



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Diseño de un indicador de apoyo a la gestión de firmas basado en Ground Penetrating Radar : análisis de la forma del espectro de onda de GRP como indicador de estado de firmas asfálticos

Josep Pedret Rodés

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
E.T.S. D'ENGINYERS DE CAMINS, CANALS I PORTS DE BARCELONA
DEPARTAMENT D'ENGINYERIA CIVIL I AMBIENTAL

Tesis Doctoral

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

Realizada por:

Josep Pedret Rodés

Directores de tesis:

Dra. Vega Pérez Gracia y Dra. Adriana Martínez Reguero

Barcelona, 28 de septiembre de 2016



A la Paula i la Laia



A mis padres y mi hermano, por su apoyo en mis proyectos.

A Vega Pérez por su paciencia a lo largo de tantos años dedicados a la tesis y a Adriana Martínez por su gran labor y enorme interés en llevarla a cabo.

A Félix Pérez y Rodrigo Miró por darme la oportunidad de colaborar con ellos a lo largo de todo este tiempo en el Departamento de Infraestructuras del transporte.

A Ramón Botella, por su paciencia y amistad.

A los amigos que hice en la UPC, a Gonzalo Valdés, a Loreto Araya y a Juan Manuel Campana, por su confianza y por escucharme en tantas ocasiones.

A Yon Marcuerquiaga, por introducirme en el apasionante mundo de la gestión de firmas.

A Pedro Delgado, por su apuesta.



En términos generales, el ensayo del Ground Penetrating Radar (GPR) aplicado a la ingeniería de pavimentos, suele circunscribirse a la determinación geométrica de la estructura del firme mediante el análisis de la onda en el dominio del tiempo.

En muchas ocasiones, suele utilizarse para apoyar el cálculo del módulo de rigidez de las capas de la estructura mediante el método conocido como retro-cálculo, según indican las principales guías de diseño empírico-mecanicistas de firmes asfálticos.

Sin embargo, los principios geofísicos que sustentan el ensayo permiten, de forma indirecta y mediante la interpretación de variables asociadas a la respuesta física de los materiales frente a una onda electromagnética, obtener datos relacionados con el estado estructural de un firme. Dichas variables pueden asociarse a patologías estructurales relacionadas, por ejemplo, con la presencia de humedad o la falta de adherencia entre las capas del firme.

En este trabajo se aborda las posibilidades que tiene el ensayo de GPR mediante el análisis de la onda en sus dimensiones temporal y frecuencial, con el propósito de permitir el diseño de futuros indicadores de estado, asociados al deterioro estructural de un firme.

Los indicadores de estado basados en la respuesta de la señal de GPR permitirán reducir considerablemente el número de ensayos destructivos practicados hoy día en los firmes tales como la extracción de testigos, u otros ensayos no destructivos pero igualmente caros y de elevada complejidad logística, como son los ensayos de deflexión.



The Ground Penetrating Radar (GPR) test applied to pavement engineering is overall used to determine the geometric characteristics of the pavement structure by analyzing the wave in the time domain.

On many cases, it is often used to assess the stiffness modulus of structural layers analysis using the method known as retro-calculation, as it is indicated by the main guide mechanistic-empirical design of asphaltic pavements.

However, the geophysics principles on which the GPR test is based, allows obtaining the data associated with the pavement and its structural condition. It is possible thanks to the interpretation of the response of a material against an electromagnetic wave. Physical variables associated with the wave response can be related with structural pathologies, for example, the presence of moisture or low cohesion level between the pavement layers.

This thesis discusses the possibilities of the GPR test in order to allow the design of future status indicators, associated with the structural deterioration of a pavement. This can be possible by analyzing the radar wave in its time and frequency dimensions.

Status indicators based on the GPR response signal allows a significantly reduction of the number of destructive tests in a pavement, such as coring, or other non-destructive but expensive and high logistical complexity tests, such as deflection tests.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Variables intrínsecas asociadas al equipo de ensayo.....	3
1.2.2 Variables extrínsecas ambientales	4
1.2.3 Variables asociadas al estado de integridad de las capas de firme, a su naturaleza y a su espesor.....	5
1.3 Publicaciones del autor relacionadas con la tesis	6
II. FUNDAMENTOS DE LA PROSPECCIÓN CON GPR	9
2.1 Principios físicos.....	9
2.1.1 Ecuaciones de Maxwell	9
2.1.2 Propiedades electromagnéticas de un medio	10
a) Conductividad	10
b) Permitividad dieléctrica.....	11
c) Permeabilidad magnética	13
2.1.3 Naturaleza ondulatoria de los campos electromagnéticos	14
a) Reflexión y refracción	14
b) Atenuación.....	16
2.2 Ground Penetrating Radar (GPR).....	17
2.2.1 Dispositivos de medición más comunes.....	17
a) Antenas.....	17
b) Unidad de control	18
c) Accesorios y complementos	19
2.2.2 Funcionamiento del equipo.....	19
2.3 Procesado de datos	20
2.3.1 Eliminación de la traza principal	21
2.3.2 Ganancia.....	22
2.3.3 Filtros pasa banda	22
2.3.4 Transformada rápida de Fourier (FFT).....	23
2.3.5 Transformada de Hilbert	24
III. UTILIZACIÓN DEL GPR EN EL DIAGNÓSTICO DE FIRMES.....	27
3.1 Visión clásica de la gestión de la conservación	27
3.1.1 Agentes solicitantes	27
3.1.2 Mecanismos de deterioro	30
3.1.3 Indicadores de deterioro clásicos	31
a) Regularidad superficial	31

b) Deflexión.....	32
c) Inspección visual.....	33
3.1.4 Sistemas de gestión.....	34
3.2 Uso del GPR en el estudio de firmes	35
3.2.1 Introducción	35
3.2.2 Detección de espesores de capas.....	36
3.2.3 Detección de humedad	38
3.2.4 Detección de daños	39
3.2.5 Estudios de calidad de firmes.....	41
3.3 Parámetros obtenidos a partir de los registros de GPR	42
3.3.1 Dominio temporal.....	43
a) Permitividad dieléctrica relativa	43
b) Scattering.....	46
c) Envolvente de la onda	47
3.3.2 Dominio frecuencial	48
a) Amplitud y ancho de banda	48
b) Modificación de la frecuencia central y del ancho de banda.....	51
c) Análisis de la variación de la forma del espectro	54
IV. CALIBRACIÓN DE ANTENAS. PATRONES DE REFERENCIA.....	59
4.1 Introducción.....	59
4.2 Objetivos	59
4.3 Características de las antenas utilizadas	60
4.4 Obtención del espectro de emisión. Medición de la onda directa.....	61
4.4.1 Parámetros de medición	63
a) Dominio temporal.....	63
b) Dominio frecuencial	63
4.4.2 Antena de frecuencia nominal de 250MHz.....	65
4.4.3 Antenas de frecuencia nominal de 500MHz.....	65
a) Resultados.....	66
b) Comparación de los espectros de la onda directa	67
4.4.4 Antenas de frecuencia nominal de 800MHz.....	68
a) Resultados.....	69
b) Comparación de los espectros de la onda directa	70
4.4.5 Antenas de frecuencia nominal de 1200MHz.....	70
a) Resultados.....	71
b) Comparación de los espectros de la onda directa	72
4.5 Variaciones del espectro a lo largo del tiempo de una antena	72
4.5.1 Antena de 500 MHz	73
4.5.2 Antena de 800 MHz	73



4.6 Distancia máxima entre la antena y la superficie del firme	74
4.6.1 Caso 1: Determinación de la altura de ensayo con la antena de 800 MHz	77
a) Dominio temporal.....	79
b) Dominio frecuencial	79
4.6.2 Caso 2: Determinación de la altura de ensayo con la antena de 1200 MHz	80
a) Dominio temporal.....	80
b) Dominio frecuencial	82
4.6.3 Caso 3: Ensayo en firme flexible con antena de 800 MHz.....	82
4.7 Calibración de antena mediante en ensayo con placa metálica	85
4.8 Conclusiones	88
4.8.1 Efectos específicos de la antena utilizada.....	88
4.8.2 Efectos de la antigüedad del equipo de medición	88
4.8.3 Determinación de la distancia máxima entre la antena y el firme	89
V. ENSAYOS PARA ANALIZAR EFECTOS EN LOS REGISTROS ASOCIADOS A LAS CONDICIONES AMBIENTALES Y EL ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL	93
5.1 Introducción.....	93
5.2 Caso 1: Ensayo con un gradiente de temperatura extremo	96
5.2.1 Introducción y objetivos	96
5.2.2 Resultados obtenidos	96
5.3 Caso 2: Efecto del contenido de agua y temperatura en un firme flexible	98
5.3.1 Introducción y objetivos	98
5.3.2 Resultados obtenidos	100
a) Estudio en el lado del terraplén	100
b) Estudio en el lado del desmonte	102
5.4 Caso 3: Efecto del espesor de la capa superior en agua sobre el espectro.....	105
5.4.1 Introducción y objetivos	105
5.4.2 Resultados obtenidos	106
5.5 Caso 4: Efecto del espesor de la capa superior de balasto sobre el espectro ..	108
5.5.1 Introducción y objetivos	108
5.5.2 Resultados obtenidos	109
a) Estudio con la antena de 500 MHz	109
b) Estudio con la antena de 800 MHz	111
c) Estudio con la antena de 1200 MHz.....	112
5.6 Conclusiones	113
VI. CARACTERIZACIÓN DE FIRMES MEDIANTE ANÁLISIS ESPECTRAL	117
6.1 Introducción.....	117
6.2 Objetivos	117
6.3 Caso 1: detección de capas y materiales a través del espectro	118

6.3.1	Introducción y objetivos	118
6.3.2	Resultados obtenidos	119
	a) Antena de 800 MHz.....	120
	b) Antena de 250 MHz.....	120
6.3.3	Conclusiones	121
6.4	Caso 2: cambio de la forma de un espectro según el deterioro de un firme asfáltico	123
6.4.1	Introducción	123
6.4.2	Objetivos	123
6.4.3	Metodología	124
	a) Tipo de firme ensayado	124
	b) Ensayos realizados	124
	c) Procesado de la señal de GPR	126
6.4.4	Resultados obtenidos	127
	a) Efecto de las variaciones de espesor de capas en el contenido frecuencial.....	127
	b) Efecto de la presencia de agua en el contenido frecuencial.....	130
	c) Efecto de la presencia de aire en el contenido frecuencial.....	131
6.4.5	Conclusiones	132
6.5	Caso 3: El espectro de GPR en la monitorización de firmes asfálticos	133
6.5.1	Introducción y objetivos	133
6.5.2	Metodología	134
	a) Secciones de diseño consideradas	135
	b) Estado de conservación de los sectores estudiados	136
	c) Metodología aplicada para la evaluación mediante GPR	137
	d) Calibración de las señales en medios conocidos.....	138
	e) Procesado de la señal	139
6.5.3	Resultados obtenidos	140
	a) Efecto de las variaciones de la sección constructiva	140
	b) Efecto de las variaciones del estado de integridad del firme	142
6.5.4	Conclusiones	146
VII.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	149
7.1	Conclusiones	149
7.1.1	Variables intrínsecas asociadas al equipo de ensayo.....	150
7.1.2	Variables extrínsecas asociadas a las condiciones ambientales.....	150
7.1.3	Variables asociadas al estado de integridad de las capas de firme, a su naturaleza y su espesor.....	151
7.2	Líneas de investigación futuras	151
Referencias	155



Índice de Figuras

Figura 2.1: Esquema del efecto del efecto de refracción y reflexión de la onda electromagnética incidente sobre medios de distintas características.....	14
Figura 2.2: Refracción y reflexión de la onda incidente. Polarizada horizontalmente, paralela al plano de incidencia (a). Polarizada verticalmente, perpendicular al plano de contacto (b).	15
Figura 2.3: Elementos que pueden asociarse a un vehículo de inspección equipado con GPR.....	17
Figura 2.4: Registro de GPR obtenido sobre un firme flexible de carretera, junto con el corte de la sección constructiva real.	20
Figura 3.1: Principales agentes solicitantes de un firme. Fuente: Instituto de la Construcción y Gerencia [ICG, 2013].	28
Figura 3.2: Mecanismos de absorción de cargas producidas por el paso de vehículos de un firme flexible (izquierda) y semirrígido (derecha). [Pérez-Jiménez, et al 2009].	28
Figura 3.3: Propagación de la temperatura a través de una mezcla bituminosa (modificado de Shalaby, et al.,1996).	29
Figura 3.4: Relación entre la velocidad de propagación de onda y la permitividad dieléctrica relativa del medio [Lorenzo, 1995].....	42
Figura 3.5: Cálculo aproximado de la permitividad dieléctrica relativa (Leng Zhen, 2011). ...	44
Figura 3.6: Evolución de la permitividad dieléctrica en un firme. [Saarenketo, 2003]	45
Figura 3.7: Fenómeno de “scattering” en una plataforma de ferrocarril. [Al Qadi et al, 2008]	46
Figura 3.8: Análisis de la envolvente de la onda. [Hammons et al., 2005].	48
Figura 3.9: Espectros patrón al aire (negro) y respuesta frente a un firme (gris claro) [Pedret, et al., 2015]......	49
Figura 3.10: Espectros de un hormigón a distintos grados de humedad [Laurens et al., 2003].	50
Figura 3.11: Espectros de capas de balasto limpio y contaminado [Silvast et al., 2006].	51
Figura 3.12: Espectros teóricos para el caso del aire, agua y hormigón [Millard et al. 2003].	51
Figura 3.13: Onda directa medida al aire en sus dominios temporal (superior) y frecuencial (inferior) [Rial et al. 2009].	52
Figura 3.14: reflejada en un reflector delimitado en los dominios temporal (superior) y frecuencial (inferior) [Rial et al. 2009].	53
Figura 3.15: Relación entre una señal reflejada patrón y su espectro.....	53
Figura 3.16: filtrado progresivo de una onda reflejada bajo la superficie del suelo	54

Figura 3.17: Espectros de una probeta de arena al 100% y una probeta contaminada con un 30% de arcilla [Benedetto y Tosti, 2013].	55
Figura 4.1: Antenas de 250 MHz (superior – izquierda), 500 MHz (superior – derecha), 800 MHz (inferior – izquierda) y 1200 MHz (inferior – derecha) utilizadas en los ensayos.	60
Figura 4.2: Disposición de los dipolos de una antena apantalla de 800 MHz.	61
Figura 4.3: Esquema de las ondas directa y reflejada en una antena de GPR de 800 MHz.	61
Figura 4.4: Descomposición de una onda compleja en frecuencias fundamentales.	64
Figura 4.5: Modelo de función normal con el ancho de banda medido a -3dB [Rao, 2009].	64
Figura 4.6: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) correspondiente a la antena 1.	65
Figura 4.7: Espectro y onda directa en la antena 2.	66
Figura 4.8: Espectro y onda directa en la antena 3.	66
Figura 4.9: Espectro y onda directa en la antena 4.	66
Figura 4.10: Espectro y onda directa en la antena 5.	67
Figura 4.11: Espectros (izquierda) y ondas directas (derecha) de las antenas 2 y 3.	68
Figura 4.12: Espectros (izquierda) y ondas directas (derecha) de las antenas 4 y 5.	68
Figura 4.13: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) de la antena 6.	69
Figura 4.14: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) de la antena 7.	69
Figura 4.15: Espectros (izquierda) y ondas directas (derecha) de las antenas 6 y 7.	70
Figura 4.16: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) de a la antena 8.	71
Figura 4.17: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) de la antena 9.	71
Figura 4.18: Espectros (izquierda) y ondas directas (derecha) de las antenas 8 y 9.	72
Figura 4.19: Espectros (izquierda) y diagramas de amplitudes (derecha) de la onda directa de la antena 5, tomadas en las fechas 7 de agosto 2012 y 24 de marzo 2015.	73
Figura 4.20: Espectros (izquierda) y diagramas de amplitudes (derecha) de la onda directa de la antena 6, tomadas en las fechas 7 de agosto 2012 y 24 de marzo 2015.	74
Figura 4.21: Representación de la medición con GPR en presencia de un medio transparente intercalado entre la antena y el medio a medir (izquierda) y en contacto directo con el medio (derecha). [Butler, 2005].	75
Figura 4.22: Carrito propuesto por MALA Geoscience para el transporte de antenas de GPR.	75
Figura 4.23: Antena de alta frecuencia de MALA Geoscience, en la puerta del vehículo.	76
Figura 4.24: Dispositivo de soporte para el uso de varias antenas con altura variable.	77
Figura 4.25: Intervalos de medición a distintas alturas	77
Figura 4.26: Dominios temporal y frecuencial en distintas alturas para la antena de 800MHz.	78



Figura 4.27: Dominios temporal y frecuencial en distintas alturas para la antena de 1200MHz..... 81

Figura 4.28: Registros obtenidos a una altura de 20, 12 y 4 cm respectivamente..... 83

Figura 4.29: Primera onda reflejada a la altura de 20, 12 y 4 cm respectivamente..... 83

Figura 4.30: Espectros de las trazas registradas a una altura de 20 cm, 12 cm y 4 cm. 84

Figura 4.31: Dispositivo de ensayo con placa metálica en altura variable..... 85

Figura 4.32: Ensayo con placa metálica desde 18 cm (izquierda) hasta 3 cm (derecha). 86

Figura 4.33: Ondas resultantes del ensayo con placa metálica..... 86

Figura 4.34: Detalle de la semi-fase escogida 87

Figura 5.1.Relación entre temperatura y conductividad eléctrica del agua, modificado de Bussian (1983) 93

Figura 5.2: Relación entre temperatura y la permitividad dieléctrica relativa, modificado de Jaselskis et al. (2003) 94

Figura 5.3: Relación entre la frecuencia y la permitividad dieléctrica relativa, modificado de Jaselskis et al. (2003) 95

Figura 5.4: Relación entre temperatura y la permitividad dieléctrica relativa, modificado de [Krupka, 1998]..... 95

Figura 5.5: Ensayo con la antena de 500MHz en el recinto interior del almacén de ultra congelados..... 96

Figura 5.6: Radargrama registrado en el almacén. El primer sector del registro es la señal obtenida en el interior de la cámara frigorífica. La segunda parte del registro se ha obtenido fuera del recinto a bajas temperaturas..... 97

Figura 5.7: Diagramas de tiempos (izquierda) y espectros (derecha) dentro y fuera del recinto frigorífico..... 97

Figura 5.13: perfil de ensayo realizado en el lado del terraplén. 99

Figura 5.14. Adquisición de datos en el lado del desmonte..... 99

Figura 5.15: Radargramas obtenidos en el lado del terraplén..... 100

Figura 5.16. Trazas correspondientes a los registros de los ensayos realizados en diferentes momentos sobre la tubería en el lado del terraplén..... 101

Figura 5.17: Diagramas espectrales de las trazas obtenidas sobre la tubería en el lado del terraplén. 102

Figura 5.18: Radargramas obtenidos en el lado del desmonte. 103

Figura 5.19: Diagramas de amplitudes obtenidos sobre la tubería en el lado del desmonte.103

Figura 5.20: Diagramas espectrales obtenidos sobre la tubería en el lado del desmonte. .. 104

Figura 5.8: Proceso de vaciado de la balsa y adquisición de datos durante el ensayo..... 105

Figura 5.9: Radargrama filtrado, obtenido durante el vaciado de la balsa en el ensayo. Las líneas marcas las trazas que se han analizado puntualmente. 106

Figura 5.10: Ondas registradas durante el vaciado de la balsa, analizada en cuatro momentos puntuales del proceso. 106

Figura 5.11: Espectro de la onda directa y espectro para un espesor de agua de 80 cm....	107
Figura 5.12: Espectros registrados en distintos puntos durante el vaciado de la balsa.	107
Figura 5.13: Sección constructiva de la plataforma ferroviaria y los puntos de ensayo.	109
Figura 5.14: Dispositivo de medición con la antena de 500 MHz montada.	109
Figura 5.15: Radargramas obtenidos con un espesor de 45 (izquierda) y 110 cm (derecha).	110
Figura 5.16: Diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha).	110
Figura 5.17: Radargramas obtenidos con un espesor de 45 (izquierda) y 110 cm (derecha).	111
Figura 5.18: Diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha).	111
Figura 5.19: Radargramas obtenidos con un espesor de 45 (izquierda) y 110 cm (derecha).	112
Figura 5.20: Diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha).	112
Figura 6.1: Secciones constructivas de las cabeceras (izquierda) y de la pista (derecha). .	118
Figura 6.2: Equipo GPR con antenas de 250 MHz (izquierda) y 800 MHz (derecha).	119
Figura 6.3: Registros con las antenas de 800 MHz (superior) y 250 MHz (inferior).	119
Figura 6.4: Diagramas de amplitud obtenidos con la antena de 800 MHz.	120
Figura 6.5: Diagramas de amplitud obtenidos con la antena de 250 MHz.	121
Figura 6.6: Espectros de amplitud de los registros obtenidos con las antenas de 250 MHz (izquierda) y 800 MHz (derecha).	122
Figura 6.7: Sección de firme tipo ensayada.	124
Figura 6.8: Espectro al aire de la antena utilizada.	125
Figura 6.9: Dispositivo de GPR utilizado para los ensayos.	125
Figura 6.10: Resultados obtenidos en un tramo de sección estructural estándar. a) Testigo mostrando las capas de la estructura. b) Envolvente de la señal temporal de GPR promediada a lo largo de 5 m. c) Contenido frecuencial de la señal promedio obtenida.	126
Figura 6.11: Radargrama obtenido sobre de la cuña de transición entre la sección tipo y un puente de hormigón. Las flechas señalan 4 puntos de la cuña (A, B, C y D) separados 5 m entre sí.	128
Figura 6.12: Espectros de respuesta obtenidos en los puntos de medición A, B, C y D.	129
Figura 6.13: Registro de deflectometría (a), espectro de amplitudes de la señal de GPR (b) y testigo (c) en un tramo en el que existen problemas de humedad en la sub-rasante.	131
Figura 6.14: Registro en un tramo con sección estructural sometida a problemas de adherencia entre capas. a) Testigo que muestra la falta de cohesión entre las capas (señalada con una flecha). b) Registro de deflectometría. c) Espectro de amplitudes del registro de GPR.	132



Figura 6.15: Secciones de diseño de tipo A “full depth” (izquierda), B flexible (centro) y C firme semirrígido con base de cemento tratado (derecha) 136

Figura 6.16: Histogramas de frecuencias acumuladas del ensayo de deflexión. 137

Figura 6.17: Histogramas de frecuencias acumuladas del ensayo de regularidad (IRI). 137

Figura 6.18: Características de la antena utilizada. Onda registrada (izquierda) y espectro de frecuencias (derecha) 138

Figura 6.19: Resultados obtenidos en un tramo de sección estructural estándar. a) Testigo mostrando las capas de la estructura. b) Onda en el dominio temporal. c) Contenido frecuencial de la señal..... 139

Figura 6.20: Espectros de frecuencia según la sección constructiva. Resultados promediados para cada subsector..... 142

Figura 6.21: Dominio temporal (a) y espectros de frecuencia (b) en los tres subsectores de la sección tipo A. 144

Figura 6.22: Dominio temporal (a) y espectros de frecuencia (b) en los tres subsectores de la sección tipo B. 145

Figura 6.23: Dominio temporal (a) y espectros de frecuencia (b) en los subsectores de la sección tipo C..... 146

Figura 7.1: Identificación de los rangos de tiempo asociados al firme y a la subrasante sobre la traza promedio. 152

Figura 7.2: Traza promedio, una vez aplicado el filtro de ganancia..... 153

Figura 7.3: Amplitud de onda para todas las trazas realizadas en un tramo de 4.000 metros. 153

Figura 7.4: Diagrama de dispersión para determinar el grado de correlación entre la deflexión y la amplitud de onda. 154

Índice de tablas

Tabla 2.1 conductividad de algunos materiales [Dios et al, 1998].	10
Tabla 2.2 Permitividad dieléctrica relativa de algunos materiales [Saarenketo, 2006].	13
Tabla 3.1. Grupos de deterioros en firmes [FHWA, 2003].	30
Tabla 3.2. Clasificación de un firme según el rango de fisuras. Fuente: ASTM, 2011.	34
Tabla 3.3. Valores típicos de permitividad dieléctrica relativa en firmes asfálticos. Fuente: Saarenketo, 2006.	43
Tabla 3.4 Longitudes de onda que excitan el efecto del “scattering” según la antena utilizada	47
Tabla 4.1: Relación de antenas utilizadas en los ensayos.	62
Tabla 4.2: Parámetros obtenidos de la onda directa en la antena 1.	65
Tabla 4.3: Parámetros obtenidos de la onda directa en las antenas 2, 3, 4 y 5.	67
Tabla 4.4: Parámetros obtenidos de la onda directa en las antenas 6 y 7.	70
Tabla 4.5: Parámetros obtenidos de la onda directa en las antenas 8 y 9.	71
Tabla 4.6: Antenas utilizadas en la comparativa de espectros a lo largo del tiempo.	73
Tabla 4.7: Resultados obtenidos en el dominio del tiempo para la antena de 800 MHz.	79
Tabla 4.8: Resultados obtenidos en el dominio frecuencial para la antena de 800 MHz.	80
Tabla 4.9: Resultados obtenidos en el ensayo con la antena de 1200 MHz.	80
Tabla 4.10: Resultados obtenidos en el dominio frecuencial para la antena de 800 MHz.	87
Tabla 5.1: Condiciones de los ensayos para la detección del paso de una tubería enterrada.	99
Tabla 6.2: Coordenadas de los cuatro puntos de medida mostrados en la figura 5.8.	128
Tabla 6.3: Valores de respuesta electromagnética [Huang, 2009].	128
Tabla 6.4: Composición estimada de cada capa según las especificaciones españolas.	129
Tabla 6.5: Tramos estudiados con los resultados de los ensayos de deflexión y regularidad superficial (IRI).	135
Tabla 6.6: Características de las capas AC, GB y CTB.	142



Glosario de acrónimos

ASTM	American Society of Testing Materials
CDA	Cumulative Difference Approach
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CMP	Common Mid Point
CTB	Cement Treated Base
ETSECCPB	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona
DOD	Department of Defense
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
FWD	Falling Weight Deflectometer
GPR	Ground Penetrating Radar
GSF	Gestión Sistematizada de firmes
HDM-IV	Highway Development and Management
IFI	International Friction Index
IIR	Infinite Impulse Response
IMD	Intensidad media diaria
IRRE	International Road Roughness Experiment
IRI	International Roughness Index
LTPP	Long-Term Pavement Performance Program
OCDE	Organización para el Comercio y el Desarrollo Económicos
PCI	Pavement Condicion Index
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses
PILE	Propagation inside layer expansion
PMS	Pavement Management System
SHRP	Strategic Highway Research Program
SN	Structural Number
UPC	Universidad Politécnica de Catalunya
UWB	Ultra-Wide Band



I. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

La conservación del firme es uno de los capítulos que más coste supone en la gestión de una infraestructura vial. La OCDE cifra esta partida entre el 30% y 40% del conjunto total, en función de la tipología y geometría de dicho firme [Harvey, 2012]. Sin embargo, la misma OCDE indica que dicha cifra puede reducirse hasta el 20%, realizando una correcta gestión de la conservación, conociendo la evolución estructural del firme y realizando políticas preventivas en lugar de correctivas.

Con el fin de conocer el estado de conservación de un firme, a lo largo de los tiempos, diversos autores han propuesto y desarrollado indicadores y métodos que permiten asociar un estado a un parámetro que le sea representativo [Huang Yang, 2008]. De todos son conocidos los indicadores IRI, SN, IFI, PCI, entre otros. Dichos indicadores permiten simplificar el proceso de prognosis y de análisis de la evolución del firme y las medidas a tomar para mantener su calidad funcional y estructural.

Por lo general, el indicador utilizado es extraído de forma indirecta a través de la medición de parámetros asociados al estado de la estructura. Dichas mediciones pueden ser realizadas a lo largo de toda la estructura o bien únicamente en puntos seleccionados.

Tradicionalmente, las grandes dimensiones de una infraestructura vial han aconsejado realizar ensayos en determinados puntos localizados, siguiendo criterios de tipo estadístico o técnico [Haas and Hudson, 1978]. Este procedimiento ha sido muy condicionado por la lentitud de los trabajos de los ensayos, basados en equipos de medición estáticos, con muy bajo rendimiento. Sin embargo, los equipos de medición dinámica más modernos, son no destructivos y de alto rendimiento, y están permitiendo realizar mediciones del conjunto de la infraestructura, con resultados que ofrecen variables que permiten alimentar sistemas de gestión a costes muy reducidos.

Una de las tecnologías de inspección remota y no destructiva que ha evolucionado con mayor rapidez durante los últimos tiempos en el campo de la ingeniería de firmes es el Ground Penetrating Radar, también conocido con las siglas GPR.

El GPR es un equipo de medición, de alto rendimiento, basado en las leyes de la propagación de ondas electromagnéticas. El equipo emite ondas en un ancho espectro de frecuencia (UWB) en el rango de las radiofrecuencias y las microondas y recibe la energía reflejada en las discontinuidades electromagnéticas existentes en el medio por el que se

propaga la señal. Una completa descripción del método puede encontrarse en publicaciones de distintos autores (por ejemplo, Daniels, 2004; Jol, 2008; Conyers y Goodman, 1997).

Por otro lado, existen numerosas publicaciones y estudios relativos al ensayo de GPR en firmes. En el campo del uso del GPR centrado en la identificación de variables indirectas asociadas al estado de un firme, las publicaciones más citadas son las de Saarenketo y Scullion (2000) y Al Qadi y Lahouar (2005).

Otro de los aspectos muy importantes a considerar del ensayo y que capta la atención de muchos autores es la sensibilidad del GPR a distintos factores externos que pueden afectar a las variables medidas. Por ejemplo, el trabajo de Maser et al. (2012) analiza los factores climáticos que pueden afectar a la medición de los espesores de capas, el de Shangguan et al. (2013) estudia la indeterminación en el cálculo de la densidad de las capas debido a la presencia de agua y el de Celaya et al. (2013) analiza los factores externos que pueden incidir en la identificación de zonas con descohesión entre las capas que conforman un firme.

Aunque la mayor parte de los estudios de firmes se basan en la relación entre la velocidad de propagación de onda (v) y su dependencia con la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r) del medio para evaluar el posible deterioro [Benedetto y Pensa, 2007], se ha comprobado que existe una relación importante entre la velocidad de propagación de onda y los espectros de frecuencia de la señal recibida [Millard et al., 2003]. Este trabajo en particular tiene como principal objetivo el comprobar la viabilidad del uso del GPR para desarrollar un indicador de apoyo a la gestión de firmes basado en la sensibilidad del espectro respuesta en el dominio de las frecuencias, a los cambios producidos por la naturaleza y las condiciones del firme.

En esta tesis se evalúa el potencial del análisis de la señal recibida por un GPR en su dominio frecuencial, tal que permita utilizar el espectro de frecuencias para diseñar un indicador de estado de un firme asfáltico.

El resultado de este análisis puede resultar útil para diagnosticar el estado estructural de un firme, dado que permitirá asociar alteraciones en la respuesta electromagnética del mismo, con cambios en su estado de integridad estructural. Un estudio pormenorizado de dichas anomalías permitirá asociarlas con algunas de las causas de deterioro más habituales en los firmes: la presencia de humedad y la descohesión de las capas que forman la estructura en su conjunto.

Para alcanzar los objetivos que se proponen en el trabajo, se han seleccionado segmentos de firmes de distintas infraestructuras de sección conocida y se han sometido a campañas de medición con GPR. En el trabajo se ha realizado también una calibración de las antenas con ensayos en medios homogéneos (aire y agua). También se ha analizado el efecto de variables como la humedad del medio, la temperatura ambiental y la antigüedad de la antena



utilizada en las mediciones, entre otros condicionantes, que puedan afectar la repetibilidad de los resultados y la reproducibilidad de los ensayos.

1.2 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es analizar la sensibilidad de las ondas electromagnéticas para valorar el estado de conservación y a la naturaleza de los materiales que conforman un firme. Para alcanzar este objetivo, la metodología de trabajo se basa en observar variaciones de la onda, y más en particular, variaciones de las frecuencias de la señal registrada. Estas variaciones pueden estar asociadas a anomalías o a fallos que no son visibles mediante inspección visual.

El análisis se efectúa sobre medios en los que existen cambios de naturaleza conocidos, de manera que es posible relacionar las condiciones experimentales del medio con el comportamiento de la onda. Aunque el estudio se centra en el espectro de frecuencias, también se analizan otros parámetros asociados a la reflexión de las ondas, como es la velocidad de propagación de onda o las amplitudes de reflexión, en el dominio temporal.

En un futuro, las variaciones que se observan y analizan en este estudio, convenientemente parametrizadas, podrían derivar en un indicador de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de los firmes.

Los objetivos específicos relacionados con el objetivo general que se plantea determinan las diferentes partes del proyecto y se refieren, fundamentalmente, a:

- Las variables intrínsecas asociadas al equipo de medición.
- Las variables extrínsecas asociadas a las condiciones ambientales del medio, en el momento en el que se realiza el ensayo.
- Las variables asociadas al estado de integridad de las capas del firme y su espesor.

1.2.1 Variables intrínsecas asociadas al equipo de ensayo

Cualquier ensayo para evaluar estructuras de firmes asfálticos requiere comprobar la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones, considerando que existan posibles variaciones indeseadas en los resultados obtenidos que puedan ser función del equipo del GPR utilizado o de las condiciones en las que se produce el ensayo.

Esta comprobación tiene como objetivo el facilitar la identificación de los cambios del comportamiento de la onda ocasionados por la naturaleza del firme, aislándolos de los efectos coyunturales del ensayo.

El análisis permite disminuir la incertidumbre en la interpretación de resultados, cuando se comparan distintas mediciones sucesivas a lo largo del tiempo.

En esta tesis, se han considerado los efectos relacionados con la variación de tres variables externas:

- Efectos debidos a las características propias de la antena.

Para ello se han estudiado diferentes antenas de las mismas características según el fabricante, para determinar si el pulso emitido es equivalente en todos los casos. Se han observado los espectros de amplitud de las señales directas registradas, analizando las diferencias que pueden introducir errores en la comparación de los datos obtenidos en diferentes mediciones realizadas con antenas diferentes.

- Influencia de la antigüedad del equipo de medición.

Los ensayos han tenido como objetivo el análisis de posibles cambios en la emisión de la misma antena a lo largo del tiempo. Este efecto debería tenerse en cuenta si es necesario comparar los resultados obtenidos por la misma antena en instantes diferentes.

- Interacción de la señal electromagnética con el vehículo tractor.

Los ensayos han considerado la posición de la antena del GPR respecto al vehículo tractor y su altura respecto a la superficie del firme como variable en el resultado de las mediciones realizadas en ensayos a velocidades elevadas.

1.2.2 Variables extrínsecas ambientales

En esta tesis, se asume que las variaciones en los resultados de un ensayo a causa de los condicionantes ambientales, afectan de una forma más intensa a la primera superficie de reflexión, es decir, el estado de la capa más superficial del firme. Las características de esta primera reflexión son muy relevantes, ya que la energía reflejada y refractada afecta notablemente a las reflexiones posteriores que se producirán en capas más profundas de la estructura del firme. De forma particular, los ensayos de calibración realizados en este campo, han tenido en consideración cambios relevantes en la humedad y la temperatura de las capas más superficiales del firme.



- Temperatura.

Se analiza si la temperatura ambiental puede modificar el comportamiento de la antena y la respuesta que se recibe del medio, debido a que este factor puede alterar ligeramente los valores de la conductividad y de la permitividad dieléctrica. Las posibles alteraciones que estarían relacionadas con estas variables, podrían asociarse equivocadamente a patologías del firme inexistentes.

- Humedad.

Se comprueba el efecto de la posible presencia de humedad en el pavimento y los cambios más relevantes en la propagación de la onda que producen.

1.2.3 Variables asociadas al estado de integridad de las capas de firme, a su naturaleza y a su espesor

Uno de los objetivos más importantes es el análisis de las posibles relaciones entre las características de la señal recibida y algunos de los parámetros del medio estudiado: su espesor, la disposición de las capas de firme, su naturaleza y las posibles y diferentes patologías estructurales conocidas.

- Efecto del espesor de las capas superficiales del firme en el espectro.

Se han seleccionado ensayos que permiten observar si el espesor de la primera capa reflectora incide de forma relevante en el conjunto de un espectro y si es necesario aplicar filtros sobre el registro, para reducir este efecto indeseable.

- Efecto de la composición material de las capas de firme. Se pretende analizar si es posible diferenciar entre los materiales más comúnmente utilizados en estructuras de firmes utilizando variables de respuesta de la señal en sus dimensiones temporal y frecuencial.

- Efecto de la disgregación de material en la superficie de contacto entre capas.

Como último objetivo se analiza la posibilidad de estudiar la falta de cohesión y pérdida de homogeneidad por efecto del deterioro en la zona de contacto entre capas a partir cambios en la forma del espectro de amplitudes de la onda reflejada.

El estudio de cada uno de los fenómenos propuesto se ha realizado de forma experimental, ya sea en laboratorio o en estudios de campo. Los resultados se han contrastado mediante ensayos de contraste con deflectometría o mediante la extracción seleccionada de testigos.

1.3 Publicaciones del autor relacionadas con la tesis

Durante la realización de los trabajos que se incluyen en esta tesis, se han obtenido resultados que han sido publicados en revistas o bien presentados en congresos y publicados en forma de comunicación en libros de *proceedings*.

A continuación se presenta la lista de las publicaciones:

(2012), Pedret Rodés J., Pérez-Gracia, V. "Estudio de la sensibilidad del Ground Penetrating Radar al contenido en huecos de las mezclas bituminosas en firmes de carreteras". Revista Ingeniería de Obras Civiles. ISSN 0719-0514. RIOCI 1:5-18, 1/2012.

(2012), Pedret Rodés J., Pérez-Gracia, V. Valdés Vidal, Gonzalo A. "Fundamentos y ejemplos de aplicación del ensayo no destructivo de reflexión electromagnética mediante GPR en firmes asfálticos". 10mo Congreso PROVIAL. 8 - 11 Oct. 2012, Santiago. Chile.

(2013), Santos Assunção S., Pérez-Gracia, V., Pedret Rodés J., "Ground Penetrating Radar in Railways inspection", 75th EAGE conference & Exhibition. SPE EUROPEC 2013. London, UK.

(2014), Pedret Rodés J., Valdebenito Montenegro, G., Fonseca Ibarra, C., Pérez-Gracia, V. "Diagnóstico estructural de un pavimento bituminoso mediante el espectro respuesta registrado con Ground Penetrating Radar". 11vo Congreso PROVIAL. 20 - 24 Oct. 2014, Valdivia. Chile.

(2015) Rodés, J. P., Pérez-Gracia, V., & Martínez-Reguero, A. "Evaluation of the GPR frequency spectra in asphalt pavement assessment". Construction and Building Materials, 96, pp 181-188. Octubre 2015.

Pedret J., Pérez-Gracia V., Martínez-Reguero, A. "GPR spectra for monitoring asphalt pavements". Automation in construction. (En fase de correcciones).



CAPÍTULO II

Fundamentos de la prospección con GPR

Resumen

La prospección con GPR es un ensayo basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas y la posterior interpretación de las señales registradas. En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos en los que se basa la técnica.

La base teórica de la prospección mediante GPR son las ecuaciones de Maxwell, que relacionan los campos eléctrico y magnético con las cargas y las corrientes que los crean. En las ecuaciones se define una serie de parámetros constantes que caracterizan a cada medio: la conductividad eléctrica, la permitividad dieléctrica y la permeabilidad magnética.

Estas tres propiedades de los medios determinan las características de las ondas electromagnéticas que se propagan por un medio material. Por lo tanto, determinan la velocidad de propagación, su atenuación y su contenido frecuencial. Todas estas características se pueden medir en la señal que registra la antena receptora de GPR.

Al interpretar un registro de GPR se deben analizar las características que determinan la propagación de la señal a través del medio, desde el momento en el que se emite mediante la antena emisora hasta que se registra en la antena receptora. Los fenómenos que definen la propagación son la reflexión, la refracción, la atenuación y la dispersión.

En este capítulo se presentan una pequeña introducción a la teoría de ondas electromagnéticas, la definición de los parámetros electromagnéticos característicos de los medios materiales, los conceptos básicos sobre propagación de señales electromagnéticas, la explicación de cada uno de los componentes de un equipo de GPR y, para finalizar, se introducen las herramientas de procesamiento de señales que van a utilizarse en los ensayos que contiene esta tesis.



II. FUNDAMENTOS DE LA PROSPECCIÓN CON GPR

2.1 Principios físicos

2.1.1 Ecuaciones de Maxwell

Aunque las leyes y características del electromagnetismo fueron estudiadas y definidas durante el siglo XIX por un importante número de autores, fue James Clerk Maxwell (1831-1879) quien determinó las cuatro ecuaciones con las que se puede describir completamente al electromagnetismo.

Estas cuatro ecuaciones de Maxwell en forma diferencial se expresan de la siguiente forma:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Ley de Gauss para campo eléctrico} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ley de Gauss para campo magnético} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ley de Faraday} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Ley generalizada de Ampère} \quad (2.4)$$

Donde \vec{E} es la intensidad de campo eléctrico (V/m); ρ es la densidad de carga eléctrica (C/m^3); \vec{B} es la densidad de flujo magnético (T); \vec{J} es la densidad de flujo de corriente eléctrica (A/m^2); \vec{D} es el vector desplazamiento (C/m^2); t es tiempo (s); y \vec{H} es la intensidad del campo magnético (A/m).

Las ecuaciones constitutivas proporcionan una descripción macroscópica de cómo los electrones, átomos y moléculas responden masivamente a la aplicación de un campo electromagnético [Jol, 2009]. Dichas ecuaciones explican el comportamiento de las ondas electromagnéticas frente a un medio. Las ecuaciones constitutivas son:

$$\vec{J} = \tilde{\sigma} \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \tilde{\epsilon} \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \tilde{\mu} \vec{H} \quad (2.7)$$

Donde $\tilde{\sigma}$ es la conductividad del medio; $\tilde{\epsilon}$ es la permitividad dielectrica; $\tilde{\mu}$ es la permeabilidad magnética.

Dichas ecuaciones describen las propiedades electromagnéticas de un medio condicionando la propagación de una onda de GPR a su paso.

2.1.2 Propiedades electromagnéticas de un medio

Las propiedades electromagnéticas de un medio, conductividad (σ), permitividad dieléctrica (ϵ) y permeabilidad magnética (μ) determinan su comportamiento cuando está en un campo electromagnético.

a) Conductividad

La conductividad de un medio proporciona una medida de la respuesta de sus cargas en presencia de un campo eléctrico externo, siendo el factor de proporcionalidad entre el campo libre y la densidad de volumen de corriente eléctrica. La ley de Ohm describe esta relación:

$$\vec{j}_f = \sigma \vec{E} \quad (2.8)$$

Donde \vec{j}_f es la densidad volúmica de corriente debido a las cargas libres, \vec{E} es el campo eléctrico aplicado y σ es la conductividad del material (S/m).

Los materiales pueden dividirse en materiales conductores, semiconductores y aislantes. Un material se considera un conductor cuando su conductividad es mayor a 10^5 S/m. Los materiales cuya conductividad es inferior a 10^{-8} S/m se clasifican como aislantes. Los semiconductores presentan valores de conductividad dentro del intervalo que separa a los conductores de los aislantes [Pérez-Gracia, 2001]. Algunos valores típicos de conductores, semiconductores y aislantes se muestran en la tabla 2.1.

Material	Conductividad (S/m)
Plata	$6,1 \times 10^7$
Cobre	$5,7 \times 10^7$
Oro	$4,1 \times 10^7$
Aluminio	$3,5 \times 10^7$
Agua del Mar	4
Silicio	$3,9 \times 10^{-17}$
Agua Destilada	10^{-4}
Vidrio	10^{-12}
Cera	10^{-17}

Tabla 2.1 conductividad de algunos materiales [Dios et al, 1998].

La conductividad de los materiales conductores no es única, siendo el límite teórico el conductor perfecto. Se trata de un material ideal en el que la conductividad tiende a infinito.



En este tipo de conductor, los electrones no colisionarían entre sí y la resistencia al flujo de la corriente eléctrica sería cero. Este tipo de material no existe en la realidad, y siempre aparece una cierta resistencia que ocasiona una pérdida de energía al transformar parte de la corriente eléctrica en calor. En los conductores perfectos, al ser cero la resistencia, no se generaría calor y, por lo tanto, no se producirían pérdidas de energía y la corriente circularía indefinidamente hasta que se aplicara una fuerza externa que modificara este comportamiento de movimiento perpetuo. Dentro de los materiales conductores reales, se define un buen conductor como aquel material que presenta una muy baja resistencia al paso de la corriente eléctrica. En estos materiales, la parte real de la conductividad es predominante frente a la parte imaginaria.

Muchos medios reales están formados por varios elementos y se componen de tres fases: fase sólida (los granos minerales que forman parte de ellos), fase fluida (el fluido contenido en sus poros) y fase gaseosa (el gas contenido en los poros). Estos casos, la conductividad está determinada por la composición mineral del material en una cierta medida, pero el factor más importante suele ser el fluido existente en sus poros y la composición química de las sales disueltas en dicho fluido. En estos casos la conductividad del medio depende también de la temperatura.

En general y debido a estos factores, la conductividad es muy variable y puede cambiar dentro de una misma formación.

La conductividad de un medio es un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - i\sigma'' \quad (2.9)$$

Donde la parte real, σ' , representa la amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo eléctrico, y la parte imaginaria, σ'' , se corresponde con la amplitud de la corriente desfasada respecto al campo eléctrico externo [Pérez-Gracia, 2001].

b) Permitividad dieléctrica

La permitividad dieléctrica es el parámetro que indica la capacidad de un material a polarizarse cuando se encuentra dentro de un campo eléctrico, anulando parcialmente el campo eléctrico interno del material [Dios et al, 1998].

La permitividad dieléctrica absoluta (ϵ) es una constante de proporcionalidad entre la intensidad del campo eléctrico externo y el vector de desplazamiento eléctrico.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.10)$$

Donde ε se define como el producto de la permitividad relativa del material (ε_r), que es una constante adimensional característica de cada medio, por la permitividad del vacío (ε_0).

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (2.11)$$

Siendo la permitividad en el vacío de:

$$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad (2.12)$$

La permitividad dieléctrica relativa también se conoce como constante dieléctrica. En el caso del vacío su valor es la unidad. En el caso de muchos de los medios que se estudia con GPR (ya sean del subsuelo o materiales de construcción) los valores de permitividad dieléctrica relativa se encuentran entre 1 y 81, siendo la última la constante relativa del agua a 20° de temperatura [Pérez-Gracia, 2001].

Al igual que la conductividad, la permitividad dieléctrica se representa mediante un número complejo:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (2.13)$$

La componente real ε' produce una corriente en fase respecto al campo eléctrico externo y la componente imaginaria ε'' provoca una corriente desfasada respecto al campo eléctrico. De este modo, la parte imaginaria se combina con la parte real de la conductividad y afecta principalmente a la amplitud de la onda transmitida, mientras que la parte real tiene un efecto que se superpone al de la parte imaginaria de la conductividad, siendo determinante para la velocidad de propagación de la señal.

Se suele definir un valor denominado permitividad dieléctrica aparente, en el que se incluyen los efectos debidos a la conductividad y a la permitividad absoluta del medio. Estos valores aparentes dependen de la frecuencia, pero dicha dependencia no es constante. En la permitividad dieléctrica aparente, para altas frecuencias (entre 10 MHz y 1000 MHz), en la mayor parte de los materiales del subsuelo el factor determinante es la parte real de la permitividad dieléctrica. Para frecuencias algo menores el término de la conductividad estática predomina sobre la permitividad dieléctrica. Respecto a la dependencia frecuencial de este parámetro, para frecuencias bajas (por debajo de los 100 Hz) puede despreciarse. Sin embargo, para frecuencias más altas la dependencia entre ambos es importante [Pérez-Gracia, 2001].

En la tabla 2.2 se muestran algunos de los valores típicos más comunes en la naturaleza:



Material	Permitividad dieléctrica relativa
Aire	1
Agua destilada	81
Hielo	4
Granito	5 – 7
Grava	4 – 7
Arena	4 – 6
Limo	16 – 30
Arcilla	25 – 40

Tabla 2.2 Permitividad dieléctrica relativa de algunos materiales [Saarenketo, 2006].

c) Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética es un parámetro que indica la capacidad de un material a magnetizarse cuando está sometido a un campo electromagnético. Es la constante de proporcionalidad entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.14)$$

Donde (μ) es el producto entre la permeabilidad relativa de la materia (μ_r) y la permeabilidad magnética del vacío (μ_0):

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.15)$$

Siendo la permeabilidad en el vacío de:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (2.16)$$

En la mayoría de los materiales que se encontrarán en los estudios con GPR el valor de la permeabilidad magnética es muy próximo a la unidad y no depende de la pulsación del campo electromagnético aplicado, exceptuando aquellos medios que contienen materiales ferromagnéticos. En general, puede considerarse que la mayoría de los materiales presentan un comportamiento isotrópico respecto a la permeabilidad magnética [Pérez-Gracia, 2001].

La relación entre la permeabilidad magnética y la permitividad permite determinar el valor de la velocidad de la onda electromagnética en el vacío, c :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.17)$$

2.1.3 Naturaleza ondulatoria de los campos electromagnéticos

Las ecuaciones de Maxwell describen la variación temporal de los campos eléctricos y magnéticos, que permiten explicar la reflexión y la refracción de ondas así como su atenuación. Estos fenómenos condicionan enormemente el estudio de las señales de onda registradas durante su propagación por un medio no homogéneo:

a) Reflexión y refracción

Cuando la energía electromagnética alcanza una discontinuidad en el medio, definida a partir de un cambio brusco en sus parámetros electromagnéticos, se producen los fenómenos de refracción y reflexión.

En la prospección con GPR, la antena emite un pulso electromagnético que se propaga a través del medio. Si durante su propagación se encuentra con una discontinuidad electromagnética, parte de la energía que incide en esa interficie se refracta y otra parte se refleja. La energía refractada se transmite al medio inferior y se propaga a través del mismo, modificando ligeramente su trayectoria. Si alcanza una nueva discontinuidad, el fenómeno vuelve a repetirse, tal como se muestra en la figura 2.1. La energía reflejada en las discontinuidades cambia totalmente su dirección de propagación, y regresa hacia la superficie sobre la que se sitúa la antena receptora. En caso de que en su nueva trayectoria existan discontinuidades se vuelven a producir los fenómenos de reflexión y de transmisión de la onda incidente.

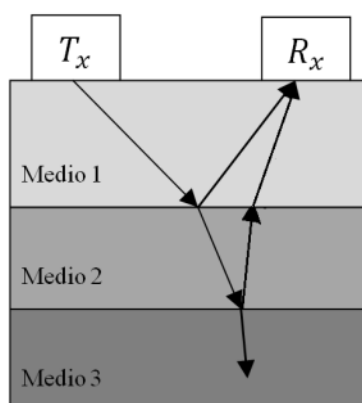


Figura 2.1: Esquema del efecto del efecto de refracción y reflexión de la onda electromagnética incidente sobre medios de distintas características.

La amplitud de señal que se registra depende en parte del número de discontinuidades que ha encontrado la onda durante su trayectoria y, por lo tanto, del coeficiente de reflexión de cada una de ellas. La ley de Snell define la relación entre los ángulos de incidencia, de reflexión y de refracción y la velocidad de propagación en los dos medios en contacto, cuya

interficie es la discontinuidad electromagnética. En la figura 2.2 se muestran esquemáticamente la incidencia de una onda electromagnética plana en el contacto entre dos materiales con propiedades dieléctricas diferentes. La polarización es perpendicular al contacto como se muestra en la figura 2.2a y paralela al mismo en el caso de la figura 2.2b.

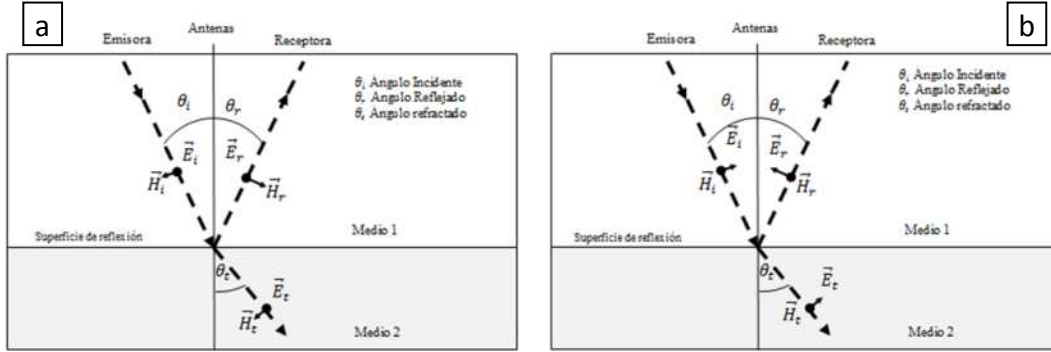


Figura 2.2: Refracción y reflexión de la onda incidente. Polarizada horizontalmente, paralela al plano de incidencia (a). Polarizada verticalmente, perpendicular al plano de contacto (b).

Para determinar los coeficientes de reflexión y de refracción se define la impedancia electromagnética como el cociente entre los campos eléctrico y magnético. En el caso de una onda incidente, la impedancia se calcula con los campos incidentes. Para la onda reflejada, se calcula con los campos reflejados y el valor, Z_1 , es el mismo que en el caso de incidencia. Para la energía transmitida se obtiene la impedancia Z_2 mediante el cociente de los campos eléctrico y magnético, refractados en la discontinuidad. Estos cocientes son una relación entre los parámetros electromagnéticos de los medios en contacto:

$$Z_1 = \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r1}}{\epsilon_0 \epsilon_{r1}}} \quad (2.18)$$

$$Z_2 = \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \quad (2.19)$$

Los coeficientes de reflexión y de refracción se determinan como el cociente entre la intensidad del campo eléctrico en el medio superior y la intensidad en el medio inferior. Por lo tanto, pueden obtenerse a partir de una relación entre las impedancias en los dos medios en contacto y los ángulos de incidencia y de refracción. Si θ_i es el ángulo de incidencia y θ_t es el ángulo de refracción, estos coeficientes se expresan así:

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_1 \cos \theta_i + Z_2 \cos \theta_t} \quad (2.20)$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2Z_2 \cos \theta_t}{Z_1 \cos \theta_i + Z_2 \cos \theta_t} \quad (2.21)$$

Donde $R_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de reflexión en el contacto entre el medio 1 y el medio 2, $T_{1 \rightarrow 2}$ es coeficiente de Fresnel de refracción entre un medio superior 1 y un medio inferior 2, \vec{E}_i es el campo incidente, \vec{E}_r es el campo reflejado y \vec{E}_t es el campo refractado o transmitido.

b) Atenuación

El fenómeno de la atenuación o absorción de energía se observa en los radargramas como una disminución de la amplitud de la señal que recibe la antena.

La amplitud de la señal que recibe la antena depende de diversos factores:

- Características intrínsecas de la antena
- Dispersión geométrica
- Dispersión cromática
- Scattering
- Número de interfaces en las que se produce reflexión y transmisión de la energía.
- Absorción

Este último factor es consecuencia de las propiedades materiales de los medios por los que se propaga la señal y es debido a la transformación de la energía electromagnética en calor. Se define a partir de un coeficiente, α cuyas unidades son dB/m. Este coeficiente proporciona una medida del grado de disminución de la amplitud de la onda debida a absorción del medio. Depende tanto de las propiedades electromagnéticas de los materiales, sobre todo de aquellos factores relacionados con la conductividad, como de la distancia recorrida por la onda en el seno de dichos materiales.

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2.22)$$

Según la Finnish Geotechnical Society (1992) esta ecuación puede simplificarse para materiales no magnéticos, considerando la atenuación como una función de la permitividad dieléctrica relativa y la conductividad eléctrica:

$$\alpha = \frac{1635 \cdot \sigma}{\epsilon_r} \quad (2.23)$$

El grado de atenuación de una onda electromagnética debido a la absorción puede definirse como el cociente entre las amplitudes de las oscilaciones de la onda en dos puntos separados por una distancia \vec{r} .



2.2 Ground Penetrating Radar (GPR)

2.2.1 Dispositivos de medición más comunes

Un equipo de GPR consta de diferentes partes básicas: una o varias antenas emisoras, una o varias antenas receptoras, una unidad de control y un dispositivo para la visualización de los registros. Todos estos componentes van unidos a fuentes de alimentación.

Además, otros componentes adicionales se pueden incluir en el equipo para posicionamiento de las antenas (GPS u odómetros), cámaras de video u otros dispositivos de medición como perfilómetros láser para la obtención de características superficiales.



Figura 2.3: Elementos que pueden asociarse a un vehículo de inspección equipado con GPR

a) Antenas

Las antenas son parte fundamental del sistema, ya que son los dispositivos utilizados para transmitir la señal electromagnética para captar la señal reflejada que regresa a la superficie.

Las antenas de radar de subsuelo son UWB (Ultra Wide Band), siendo su ancho de banda mucho mayor que el utilizado normalmente en los sistemas de radar aéreo convencionales, lo que les proporciona una mayor resolución [Daniels, 2004].

Las antenas pueden estar apantalladas. En este caso, la mayor parte de la energía radiada lo hace en una dirección determinada, ya que se encuentran situadas en el interior de un contenedor que está recubierto en todas sus superficies excepto en una por un material absorbente. Esto permite mejorar la relación señal/ruido ya que se evita disminuir la intensidad de las reflexiones en objetos externos al medio estudiado [Pérez-Gracia, 2001]. Sin embargo, no todas las antenas de GPR están apantalladas, ya que el sistema de apantallamiento aumenta su peso y sus dimensiones.

En el estudio de firmes de carreteras, comúnmente se utilizan dos tipologías de equipos:

- 1- **“Air coupled systems”**: Son antenas específicamente diseñadas para carretera que permiten evaluar las capas más superficiales del firme [Saarenketo, 2006]. Su señal está muy direccionada, hecho que permite estar levantada entre 0,3 y 05 metros por encima de la superficie del firme. Los sistemas operan generalmente entre 2,0 GHz y 500 MHz, hecho que permite obtener registros entre 50 y 90 cm de profundidad. La mayor ventaja de estas antenas es la repetibilidad de registros ya que no existe acoplamiento con el aire, permitiendo obtener señales muy limpias para el cálculo de espesores y constantes dieléctricas. Otra ventaja es que pueden medir a velocidades elevadas (100 km/h), no interfiriendo en el tráfico de la carretera. Este es el equipo preferido si se utilizan datos asociados a la medición con georradar para el apoyo en sistemas de gestión de firmes, como es en el caso de Alemania [Golgowsky 2003]. Por otro lado, son equipos costosos y su montaje requiere un vehículo con anclajes reglamentarios. Por tanto, el uso de esta tipología de equipos se justifica en función del alcance de los trabajos a realizar.

- 2- **“Ground coupled systems”**: Son antenas de uso general que operan en un amplio espectro de frecuencias; comúnmente desde los 2.5GHz a los 80 MHz, por lo que permiten medir desde las capas más superficiales del firme con mucha resolución hasta profundidades superiores a los 10 metros. Durante la adquisición de datos, la antena debe estar pegada al suelo o suspendida a pocos centímetros del firme, para producir una afectación de acople mínima. Son antenas que presentan un ancho de banda muy grande, con muy buena resolución, aunque es necesario realizar un mayor procesado de la señal que en el caso de las “Air coupled antennas”. La velocidad de recogida de datos suele ser a una velocidad inferior a los 50 km/h, y más lenta conforme más cercana está la antena a la superficie del firme.

b) Unidad de control

La unidad central o unidad de control consiste básicamente en una consola que funciona a través de un procesador central, donde se realiza la coordinación y control de las antenas, y de los accesorios que se pueden añadir al equipo [Pérez-Gracia, 2001]. Además, coordina el almacenamiento de la señal en algún tipo de soporte digital o fotográfico y en algunos casos permite realizar un tratamiento básico de las señales durante la adquisición de datos.



c) Accesorios y complementos

A los componentes básicos de un equipo de GPR se le pueden añadir algunos accesorios y equipos complementarios para facilitar las tareas de aplicación del sistema y obtención de datos. Los elementos adicionales más importantes son los que se utilizan para el posicionamiento del equipo y de los registros. Los dos más habituales son:

- **Odómetro:** se utiliza para una ubicación lineal sobre la superficie en estudio. Una vez determinadas las coordenadas del punto inicial de un perfil y su orientación, la situación de la antena sobre dicha línea puede determinarse mediante un odómetro. En algunos casos el posicionamiento se realiza mediante una cinta métrica o utilizando ambos sistemas para calibrar el odómetro.
- **GPS:** se utiliza para tener una ubicación espacial sobre la superficie en estudio. En zonas abiertas con buena recepción, pueden determinarse las coordenadas de la posición de cada traza.
- **Cámara de vídeo:** suele utilizarse para realizar la inspección visual de la superficie del firme y permite obtener datos de fisuración que puedan ser útiles para interpretar los registros generados por el georradar. Es decir, las zonas con graves deficiencias superficiales, pueden corresponder con zonas anormalmente deterioradas y visibles en superficie.
- **Perfilómetro láser:** suele utilizarse para medir deformaciones en la superficie de la carretera. Dichas deformaciones pueden ser ya en origen constructivo o bien por deformación posterior de la plataforma. Ambos defectos pueden ser correlacionables con valores anómalos medidos con georradar.

2.2.2 Funcionamiento del equipo

El equipo inicia su funcionamiento cuando desde la unidad central se le envía una señal a la antena emisora. Desde la electrónica de la antena se capta la señal y se excita el dipolo que, a su vez, genera el campo electromagnético que se irradia y se propaga a través del material a una velocidad que depende de la frecuencia del campo y de los parámetros electromagnéticos del medio. La onda se propaga y, cuando incide sobre una superficie que separa dos medios caracterizados por diferentes parámetros electromagnéticos parte de la energía se refracta y continúa su trayectoria y parte se refleja invirtiendo su trayectoria y dirigiéndose hacia la superficie. Cuando la onda alcanza la superficie, una antena receptora capta la señal y, mediante un transductor electromagnético la transforma en un pulso que se transmite mediante un cable coaxial o de fibra de vidrio hasta la unidad central, donde se almacena. Los registros de la unidad central pueden visualizarse en un monitor o en un

ordenador durante la adquisición de datos, y pueden grabarse en formato digital para su posterior interpretación.

La representación gráfica de las señales registradas es conocida como radargrama, y consiste en una representación de las trazas generadas cada vez que se produce un pulso electromagnético.

Una traza es una representación de la energía de la señal recibida (representada como amplitudes) en función del tiempo, que es el eje vertical de los registros. La representación de las trazas en función de su posición en el eje horizontal (la distancia medida sobre la superficie sobre la que se desliza la antena) forma el radargrama. En la figura 2.4 se muestra un radargrama de la sección transversal de un firme de carretera. Las líneas horizontales que se observan son debidas al aumento de la amplitud de las trazas en el mismo tiempo de propagación. Este aumento de la amplitud se corresponde con un incremento de la energía que alcanza a la antena receptora, como consecuencia de la energía reflejada en las discontinuidades electromagnéticas del medio.

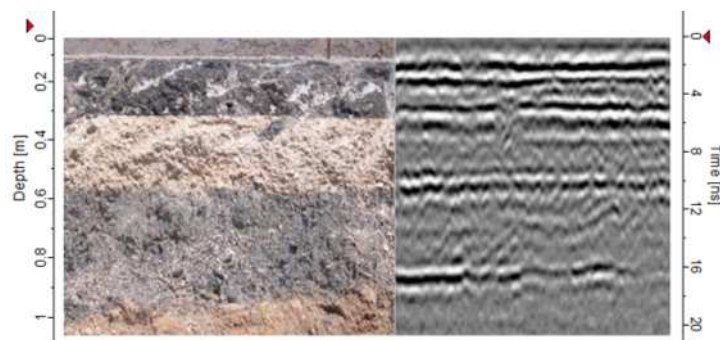


Figura 2.4: Registro de GPR obtenido sobre un firme flexible de carretera, junto con el corte de la sección constructiva real.

2.3 Procesado de datos

Durante la adquisición de datos se suele aplicar un procesado sencillo a los registros, para facilitar su visualización. Sin embargo, se recomienda siempre almacenar las trazas sin procesado, para efectuarlos siempre con posterioridad. La interpretación de los registros se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- Adquisición de datos tomando nota en una libreta de campo de elementos que pudieran perturbar las señales.
- Registro de la información básica de la medición en la cabecera de un registro. En este archivo se incluyen datos como el muestreo temporal de cada traza, la ventana temporal de adquisición de datos o la posición en coordenadas de la traza.



- Visualización de los registros representados como radargramas en escalas de color o como conjuntos puntuales de trazas, cotejándolos con la información que se tiene de la zona y con la libreta de campo.
- Cálculo o estimación de la velocidad que se utilizará para convertir los tiempos dobles de propagación en profundidades y, por lo tanto, para efectuar una correcta interpretación de los registros.
- Procesado de las señales. Los filtros se aplican para mejorar la calidad de los registros y realzar algunas anomalías interesantes que son difíciles o incluso imposibles de visualizar en los registros originales. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el filtrado modifica los registros y se elimina siempre información además de introducir frecuencias y señales que no se corresponden con las que se obtienen del subsuelo. Por este motivo siempre es recomendable analizar conjuntamente los registros procesados y los no procesados, almacenando estos últimos sin ningún tipo de tratamiento. Los procesados más utilizados son los siguientes:
 - Eliminación de la traza principal.
 - Ganancia.
 - Filtros pasa banda.
 - Transformada de Fourier.
 - Transformada de Hilbert.

2.3.1 Eliminación de la traza principal

Este tratamiento se aplica a los registros temporales para eliminar las reflexiones que son producidas por fenómenos externos a la medición, independientes de las reflexiones producidas por los cambios de naturaleza del subsuelo. Una de las reflexiones indeseadas más características que debe eliminarse del registro es la onda directa, que no aporta ninguna información al registro y que se manifiesta como una banda que se superpone a las ondas reflejadas más superficiales, siempre durante los primeros nanosegundos del registro.

Otras reflexiones indeseadas son las producidas por elementos cercanos a la antena, y se suelen manifestar de una forma similar a la onda directa, aunque de forma más atenuada.

El filtro para eliminar la traza principal o trazas equivalentes es la eliminación sistemática de la traza promedio de todo el registro o una parte sustancial del mismo.

2.3.2 Ganancia

Este tratamiento se aplica a los registros temporales para amplificar la señal. Consiste en multiplicar cada traza por una función que se selecciona, dependiente del tiempo doble de propagación de la señal.

La amplitud de las señales se atenúa rápidamente conforme el frente de onda avanza por el medio. En un medio homogéneo semi-infinito, las principales causas de atenuación son la dispersión geométrica y la absorción de energía. La función de la ganancia se selecciona para compensar alguno de estos efectos o ambos, aunque también se utiliza para disminuir la amplitud de reflexiones no deseadas o recibidas en zonas de mucho contraste, que ocultan de este modo otras recibidas en zonas de menor contraste.

Cuando los medios son sencillos se puede utilizar una ganancia lineal. Para medios más complejos la ganancia puede ser otra función cuya selección se suele hacer con diferentes pruebas sobre los registros. Una forma más cuidadosa de seleccionar la ganancia es comparar la amplitud de la señal para diferentes tiempos de propagación, analizando la atenuación producida propagación en el medio estudiado.

2.3.3 Filtros pasa banda

Este filtro se aplica sobre el espectro de amplitud de cada traza (por lo tanto, es un filtro unidimensional o vertical) y consiste en convolucionar la función en el espacio frecuencial con una señal que se selecciona tras analizar el espectro. El filtro, también en el espacio frecuencial, consiste idealmente en una señal que es igual a la unidad en la banda de frecuencias que interesa conservar, y es igual a cero en la banda de frecuencias que se desea eliminar. Dependiendo de la función del filtro se habla de:

- Filtro paso alta si la zona de la función igual a la unidad se inicia en una frecuencia determinada y finaliza en el infinito. De este modo, se convolucionan con cero aquellas frecuencias que están por debajo de la frecuencia seleccionada, de manera que quedan únicamente las que se sitúan por encima de dicha frecuencia, que se denomina frecuencia de corte.
- Filtro paso baja si la zona con la función igual a la unidad está situada entre el cero y la frecuencia de corte. De este modo, en la función del registro quedarán únicamente las frecuencias que sean menores a la frecuencia de corte seleccionada.
- Filtro paso banda si se tienen dos frecuencias de corte y la zona igual a la unidad es la situada entre ellas. Aplicando este filtro únicamente quedan aquellas frecuencias situadas entre las dos seleccionadas como frecuencias de corte.



Una vez aplicado el filtro se transforma la señal de nuevo en una señal temporal de la que habrán desaparecido las componentes debidas a las frecuencias eliminadas al convolucionarlas con cero.

El objetivo es disminuir el ruido de fondo para mejorar la relación señal/ruido y destacar la información correspondiente a las anomalías que se pretenden investigar eliminando componentes que pueden proceder de fuentes espurias.

2.3.4 Transformada rápida de Fourier (FFT)

FFT es la abreviatura de Fast Fourier Transform de un algoritmo que permite calcular la Transformada de Fourier Discreta. Se utiliza para pasar los registros del dominio temporal al frecuencial, lo que permite analizar las distintas contribuciones frecuenciales que componen la señal registrada.

Para una función real temporal $f(t)$ que cumpla las condiciones de Dirichlet, su transformada de Fourier, $F(\omega)$ se define como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.23)$$

La señal temporal se puede obtener a partir de la transformada inversa de Fourier, aplicada a la señal en el espacio de frecuencias:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.24)$$

La FFT es el algoritmo comúnmente utilizado para el tratamiento de datos sísmicos y se utiliza también en el procesado de datos de GPR. Su gran ventaja es el tiempo de computación. La limitación de este algoritmo es el número de puntos de muestreo, que debe ser una potencia entera de 2, y que además deben estar equiespaciados.

Las frecuencias consideradas serán:

$$f_n = \frac{1}{T} \frac{n}{N} \quad (2.25)$$

Donde N es el número de puntos de muestreo, $n = 0, 1, \dots, N - 1$ y T es el intervalo de muestreo temporal, de forma que la frecuencia empezará en cero y alcanzará un valor límite denominado frecuencia de Shanon, $f_s = 1/T$. El algoritmo de la transformada rápida de Fourier solo calculara hasta la frecuencia de Shanon, con un intervalo de frecuencia equiespaciada $\Delta f = 1/(TN)$.

Este tipo de procesado permite pasar las trazas de GPR del espacio temporal al espacio frecuencial. Esta representación permite tanto seleccionar de forma adecuada los filtros frecuenciales a utilizar como comprobar si el proceso de filtrado ha sido correcto, eliminando aquellos contenidos frecuenciales considerados ruidos y dejando pasar los que se consideran señal.

2.3.5 Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert es el procedimiento matemático que expresa la relación existente entre la parte real y la parte imaginaria de una función, o bien entre la fase y la amplitud de la misma. Mediante esta transformada se puede reconstruir la parte imaginaria, conociendo la parte real o viceversa, o reconstruir la amplitud de una señal a partir de su fase conocida o viceversa.

Una señal $f(t)$ temporal real, puede considerarse como la parte real de una función temporal compleja:

$$Z(t) = A(t)e^{i\varphi(t)} \quad (2.26)$$

Donde $A(t)$ es la amplitud temporal instantánea y $\varphi(t)$ es la fase instantánea de la función.

A partir de la transformada de Hilbert puede calcularse la parte imaginaria $y(t)$ de la función $Z(t)$ en función de la parte real ya conocida (la señal $f(t)$) y la amplitud instantánea $A(t)$.

$$Z(t) = f(t) + iy(t) \quad (2.27)$$

$$A(t) = \sqrt{f^2(t) + y^2(t)} \quad (2.28)$$

La amplitud $A(t)$ es la envolvente de la señal $Z(t)$, y proporciona información acerca de la energía reflejada en cada objeto, ya que la forma de la onda de un registro de GPR no es un buen indicador de la energía reflejada porque suele estar compuesto de varios ciclos.



CAPÍTULO III

Utilización del GPR en el diagnóstico de firmes

Resumen

En este capítulo se presenta el estado actual de la técnica aplicada al estudio de firmes de carreteras.

En primer lugar se exponen, de forma abreviada, los agentes solicitantes, los mecanismos de deterioro de los firmes y los indicadores más conocidos para el diagnóstico. Partiendo de esta información (problemas, necesidades e indicadores) puede desarrollarse y adaptarse la prospección con GPR al problema del análisis de firmes como herramienta útil para el desarrollo de estrategias de conservación.

Para finalizar el capítulo se presentan distintas variables de los radargramas en el dominio del tiempo y en el de las frecuencias que se utilizan para identificar distintas patologías de los firmes como, por ejemplo, fallos por fisuración, presencia de humedad, falta de cohesión entre capas.



III. UTILIZACIÓN DEL GPR EN EL DIAGNÓSTICO DE FIRMES

3.1 Visión clásica de la gestión de la conservación

Por lo general, los firmes se clasifican en tres tipologías, según su sección constructiva:

- Firmes flexibles:

Se trata de una estructura de mezcla asfáltica sobre una base granular sin ligantes. Dado que los materiales de las capas son flexibles, es muy importante la correcta adherencia entre todas ellas para asegurar un comportamiento monolítico al paso de las cargas.

- Firmes semirrígidos:

Se componen de una estructura de mezcla asfáltica sobre una base tratada con ligante hidráulico, por lo general de suelo-cemento. La presencia del suelo-cemento aporta mayor rigidez a la estructura y permite reducir los espesores de mezcla asfáltica.

- Firmes rígidos:

Estos firmes están compuestos en su superficie por una losa de hormigón, generalmente apoyada sobre una base granular, una capa de suelo-cemento o un hormigón magro. La elevada rigidez que caracteriza el material permite concentrar en la losa las tensiones transmitidas por las cargas solicitantes.

En esta tesis se analizan básicamente los firmes flexibles y, en algún caso, los semirrígidos, estudiando cómo se comporta la señal de GPR al atravesar los diferentes materiales que forman parte de la estructura, es decir: mezclas asfálticas, bases granulares sin ligar y suelo-cementos.

3.1.1 Agentes solicitantes

Los principales agentes solicitantes de los firmes son las cargas generadas por el tráfico y las condiciones ambientales a las que están expuestos durante su vida útil. En la figura 3.1 se ilustran los principales agentes solicitantes de un firme.

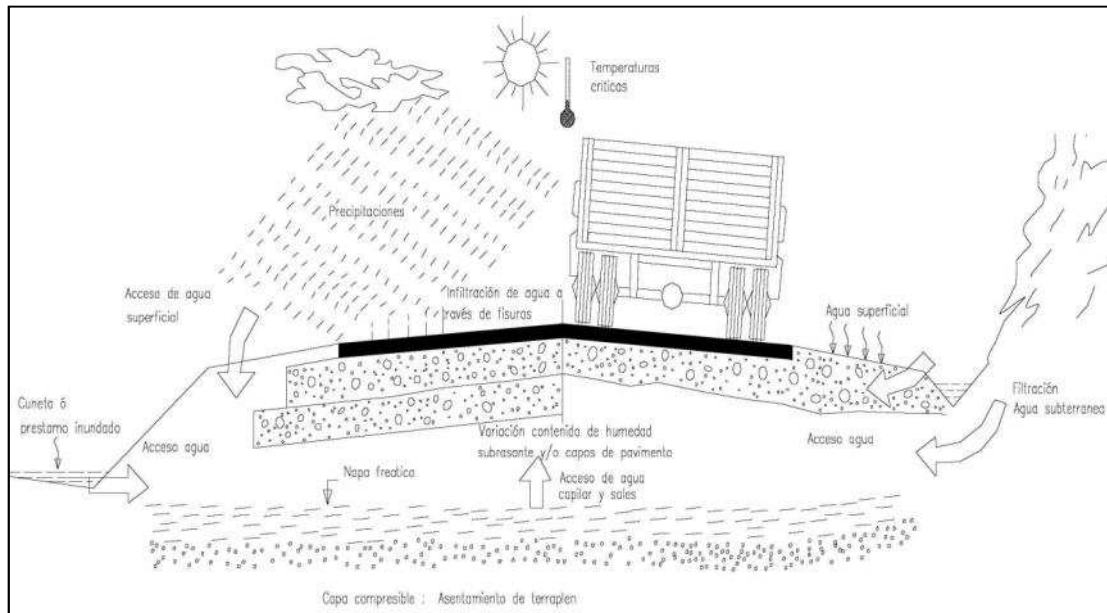


Figura 3.1: Principales agentes solicitantes de un firme. Fuente: Instituto de la Construcción y Gerencia [ICG, 2013].

El tráfico es el principal factor cuando debe determinarse o predecirse el daño que sufrirá un firme en un período dado. Sin embargo, caracterizar los efectos producidos por el tráfico sobre los firmes es bastante complejo, debido no solo a la variabilidad y periodicidad de los vehículos, sino también a las interacciones vehículo-pavimento y a las velocidades de circulación que producen solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas de los vehículos. En la figura 3.2. se muestran los mecanismos de distribución de una carga producida al paso de un vehículo sobre un firme flexible (figura 3.2-izquierda) y semirrígido (figura 3.2-derecha). En ella se observa como en el caso de un firme flexible, la sub-base granular falla por deformación (ϵ), mientras que la capa tratada con cemento (CTB) falla por tensión (σ), al ser menos deformable.

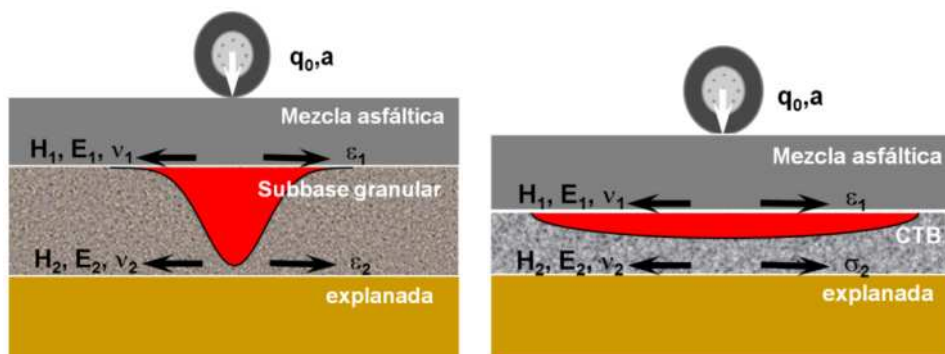


Figura 3.2: Mecanismos de absorción de cargas producidas por el paso de vehículos de un firme flexible (izquierda) y semirrígido (derecha). [Pérez-Jiménez, et al 2009].



Los efectos debidos a causas medioambientales tienen también una gran influencia en el comportamiento mecánico del firme. Dos son los efectos que afectan principalmente a las características del firme: la temperatura y la humedad.

La temperatura influye de manera directa en la rigidez del firme ya que, a medida que aumenta la temperatura, la capa superior del firme se vuelve menos rígida y viceversa. A su vez, la temperatura también afecta a los estados tensionales del firme, puesto que cuando bajan las temperaturas se generan altas tensiones superficiales de retracción en la superficie del firme.

En la figura 3.3 se representa la propagación de la temperatura a través de una mezcla bituminosa durante un ciclo de 24 horas [Shalaby, et al.,1996]. En ella se puede observar que el gradiente térmico se vuelve prácticamente irrelevante a partir de los 20 cm. de espesor de mezcla bituminosa.

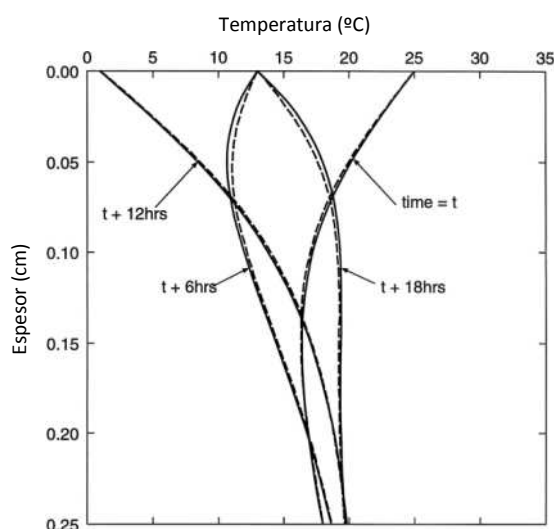


Figura 3.3: Propagación de la temperatura a través de una mezcla bituminosa (modificado de Shalaby, et al., 1996).

El otro factor, la humedad, tiene una gran influencia en la adhesividad entre los materiales componentes de las capas bituminosas, siendo la infiltración de agua en las capas inferiores del firme el origen de posibles fallos.

Además, se puede producir un efecto combinado entre la temperatura, la radiación solar, la humedad y el aire que produce una oxidación del ligante de la mezcla bituminosa, causando un aumento de rigidez de la mezcla, incrementando su fragilidad y haciéndola más susceptible a fallos por fisuración.

Estos dos agentes (las condiciones medioambientales y las cargas de tráfico), además de ser causa de los principales fallos en los firmes de carreteras, determinan en gran medida su vida útil.

3.1.2 Mecanismos de deterioro

Los agentes solicitantes que inciden sobre los firmes dan lugar a una serie de fallos o deterioros. Con objeto de clasificar estos fallos, la *Strategic Highway Research Program* (SHRP) desarrolló un catálogo para su utilización en el *Long-Term Pavement Performance Program* (LTPP) [FHWA, 2003], que reconoce los grupos de deterioros en firmes, ilustrados en la tabla 3.1. Todos ellos son el síntoma visible de la pérdida de propiedades portantes y funcionales de la infraestructura.

A. Fisuración	B. Baches y Parches	C. Deformación Superficial
Fisuración por Fatiga Fisuración en Bloque Fisuración de Borde Fisuración Longitudinal Fisuración por Reflexión en Juntas Fisuración Transversal	Baches Deterioros por Parches	Ahuellamiento o Roderas Deslizamiento de la capa de rodadura respecto a la subyacente
D. Defectos Superficiales	E. Deterioros Misceláneos	
Exudación Pulimento de Áridos Desprendimiento de Gravillas	Asentamiento de la Berma Expulsión de Finos	

Tabla 3.1. Grupos de deterioros en firmes [FHWA, 2003].

Numerosos investigadores señalan que el fallo por fisuración en los firmes bituminosos es un fenómeno sumamente complejo, difícil de reproducir experimentalmente dado que está regido por una amplia gama de factores, entre los cuales se pueden considerar las características de los materiales constituyentes, el espesor de las capas y el proceso de ejecución de las mezclas. Por otra parte, tal como se señaló en el apartado anterior, debe considerarse la importante influencia de los agentes externos que tienen que ver principalmente con las características de las cargas aplicadas y con las condiciones climáticas [Brown et al., 2001; Roberts et al., 1996; McGennis et al., 1994; Alonso, 2006].

Para la adecuada gestión funcional de una red de carreteras, es necesario simplificar el problema a través de indicadores de estado. Dichos indicadores permiten aproximar el estado estructural o funcional de un firme para obtener un diagnóstico y proporcionar estudios de pronóstico de comportamiento en el futuro [Pérez, et al., 2009].



3.1.3 Indicadores de deterioro clásicos

Existen varios indicadores que asocian el estado de un firme a un valor numérico. En este apartado, se realiza una breve descripción de los más comúnmente utilizados. Por lo general, dichos indicadores se asocian con características parametrizables de un firme como su regularidad superficial, su capacidad portante o su nivel de fisuración.

a) Regularidad superficial

La *American Society of Testing Materials* [ASTM, 2004] define la regularidad de un pavimento como “La desviación de una determinada superficie de pavimento respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo así como a la calidad del transporte”. Particularmente, la regularidad superficial es la característica más percibida por el usuario ya que afecta a su comodidad y a la seguridad. La comodidad depende principalmente del vehículo y del perfil longitudinal de la carretera. La mayor parte de los sistemas de análisis miden directamente el perfil para, posteriormente, obtener un índice de regularidad superficial.

Un perfil longitudinal de la carretera es una representación bidimensional real de la superficie del firme, a una cierta distancia paralela del eje de la calzada. Esta línea se puede utilizar para mostrar las desviaciones del firme respecto al perfil teórico de proyecto [Sayers y Karaminhas, 1998]. De esta forma, la regularidad superficial suele expresarse mediante un valor numérico que, debidamente interpretado, proporciona un índice de esta característica.

El Banco Mundial desarrolló el proyecto *International Road Roughness Experiment* (IRRE) en Brasil en el año 1.982 [Sayers et al., 1986], en el cual participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica, donde se realizó una medición controlada de la regularidad superficial de firmes para un número de vías bajo diferentes condiciones, utilizando una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto se seleccionó un parámetro de medición de regularidad superficial, el cual satisface completamente los criterios de estabilidad en el tiempo, es transferible y también relevante, denominado: *International Roughness Index* (IRI).

El IRI constituye hoy día uno de los controles de recepción de obra más importantes y es calculado por modernos equipos de perfilometría láser. Además es reconocido como indicador de estado de un firme permitiendo, a través de distintos modelos de deterioro, realizar estudios de pronóstico de la evolución estructural de una red.

b) Deflexión

Durante años se han empleado métodos empíricos fundamentados en la observación de la deflexión que producía la aplicación de una carga normalizada sobre la superficie de un firme para determinar su capacidad estructural. Sin embargo, estos procedimientos, a pesar de ser útiles han demostrado ser limitados y progresivamente está siendo sustituido por nuevos métodos de análisis empírico-mecanicistas. A fines de la década de los años setenta e inicios de los ochenta empezaron a proponerse y utilizarse los métodos racionales basados en el empleo de modelos matemáticos y la teoría de la elasticidad para la representación del sistema suelo-firme, con la finalidad de determinar el estado tenso-deformacional de la estructura. Para el cálculo de los citados parámetros se desarrollaron diversos programas, algunos muy populares, enfocados al diseño de firmes (Bisar, Elsym5, Kenlayer, etc.) o bien a su rehabilitación mediante la medición con sistemas basados en la deflexión por impacto (Modulus, Elmod, Modcomp, Evercalc, etc.) o mediante la viga Benkelman (Hogg-Burmister, Depav, etc.).

En muchos países, la determinación de la deflexión sigue siendo el indicador fundamental utilizado para realizar cualquier estudio relacionado con la conservación de los firmes: su vida residual y el diseño de refuerzos.

Tradicionalmente, los modelos matemáticos utilizados para calcular la vida residual de un firme se han basado en el cálculo de tensiones y deformaciones producidas en un sistema multicapa modelado por Burmister [Burmister, 1945] y que se basa las ecuaciones de Boussinesq, que describían ya en 1885 [Boussinesq, 1885] el comportamiento bajo una carga de un sistema elástico monocapa, de espesor y módulo conocido. Para la determinación del módulo de la explanada, asociado a la deformación producida por el efecto de una carga (Benkelman), en un sistema bicapa (firme bituminoso – explanada) se ha estado utilizando el modelo de Hogg de 1944 [Hogg, 1944].

Por tanto, utilizando el módulo como variable de entrada y conociendo el espesor de las capas es posible determinar el valor de la deflexión y, por tanto, las tensiones y deformaciones en las interfases de las capas. Con estos parámetros y la ley de fatiga, se pronosticará la vida residual de cualquier firme, antes y después del refuerzo. La normativa española de rehabilitación de firmes se basa en la experiencia de la aplicación de éstos modelos para elaborar una tabla de referencia para el diseño de refuerzos según la deflexión medida [CEDEX, 2003].

Además, a través del mismo procedimiento, es posible pronosticar la deflexión generada después de aplicar un refuerzo de firme, conociendo la deflexión previa al refuerzo y el espesor de la nueva capa [Kirk, 1964], parametrizando así la mejora de la capacidad portante obtenida mediante dicho refuerzo.



El modelo teórico más utilizado para calcular la deflexión prevista después de realizar una operación de rehabilitación se basa en el modelo de espesores equivalentes propuesto por [Odemark, N., 1949]. La ecuación suele ser presentada de forma simplificada, asumiendo un cierto coeficiente de Poisson y factores de corrección, tal y como describe [Ullidtz, P., 1987]:

$$d_0 = \frac{1,5 \cdot \sigma_0 \cdot a}{E_s} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + n_1^2 \cdot \left(\frac{h_1}{a}\right)^2}} \right) \cdot \frac{E_s}{E_1} + \frac{1}{\sqrt{1 + n^2 \cdot \left(\frac{h_1}{a}\right)^2 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{E_1}{E_s}}\right)^2}} \right] \quad [3.1]$$

Donde:

σ_0 = presión de contacto (Mpa).

a = radio de la carga equivalente del eje tipo (mm/100).

h = espesor de refuerzo (mm/100).

E_1 = módulo de rigidez de la mezcla bituminosa nueva (MPa).

E_s = módulo de rigidez actual del firme (MPa).

$n = 0,9$ (según Odemark).

Los valores “ a ” y “ σ_0 ” vienen dados por el equipo de medición utilizado. Por otro lado, el módulo de rigidez actual del firme “ E_s ” se obtiene mediante la ecuación:

$$E_s = \frac{1,5 \cdot \sigma_0 \cdot a}{d_2} \quad [3.2]$$

Donde:

d_2 = deflexión conocida, previa a la acción de rehabilitación (mm/100).

Finalmente, considerando un módulo de rigidez fijo para la capa de refuerzo nueva “ E_1 ”, por ejemplo: “ $E_1=6.000$ MPa”, la ecuación queda dependiente únicamente de dos variables: la deflexión inicial “ d_0 ” y el espesor de recrecimiento “ h ”.

c) Inspección visual

La evolución del deterioro de la estructura de un firme es una función de la clase de daño, su severidad y cantidad o densidad del mismo. En el caso particular de la fisuración, su valoración, ha sido siempre problemática debido al gran número de posibles condiciones.

Para superar esta dificultad, el cuerpo de ingenieros militares de los Estados Unidos propuso la introducción de un valor deducido, como un arquetipo de factor de ponderación, con el fin de indicar el grado de afectación que cada combinación de clase de daño, nivel de severidad y densidad tiene sobre la condición del firme. Es el indicador llamado PCI, como acrónimo de *Pavement Condition Index* [Shahin, et al, 1978].

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un firme fallado o en mal estado, hasta cien (100) para un firme en perfecto estado. En la tabla 3.2 se presentan los rangos de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del firme [ASTM, 2011].

Rango	Clasificación
100-85	Excelente
85-70	Muy bueno
70-55	Bueno
55-40	Regular
40-25	Malo
25-10	Muy malo
10-0	Fallado

Tabla 3.2. Clasificación de un firme según el rango de fisuras. Fuente: ASTM, 2011.

El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del firme en el cual se establecen: la clase, severidad y cantidad que cada daño presenta. El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del firme y de la condición operacional de la superficie. La información de los daños obtenida como parte del inventario ofrece una percepción clara de las causas de los daños y su relación con las cargas o con el clima.

El inventario visual se realiza mediante un levantamiento de datos en campo, mediante fotografías, utilizando visión artificial o más recientemente mediante fisurómetros láser.

3.1.4 Sistemas de gestión

La optimización de los recursos invertidos en la red de carreteras es la misión de los denominados sistemas de gestión de firmes, también conocidos como PMS (*Pavement Management System*). Dichos sistemas suelen tener una estructura de funcionamiento por módulos, y suelen incluir cualquier aspecto que influye en el diseño, construcción y conservación de la carretera. Sin embargo, en ésta tesis tan sólo se hará hincapié en los aspectos relacionados con los modelos de deterioro del firme, basándose en las curvas de evolución de determinados índices de calidad. En éste sentido, cada PMS, utiliza un índice o combinación de ellos para relacionar su evolución con la descapitalización del firme. A continuación se pone un ejemplo de algunos de los PMS relevantes según los índices que utilizan.

- **PMS basados en la regularidad superficial - HDM-IV (PIARC):** El HDM-IV es el sistema de gestión más conocido en el mundo. Utiliza como indicador de deterioro el IRI. El IRI es el



resultado de la combinación de un conjunto de fallos que aparecen en el firme a lo largo del tiempo. Los fallos más típicos son: las roderas, fisuras, peladuras y baches. El valor del IRI evoluciona según un número estructural, un volumen de tráfico soportado y la incidencia climática en la región considerada [Kerali, 2000].

- **PMS basados en la deflexión – GSF (UPC):** El sistema de gestión de firmes GSF es un sistema implementado en la Dirección General de Carreteras del Gobierno regional de Cataluña para la gestión de la conservación, basado en la deflexión [Hereu A, 2006]. El GSF fue diseñado por el laboratorio de Caminos la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en base a un histórico de datos de deflexiones y actuaciones realizadas sobre una red de unos 6.000 km de carreteras de todas las categorías, y tiene la virtud de ser simple en su uso y ajustado a las condiciones regionales donde opera. Una información detallada sobre este sistema de gestión puede consultarse en el trabajo de Martínez-Lainez [Martínez-Lainez, 2006].

- **PMS basados en la inspección visual – (PAVER – University of Colorado):** PAVER es un sistema de gestión de mantenimiento de firmes originalmente desarrollado a finales de 1970 para ayudar al Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DOD). Utiliza los datos de inspección visual para deducir un índice de condición del firme (PCI) de 0 (fallo) a 100 (excelente) y para predecir su comportamiento en el futuro [Fitch et al., 1991].

Una característica común a todos los sistemas de gestión de firmes es que son capaces de realizar múltiples niveles de análisis de políticas de conservación para mostrar dónde asignar mejor los recursos económicos limitados.

3.2 Uso del GPR en el estudio de firmes

3.2.1 Introducción

La prospección geofísica con GPR es una herramienta de gran interés en aplicaciones en muchas áreas que necesitan un conocimiento preciso del subsuelo o del interior de diferentes cuerpos. Es un método seguro, eficaz, rápido y no destructivo. En ingeniería civil está siendo utilizado en diversas aplicaciones, como en la caracterización de los materiales de construcción, en la evaluación de hormigones, en el diagnóstico de firmes y en inspecciones de puentes, entre otras.

El trabajo de Maierhofer (2003) demostró que el GPR se puede utilizar para determinar las posibles causas de daños en inspecciones de estructuras, y para evaluar la calidad de determinadas estructuras de ingeniería civil. Entre las posibles aplicaciones mostradas se

incluye la inspección de carreteras, y puentes, la detección de cavidades y el control de calidad-del hormigón armado.

En las últimas décadas, para las inspecciones de carreteras se han utilizado cada vez más instrumentos no destructivos que permiten evaluar sus condiciones estructurales. Una de las técnicas más extendidas, el GPR, se ha utilizado en carreteras para medir el espesor de capas, para detectar defectos bajo la superficie y evaluar su calidad y condiciones de humedad. El trabajo de Saarenketo y Scullion (2003) presenta al GPR como una técnica a desarrollar que tiene una gran potencial para ayudar en los diseños del firme y en la determinación de las estrategias óptimas de reparación estructuras deterioradas.

3.2.2 Detección de espesores de capas

La extracción de testigos es el método más común para medir el espesor de las capas en la construcción de firmes. Aunque este método proporciona una medición de espesores muy exacta, es destructiva, lleva mucho tiempo, y no proporciona una representación adecuada de la variabilidad del espesor en la totalidad del camino. El GPR es una herramienta muy práctica para este propósito por su versatilidad y porque además es capaz de proporcionar información de zonas de mayor tamaño, ya que se puede recorrer una gran distancia, afectando poco al funcionamiento de la carretera.

El trabajo de Fauchard et al. (2003) confirmó la aplicabilidad del GPR para medir el espesor de la capa asfáltica de un firme en una pista de prueba, en las instalaciones de “Laboratoire Central Ponts et Chaussées” (LCPC).

La investigación de Loizos y Plati (2007) se centra en la estimación de espesores de las capas asfálticas de un firme utilizando GPR, en base a la estimación de la permitividad dieléctrica de los materiales que lo componen.

Por otro lado, el trabajo de Huang y Kang (2010) explica el estudio no destructivo en un firme asfáltico en el que se incluye el GPR, que es utilizado para evaluar el espesor de las capas de firme. La conclusión muestra que este tipo de prospección puede ser utilizado para estimar espesores.

El trabajo de Al-Qadi y Lahouar (2005) presenta una descripción de la aplicación de GPR para la estimar el espesor del firme. En el trabajo se utilizan datos de campo para evaluar la capacidad del radar para determinar los espesores de las capas de firme considerando diferentes tipos de firme. Una de las conclusiones más relevantes es que, cuando el firme se compone de capas densas los resultados son aceptables, pero cuando el firme tiene al menos tiene una capa delgada, la exactitud en la determinación del espesor disminuye



considerablemente. En este último caso se necesita aplicar técnicas de procesado de datos para mejorar la visualización de las anomalías, antes de la interpretación.

En un trabajo posterior, Lahouar y Al-Qadi (2008) presentan el desarrollo de un método para la detección automática de las capas de firme. En el trabajo se muestra que, cuando el grosor de estas capas es menor que la longitud de onda utilizada, se produce el solapamiento entre los pulsos reflejados en las discontinuidades superior e inferior. La solución que proponen para este problema es la detección iterativa de las reflexiones fuertes registradas en el radargrama, para lo que utilizan un umbral de la amplitud. Esta técnica se aplicó con éxito en los datos recogidos en un tramo experimental en el Road Smart Virginia (USA).

Por otra parte, en el trabajo de Morcoux y Erdogmus (2010) se analiza la exactitud y la relación coste-efectividad de la prospección con GPR para determinar el espesor de firmes de hormigón, con el objetivo de garantizar su calidad. En el estudio se utiliza una antena 1,6 GHz para los experimentos de laboratorio y los de campo. Para realizar el correcto análisis experimental del método, se obtuvieron muestras del firme para determinar en laboratorio las propiedades dieléctricas del hormigón, logrando una exactitud de un 98,5%. El trabajo concluye que el GPR es una herramienta eficiente para medir espesores de hormigón. Sin embargo, las refracciones en la interfaz entre el hormigón y la base son poco claras debido a la similitud de las permitividades entre ambos medios.

Liu y Sato (2014) desarrollan uno de los sistemas (hay diferentes métodos propuestos por diversos autores) que permiten automatizar las mediciones de GPR para calcular espesores. En el trabajo utilizan lo que se conoce como un *array de antenas*. Se trata de utilizar varias antenas en paralelo a menudo de diferentes frecuencias, de manera que se pueden analizar diferentes profundidades con la mejor resolución posible. El sistema de antenas se calibra considerando el centro de fase de cada una de ellas. Los resultados de las pruebas efectuadas en laboratorio demuestran que el método de calibración mejora la precisión en la estimación de la velocidad y del espesor, en comparación con los métodos convencionales.

Con el propósito de obtener una interpretación más precisa de los radargramas obtenidos en mezclas bituminosas en firmes de carreteras, Pedret y Pérez-Gracia (2012) proponen aplicar algunas posibles correcciones a los resultados finales, analizando el efecto que el contenido de huecos en la composición en las mezclas bituminosas produce en la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. En este trabajo se analizan firmes que presentan diversos estados de conservación. Los resultados permiten concluir que en los índices de huecos más elevados se obtienen velocidades de propagación superiores a las esperadas en los materiales del medio.

Finalmente, los últimos avances en el campo del GPR aplicados a la medición de espesores de capas de firmes asfálticos son relativos a la mejora de las técnicas para determinar la permitividad dieléctrica relativa y sus variables asociadas. Por ejemplo, Leng y Al-Qadi (2014) desarrollan un método innovador que mejora la precisión del método tradicional para estimar de la permitividad promedio del firme, utilizando dos antenas y realizando una adquisición de datos mediante *Common Mid Point* (CMP). El estudio permitió desarrollar un algoritmo para el cálculo de la permitividad del firme como variable asociada al cálculo de los espesores.

3.2.3 Detección de humedad

El contenido de agua en un firme es una de las causas más frecuentes de su deterioro. En los estudios que se han realizado para analizar la viabilidad de la prospección con GPR para analizar firmes, uno de los objetivos ha sido la determinación de la presencia de humedad en determinadas capas.

En el trabajo publicado por Al-Qadi, et al (2004) se utiliza una antena de 1 GHz para estudiar el efecto del uso de una membrana geocompuesta utilizada como barrera contra la humedad en firmes flexibles, determinando cuantitativamente el contenido de humedad de los materiales granulares. Los resultados obtenidos a partir de los ensayos con GPR indican que la infiltración de agua disminuía hasta un 30% en las zonas en las que estaba colocada la membrana.

Grote et al. (2005) utilizan el GPR para controlar el contenido volumétrico de agua en las capas granulares durante un experimento de infiltración extendida. Los datos obtenidos revelan la existencia de variaciones significativas en el contenido de agua de las capas granulares en las direcciones horizontal y vertical.

En el estudio publicado por Plati y Loizos (2013) se analiza in-situ la densidad y la humedad dentro de la capa de firme asfáltico, utilizando una antena que funciona alternativamente a 1 GHz y a 2 GHz. Esta investigación demuestra que la mayor profundidad de penetración de la antena de 1 GHz mejora la identificación de áreas afectadas potencialmente por humedad. Los autores concluyen que las diferencias observadas en la permitividad en cada una de las dos frecuencias se podrían utilizar para evaluar cómo cambia la homogeneidad de la densidad del material con la profundidad. De este modo, el resultado puede utilizarse como un indicador de la compactación de la mezcla.



3.2.4 Detección de daños

En muchos estudios, la prospección con GPR se utiliza para diagnosticar el deterioro de los firmes, complementando la inspección visual comúnmente utilizada para identificar zonas agrietadas y deterioros debidos a asentamientos, entre otros daños. En el análisis realizado por Chen y Wimsatt (2009) con una antena de 400 MHz, se caracterizan las condiciones sub-superficiales de tres secciones de firme, obteniendo radargramas en los que se registran anomalías que los autores asocian con daños, concluyendo que se puede utilizar la información del GPR para emprender acciones correctivas sobre los firmes.

Benedetto y Pensa (2007) utilizan el GPR para el diagnóstico indirecto de los daños estructurales de un firme. El método resulta eficaz en la detección de la presencia de arcilla o de suelos cohesivos que comprometen la capacidad de soporte de la sub-base e inducen posibles daños.

Chen et al. (2009) analizan firmes de hormigón utilizando conjuntamente métodos no destructivos y extracción de testigos. En este estudio, la prospección mediante GPR se utiliza para identificar las causas de los continuos problemas de bombeo y asentamiento, con el fin de desarrollar una estrategia óptima de reparación.

Sudyka y Krysiński (2011) analizan la calidad de la adherencia entre capas de firmes flexibles mediante prospección con GPR. En el trabajo se realizan mediciones en laboratorio con una antena de 2 GHz, analizando los registros obtenidos en muestras con falta de cohesión horizontal. Con la misma antena se obtienen medidas de campo, extrayendo testigos en las zonas en las que los radargramas mostraron fuertes reflexiones dobles. El estudio de los testigos permitió analizar los elementos del medio que habían generado las fuertes reflexiones. Se concluyó que este efecto no era debido necesariamente a grietas horizontales, ya que también se producía como consecuencia otro tipo de deterioros.

En el trabajo de Colagrande et al. (2011) se estudian firmes degradados utilizando antenas de 600 MHz y de 1600 MHz, obteniendo registros de GPR en 40 secciones de firmes, dañados y sin daños. El estudio concluye que el ángulo de absorción permite identificar la causa del deterioro. Si el ángulo de absorción de las secciones dañadas es aproximadamente el mismo que el de las secciones no dañadas, entonces la causa probable del deterioro es el fenómeno de fatiga o contracción térmica en las capas superficiales del firme. Sin embargo, si el ángulo es muy diferente, entonces la causa es debida a defectos de la explanada.

El trabajo publicado por Diamanti y Redman (2012) demuestra la capacidad del GPR para detectar y caracterizar grietas verticales en firmes. Los autores recomiendan un estudio

multi-frecuencial: las frecuencias más bajas para detectar los daños y las más altas frecuencias para caracterizarlos.

Tosti y Benedetto (2012) proponen un método de inspección con GPR para predecir el bombeo de finos en firmes flexibles. A modo experimental, los autores efectúan mediciones de contenido de arcilla en suelos compactados con dos sistemas de GPR diferentes. Las señales se procesaron y analizaron en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia, aplicando la teoría de dispersión de Rayleigh a los resultados, obteniendo correlaciones prometedoras.

El artículo publicado por Kyrskiński y Sudyka (2013) describe los resultados de una investigación la eficacia del GPR en el diagnóstico de grietas en el firme. Para analizar el método los autores realizaron pruebas de laboratorio en prototipos simulando grietas. Posteriormente, realizaron observaciones visuales y una inspección con GPR en tres tramos de carreteras con firmes semirrígidos y un tramo con firme rígido, sometidos a tráfico pesado. Como resultado clasificaron diversas anomalías registradas en los radargramas, vinculándolas a posibles tipologías de grietas y a los efectos relacionados con la segregación de áridos de la mezcla asfáltica.

En el trabajo de Solla et al. (2014) se combinó el uso del GPR con la termografía infrarroja para detectar y caracterizar las grietas en un firme. Los resultados del estudio muestran la idoneidad de la combinación de ambas técnicas en la inspección y caracterización de grietas en la mezcla asfáltica, dado que los datos de los dos métodos, analizados conjuntamente, permiten la estimación de la profundidad de la grieta, la detección de presencia de material de relleno y la valoración de la severidad de la fisura.

En el trabajo de Pinel et al. (2011) se realizó un estudio teórico de la influencia de la regularidad superficial del firme sobre los registros que se obtienen con el GPR. En este estudio se utilizó un método de propagación electromagnética llamado: Propagation-inside-layer-expansion (PILE), para simular la señal retro-dispersada del GPR. El estudio demostró que las variaciones espaciales de la amplitud registrada para diferentes anomalías son significativas en el estudio de daños.

El trabajo publicado por Kryskiński y Sudyka (2012) tiene como objetivo la descripción de anomalías dobles detectadas en los radargramas, introduciendo una definición fenomenológica de este tipo de registros continuos obtenidos en el diagnóstico de firmes flexibles. En este trabajo se presenta y discute un elevado número de ejemplos, siendo uno de los primeros que introduce la descripción de las características de las señales reflejadas como una herramienta en el diagnóstico de firmes.



Chen et al. (2014) presenta la técnica del GPR para caracterizar los huecos de la mezcla bituminosa. Para establecer la relación entre el porcentaje de huecos y la permitividad del medio, medida a partir de registros de GPR, utilizaron un total de 92 testigos. La gran cantidad de muestras les permitió desarrollar un modelo estadístico para expresar el contenido de huecos como una función de la permitividad. Los resultados se han utilizado como base para la selección de estrategias de rehabilitación.

El análisis numérico de Shangguan et al. (2014) permite desarrollar un algoritmo para reconocimiento de patrones de respuesta con el objetivo de determinar la densidad de firmes asfálticos. Este método se diseña para monitorizar la densidad de la mezcla asfáltica durante su compactación.

3.2.5 Estudios de calidad de firmes

El GPR ha demostrado ser una herramienta útil para realizar evaluaciones de firmes y de sus componentes, tal como se pone de manifiesto en los trabajos realizados por Moropoulou et al. (2002), en el que se aplican conjuntamente la prospección mediante GPR y la evaluación de termografía infrarroja para examinar el firme flexible del aeropuerto internacional de Atenas, con el fin de realizar una evaluación rápida de su estado.

De forma similar, Kassem et al. (2008) utilizan el GPR conjuntamente con ensayos de rayos-x para evaluar el contenido y distribución de huecos en un firme asfáltico. Los resultados muestran un elevado grado de correlación entre el GPR y los rayos-x.

El estudio de Evans et al. (2006) determina cómo una recopilación detallada y extensa de datos de GPR se puede utilizar para seleccionar y planificar una campaña de extracción de testigos en una red de firmes de vías urbanas.

Plati y Loizos (2012) documentan la metodología que debe utilizarse para un correcto uso de la prospección mediante GPR en el proceso de evaluación de las necesidades estructurales de firmes asfálticos. En su trabajo definen una metodología asociada principalmente al uso eficiente del ensayo. Por otro lado, el trabajo también pone de manifiesto la importancia del desarrollo de herramientas informáticas para ejecutar los procesos complejos que se necesitan para definir las necesidades estructurales de los firmes. Los análisis y resultados permiten concluir que el método sugerido puede ser utilizado como una herramienta complementaria para monitorizar y evaluar el estado de firmes.

3.3 Parámetros obtenidos a partir de los registros de GPR

El GPR es un sistema de prospección que utiliza antenas de *Ultra Wide Band* (UWB), en un rango de frecuencias situado entre los 3 GHz y los 10 MHz. Se encuentra operando, por lo tanto, en una región del espectro electromagnético que corresponde con las radiofrecuencias y las microondas, situadas en la zona conocida como *Ultra High Frequency* (UHF).

Una de las particularidades que caracterizan la propagación de ondas en la banda UHF es su gran sensibilidad a la parte real de la permitividad dieléctrica relativa y la poca dependencia que presentan con la parte imaginaria de la conductividad [Jol, 2009]. La permitividad dieléctrica de los materiales que componen un medio dependen en gran manera de su contenido de agua y de aire en los poros ya que son elementos con valores que difieren mucho de los que presentan muchos de los minerales y granos sólidos más habituales. Como consecuencia directa, la permitividad dieléctrica relativa promedio del material por el que se propagan las ondas tiene efectos visibles en la señal tanto en el espacio temporal como en el espacio frecuencial.

En el espacio temporal, los cambios en este parámetro se detectan como variaciones en la velocidad de la señal durante su propagación por el medio. La figura 3.4 muestra la relación entre la velocidad de propagación de la onda y la permitividad dieléctrica relativa [Lorenzo, 1995].

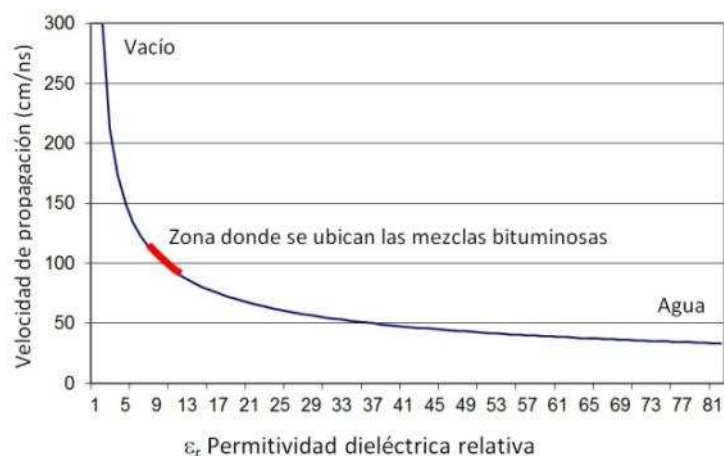


Figura 3.4: Relación entre la velocidad de propagación de onda y la permitividad dieléctrica relativa del medio [Lorenzo, 1995].

Siendo la relación matemática:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad [3.3]$$



Donde:

ϵ_r = Permitividad dieléctrica relativa.

v = Velocidad de propagación de onda en el medio.

c = Velocidad de propagación de onda en el espacio.

Por otro lado, en el espacio frecuencial, se observan variaciones en los máximos del espectro de amplitud, en su ancho de banda y en su forma y simetría.

Estos fenómenos pueden ser aprovechados para obtener la máxima información posible acerca de las características físicas del medio a partir de los registros de GPR.

3.3.1 Dominio temporal

a) Permitividad dieléctrica relativa

El cálculo del valor de la permitividad dieléctrica relativa de una capa de firme es uno de los métodos más típicos para estudiar sus características y el estado de conservación. El valor de permitividad dieléctrica relativa ofrece una orientación bastante clara acerca de las condiciones, especialmente de humedad, presencia de huecos o granulometría del suelo donde se apoya el firme [Saarenketo, 2006].

Los valores típicos de permitividad dieléctrica relativa en firmes de carreteras son:

Material	Permitividad dieléctrica relativa
Mezcla asfáltica	4-8
Hormigón	8-10
Base granular sin tratar	7-9
Base tratada con cemento	8-10
Promedio de estructuras de carreteras (nuevas / en seco)	5
Promedio de estructuras de carreteras (normal)	6
Promedio de estructuras de carreteras (viejas / húmedas)	7-8

Tabla 3.3. Valores típicos de permitividad dieléctrica relativa en firmes asfálticos. Fuente: Saarenketo, 2006.

El método tradicional para determinar la permitividad dieléctrica relativa es el cálculo inverso usando como referencia el estudio de testigos y determinando la velocidad de propagación de onda. Otro método de cálculo también muy conocido es el denominado método de reflexión superficial [Maser y Scullion, 1991].

En este método, la amplitud de reflexión de la capa superficial es comparada con la reflexión de una placa metálica totalmente reflectiva. Según el método, comparando los dos valores de amplitud, es posible calcular la permitividad dieléctrica relativa según la ecuación 3.4:

$$\epsilon_{r,1} = \left[\frac{1 + \frac{A_0}{A_p}}{1 - \frac{A_0}{A_p}} \right]^2 \quad [3.4]$$

Donde:

$\epsilon_{r,1}$ = Permitividad dieléctrica relativa de la capa de mezcla asfáltica superficial.

A_0 = Amplitud de reflexión de la capa de mezcla asfáltica superficial.

A_p = Amplitud de reflexión de una placa metálica totalmente reflectiva.

Por otro lado, es posible también calcular la permitividad de una capa más profunda, a través de la siguiente ecuación:

$$\sqrt{\epsilon_{r,2}} = \sqrt{\epsilon_{r,1}} \left[\frac{1 - \left[\frac{A_0}{A_p} \right]^2 + \frac{A_1}{A_p}}{1 - \left[\frac{A_0}{A_p} \right]^2 - \frac{A_1}{A_p}} \right] \quad [3.5]$$

Donde:

$\epsilon_{r,2}$ = Permitividad dieléctrica relativa de la capa de base granular.

A_1 = Amplitud de reflexión de la capa de base.

En la figura 3.5 se muestra, a modo ilustrativo, el método de reflexión superficial con todas las variables expuestas en las ecuaciones 3.4 y 3.5:

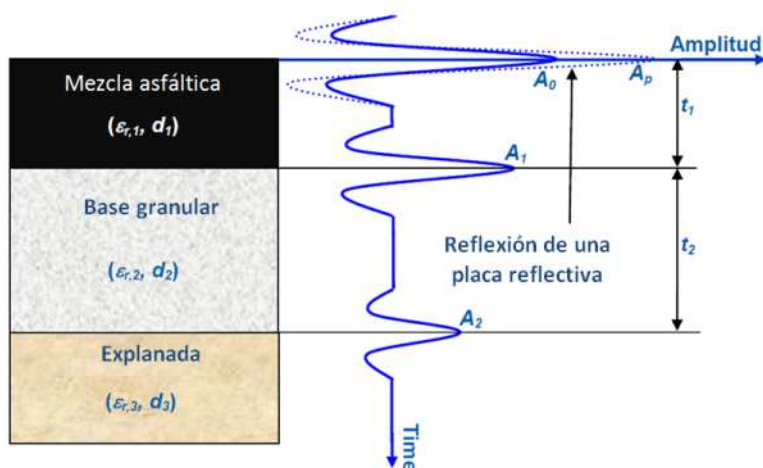


Figura 3.5: Cálculo aproximado de la permitividad dieléctrica relativa (Leng Zhen, 2011).

Dado que existe una relación entre la permitividad dieléctrica relativa y la velocidad de propagación de onda por un medio homogéneo y no conductor, conociendo el valor de permitividad dieléctrica relativa del reflector, el espesor de la capa se obtiene como:



$$d_1 = \frac{v \cdot t_1}{2} \quad [3.6]$$

Donde:

d_1 = espesor de la capa 1.

t_1 = tiempo transcurrido entre los dos primeros reflectores.

Una de las zonas del planeta en las que más se ha investigado esta metodología aplicada al estudio de carreteras es en los países escandinavos, donde el efecto de la helada origina la aparición de fisuras prematuras en el firme y su deterioro acelerado. Por tanto, son zonas en las que un diagnóstico precoz mediante técnicas no destructivas, de alto rendimiento y bajo coste (condiciones que se cumplen en el caso de la prospección con GPR) se ha promovido, ayudando en los últimos años a mejorar las políticas de carácter preventivo para poder alargar la vida útil de los firmes.

En este sentido, Saarenketo (2005) estudia la evolución temporal la permitividad dieléctrica relativa y de la conductividad eléctrica, para determinar el estado estructural o la antigüedad de un firme. Por ejemplo, la permitividad dieléctrica del conjunto del firme aumentará a medida que envejece, debido principalmente a la aportación de agua al sistema. En un momento dado, el valor de este parámetro se reducirá bruscamente ya que llegará un momento en el que las propias fisuras generadas en la rotura del firme permitirán drenar el agua hacia fuera de la plataforma. La figura 3.6 muestra el efecto de esta sucesión de fenómenos [Saarenketo, 2003].

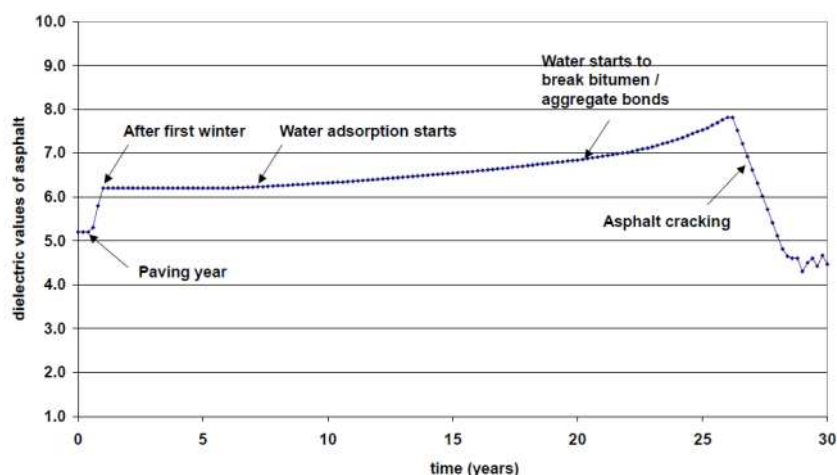


Figura 3.6: Evolución de la permitividad dieléctrica en un firme. [Saarenketo, 2003]

En estos casos, el estudio de la evolución temporal de los parámetros determinados a partir de radargramas (velocidad de propagación, contenido frecuencial y amplitud) permite un conocimiento exhaustivo del firme y de su evolución. Sin embargo, estos parámetros dependen de las propiedades electromagnéticas de los medios que varían dependiendo de

la frecuencia de la onda, pero también de la climatología. Además, estas propiedades dependen también de los materiales de construcción específicos utilizados regionalmente.

b) Scattering

El fenómeno de la atenuación o absorción de energía se observa en los radargramas como una disminución de la amplitud de la señal que recibe la antena. Se produce principalmente por conversión de la energía electromagnética del campo en calor. Un aumento de la conductividad aparente del medio es un factor que aumenta la atenuación de la señal debido a la absorción [Reynolds, 1997].

Según Sussman (1999), la longitud de onda en el medio puede ser calculada como:

$$\lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad [3.7]$$

Donde:

ϵ_r = Permitividad dieléctrica relativa aproximada del medio.

Una de las aplicaciones más conocidas del uso del fenómeno del “scattering” en ingeniería civil es para la determinación de las características y condiciones del balasto en plataformas ferroviarias, tal y como describe Al-Qadi et al. (2008).

El motivo es la relación existente entre las frecuencias de antenas de uso típicas para la inspección de estructuras y las dimensiones de las piedras de balasto.

En la figura 3.7 se muestra el caso de la aparición de “scattering” en el estudio de una plataforma de ferrocarril:

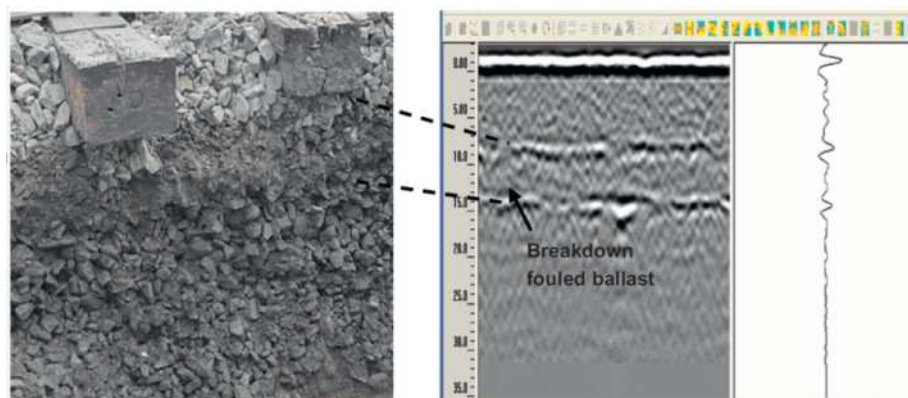


Figura 3.7: Fenómeno de “scattering” en una plataforma de ferrocarril. [Al Qadi et al, 2008]



En el caso de las antenas utilizadas en esta tesis, las longitudes de onda generadas en un firme flexible, para cada una de las antenas son:

Frecuencia central (f_c)	(λ)*	(λ)**	(λ)***
250 MHz	54 cm	49 cm	42 cm
500 MHz	27 cm	24 cm	21 cm
800 MHz	17 cm	15 cm	13 cm
1200 MHz	11 cm	10 cm	9 cm

Tabla 3.4 Longitudes de onda que excitan el efecto del “scattering” según la antena utilizada

(*) Para un firme flexible nuevo, se asume una ϵ_r de: 5 según Saarenketo (2006)

(**) Para un firme flexible promedio, se asume una ϵ_r de: 6 según Saarenketo (2006)

(***) Para un firme flexible viejo, se asume una ϵ_r de: 8 según Saarenketo (2006)

Por tanto, en ninguno de los ensayos considerados en firmes asfálticos existen áridos de diámetro cercano a los obtenidos con las antenas utilizadas. Por tanto, el fenómeno del “scattering” es una variable que no será considerada en esta tesis.

c) Envolvente de la onda

La transformada de Hilbert, aplicada sobre una señal, proporciona una medida de la energía instantánea de la onda, representándola a partir de su envolvente.

En el estudio de Hammons et al. (2005) se investiga la pérdida de adherencia entre capas del firme utilizando la envolvente de la onda, calculada a partir de la transformada de Hilbert.

La envolvente presenta zonas de mayor amplitud a menor tiempo doble de propagación en el caso de firmes deteriorados. Este efecto es debido a que en los firmes deteriorados se generan un mayor número de grietas, en muchos casos llenas de aire. Como la onda se propaga a mayor velocidad en el aire que en otros materiales, la velocidad promedio en toda la capa aumenta. Este aumento hace que las anomalías asociadas con reflexiones que se sitúan a la misma profundidad, se observen con menores tiempos de propagación en el caso de materiales dañados. Un efecto adicional que se observa en la envolvente es el aumento de máximos y mínimos (picos) en el diagrama, indicando la existencia de con mayor proporción de aire (zonas con grietas) o bien falta de adherencia entre capas.

En la figura 3.8a se puede observar la envolvente de la señal obtenida en el caso de disponer de un testigo con capas perfectamente adheridas. Por otro lado, en la figura 3.8b se muestra el efecto producido sobre la envolvente por la falta de adherencia entre capas.

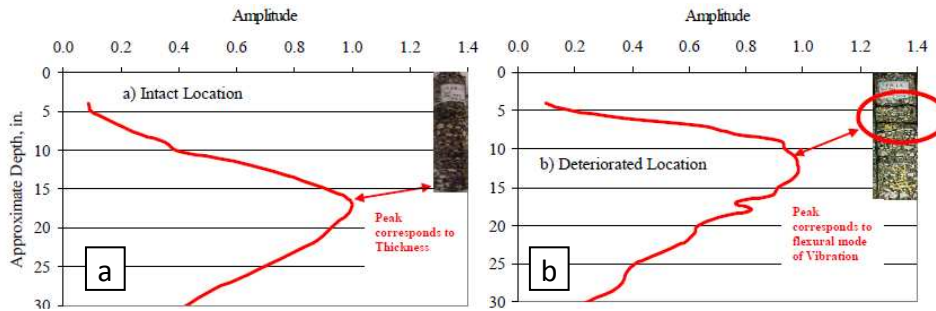


Figura 3.8: Análisis de la envolvente de la onda. [Hammons et al., 2005].

3.3.2 Dominio frecuencial

Los medios materiales actúan como un filtro paso baja sobre las ondas electromagnéticas que se propagan por ellos. Para determinar en qué medida ocurre este fenómeno se obtienen los espectros de amplitud de los diferentes registros mediante la transformada de Fourier [Pérez-Gracia, 2001].

El análisis de Fourier es un procesado clásico que se aplica al estudio de series temporales. Se utiliza para pasar los registros del dominio temporal al frecuencial, lo que permite analizar las contribuciones de cada una de las frecuencias que componen la señal registrada. Numerosos tratados y trabajos desarrollan este procesado. Una explicación completa puede encontrarse en Brigham (1974).

a) Amplitud y ancho de banda

La mayor parte de los autores sugieren analizar las frecuencias que tienen una mayor amplitud y ancho de banda [Pérez-Gracia, 2001]. Los resultados obtenidos en cada caso se suelen comparar con un espectro patrón, para determinar qué frecuencias han sido absorbidas por el medio y en qué magnitud.

Este análisis requiere disponer de un espectro de referencia sobre el cual se determinarán las diferencias observadas en cada uno de los registros.

Una forma de obtener este espectro patrón es la adquisición de datos en el aire. Se trata de un ensayo sencillo en el cual el medio de propagación de la señal es el aire, y que puede realizarse utilizando únicamente la onda directa que se registra, o bien utilizando la onda directa y la onda generada en una primera reflexión sobre una discontinuidad conocida (habitualmente una placa metálica a una distancia determinada de la antena). El espectro que se obtiene mediante este ensayo debería ser un patrón de medida puro, ya que el aire puede considerarse un medio homogéneo y no absorbente para las frecuencias y las



distancias que se utilizan en los estudios de GPR, en el que la onda se propaga a una velocidad de, aproximadamente 30 cm/ns.

La figura 3.9 muestra el espectro patrón (en negro) obtenido en un ensayo en aire en el que se ha analizado únicamente la onda directa (que se propaga desde la antena emisora hasta la receptora) y el espectro de amplitudes (gris claro) obtenido a partir de la señal recibida tras propagarse por un firme. En ambos casos se ha utilizado una antena de frecuencia central próxima a los 950 MHz, comúnmente utilizada para el estudio de firmes de carreteras [Pedret, et al., 2015]:

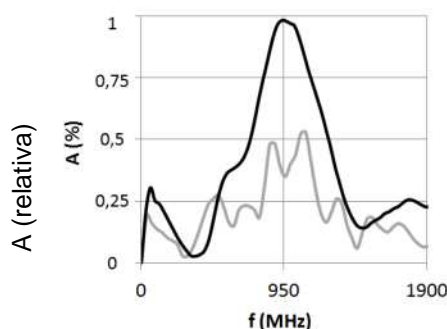


Figura 3.9: Espectros patrón al aire (negro) y respuesta frente a un firme (gris claro) [Pedret, et al., 2015].

El espectro patrón de la figura 3.9 es un diagrama limpio y bastante regular, que presenta un pico de amplitud a los 950 MHz, y donde sólo se registran dos pequeños máximos extremos, fuera del intervalo de interés. Sin embargo, en el espectro de amplitud obtenido del registro experimental en el firme se observa una disminución del ancho de banda apreciable de la frecuencia central, así como una reducción drástica de la amplitud de todas las componentes frecuenciales. Una característica interesante es la aparición de diversos máximos en la zona más regular del espectro patrón indicativos de la heterogeneidad del medio.

La disminución de la amplitud de todas las componentes frecuenciales de la onda y del ancho de banda sugiere una mayor absorción de energía, parámetro asociado a las propiedades electromagnéticas del medio por donde se propaga la onda.

Las pérdidas en energía del sistema pueden calcularse determinando la energía total considerando el espectro de cada señal. Como la radiación electromagnética es un flujo de fotones, siendo la energía de cada fotón proporcional a su frecuencia (ecuación 3.3), la energía total será la suma de todas las energías asociadas a cada una de las frecuencias que contribuyen al espectro de la señal.

$$E = f \hbar \quad [3.8]$$

Siendo E la energía de un único fotón, f su frecuencia y \hbar la constante de Plank

Los efectos de un medio sobre el espectro de frecuencia se han observado en diferentes ensayos experimentales, bajo condiciones de laboratorio. Por ejemplo, en el campo de los materiales de construcción, Laurens et al. (2003) analizan la evolución del espectro de amplitud de las señales de radar obtenidas en probetas de un mismo hormigón con diferentes grados de saturación. La frecuencia central del espectro en el caso de bajo grado de saturación es de 1,5 GHz y se observa cómo, a medida que el grado de saturación aumenta, la frecuencia central disminuye. Paralelamente, se observa como disminuye el ancho de banda al aumentar el contenido de agua de las probetas (figura 3.10):

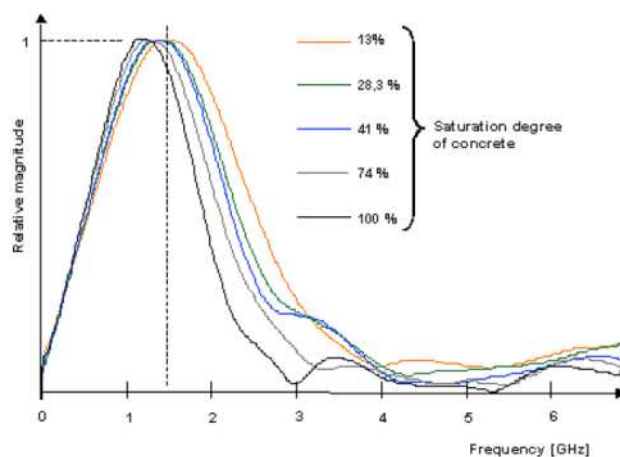


Figura 3.10: Espectros de un hormigón a distintos grados de humedad [Laurens et al., 2003].

En el campo de las aplicaciones en ingeniería de infraestructuras de transporte (tales como ferrocarriles o carreteras) es posible encontrar aplicaciones interesantes en las que se pretende determinar la permitividad dieléctrica del medio asociado que, a su vez, está relacionado con características de la infraestructura. Por ejemplo, en el caso del ferrocarril, con la contaminación del balasto por presencia de finos o en el caso de las carreteras, a la presencia de humedad en la explanada. En todos estos análisis se concluye que unos determinados valores de permitividad dieléctrica relativa y de conductividad eléctrica, pueden asociarse con la patología.

En el caso del ferrocarril, casi todos estos estudios están dedicados al análisis de la señal en el espacio temporal para asociar diferentes características de la onda con las patologías clásicas de deterioro de las plataformas ferroviarias. Algunas conclusiones interesantes de estos estudios son que el GPR, especialmente utilizando antenas de baja frecuencia, es una técnica excepcional para la determinación de la humedad bajo las capas de balasto y sub-balasto [Clark et al., 2001].

Otros estudios, se fijan también en los efectos de dichas patologías sobre el espectro de las ondas. La hipótesis principal en la que se apoyan estos trabajos es que una mayor presencia de humedad en un medio o una zona de balasto contaminado, modifican la permitividad



dieléctrica promedio del medio [Silvast et al., 2006], normalmente aumentando su valor. Este fenómeno implica una variación en la energía de la señal, que puede reflejarse en el espectro de frecuencia. En el caso particular de un aumento de permitividad dieléctrica se espera una disminución de la energía, lo que ocasiona una disminución del área bajo la curva del espectro, es decir, una reducción de su ancho de banda (figura 3.11):

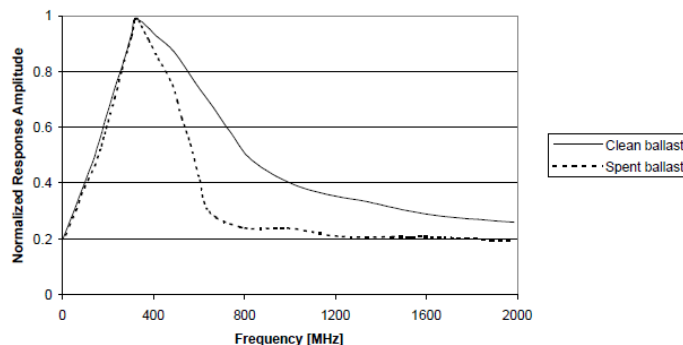


Figura 3.11: Espectros de capas de balasto limpio y contaminado [Silvast et al., 2006].

b) Modificación de la frecuencia central y del ancho de banda

En el estudio experimental de Millard et al. (2003) se determinaron las diferencias en el espectro de frecuencia de las señales de GPR obtenidas bajo condiciones de laboratorio con una antena de frecuencia central nominal próxima a 900 MHz. En el estudio se analizaron las señales que se habían propagado por medio con permitividades dieléctricas relativas y conductividades muy diferentes. El medio en uno de los ensayos era aire ($\epsilon_r \approx 1$ y $\sigma \approx 0$ S/m) y en el otro ensayo era agua ($\epsilon_r \approx 81$ y $\sigma \approx 1$ S/m). El análisis se completó con un ensayo sobre hormigón. La comparación de los tres espectros de frecuencia, cada uno relacionado con un medio diferente, permitió comprobar cómo, a medida que ϵ_r se reduce, la frecuencia central se desplaza hacia las bajas frecuencias y el ancho de banda disminuye (figura 3.12).

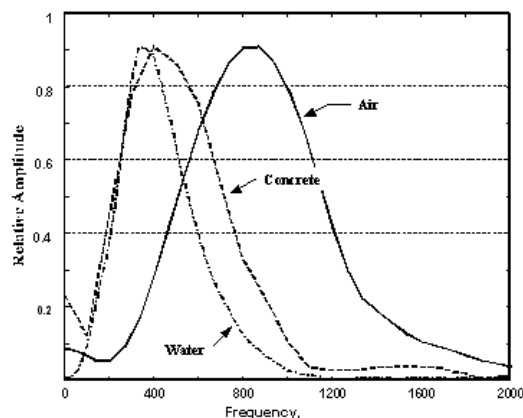


Figura 3.12: Espectros teóricos para el caso del aire, agua y hormigón [Millard et al. 2003].

Otro trabajo interesante es el publicado por Rial et al. (2009) donde se analizan las formas del espectro de la onda mediante el estudio de reflexiones en elementos característicos.

Rial, en primer lugar realiza un estudio de la onda directa (figura 3.13) en su dominio temporal (superior) y frecuencial (inferior). En ella se comprueba que el primer ciclo puede corresponder a una onda sinusoidal pura con un período aproximado de 2.2 ns. Dicho período correspondería a una frecuencia central de unos 450 MHz y un ancho de banda equivalente, medido a -10 dB; es decir, en la base del espectro.

Por otro lado, a partir de los 8 ns de doble tiempo de reflexión, la onda presenta de nuevo máximos de menor amplitud que no responden a la onda pura, sino a distintos acoplamientos asociados al pico secundario del espectro observado en torno a los 350 MHz.

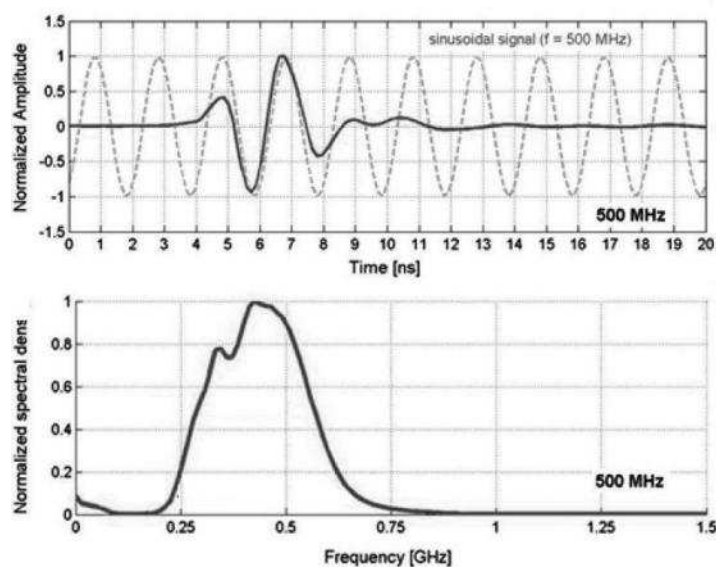


Figura 3.13: Onda directa medida al aire en sus dominios temporal (superior) y frecuencial (inferior) [Rial et al. 2009].

En segundo lugar, Rial estudia la onda reflejada sobre reflectores conocidos, delimitando la señal al tiempo de reflexión correspondiente. Dichos reflectores son: una barra metálica (M.BAR), una plancha metálica reflectora (PEC) y un tubo enterrado (PIPE). Los dos primeros reflectores están aislados y situados a una distancia conocida de la antena, mientras que el tercero está enterrado en arena.

En la figura 3.14 se presentan los diagramas resultantes solapados de los ensayos en su dominio temporal (superior) y frecuencial (inferior).

Empezando a medir la longitud de onda en los 14,5 ns en todos ellos, obtenemos el ciclo de mayor amplitud. De esta forma comprobamos que, en el caso de la barra metálica y del



reflector de chapa, la longitud de onda estaría situada en torno a los 2 ns mientras que en el caso del tubo enterrado, la longitud de onda es más elevada.

En conclusión, en todos los ensayos se comprueba la pureza de la señal reflejada sobre reflector conocido y la relación entre la longitud de onda, el ancho de banda y la frecuencia central obtenidos.

Por otro lado, en el caso de la onda propagada en la arena, el efecto de la arena como filtro de señal pasa bajas, reduce la frecuencia central y el ancho de banda de la onda asociada.

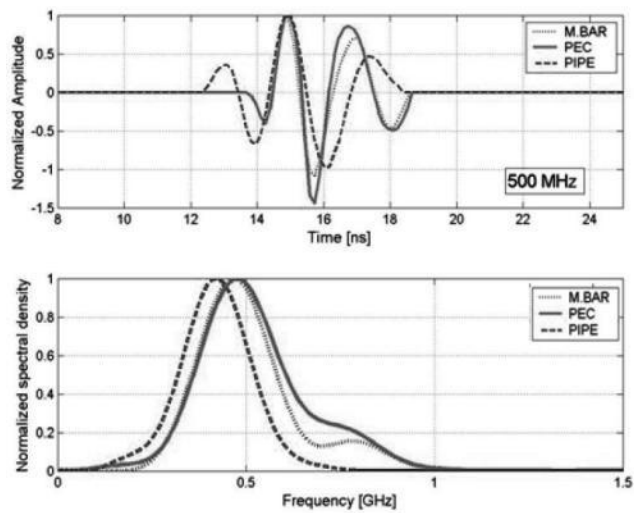


Figura 3.14: reflejada en un reflector delimitado en los dominios temporal (superior) y frecuencial (inferior) [Rial et al. 2009].

En la figura 3.15 se muestran diferentes tipos de ondas reflejadas patrón y cómo, según Rial et al. (2009), a medida que se reducen el número de ciclos de la onda directa, aumenta el ancho de banda de la señal.

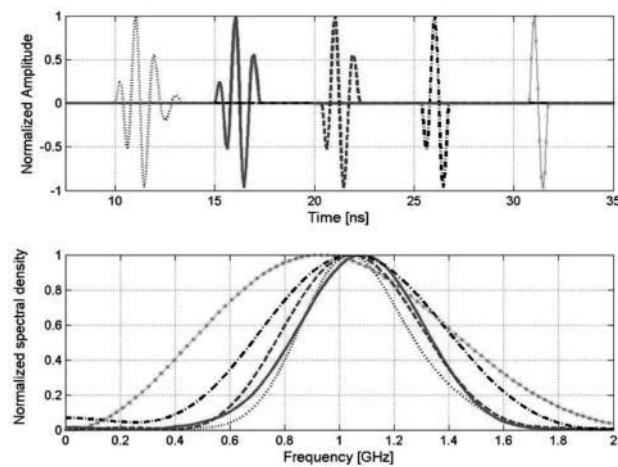


Figura 3.15: Relación entre una señal reflejada patrón y su espectro.

Finalmente, en la figura 3.16, se muestra el filtrado progresivo de una onda reflejada bajo la superficie del suelo. En él se observa cómo a medida que la onda se va filtrando, se reduce el número de picos de mayor amplitud, quedando únicamente uno que es el resultado del reflector puro.

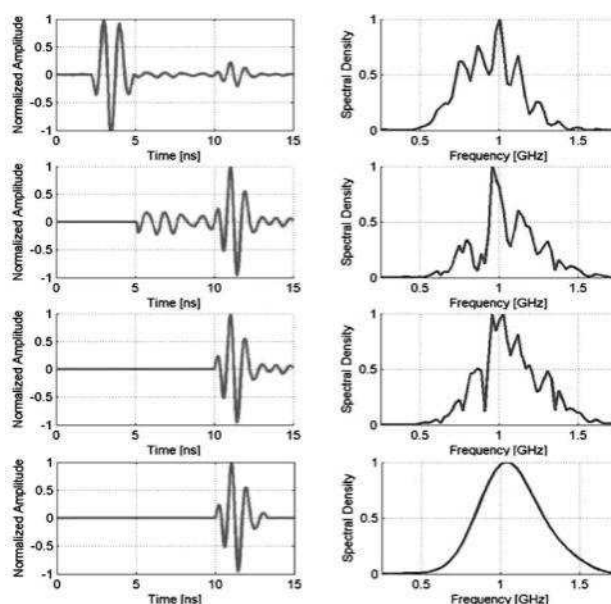


Figura 3.16: filtrado progresivo de una onda reflejada bajo la superficie del suelo

c) Análisis de la variación de la forma del espectro

A medida que un medio homogéneo se altera, disminuyendo su homogeneidad, el espectro de amplitud de la señal recibida pierde su simetría. En el trabajo de Benedetto y Tosti (2013) se utiliza esta nueva variable en un análisis estadístico para relacionar la variación de la permitividad dieléctrica con la simetría del espectro de amplitud de los radargramas. En el trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental realizado en una probeta de arena seca ($\epsilon_r \approx 3$) que va siendo progresivamente contaminada con arcilla ($\epsilon_r \approx 6$), de manera que la permitividad de la muestra va variando desde el valor inicial hasta llegar a un valor asintótico que tiende a $\epsilon_r \approx 6$.

Para este estudio se utilizan como variables estadísticas el pico de la frecuencia dominante (que es un indicador ya utilizado por diversos autores en trabajos anteriores), la varianza del conjunto de frecuencias y la asimetría de su distribución. La figura 3.17 muestra uno de los resultados de este estudio:

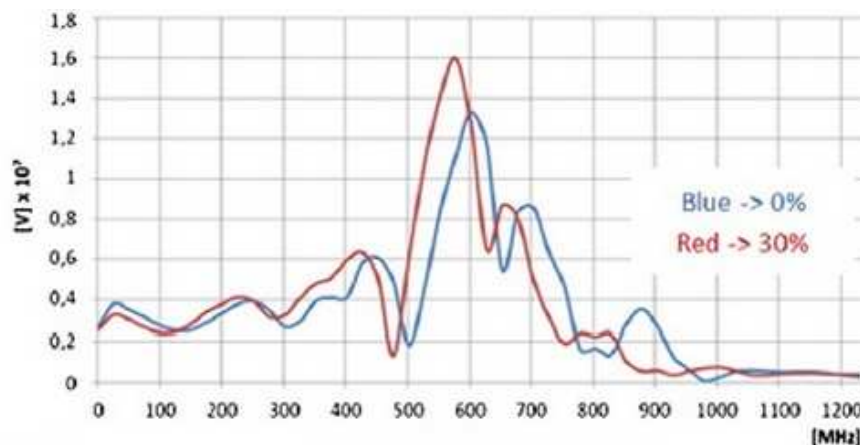


Figura 3.17: Espectros de una probeta de arena al 100% y una probeta contaminada con un 30% de arcilla [Benedetto y Tosti, 2013].

El estudio presenta unas conclusiones relevantes. Por un lado se observa, coincidiendo con trabajos previos de otros autores, que los máximos más prominentes se desplazan hacia las bajas frecuencias conforme aumenta la heterogeneidad del medio. Por otro lado los indicadores de la varianza y la asimetría se van reduciendo hasta llegar a ser casi invariables a partir del momento en el que la probeta está contaminada con un 30% de arcilla.

Finalmente, la distribución de amplitudes del espectro muestra cambios relevantes en las frecuencias alrededor de 600 MHz, valor para el que se produce el mayor máximo de amplitud, y también en, aproximadamente, los 900 MHz, frecuencia para la cual se puede considerar un límite del espectro ya que a partir de ese valor, el contenido frecuencial es inapreciable. Estos resultados sugieren la existencia de rangos de frecuencia o de longitud de onda que son sensibles a la presencia de arcillas en arenas.

Por otro lado, En el trabajo de Pedret et al. (2015) se comprobó la sensibilidad del espectro de amplitud de las señales registradas mediante GPR en el caso de estudios para el diagnóstico de patologías en firmes asfálticos. El análisis realizado se centró en la determinación de los cambios del espectro comparando el obtenido a partir de la onda directa en aire con el resultante de un registro de GPR realizado sobre varios tramos de carreteras. Las variaciones observadas en el espectro se relacionan con la proporción de elementos no deseados en el núcleo del firme (habitualmente, aire y agua), que son los que más afectan a su capacidad portante.

Este trabajo se presenta en su totalidad en el capítulo 6 del presente documento, por formar parte de la tesis doctoral.



CAPITULO IV

Calibración de antenas. Patrones de referencia

Resumen

En este capítulo se presenta un análisis comparativo entre antenas realizado a partir de una serie de ensayos sistemáticos al aire con distintas unidades de antenas de varias frecuencias centrales. Se observa cómo el espectro cambia según la antena y según las condiciones de medición (temperatura y distancia al suelo).

Las antenas utilizadas para los ensayos son antenas apantalladas de 250, 500, 800 y 1200 MHz.

Los objetivos de los ensayos de calibración al aire son los siguientes:

- *Comprobar si es posible utilizar el espectro de respuesta de la onda directa como patrón de referencia en el análisis de firmes bituminosos. El procedimiento a seguir es cuantificar la energía de emisión en distintos casos a través de los tratamientos de señal en el dominio del tiempo y en el dominio de las frecuencias.*
- *Determinación del cero, origen de las medidas. Es el instante a partir del cual se empieza a contar los incrementos de tiempos dobles de propagación para que se puedan traducir en distancias con el mínimo error posible. Este aspecto es de gran interés para la medición exacta de los espesores de capas del firme.*
- *Obtener, mediante la lectura de la onda directa, la distancia máxima entre la antena y la superficie del reflector sin que se produzca un acoplamiento de señal. Ese punto es muy importante ya que para realizar ensayos en carretera lo más adecuado es disponer la antena lo más elevada posible de la superficie de rodadura, con el fin de evitar siniestros midiendo a velocidades elevadas.*
- *Comprobación de la afectación de la temperatura ambiente en los resultados del ensayo.*



IV. CALIBRACIÓN DE ANTENAS. PATRONES DE REFERENCIA

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la serie de ensayos de laboratorio realizados en aire, con el objetivo de calibrar el equipo. En algunos de estos ensayos se ha utilizado la onda directa mediante el disparo sin un reflector cercano. En otros se ha emitido una señal hacia un reflector situado a una distancia conocida de la antena.

A efectos prácticos, se puede considerar el aire como un medio homogéneo y no absorbente, por el cual las ondas electromagnéticas se propagan con una velocidad conocida, que se puede aproximar a $c=30$ cm/ns, la velocidad de la luz en el vacío (Conyers y Goodman, 1997). Por este motivo se utiliza en primer lugar el aire como medio en el que realizar los ensayos, para poder caracterizar el comportamiento de la onda y utilizarla como referencia para ensayos más complejos asociados al uso en firmes asfálticos.

Este documento muestra los resultados obtenidos para distintas antenas apantalladas de las frecuencias: 250, 500, 800 y 1200 MHz, todas ellas distribuidas por el fabricante MALA Geoscience.

4.2 Objetivos

El objetivo general de esta serie de ensayos es realizar una calibración de las antenas, en base a una serie de registros obtenidos al aire o sobre un medio conocido en cada una de las antenas.

Los objetivos específicos son:

- Comprobar el uso del espectro de la onda directa como espectro patrón. Se analizará la repetitividad de los registros en distintas antenas de la misma frecuencia nominal en las mismas condiciones de medición.
- Determinar el cero de las medidas. Este parámetro es necesario para calcular con precisión la distancia entre dos reflectores. En el caso particular de la aplicación en carreteras, esta distancia debe permitir calcular el espesor de las capas de un firme.
- Determinar la distancia máxima entre la antena y la superficie del firme para evitar que se produzcan efectos de acoplamiento entre la onda directa y la reflejada en la propia superficie. Este fenómeno lleva implícito, además de la pérdida de calidad en la lectura de los registros, una notable pérdida de energía de refracción hacia las capas más profundas del propio firme.

4.3 Características de las antenas utilizadas

Los ensayos que se presentan en este capítulo han sido realizados con las antenas apantallas de las frecuencias nominales de 250, 500, 800 y 1200 MHz., cubriendo así casi la totalidad del rango de frecuencias comúnmente utilizados en estudios de firmes.

En la figura 4.1 se muestra la disposición sobre el vehículo tractor de todas ellas, utilizadas en los ensayos sobre firmes:



Figura 4.1: Antenas de 250 MHz (superior – izquierda), 500 MHz (superior – derecha), 800 MHz (inferior – izquierda) y 1200 MHz (inferior – derecha) utilizadas en los ensayos.

Internamente, cada antena está formada por un dipolo transductor y un dipolo receptor, así como la electrónica de antena que se encarga de coordinar la emisión y recepción de las señales. En la figura 4.2 se observan las placas con los dipolos transductor y receptor, respectivamente en una antena de 800 MHz:

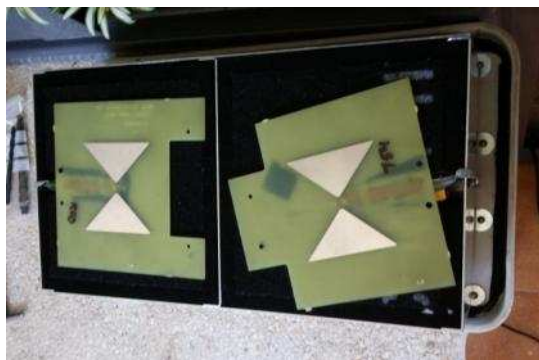


Figura 4.2: Disposición de los dipolos de una antena apantalla de 800 MHz.

Todas las antenas apantalladas del mismo fabricante tienen una arquitectura similar, siendo las dimensiones de los dipolos la variable que determina la frecuencia de emisión. En la figura 4.3 se muestra la geometría interna de una antena apantallada de 800 MHz. En ella se muestra las dimensiones de los dipolos y la distancia, d , entre los dipolos que es de unos 12 cm. Dicha distancia afecta directamente a la diferencia de tiempo de recepción entre la onda directa (t_1) y la onda reflejada (t_2).

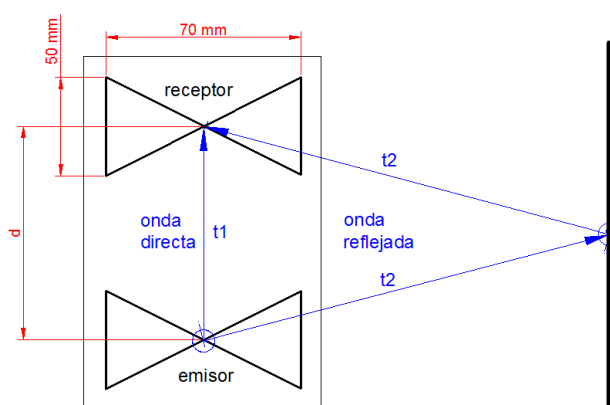


Figura 4.3: Esquema de las ondas directa y reflejada en una antena de GPR de 800 MHz.

En el trabajo de Rial, et al. (2009), se realiza una calibración de una antena de 500 MHz de características similares a las utilizadas en este documento. La distancia entre dipolos es de 18 cm. y las dimensiones de los dipolos son mayores, que las de la antena de 800 MHz.

4.4 Obtención del espectro de emisión. Medición de la onda directa

Cada antena de GPR emite pulsos con un contenido frecuencial que le es propio. Durante la propagación de la señal por el medio, el contenido frecuencial cambia porque el medio actúa como un filtro paso-bajas. Para determinar en qué medida ocurre este fenómeno debe analizarse el contenido frecuencial de la onda recibida, comparándolo con el de la señal emitida, observando de este modo los rangos de frecuencias absorbidas por el medio.

Para estudios de conservación de carreteras donde el factor de la evolución temporal es clave para determinar su comportamiento, es necesario realizar estudios donde la repetitividad y reproducibilidad de los ensayos a lo largo del tiempo estén garantizadas.

Por este motivo, es necesario comprobar si todas las antenas de una misma serie y fabricante emiten por igual.

Para ello se han sometido a estudio varias antenas de distintas frecuencias. La siguiente tabla resume las antenas consideradas:

Antena	Número de serie	Frecuencia (MHz)
1	36052	250
2	11584	500
3	11831	500
4	12098	500
5	15260	500
6	11540	800
7	14114	800
8	20323	1200
9	26377	1200

Tabla 4.1: Relación de antenas utilizadas en los ensayos.

En primer lugar se presentan las ondas directas registradas de cada una de las antenas, en su dominio temporal y frecuencial, agrupadas por frecuencias nominales según el fabricante.

El dispositivo de ensayo consiste en una la antena direccionada hacia un espacio libre de reflectores a su alcance, un apoyo para evitar vibraciones externas y en un contador electrónico con disparador (trigger). De esta manera, tan sólo se registra la onda directa que se ha propagado entre el dipolo emisor y el dipolo receptor “ t_1 ” (figura 4.3).

El resultado de un ensayo ideal consistiría en un registro con una única onda recibida, constante durante todo el tiempo que dure la medición.



4.4.1 Parámetros de medición

a) Dominio temporal

En los registros en dominio temporal se representa la señal en función de tres parámetros: la longitud de onda (λ), el número de ciclos (N) y la amplitud de onda (A).

La longitud de onda (λ) es la separación entre dos puntos consecutivos de una misma onda que tienen la misma fase, es decir, puede determinarse como la distancia entre dos ceros, dos valles o dos crestas consecutivas de la onda.

La amplitud de onda (A) es la medida del desplazamiento máximo y, por lo tanto, se corresponde con la distancia entre el máximo de la onda y el cero. Este parámetro es proporcional a la energía de la señal.

La unidad de medida de la amplitud de una onda electromagnética suele ser el mili voltio (mV). Los equipos de radar transforman la señal digital en analógica para representar los valores de muestreo de la señal. En el caso del equipo usado, el sistema incluye un conversor analógico-digital A/D de 16 bits: 15 de ellos son para el muestreo de la onda y el 16^{avo} para el signo, pudiendo ser éste positivo o negativo. Es decir, la amplitud de onda se muestrea sobre los valores comprendidos entre 32768 y -32768.

En esta tesis, con el fin de evitar confusiones de unidades, se realizarán comparaciones entre amplitudes de onda relativas al valor máximo y, por lo tanto, representándose entre los valores máximo y mínimo de 1 y -1.

b) Dominio frecuencial

En el dominio frecuencial se representa el contenido de frecuencias de una determinada señal. La representación se realiza mediante el espectro de frecuencias, una gráfica en la que se muestra la amplitud de cada frecuencia que forma parte de una señal, habitualmente medidas en decibelios. El espectro se suele caracterizar por su frecuencia central dominante (f_c) y por su ancho de banda (BW), que se mide, por lo general a -3 dB.

La frecuencia es la magnitud física que mide las veces por unidad de tiempo en que se repite un ciclo de una señal periódica. El ancho de banda de una señal monofrecuencial tendería a cero. En general, una señal periódica tiene componentes en varias frecuencias, de manera que su ancho de banda podrá definirse en función a dichas componentes y su variación temporal dependerá también de ellas. En la figura 4.4 se muestra la descomposición de una onda en distintas frecuencias.

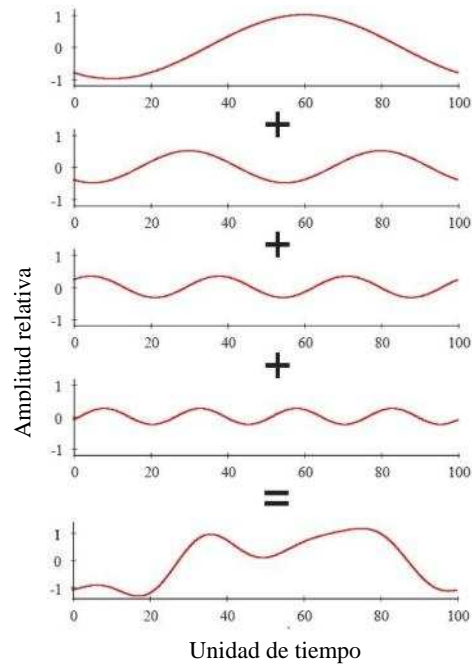


Figura 4.4: Descomposición de una onda compleja en frecuencias fundamentales.

A partir del espectro de amplitud se puede obtener el espectro de potencia, ya que la amplitud al cuadrado es proporcional a la potencia de la señal. El ancho de banda de los espectros de potencia se determina mediante las frecuencias de corte que permiten tener la potencia mitad. Estas frecuencias de corte están situadas a 3 dB. Esto puede obtenerse mediante un filtro paso banda, considerando los puntos para los cuales la amplitud de la frecuencia presenta un valor 3 dB menor que el correspondiente al máximo. Es decir, el ancho de banda se obtiene midiendo a la diferencia de frecuencias entre los puntos Z_1 y Z_2 (figura 4.5). Dicho valor corresponde a la máxima amplitud dividido entre la raíz cuadrada de 2 [Rao, 2009].

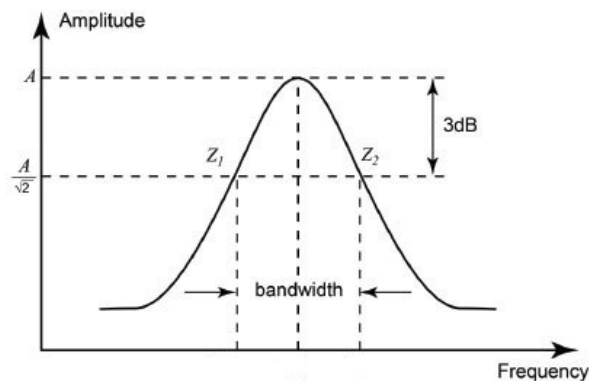


Figura 4.5: Modelo de función normal con el ancho de banda medido a -3dB [Rao, 2009].



4.4.2 Antena de frecuencia nominal de 250MHz

Para calibrar las antenas de frecuencia nominal de 250 MHz, únicamente se ha considerado un caso ya que es una antena de uso poco habitual en estudios de firmes (antena 1, según la tabla 4.1).

A continuación se muestran los resultados del ensayo en el aire: el espectro y diagrama temporal de la onda directa (figura 4.6):

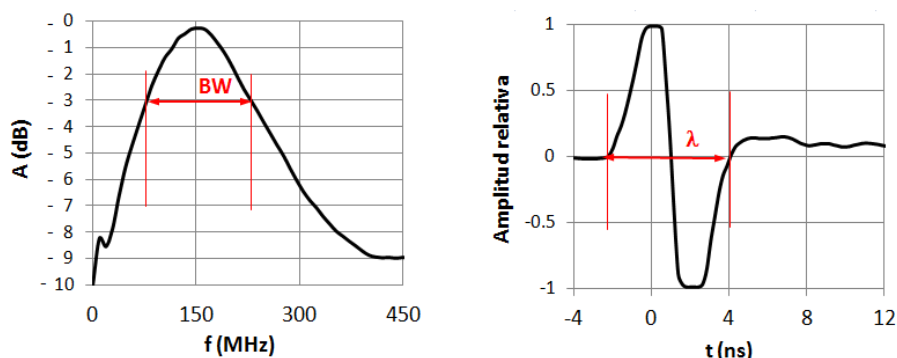


Figura 4.6: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) correspondiente a la antena 1.

De los resultados se extrae que la frecuencia central (f_c) de la antena se sitúa en los 150 MHz, con un ancho de banda (BW) a -3 dB también de unos 150 MHz.

La longitud de onda del primer ciclo es de unos 6,5 ns. Asumiendo que la resolución de una antena es de $\lambda/4$, y una velocidad de propagación de onda promedio en un firme asfáltico de unos 10 cm/ns, la resolución vertical en dicho medio será entorno a los 16 cm.

En la tabla 4.2 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos para la antena 1:

Antena	f_c (MHz) = $\frac{1}{\lambda}$	BW (MHz)	λ primer ciclo (ns)	Resolución vertical $R_v = \frac{\lambda}{4} * v$ (cm)	N
1	150	150	6,5	16	1

Tabla 4.2: Parámetros obtenidos de la onda directa en la antena 1.

4.4.3 Antenas de frecuencia nominal de 500MHz

Para el estudio de antenas de frecuencia nominal de 500 MHz se han analizado un conjunto de 4 unidades. Este tipo de antena es muy habitual en ensayos para determinar el estado de la sub-rasante hasta una profundidad de unos 120 cm. y más en particular, para la identificación de variables de respuesta típica como la permitividad dieléctrica relativa, asociada a la velocidad de propagación de onda.

a) Resultados

Para el estudio, se ha considerado un total cuatro casos (antenas 2, 3, 4 y 5 según la tabla 4.1), con el fin de tener un amplio espectro de representación de esta antena. En las figuras 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran los resultados de los ensayos realizados en todas ellas, mediante su representación en el espacio frecuencial (izquierda) y temporal (derecha):

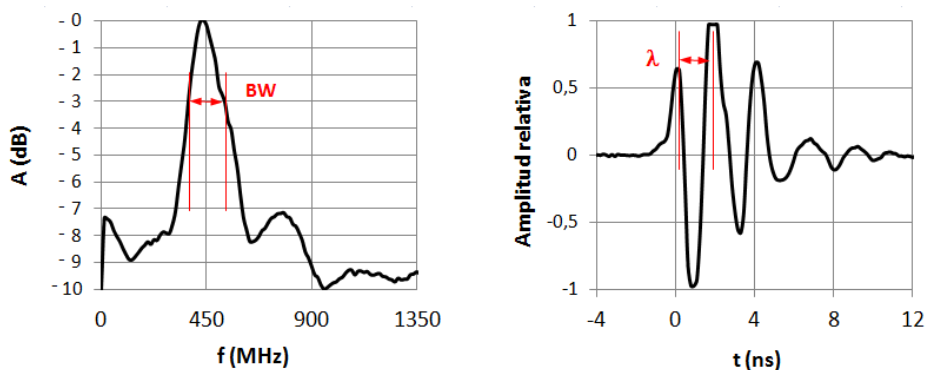


Figura 4.7: Espectro y onda directa en la antena 2.

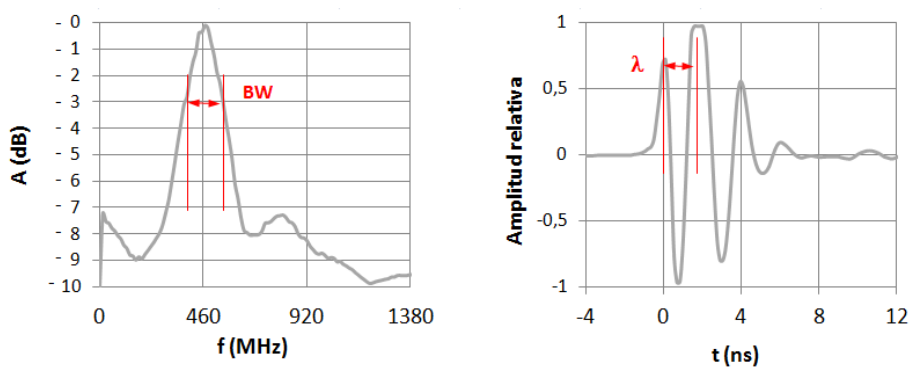


Figura 4.8: Espectro y onda directa en la antena 3.

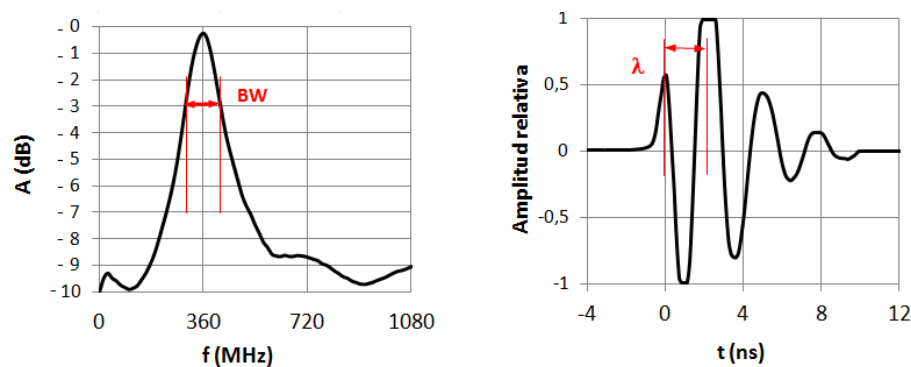


Figura 4.9: Espectro y onda directa en la antena 4.

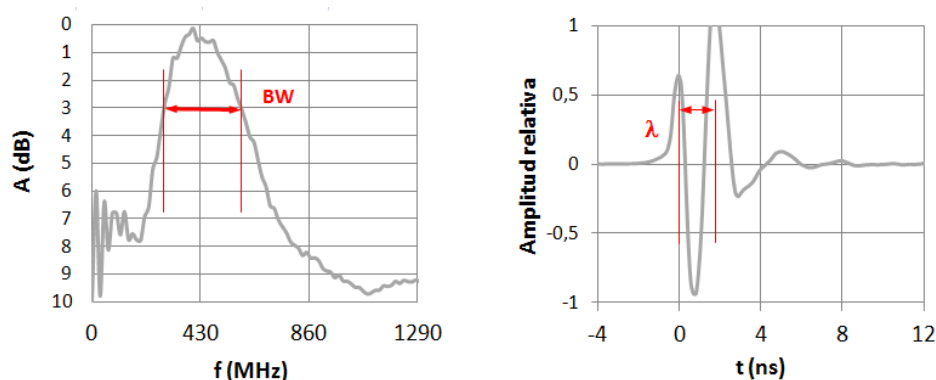


Figura 4.10: Espectro y onda directa en la antena 5.

En las figuras 4.7 a 4.10 se observa como las distintas antenas, a priori de características equivalentes, han generado ondas directas con un espectro distinto. Por un lado, las antenas 2 y 3 tienen un espectro bastante similar, tanto en frecuencia central como en ancho de banda, mientras que las antenas 4 y 5 son diferentes. Por un lado la antena 4 con una frecuencia central anormalmente baja (360 MHz) y por otro, la antena 5 con un ancho de banda anormalmente elevado (310 MHz). Este fenómeno provoca que la antena 4 presente una longitud de onda más amplia (2,7 ns), mientras que la antena 5 presenta un número de ciclos más reducido (2).

En la tabla 4.3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, junto con la resolución vertical teórica aproximada calculada para cada antena en un medio de asfalto:

Antena	f_c (MHz) = $\frac{1}{\lambda}$	BW (MHz)	λ primer ciclo (ns)	Resolución vertical $R_v = \frac{\lambda}{4} * v$ (cm)	N
2	450	160	2,2	4,75	4
3	460	160	2,1	4,5	3
4	360	120	2,7	5,5	4
5	430	310	2,3	5,0	2

Tabla 4.3: Parámetros obtenidos de la onda directa en las antenas 2, 3, 4 y 5.

b) Comparación de los espectros de la onda directa

En este apartado se comparan, dos a dos, las antenas 2 y 3, por un lado, y 4 y 5 por otro.

En la figura 4.11 se observa el resultado de superponer los espectros correspondientes a las antenas 2 y 3 (izquierda) en valores de amplitud absolutos. Puede verse que la única diferencia apreciable entre ellas se sitúa a partir de los 900 MHz y se corresponde con una amplitud casi nula en el rango de frecuencias entorno a los 1000 MHz en el caso de la

antena 2, a diferencia de la amplitudes observadas para la antenna 3. Este fenómeno observado en el espacio frecuencias se corresponde con el pequeño incremento del número de ciclos y del período en la señal correspondiente a la antenna 2 (Figura 4.11, derecha).

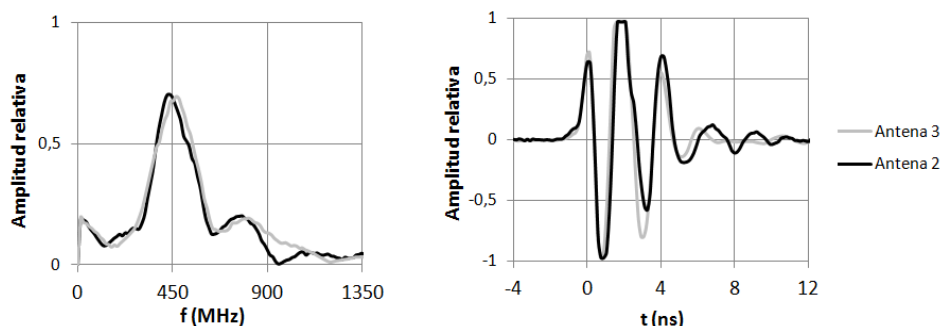


Figura 4.11: Espectros (izquierda) y ondas directas (derecha) de las antenas 2 y 3.

En la figura 4.12 se observa el resultado de superponer los espectros correspondientes a las antenas 4 y 5 en valores de amplitud absolutos. En este caso se contraponen dos antenas con un comportamiento muy distinto. Por un lado la antenna 4 con una elevada amplitud de onda y poca anchura de banda, y por otro la antenna 5 con poca amplitud de onda y gran ancho de banda.

En los diagramas de amplitudes de onda (Figura 4.12, derecha) se observa que para la antenna 4 se obtienen registros que presentan un número de ciclos mayor con mayores amplitudes de onda (se ha saturado el registro), lo representa una potencia mayor que la asociada con la antenna 5.

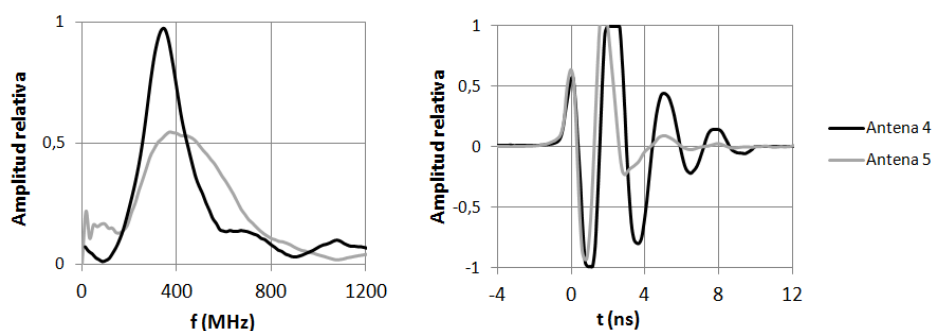


Figura 4.12: Espectros (izquierda) y ondas directas (derecha) de las antenas 4 y 5.

4.4.4 Antenas de frecuencia nominal de 800MHz

Para el estudio de antenas de frecuencia nominal de 800 MHz se han analizado 2 antenas (las antenas número 6 y 7 en la tabla 4.1). Estas antenas se utilizan habitualmente en ensayos para determinar espesores de materiales de firmes, sin discriminar capas de asfalto, hasta una profundidad de unos 80 cm.



a) Resultados

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados con las antenas 6, (figura 4.13) y 7 (figura 4.14). En estos resultados se puede analizar la onda directa mediante su representación en el espacio temporal y su espectro de amplitudes:

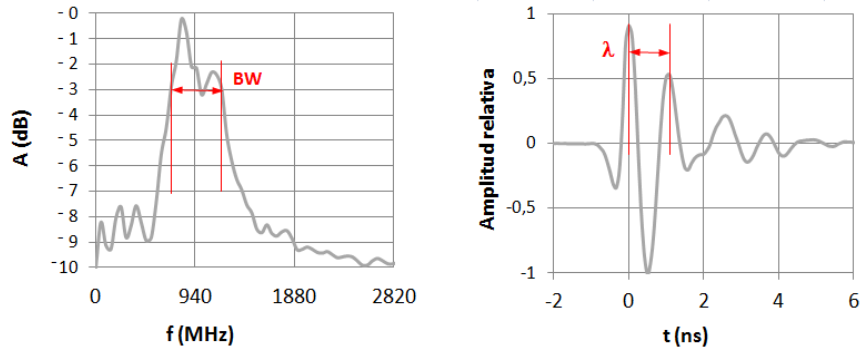


Figura 4.13: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) de la antena 6.

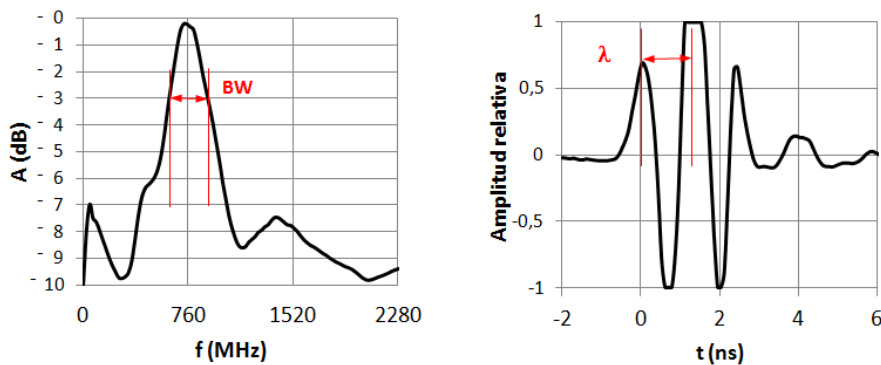


Figura 4.14: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) de la antena 7.

En las dos figuras 4.13 y 4.14 se observa como las dos antenas se comportan también de distinta manera. Por un lado la onda que se corresponde a la antena 6 tiene una frecuencia central más elevada (940 MHz) y un ancho de banda muy amplio (470 MHz). Por otro lado la onda correspondiente a la antena 7 se caracteriza por una frecuencia central más baja (760 MHz) y un ancho de banda también más pequeño (280 MHz).

En la tabla 4.4 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de los diferentes parámetros de medida de la onda. Al igual que en el caso de las antenas de 500 MHz, se comprueba que un ancho de banda mayor permite reducir el número de ciclos en la onda directa y, por tanto, detectar anomalías más próximas entre ellas:

Antena	$f_c \text{ (MHz)} = \frac{1}{\lambda}$	BW (MHz)	λ primer ciclo (ns)	Resolución vertical $Rv = \frac{\lambda}{4} * v \text{ (cm)}$	N
6	940	470	1,0	2,5	3
7	760	280	1,2	3,0	4

Tabla 4.4: Parámetros obtenidos de la onda directa en las antenas 6 y 7.

b) Comparación de los espectros de la onda directa

En la figura 4.15 se observa el resultado de superponer los espectros de onda de las antenas 6 y 7 en la misma escala de amplitudes (figura 4.15, izquierda) donde se comprueba la diferencia en el ancho de banda de cada uno de ellos. Por otro lado, en los diagramas de amplitud de onda (figura 4.15, derecha) se observa que la antena 7 presenta un número de ciclos y amplitudes de onda mayores, lo que indica que presenta una potencia mayor que la de la antena 6.

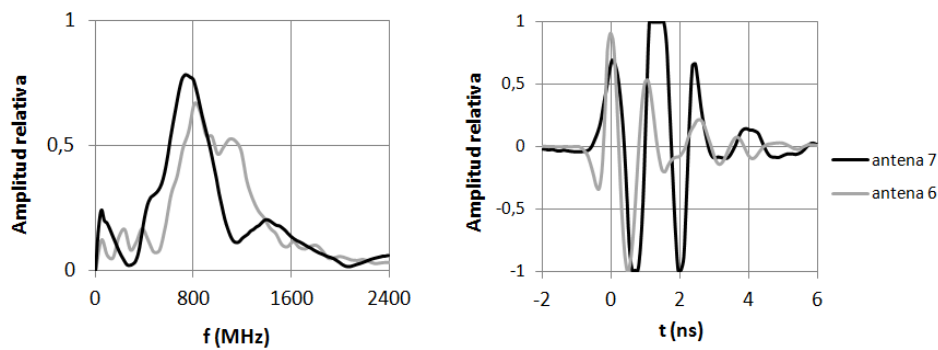


Figura 4.15: Espectros (izquierda) y ondas directas (derecha) de las antenas 6 y 7.

4.4.5 Antenas de frecuencia nominal de 1200MHz

Para el estudio de antenas de frecuencia nominal de 1200 MHz se ha analizado dos antenas (la antena número 8 y 9). Las antenas de esta frecuencia son muy habituales en ensayos para determinar espesores de materiales de firmes, discriminando capas de asfalto, hasta una profundidad de unos 60 cm.

A diferencia del resto de antenas, su diseño impide situarla alejada de la superficie del firme, tal y como se ve en este capítulo. La causa es la corta distancia que separa los dipolos emisor y receptor que genera acoplamientos de onda indeseados en el momento que se aleja de la primera superficie reflectora.



a) Resultados

A continuación se muestran los resultados del ensayo en el aire de las antenas 8 (figura 4.16) y 9 (figura 4.17). En ellos se compara la onda directa y su espectro de amplitudes:

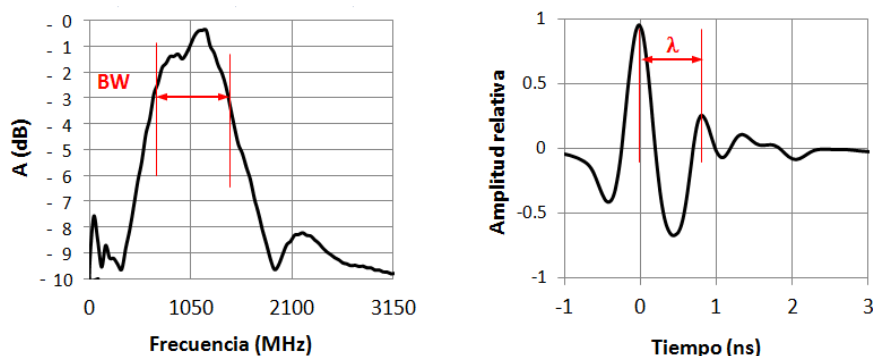


Figura 4.16: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) de a la antena 8.

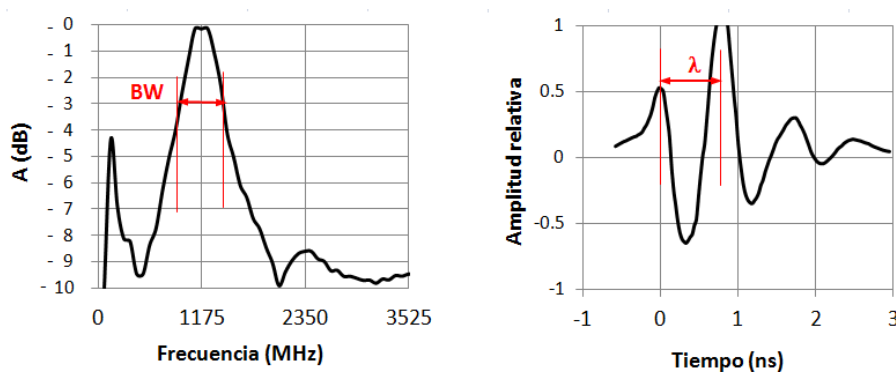


Figura 4.17: Espectro (izquierda) y onda directa (derecha) de la antena 9.

En las dos figuras 4.16 y 4.17 se observa como la dos antenas de comportan también de distinta manera. Por un lado la onda que se corresponde a la antena 8 tiene una frecuencia central más baja (1050 MHz) y un ancho de banda muy amplio (800 MHz). Por otro lado la onda correspondiente a la antena 9 se caracteriza por una frecuencia central más alta (1175 MHz) y un ancho de banda más pequeño (550 MHz).

En la tabla 4.5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, junto con la resolución vertical aproximada de la antena en un medio de asfalto para las antenas 8 y 9:

Antena	$f_c \text{ (MHz)} = \frac{1}{\lambda}$	BW (MHz)	λ primer ciclo (ns)	Resolución vertical $R_v = \frac{\lambda}{4} * v$ (cm)	N
8	1050	800	0,9	2,0	2
9	1175	550	0,7	1,5	3

Tabla 4.5: Parámetros obtenidos de la onda directa en las antenas 8 y 9.

b) Comparación de los espectros de la onda directa

En la figura 4.18 se observa el resultado de superponer los espectros de onda de las antenas 8 y 9 en la misma escala de amplitudes (figura 4.18, izquierda), donde se comprueba la diferencia en el ancho de banda de cada uno de ellos. Por otro lado, en los diagramas de amplitud de onda (figura 4.18, derecha) se observa que la antena 9 presenta un número de ciclos de onda mayores, siguiendo la tendencia observada en el resto de antenas estudiadas.

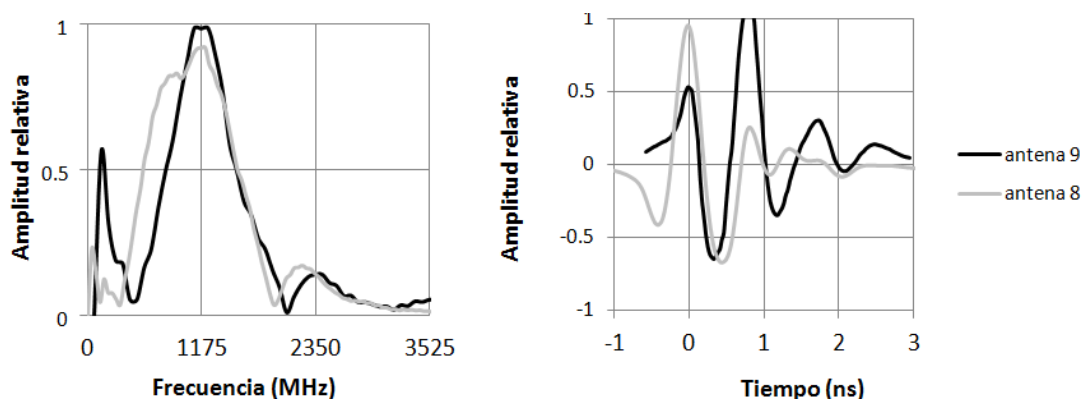


Figura 4.18: Espectros (izquierda) y ondas directas (derecha) de las antenas 8 y 9.

4.5 Variaciones del espectro a lo largo del tiempo de una antena

Otro de los aspectos a tener en consideración durante la comparación de estudios realizados para la conservación de firmes es la repetibilidad del resultado del espectro de una misma antena a lo largo del tiempo; es decir, si es suficiente considerar un solo espectro al aire durante toda la vida útil de una antena o, por el contrario, dicho espectro puede sufrir modificaciones.

Este aspecto es clave ya que el análisis de las variaciones del espectro es fundamental para la interpretación de la evolución de los firmes a lo largo de su vida útil.

Para ello se ha realizado el ensayo de calibración de antena mediante la obtención de la onda directa en un espacio de separación de unos tres años, con antenas que han sufrido intensos períodos de trabajo. Dichos ensayos han sido realizados con las antenas 5 y 6, las cuales se ha podido asegurar la repetibilidad de las condiciones de ensayo, en fechas claras y en puntos alejados de posibles fuentes de ruido electromagnético.

Las fechas de los ensayos realizados y la puesta en servicio de cada una de las antenas se resumen en la siguiente tabla:



Antena	Frecuencia nominal	Puesta en servicio	Ensayo 1	Ensayo 2
5	500	Junio 2008	7 agosto 2012	24 marzo 2015
6	800	Abril 2004	7 agosto 2012	24 marzo 2015

Tabla 4.6: Antenas utilizadas en la comparativa de espectros a lo largo del tiempo.

4.5.1 Antena de 500 MHz

En la figura 4.19 se observa el resultado de superponer los dos espectros de la onda correspondiente a la antena 5 en amplitud absoluta (Figura 4.19, izquierda). Los ensayos se han realizado con una diferencia aproximada de unos 3 años (2012 y 2015). Aunque la diferencia en el espectro podría estar también influenciada por las condiciones atmosféricas en el momento del ensayo, se observan notables diferencias que pueden tener causas diversas. En el caso del espectro del 2015, se observa una apreciable reducción del ancho de banda, aunque no de la amplitud de onda. Este hecho podría deberse a una atmósfera más húmeda, condicionando únicamente el último ciclo, donde parece observarse un cambio de polaridad a los 4 ns (Figura 4.19, derecha) que puede deberse a la presencia de interferencias indeseadas en el ensayo.

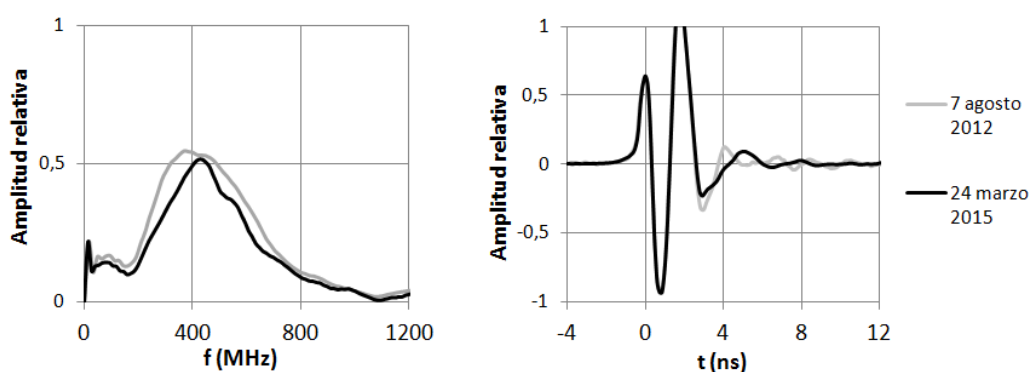


Figura 4.19: Espectros (izquierda) y diagramas de amplitudes (derecha) de la onda directa de la antena 5, tomadas en las fechas 7 de agosto 2012 y 24 de marzo 2015.

4.5.2 Antena de 800 MHz

En la figura 4.20 – izquierda, se observa el resultado de superponer dos espectros de la antena 6 en valores (valores de la amplitud relativos al valor máximo). Su evolución sigue la línea del ensayo realizado con la antena de 500 MHz, presentando una apreciable reducción de frecuencia central y amplitud de onda en el mismo período. Esta diferencia condiciona a

las amplitudes de onda observadas en todos los ciclos de la onda directa, de una forma apreciable (derecha):

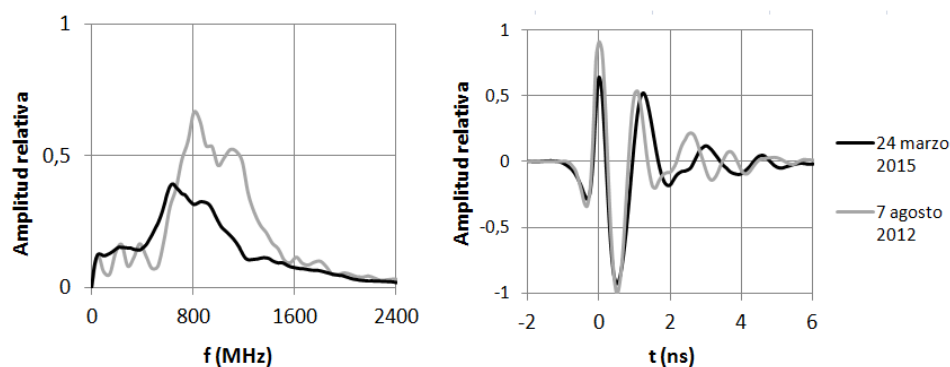


Figura 4.20: Espectros (izquierda) y diagramas de amplitudes (derecha) de la onda directa de la antena 6, tomadas en las fechas 7 de agosto 2012 y 24 de marzo 2015.

Esta mayor diferencia entre espectros, podría deberse a la antigüedad de la antena y a su intenso uso, que hace que se encuentre en su umbral de vida útil.

4.6 Distancia máxima entre la antena y la superficie del firme

Las antenas de GPR pueden ser de tres tipos: antenas de acoplamiento con la superficie del medio (*ground-coupled antennas*), antenas cónicas aéreas (*air-launched antennas*) y antenas para sondeos (*borehole antennas*). Todas las antenas utilizadas en esta tesis son apantalladas del primer tipo; es decir, antenas de acoplamiento con el medio. El diseño de estas antenas apantalladas tradicionales está pensado para acoplar la antena a la superficie de medición, de manera que la mayor parte de la señal penetra en el medio que se quiere estudiar. La mayoría de fabricantes de esta tipología de antenas, recomiendan acercar lo máximo posible la antena a la superficie del pavimento [Butler, 2005].

En la figura 4.21 de la izquierda, se representa el efecto de la presencia de un medio transparente como el aire, intercalado entre la antena y el medio donde se desea medir. La figura muestra la pérdida de energía electromagnética, generando un diagrama de onda reflejada sin información asociada al medio.

Por otro lado, en la figura 4.19 de la derecha, se representa el efecto de realizar mediciones en contacto directo al medio a medir, por lo general, un pavimento o suelo. En este caso, el diagrama resultante sí recoge información de medio por donde se propaga.

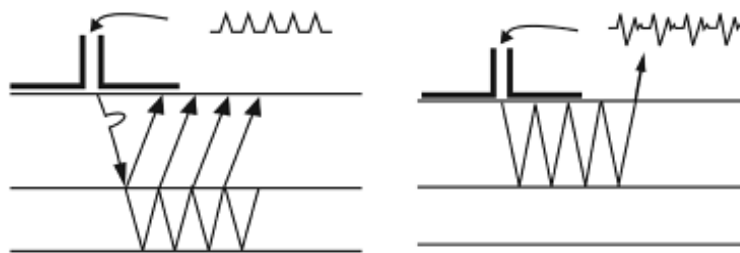


Figura 4.21: Representación de la medición con GPR en presencia de un medio transparente intercalado entre la antena y el medio a medir (izquierda) y en contacto directo con el medio (derecha). [Butler, 2005].

Con el objetivo de acercar la antena a la superficie del pavimento en el estudio de firmes, algunos fabricantes proponen carritos transportadores donde pueden instalarse diferentes antenas apantalladas. En el caso de MALA Geoscience, antenas con frecuencias desde 2,3 GHz hasta 250 MHz. En la figura 4.22 se muestra la propuesta de carrito.



Figura 4.22: Carrito propuesto por MALA Geoscience para el transporte de antenas de GPR.

Esta solución, aunque presenta la ventaja de permitir un acople casi total con la superficie del firme, es muy vulnerable a los defectos de las carreteras tales como baches, parcheos, juntas de dilatación de puentes, etc., poniendo en riesgo el equipo de medida, en especial en superficies de asfalto irregulares.

Otra opción más simple propuesta también por el mismo fabricante es instalar la antena deseada lo más cerca de la superficie colgada del vehículo, sin carrito. En la figura 4.23 se muestra un ejemplo de una antena de alta frecuencia colgada de la puerta del vehículo.



Figura 4.23: Antena de alta frecuencia de MALA Geoscience, en la puerta del vehículo.

Esta solución, aunque es más segura para el equipo de medición, presenta el problema de la existencia de una superficie de aire de un espesor considerable, entre la antena y la superficie del pavimento.

A continuación se presentan los resultados de un ensayo experimental para comprobar la distancia máxima a la que puede instalarse sobre un vehículo, sin producir acoples y minimizar el efecto de dispersión de onda producido por la distancia entre la antena y la superficie del firme. Para ello se han utilizado dos de las antenas apantalladas más típicas de medición de firmes asfálticos: la antena de 800 MHz y la antena de 1200 MHz.

Esta distancia deberá ser un valor de compromiso sabiendo que la mejor distancia es cero para obtener mejores señales, pero que, la que asegura la integridad del equipo de medición es la más alta posible.

El ensayo consiste en situar las antenas apantalladas en un rango de alturas, empezando por la más elevada y reduciéndose progresivamente hasta llegar a la superficie del suelo. A medida que la distancia hasta el suelo se va reduciendo, se comprueba la onda generada en el espacio temporal, así como su espectro.

En la figura 4.24 se muestra el dispositivo de soporte utilizado para las mediciones, que es apto tanto para la antena de 800 MHz como para la antena de 1200 MHz. En tipo de soporte está diseñado para variar la altura de medición con gran facilidad:



Figura 4.24: Dispositivo de soporte para el uso de varias antenas con altura variable.

El intervalo de paso de alturas del soporte es de 3 cm, con un máximo de 24 cm y un mínimo de 0 cm, arrastrando la antena por el suelo, tal y como se muestra en la figura 25:



Figura 4.25: Intervalos de medición a distintas alturas

4.6.1 Caso 1: Determinación de la altura de ensayo con la antena de 800 MHz

En la figura 4.26 se presentan los registros que se han obtenido en distintas alturas en los dominios frecuencial (izquierda) y temporal (derecha). En el caso de la antena de 800 MHz se considera una altura de ensayo máxima de 21 cm mientras que la mínima es de 6 cm.

Tanto en el dominio temporal como en el frecuencial, la onda y el espectro dibujados en tono gris muestran los resultados del ensayo de la antena al aire (onda directa), mientras que la onda y el espectro dibujados en tono negro muestran los resultados en ensayo en cada una de las alturas consideradas en el ensayo.

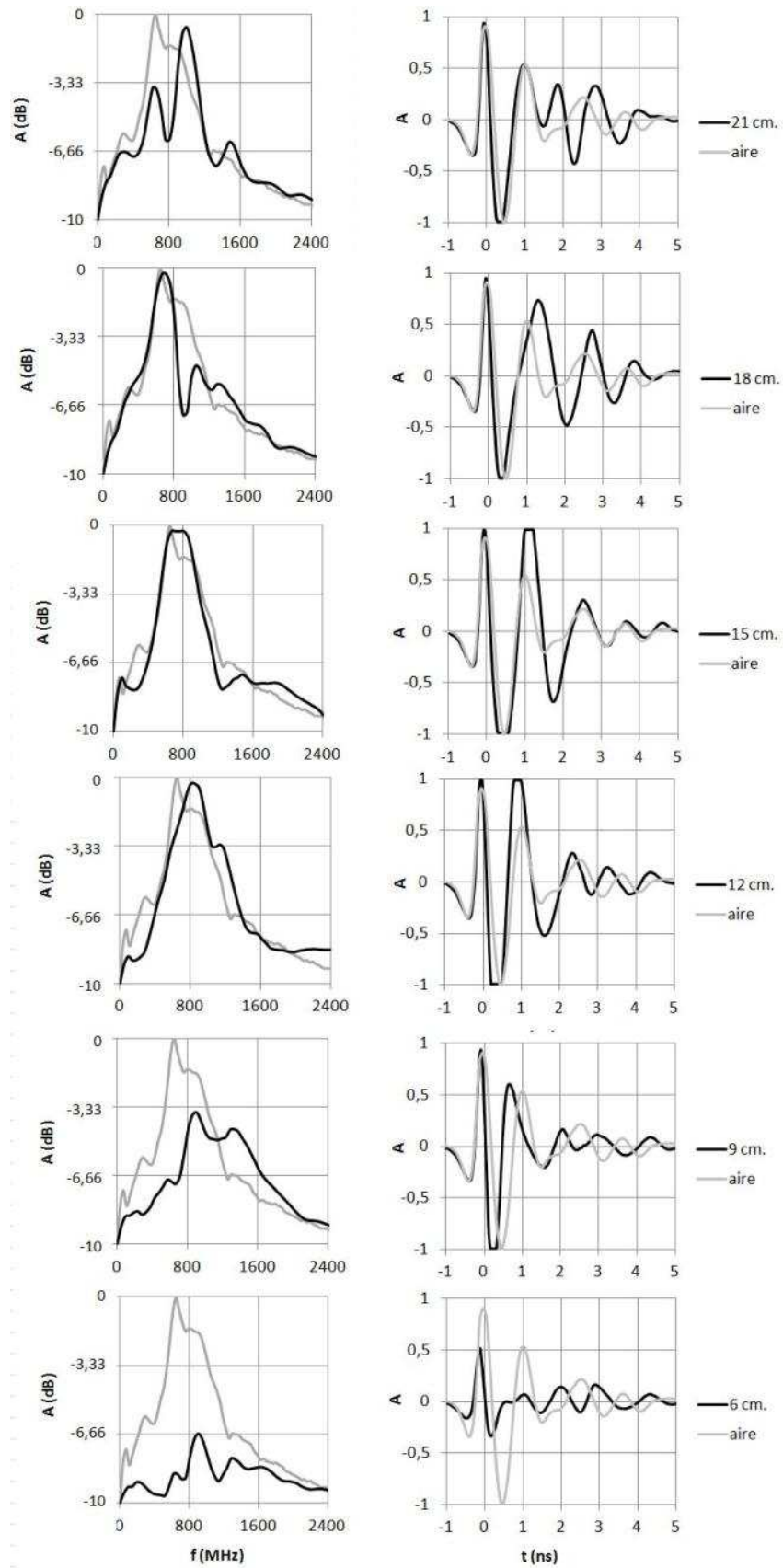


Figura 4.26: Dominios temporal y frecuencial en distintas alturas para la antena de 800MHz.



a) Dominio temporal

En la tabla 4.7 se muestra el resumen de resultados obtenidos mediante el ensayo. En ella se muestra, en primer lugar, la altura de ensayo. A continuación el tiempo de reflexión observado y, finalmente, si se produce acople o no de la onda reflejada con la onda directa.

Para ello cabe considerar que, en las zonas de acople, el tiempo de reflexión es aproximado ya que el pico de máxima amplitud donde se mide el tiempo, puede estar ligeramente desplazado debido al efecto del acople la onda directa. Este fenómeno se observa claramente a las alturas de ensayo de 12 y 15 cm.

altura antena (cm)	tiempo de reflexión (ns)	Efecto de acoplamiento SI / NO
21	1,9	NO
18	1,4	LÍMITE SI / NO
15	1,2	SI
12	0,9	SI
9	0,6	NO
6	-	NO

Tabla 4.7: Resultados obtenidos en el dominio del tiempo para la antena de 800 MHz.

De la tabla y las gráficas, se comprueba que, por encima de los 18 cm, la onda directa y la reflejada pueden distinguirse perfectamente por separado. Sin embargo, por debajo de los 18 cm hasta los 12 cm., ambas ondas producen un acoplamiento constructivo. El resultado es una onda de amplitud anormalmente elevada. Por debajo de los 12 cm, la amplitud de onda reflejada se reduce a un valor asociado a la constante dieléctrica del material reflector.

b) Dominio frecuencial

En el dominio de las frecuencias, se observa el espectro generado en cada una de las alturas. Llama la atención el comportamiento, muy variable en función de la altura del ensayo. Su evolución se resume en la tabla 4.8:

altura antena (cm)	Comportamiento del espectro
21	Destacan dos picos de máxima amplitud a 700 MHz y 900 MHz. El pico de mayor amplitud es el situado en torno a los 900 MHz
18	Se observan los dos mismos picos. Sin embargo, el de mayor amplitud pasa a ser el situado a 700 MHz.
15	Acoplamiento de picos con amplitud máxima cercana a los 700 MHz
12	Acoplamiento de picos con amplitud máxima en desplazamiento hacia frecuencias más elevadas
9	Aparecen de nuevo dos picos de 800 y 1300 MHz respectivamente, con amplitudes claramente inferiores a las registradas por la onda directa.
6	Los dos nuevos picos observados, pierden mucha amplitud, debido a la mayor absorción de energía por el medio.

Tabla 4.8: Resultados obtenidos en el dominio frecuencial para la antena de 800 MHz.

4.6.2 Caso 2: Determinación de la altura de ensayo con la antena de 1200 MHz

En la figura 4.27 se presentan los registros que se han obtenido en distintas alturas en los dominios frecuencial (izquierda) y temporal (derecha). En el caso de la antena de 1200 MHz se considera una altura de ensayo máxima de 21 cm mientras que la mínima es de 6 cm.

a) Dominio temporal

En la tabla 4.9 se muestra el resumen de resultados obtenidos mediante el ensayo. Al igual que en el caso anterior, se muestra la altura de ensayo, el tiempo de reflexión observado y si se produce acople o no de la onda reflejada con la onda directa.

En la tabla 4.9 se muestra el resumen de resultados obtenidos mediante el ensayo.

altura antena (cm)	tiempo de reflexión (ns)	Efecto de acoplamiento SI / NO
21	1,6	NO
18	1,3	NO
15	1	LIMITE SI / NO
12	0,9	SI
9	0,8	SI
6	0,27	NO

Tabla 4.9: Resultados obtenidos en el ensayo con la antena de 1200 MHz.

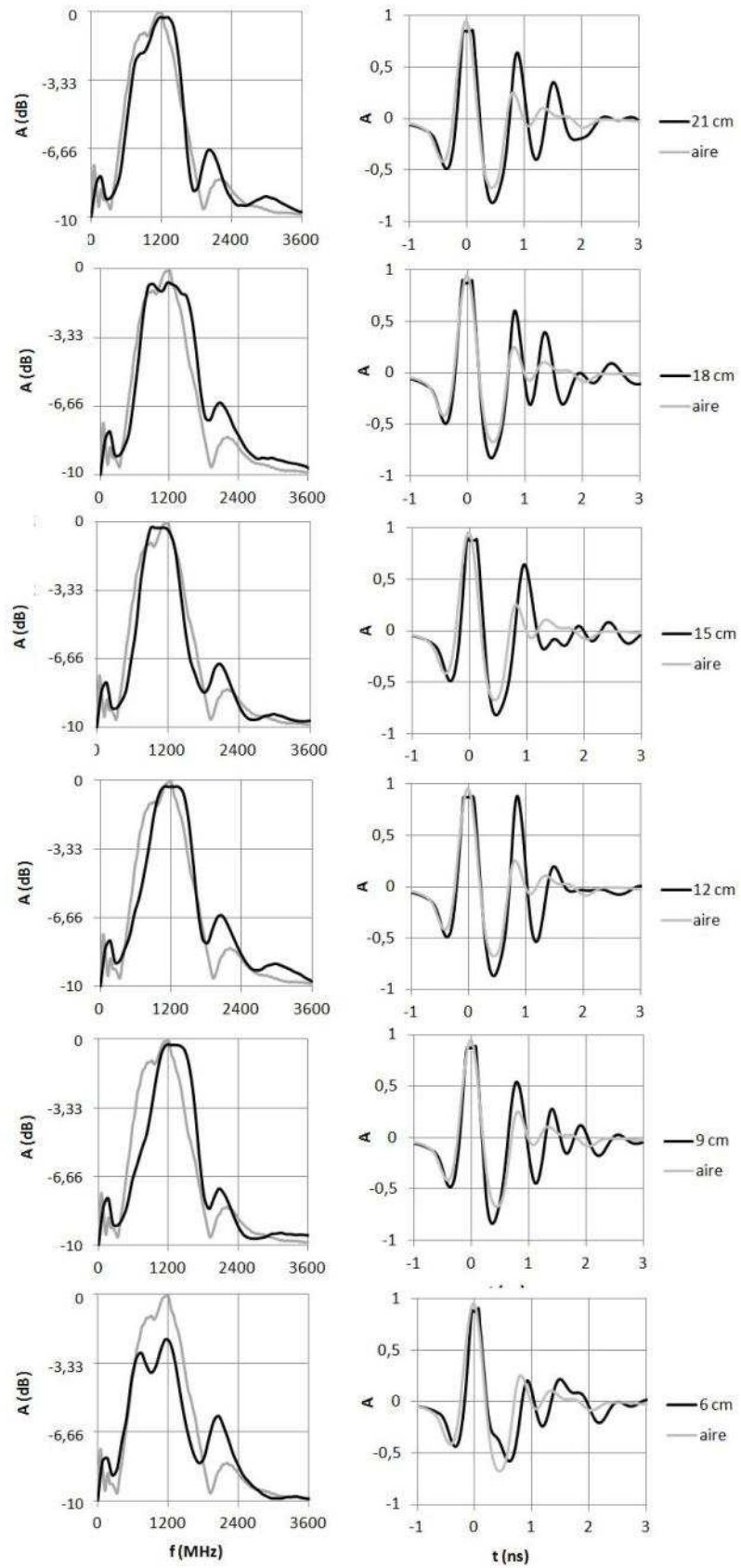


Figura 4.27: Dominios temporal y frecuencial en distintas alturas para la antena de 1200MHz.

De la tabla y las gráficas, se comprueba que, por encima de los 15 cm, la onda directa y la reflejada pueden distinguirse perfectamente por separado. Sin embargo, por debajo de los 15 cm hasta los 9 cm., ambas ondas producen un acoplamiento constructivo. El resultado es una onda de amplitud anormalmente elevada. Por debajo de los 9 cm, la amplitud de onda reflejada se reduce a un valor asociado a la constante dieléctrica del material reflector.

El comportamiento en el dominio del tiempo es pareció y coherente con los resultados obtenidos en el ensayo con la antena de 800 MHz.

b) Dominio frecuencial

A diferencia de los resultados obtenidos con la antena de 800 MHz, en el ensayo con la antena de 1200 MHz, únicamente se observa un pico en registros obtenidos a alturas a partir de los 9 cm. con una frecuencia central próxima a los 1200 MHz, y que se asocia a la onda directa y a las reflexiones externas que se producen antes de llegar al suelo. Únicamente en el registro obtenido a 6 cm de altura, se observan dos picos de menor amplitud, relacionados con la propagación de la señal bajo la superficie del suelo.

4.6.3 Caso 3: Ensayo en firme flexible con antena de 800 MHz

En este apartado se presentan los resultados de un ensayo experimental con la antena de 800 MHz para comprobar los efectos de la disposición del dispositivo a una determinada altura de la superficie del firme, con el propósito de evitar los riesgos propios asociados a la medición en dinámico a velocidades elevadas.

El ensayo consiste en realizar un perfil de prueba sobre un firme de estructura conocida y delimitada. Dicho perfil ha sido repetido sistemáticamente tres veces, disponiendo la antena a 20, 12 y 4 cm de la superficie de rodadura.

La velocidad del vehículo durante el ensayo ha sido de unos 50 km/h, y el tramo ha sido previamente inspeccionado para comprobar que no existían irregularidades relevantes con el propósito de evitar posibles accidentes con el equipo de medición.

En la figura 4.28 se muestra el resultado de los radargramas en el dominio del tiempo sin filtrar (izquierda) y filtrados con la misma secuencia de filtros, independientemente de la altura de medición (derecha). En ellos puede observarse la calidad de los resultados en cada caso, siendo la altura de 20 cm (la superior), de 12 cm (la intermedia) y de 4 cm (la más pegada a la superficie del firme).



Comparando la amplitud de onda en cada ensayo se observa que, en el dominio del tiempo, hay poca diferencia entre las lecturas tomadas a 12 y 4 cm del suelo. En ambos casos las ondas reflejadas una elevada amplitud pudiéndose apreciar las anomalías perfectamente hasta un tiempo doble de 15 ns, equivalentes a unos 80 cm de profundidad.

Por otro lado, el registro que se ha obtenido en el perfil registrado con la antena a una altura de 20 cm presenta un aspecto más difuso, con amplitudes bajas y con anomalías que no se corresponden a los tiempos esperados, calculados para los reflectores conocidos.

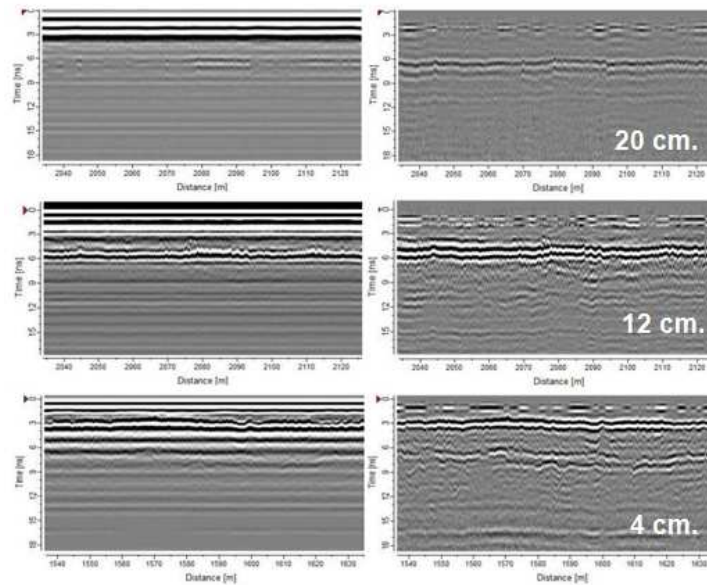


Figura 4.28: Registros obtenidos a una altura de 20, 12 y 4 cm respectivamente.

En los registros sin filtrar se comprueba el efecto en el radargrama de la onda reflejada sobre la superficie del firme. A los 20 cm, dicha onda recorre 3 ns de tiempo doble antes de atenuarse, mientras que a los 12 cm y a los 4 cm invierte 4 ns y 2 ns respectivamente.

Además, en la figura 4.29 se muestra el diagrama de la primera onda reflejada en cada uno de los casos, sin filtrar, donde se comprueba la coherencia de resultados obtenidos con los radargramas. Cada una de las ondas mostradas es el promedio de 1000 metros medidos:

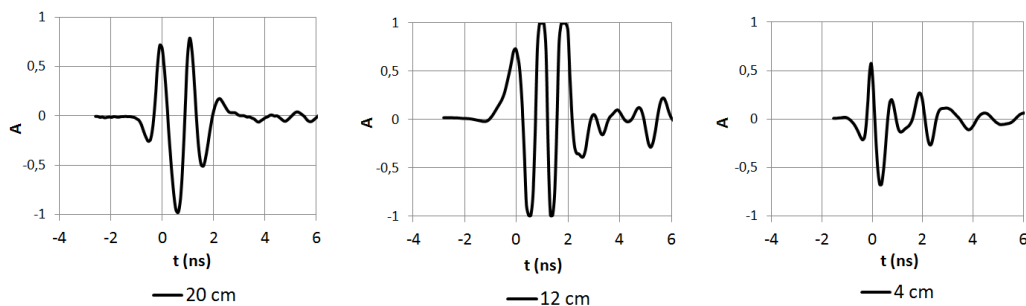


Figura 4.29: Primera onda reflejada a la altura de 20, 12 y 4 cm respectivamente.

Los resultados son coherentes con los obtenidos en los ensayos de determinación de la altura máxima del ensayo con antena de 800 MHz. Por un lado, la reflexión producida con la antena situada a una altura de 20 cm de la superficie reflectora corresponde a la onda directa, produciéndose ésta antes que la reflejada. Por otro lado, la reflexión producida a una altura de antena de 12 cm está dentro del rango del acoplamiento constructivo con la onda directa, produciéndose un alargamiento temporal de dicha reflexión. Finalmente, la reflexión producida a una altura de antena de 4 cm es debida exclusivamente a la reflexión en la superficie del pavimento y se atenúa con mayor rapidez que el resto, pudiendo dedicar mayor energía a la onda refractada hacia el interior del medio, en este caso un firme.

En el caso de los registros filtrados, en todos ellos se observa como primer reflector visible es el correspondiente a la superficie de contacto entre mezclas asfálticas y la base granular. Dicho reflector es bien visible en los registros tomados con alturas de antena a 12 y 4 cm, pero atenuado en el caso de los 20 cm.

Por otro lado, los reflectores que aparecen a mayores profundidades, bajo del límite de contacto con la base granular, son muy claros en el caso del ensayo realizado a una altura de 4 cm, difusos en el registrado a 12 cm e inexistentes en el obtenido a 20 cm.

En la figura 4.30 se muestra el resultado de los espectros de cada uno de los casos. En los espectros de los registros obtenidos en los ensayos con la antena situada a 20 cm y 12 cm de la superficie del firme, se observa una tendencia parecida a la discutida en la figura 4.25: es decir, el resultado indicaría que las componentes frecuenciales del espectro obtenido proceden principalmente de la onda directa, siendo determinantes las condiciones geométricas del dispositivo, con una mayor influencia en la señal que la de las ondas procedentes de las reflexiones en elementos situados bajo la superficie del firme.

Por otro lado, los resultados parecen indicar que el espectro de las trazas registradas en el perfil realizado a 4 cm de la superficie está determinado principalmente por las señales procedentes del interior del firme. En este espectro se observa también una amplitud menor para todas las frecuencias, posiblemente a consecuencia de la mayor absorción de energía.

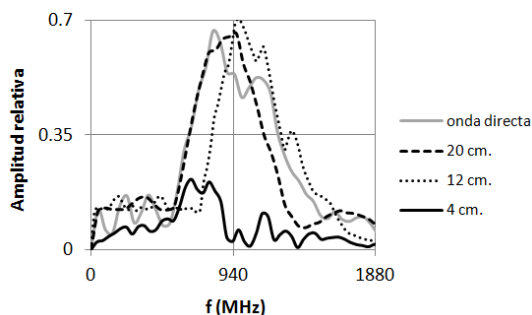


Figura 4.30: Espectros de las trazas registradas a una altura de 20 cm, 12 cm y 4 cm.



4.7 Calibración de antena mediante en ensayo con placa metálica

En este apartado se presentan los resultados de un ensayo experimental con una antena apantallada de 800 MHz para la comprobación de la altura mínima y máxima donde se produce el acoplamiento constructivo de la onda directa con la onda reflejada en un reflector puro. Para ello se ha utilizado el mismo dispositivo de ensayo que en los apartados anteriores, con la diferencia que la primera superficie de reflexión, en lugar de ser la superficie del firme asfáltico, es una placa metálica que permite devolver prácticamente la totalidad de la energía emitida por la antena.

Aprovechando el montaje del dispositivo, se ha aprovechado para comprobar la constante dieléctrica obtenida en la superficie del firme según la ecuación del método de reflexión superficial [Maser y Scullion, 1991]. Sobre este método se habla en el apartado 3.3.1 de esta tesis. En la figura 4.31 se muestra el dispositivo de ensayo con la placa metálica:



Figura 4.31: Dispositivo de ensayo con placa metálica en altura variable.

Partiendo de los resultados obtenidos en los ensayos a distintas alturas sin placa, el ensayo con placa ha sido realizado con un rango de interés entre los 18 cm y los 3 cm con un intervalo de paso de 3 cm, tal y como se muestra en la figura 4.32:



Figura 4.32: Ensayo con placa metálica desde 18 cm (izquierda) hasta 3 cm (derecha).

En la figura 4.33 se muestran las ondas resultantes del estudio. En color gris pálido, utilizando como primer reflector el firme asfáltico y en color negro, la placa metálica:

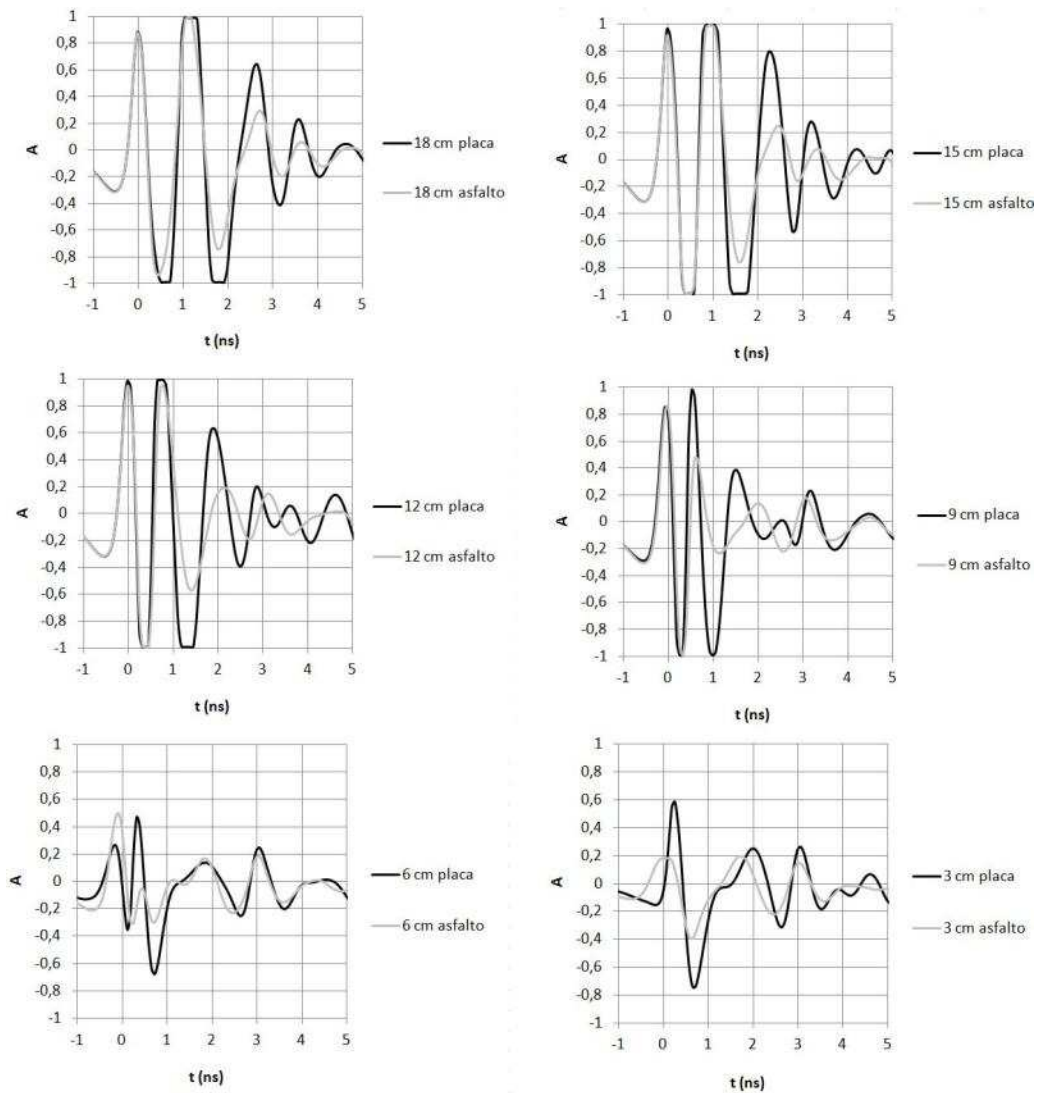


Figura 4.33: Ondas resultantes del ensayo con placa metálica.



En la tabla 4.10 se muestra la evolución de los resultados para cada una de las alturas:

altura antena (cm)	tiempo de reflexión (ns)	Efecto de acoplamiento SI / NO
18	1,2	SI
15	1	SI
12	0,8	SI
9	0,6	NO
6	0,4	NO
3	0,2	NO

Tabla 4.10: Resultados obtenidos en el dominio frecuencial para la antena de 800 MHz.

Finalmente, y a tenor de los resultados obtenidos, para la obtención de la constante dieléctrica mediante el método de la reflexión superficial, se asume como válida la medición de las reflexiones generadas por el dispositivo de ensayo a una altura situada a 9 cm. Dicha altura se considera solamente válida para esta antena y en estas condiciones locales.

En la figura 4.34 se muestra, al detalle, la semi-fase de la onda escogida para el cálculo de la constante dieléctrica, que es la altura máxima a la que se puede poner el dispositivo libre de acoplamientos por efectos de la onda directa. La semi-fase produce un pico de amplitud máxima en un tiempo de propagación aproximado de 0,6 ns:

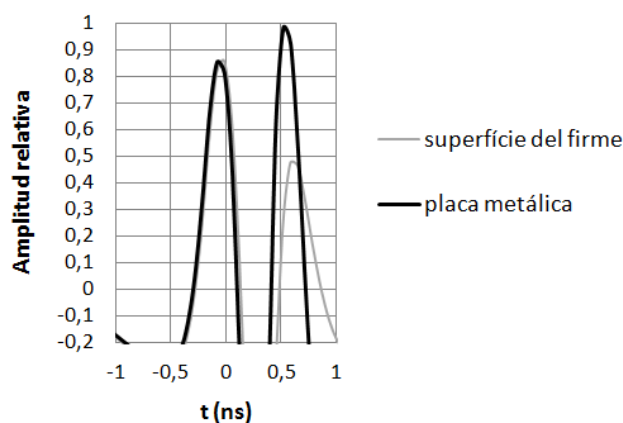


Figura 4.34: Detalle de la semi-fase escogida

Considerando una amplitud de onda en la reflexión de la placa de 1 y una amplitud en la superficie del firme de 0,48 y aplicando la ecuación para el cálculo de la permitividad dieléctrica relativa [ecuación 3.4], se obtiene un valor de 8,1. Además, aplicando la relación entre la permitividad dieléctrica relativa y la velocidad de propagación de onda para medios resistivos y no magnéticos [ecuación 3.3], se obtiene una velocidad de propagación de onda de 10,5 ns.

4.8 Conclusiones

En este capítulo se han realizado distintos ensayos con el propósito de analizar características de diferentes antenas equipo de GPR que se ha utilizado en los casos presentados y estudiados en esta tesis. Para ello se ha analizado en primer lugar la onda directa para, a continuación, estudiar la onda reflejada sobre una superficie.

Los resultados de estos ensayos permiten conocer el comportamiento de cada antena, facilitando la selección de configuraciones equipos adecuadas y adaptadas a los diferentes problemas. Uno de los aspectos de mayor interés en el estudio de firmas es determinar la disposición más adecuada de la antena en el vehículo con el objetivo de obtener resultados óptimos. A continuación se presentan algunas conclusiones extraídas de los ensayos realizados, partiendo de cada uno de los objetivos específicos planteados en esta fase.

Los resultados de estos ensayos han mostrado que se producen pequeñas divergencias entre antenas e, incluso, entre dos ensayos separados en el tiempo y realizados con la misma antena.

4.8.1 Efectos específicos de la antena utilizada

Se ha comprobado que cada antena tiene una onda directa con un espectro singular que la define y diferencia del resto de antenas. Este espectro, condiciona de forma muy relevante el de la señal que se obtiene cuando se aplica sobre un medio, hecho por el cual, resulta difícil comparar espectros de dos antenas diferentes. Aspectos como la frecuencia central o el ancho de banda del espectro de emisión, condicionarán de forma relevante el espectro obtenido de una medición sobre un firme.

Además, se ha comprobado que las antenas con un ancho de banda mayor generan reflexiones en la superficie con un número menor de ciclos. Esto facilita la interpretación de los radargramas ya que permite identificar, de una forma más precisa, anomalías más cercanas entre ellas.

Finalmente, se ha comprobado también que las antenas con frecuencia central más alta generan una longitud de onda más corta que permite aumentar la resolución vertical, aunque también fuerza una atenuación mucho más rápida de la onda.

4.8.2 Efectos de la antigüedad del equipo de medición

Se ha observado que existen diferencias en el espectro de la onda directa registrada por una misma antena durante dos ensayos separados en el tiempo, más relevante a medida que la



antena acumula horas de uso. Este posible fenómeno, por falta de datos y ensayos de contraste, no ha podido parametrizarse.

Sin embargo, se ha constatado que los cambios del espectro, por reducción de ancho de banda y amplitud de onda, podrían afectar a la capacidad de penetración de la onda. Por tanto, los espectros obtenidos en dos ensayos separados en el tiempo, serían comparables siempre que se asegure un resultado de ensayo de onda directa del mismo rango.

En conclusión, esta serie de ensayos demuestran que en estudios de comparación de campañas de ensayos basados en el análisis analítico de la onda, la antena, además de ser la misma, debe ser calibrada mediante ensayos en el aire, con una cierta periodicidad.

4.8.3 Determinación de la distancia máxima entre la antena y el firme

Los análisis temporales de la onda realizados en los ensayos sobre una lámina de aire de espesor conocido permiten medir con gran precisión el tiempo transcurrido entre dos picos de amplitud máxima en una misma traza.

Por otro lado, dado que las mediciones sobre el firme a altas velocidades se realizan a una determinada distancia de su superficie, se debe tener en cuenta el acople de la onda directa con la onda reflejada, hecho que dificulta la determinación del cero de las mediciones, así como la determinación de los reflectores asociados a las capas de firme más cercanas a la superficie.

Los resultados de ensayos realizados con diferentes antenas muestran que es posible separar la antena de la superficie del estudio obteniendo buenos resultados, aunque con pérdidas de energía que aumentan al incrementar la distancia entre la antena y la superficie. Los ensayos mostrados en este capítulo se han utilizado para identificar la máxima distancia entre la antena y la superficie para que los resultados sean adecuados. Estos ensayos se han realizado con dos de las antenas de uso más frecuente en estudios de firmes: una antena apantallada de frecuencia 800 MHz y una antena de frecuencia de 1200 MHz.

Los resultados obtenidos con ambas antenas parecen indicar que el punto crítico a partir del cual se produce un efecto de pérdidas y un aumento del nivel de ruido por encima de un nivel admisible, es el punto donde la onda directa produce una interferencia constructiva con la onda reflejada en la superficie del firme. Esta distancia sería aproximadamente la misma que existe entre el dipolo emisor y el dipolo receptor. Dada la geometría de ambas antenas, es lógico que, para la antena de 1200 MHz (con una distancia entre dipolos mucho menor) se obtenga una distancia admisible inferior a la de la antena de 800 MHz.

En los dos casos se ha realizado un estudio de los registros de las antenas en dominio frecuencial y en el temporal, observándose grandes concordancias entre ambos; es decir, los puntos de acoplamiento constructivo entre dos picos de amplitud máxima, coinciden con un pico de mayor amplitud en la frecuencia central de la antena.

Antena apantallada de 800MHz

En los ensayos con la antena de 800 MHz se ha observado un efecto de interferencia constructiva cuando la distancia entre la antena y la superficie del medio se sitúa entre los 20 cm y los 12 cm. Este resultado parece indicar que la distancia máxima de la antena al suelo debe ser inferior a los 12 cm.

Este resultado, obtenido en ensayos de laboratorio controlados, se ha corroborado en un estudio real de medición sobre un firme. Los radargramas obtenidos a 20 cm, además de estar muy atenuados, presentan anomalías que no se corresponden a la geometría real del firme, sino que a interferencias entre señales directas y reflejadas en diferentes elementos.

Antena apantallada de 1200MHz

Los ensayos con la antena de 1200 MHz indican que la interferencia constructiva entre la onda directa y la primera reflexión en la superficie del medio se produce a una distancia mucho menor que la obtenida en el caso de la antena de 800 MHz. En este caso, el fenómeno ocurre entre los 15 y los 7 cm. Este hecho indicaría que la distancia máxima de la antena al suelo debe estar siempre por debajo de los 7 cm.



CAPITULO V

Ensayos para analizar efectos en los registros a las condiciones ambientales y el espesor de la capa superficial sobre el espectro

Resumen

En este capítulo se aborda el estudio el efecto de las condiciones ambientales y el espesor de la capa más superficial del firme sobre el conjunto del espectro.

El objetivo es, por un lado, determinar la sensibilidad del espectro a los cambios en el medio que son de carácter temporal y no permanente, como pueden ser la temperatura y la humedad presentes en las capas más superficiales del firme.

Por otro lado, se desea comprobar el peso de las condiciones de la primera superficie reflectora sobre el conjunto del registro. Este hecho, podría agravar aún más los efectos indeseados de las condiciones temporales en las que se encuentre dicha capa reflectora.

Para ello se presentan cuatro ensayos distintos, los dos primeros orientados al efecto de las condiciones climáticas del ensayo y el tercero y cuarto orientados a la aportación del espesor de la primera capa reflectora al conjunto del espectro.



V. ENSAYOS PARA ANALIZAR EFECTOS EN LOS REGISTROS ASOCIADOS A LAS CONDICIONES AMBIENTALES Y EL ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL

5.1 Introducción

La temperatura y la humedad del medio por el cual se propaga una onda electromagnética inciden en su comportamiento, ya que ambos parámetros afectan tanto a la conductividad eléctrica del medio como a su permitividad dieléctrica relativa.

Estos dos parámetros afectan sobre todo a la velocidad de propagación de la señal y a la absorción de energía por el medio.

No existen referencias sobre estudios específicos de conductividad aplicados a firmes asfálticos, aunque sí es conocido que, siendo el betún es un buen aislante, su resistividad decrece progresivamente conforme aumenta su temperatura (García et al., 2009).

En el caso de la conductividad eléctrica del agua, ésta está relacionada con la concentración de las sales en disolución que se polarizan en presencia de un campo eléctrico. Como la solubilidad de las sales en el agua depende de la temperatura, la conductividad varía con la temperatura del agua, aumentando conforme aumenta la temperatura del agua. Para estandarizar la medición de la conductividad eléctrica se referencia a una temperatura de medición, generalmente a 20 ó a 25 °C. Bussian (1983) deduce que la conductividad eléctrica del agua aumenta entre un 2 y un 3% por cada grado Celsius. En la figura 5.1 se muestra la relación entre la temperatura y la conductividad eléctrica del agua dulce.

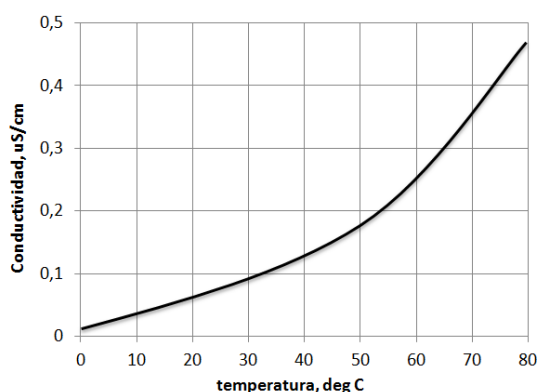


Figura 5.1. Relación entre temperatura y conductividad eléctrica del agua, modificado de Bussian (1983)

Como los firmes pueden considerarse medios trifásicos, un incremento de temperatura implicará una mayor conductividad del conjunto de materiales que forman el firme y, en consecuencia, mayores pérdidas de energía de las ondas electromagnéticas utilizadas en la

prospección, durante su propagación por el medio. Éste efecto será mayor cuanto más elevado sea el contenido en agua del sistema.

Respecto a la permitividad dieléctrica relativa, existen multitud de estudios referentes a la respuesta dieléctrica de un firme frente a aplicación de microondas. Diversos estudios utilizan esta variable para determinar el estado de integridad estructural de un firme (por ejemplo, Saarenketo, 2003).

Por otro lado, además de la temperatura y la humedad del medio, la frecuencia de la onda que se propaga por el medio es otra variable que condiciona la respuesta dieléctrica de dicho medio. Según Jaselskis et al. (2003), los tres parámetros determinan la respuesta dieléctrica de un firme, por lo que el problema resulta complejo y requiere de estudios pormenorizados que consideren las distintas variables que intervienen en el proceso.

En la figura 5.2 se muestra la relación entre la temperatura y la permitividad dieléctrica relativa de una mezcla bituminosa tipo, considerando una onda de frecuencia 1 MHz.

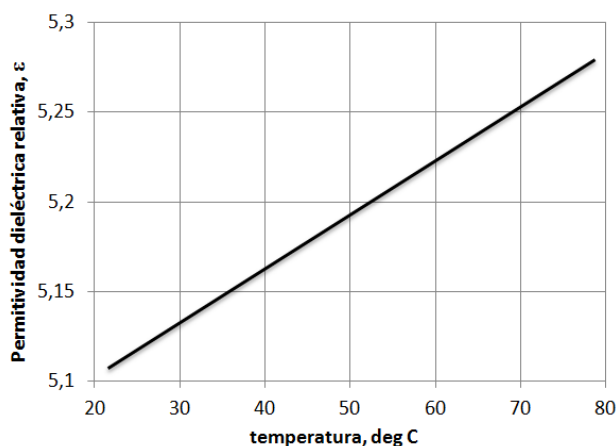


Figura 5.2: Relación entre temperatura y la permitividad dieléctrica relativa, modificado de Jaselskis et al. (2003)

En la figura 5.3 se muestra la relación entre la frecuencia de emisión de onda y la permitividad dieléctrica relativa de otra mezcla bituminosa a una temperatura de 20°C.

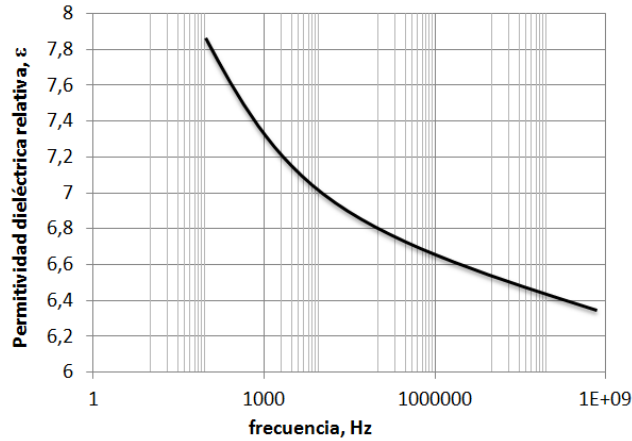


Figura 5.3: Relación entre la frecuencia y la permitividad dieléctrica relativa, modificado de Jaselskis et al. (2003)

Las figuras 5.2 y 5.3 muestran que, conforme aumenta temperatura del firme su permitividad dieléctrica relativa aumenta ligeramente, mientras que disminuye progresivamente conforme se aumenta la frecuencia de la señal. Estos cambios de permitividad afectan de forma directa a la velocidad de propagación de la onda en el firme.

Las propiedades dieléctricas del agua tienen un comportamiento diferente a las de las mezclas bituminosas (Wobschall, D., 1977).

En la figura 5.4 se muestra la relación entre temperatura y la permitividad dieléctrica relativa del agua para frecuencias inferiores a 3 GHz. Como se puede observar, la permitividad dieléctrica relativa del agua a una temperatura normalizada de 20 grados Celsius se sitúa en un valor cercano a 80.

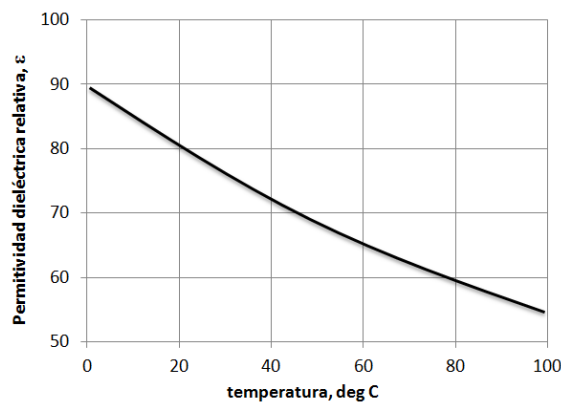


Figura 5.4: Relación entre temperatura y la permitividad dieléctrica relativa, modificado de [Krupka, 1998]

5.2 Caso 1: Ensayo con un gradiente de temperatura extremo

5.2.1 Introducción y objetivos

En este apartado se presentan los resultados de un ensayo experimental con una antena apantallada de 500 MHz en el interior y en el exterior de una cámara frigorífica. El estudio se realizó en un almacén que tenía un recinto cerrado acondicionado para ultra congelados cuya temperatura estaba alrededor de -30°C (figura 5.5). Fuera del recinto para frigorífico, la temperatura era de unos $+10^{\circ}\text{C}$. Las dos zonas quedaban separadas por un muro recubierto con material aislante y con una puerta de apertura automática levadiza.



Figura 5.5: Ensayo con la antena de 500MHz en el recinto interior del almacén de ultra congelados.

El objetivo del ensayo es comprobar la afectación de la temperatura de un pavimento en su capa más superficial, bajo condiciones de gradiente térmico muy elevado. Este fenómeno permitirá amplificar y observar sus consecuencias sobre el registro en sus dimensiones temporal y frecuencial.

5.2.2 Resultados obtenidos

En la figura 5.6 se observa el radargrama registrado con una antena de 500 MHz cruzando el paso entre ambos recintos.

En él se pueden observar dos sectores diferenciados: los primeros 17 metros de perfil corresponden al interior del recinto frigorífico. En ese sector del radargrama la amplitud de las ondas registradas es elevada. Sin embargo, a partir del metro 18 y hasta el final del registro, los datos obtenidos corresponden al exterior del recinto, donde observan amplitudes menores que en el primer sector. Del metro 17 al 18 se sitúa la zona de transición de paso del interior al exterior del recinto.

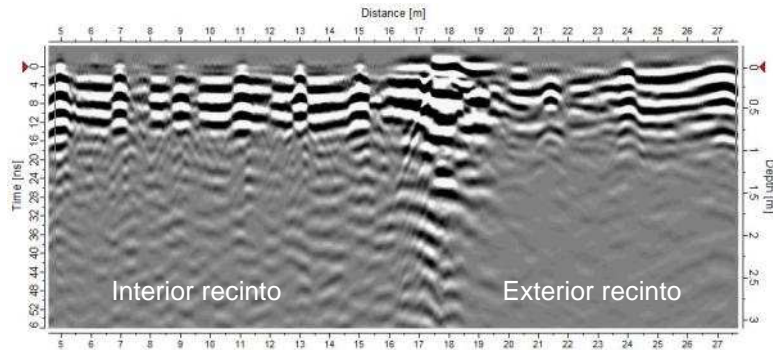


Figura 5.6: Radargrama registrado en el almacén. El primer sector del registro es la señal obtenida en el interior de la cámara frigorífica. La segunda parte del registro se ha obtenido fuera del recinto a bajas temperaturas.

El pavimento del interior y del exterior del recinto forma parte de la misma losa de hormigón en masa de un espesor aproximado de unos 30 cm. sobre un suelo de origen sedimentario.

La única diferencia en la estructura del pavimento entre la parte interior y exterior del recinto son unos pequeños orificios de aire en la parte baja de la losa que actúan de ventilación forzada para mejorar el aislamiento térmico del recinto frigorífico. Dichos orificios se detectan a un tiempo de reflexión entre 6 y 8 nanosegundos en forma de pequeñas reflexiones hiperbólicas, muy cercanas entre ellas y equidistantes. Dichos orificios, por tener un diámetro muy pequeño no interfieren en la propagación de la onda bajo el suelo de la losa.

En la figura 5.7 se muestran las trazas obtenidas en el ensayo y sus espectros. Las trazas analizadas son el resultado de promediar todos los registros en cada uno de los sectores del almacén. En negrita se muestra el diagrama de amplitud y el espectro promediado de todo el sector del interior del recinto frigorífico, mientras que en línea de puntos se muestran los valores promediados en el exterior del recinto.

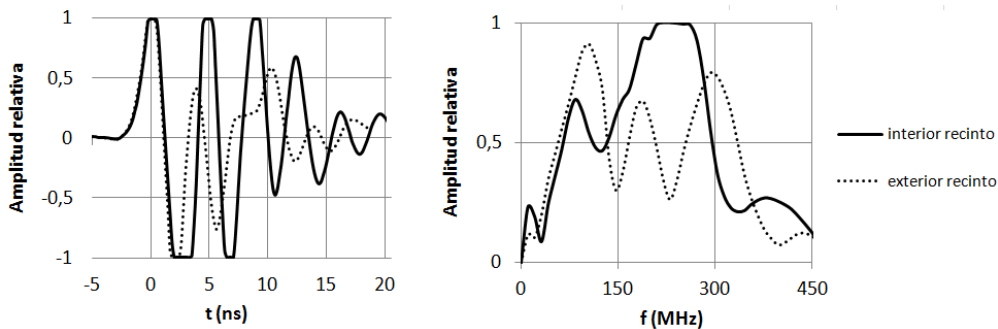


Figura 5.7: Diagramas de tiempos (izquierda) y espectros (derecha) dentro y fuera del recinto frigorífico.

Observando el diagrama de temporal (trazas), puede comprobarse que la onda registrada en el interior de la cámara frigorífica se caracteriza por una amplitud mayor que en el caso de la

señal registrada fuera de la cámara. El registro se ha saturado hasta los 10 ns (correspondientes a unos 50 cm de profundidad). Por otro lado, la señal registrada en el exterior del recinto muestra amplitudes menores y una inflexión en torno a los 7 ns, asociado al límite inferior de la losa de hormigón. Dicho umbral no es posible detectarlo dentro del recinto con la losa congelada, por estar dentro del rango saturación de la onda.

En el caso de los diagramas frecuenciales, ambos espectros presentan un ancho de banda y una frecuencia central del mismo orden de magnitud. Sin embargo puede comprobarse que mientras la energía en el caso del pavimento congelado se focaliza en un único pico, la energía en el pavimento descongelado se divide en tres picos, que probablemente pueden asociarse con los distintos materiales que forman la estructura del pavimento. Este fenómeno podría estar relacionado con el efecto de la congelación del medio, provocando menores diferencias entre permitividades dieléctricas relativas de los diferentes materiales detectados en el conjunto del registro.

5.3 Caso 2: Efecto del contenido de agua y temperatura en un firme flexible

5.3.1 Introducción y objetivos

En este apartado se presentan los resultados de un ensayo experimental sobre el firme de una carretera, con el fin de comprobar las variaciones que puedan afectar a la onda de radar por efecto de los cambios de humedad y temperatura en el medio, repitiendo el ensayo de forma periódica y separada en el tiempo.

Para ello se ha escogido un tramo de unos 10 metros de longitud de un firme flexible, coincidiendo con el cruce transversal de una tubería de polietileno perpendicular al trazado de la carretera, bajo las capas del firme.

La antena utilizada en este ensayo ha sido de frecuencia central de 500 MHz.

Las mediciones realizadas corresponden a dos perfiles realizados sobre la línea de separación entre la calzada y el arcén en cada uno de los lados de la plataforma. De esta manera, se asegura la repetibilidad del ensayo. Se da la circunstancia, además, que uno de los lados se sitúa en condiciones orográficas de desmonte y el otro de terraplén.

En la siguientes figuras se muestran los perfiles de ensayo realizados (línea entre los dos conos), en el lado del terraplén (figuras 5.13) y desmonte (figuras 5.14).



Figura 5.13: perfil de ensayo realizado en el lado del terraplén.



Figura 5.14. Adquisición de datos en el lado del desmonte.

Se han realizado cuatro campañas de adquisición de datos separadas aproximadamente un mes, bajo condiciones climáticas conocidas y siempre con la misma antena.

Todos los ensayos han sido realizados a primera hora de la tarde, para asegurar que la temperatura sea la máxima diurna. Las condiciones de temperatura y pluviometría de cada ensayo se resumen en la tabla 5.1.

Ensayo	Fecha	Temperatura durante el ensayo (°C)	Precipitación acumulada en los 7 días previos al ensayo (mm)
1	26-dic-2010	14,3	0 (sin lluvias)
2	31-ene-2011	14,0	41 (lluvia corta y torrencial)
3	19-mar-2011	16,8	108 (lluvia intensa)
4	08-abr-2011	21,5	52 (lluvia suave)

Tabla 5.1: Condiciones de los ensayos para la detección del paso de una tubería enterrada.

5.3.2 Resultados obtenidos

a) Estudio en el lado del terraplén

En la figura 5.15 se presentan los radargramas registrados. En ellos se pueden observar dos reflectores continuos; el primero de ellos, situado a unos 7 ns (a una profundidad aproximada de unos 40 cm) se correspondería con la sección conjunta de las capas bituminosas y granulares, mientras que el segundo, situado entre 14 y 18 ns se correspondería a la capa de coronación de la explanada, que tendría un espesor variable de entre 40 cm y 60 cm.

Por otro lado, en todos ellos se puede observar una anomalía hiperbólica situada a un tiempo de propagación doble de unos 18 ns, debida a la reflexión de la señal en la tubería enterrada en este sector, a una profundidad de unos 100 cm.

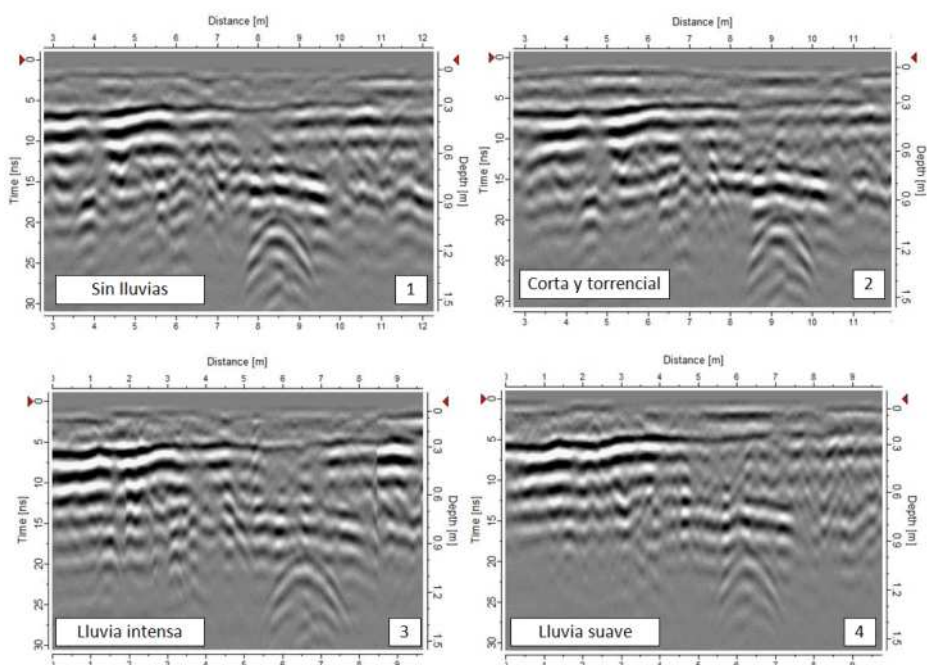


Figura 5.15: Radargramas obtenidos en el lado del terraplén.

En el análisis comparativo entre todos ellos, se puede apreciar dos efectos destacables:

- Un mayor contraste en los radargramas 1 y 2 que en el resto. Este fenómeno se debe a que las amplitudes de las ondas, por lo general, son algo más elevadas.
- Geométricamente, la hipérbola es más completa en el radargrama número 3, mientras que el radargrama número 4 es donde peor se ve, tanto a nivel geométrico como en el contraste de la imagen.



En la figura 5.16 se presentan los diagramas de amplitudes de las cuatro campañas, obtenidos sobre el punto situado en la vertical de la tubería.

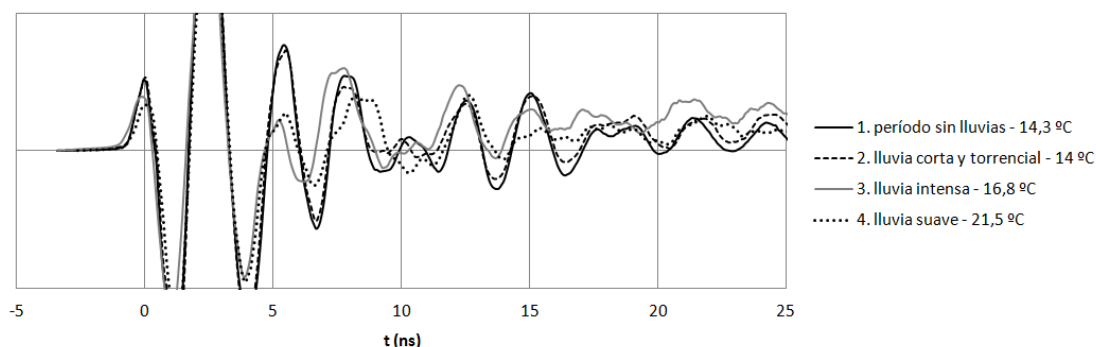


Figura 5.16. Trazas correspondientes a los registros de los ensayos realizados en diferentes momentos sobre la tubería en el lado del terraplén.

En las cuatro trazas se observa cambios en la amplitud de la señal (correspondientes a llegadas) a unos 10 ns y a unos 18 ns. El primero es debido a la reflexión que se produce en el contacto entre las capas granulares y la explanada. El segundo es debido a la reflexión producida en el contacto entre la capa de coronación de la explanada y la explanada propiamente dicha, junto con la reflexión ocasionada en la tubería enterrada.

Se observa que las ondas obtenidas en los ensayos 1 y 2 son muy parecidas, manteniendo la forma sinusoidal en todo el registro y con una atenuación progresiva.

Sin embargo, las ondas obtenidas en los ensayos 3 y 4 presentan una reducción drástica de amplitud de onda en torno a los 5 ns. Sin embargo, mientras que la onda 3 recupera en parte un patrón sinusoidal similar al obtenido en los ensayos 1 y 2, la traza correspondiente al ensayo 4 presenta un patrón sinusoidal diferente, con un mayor nivel de ruido, amplitudes más bajas y una fuerte desviación de la línea base. Este último efecto se observa en los demás ensayos, pero de forma más atenuada.

En la figura 5.17 se presentan los diagramas espectrales de cada una de las trazas obtenidas sobre la vertical de la tubería en el lado del terraplén. Estos diagramas muestran que los espectros asociados a los ensayos 1 y 2 son muy parecidos. Por el contrario, al igual que en las correspondientes trazas, los espectros 3 y 4 difieren del resto.

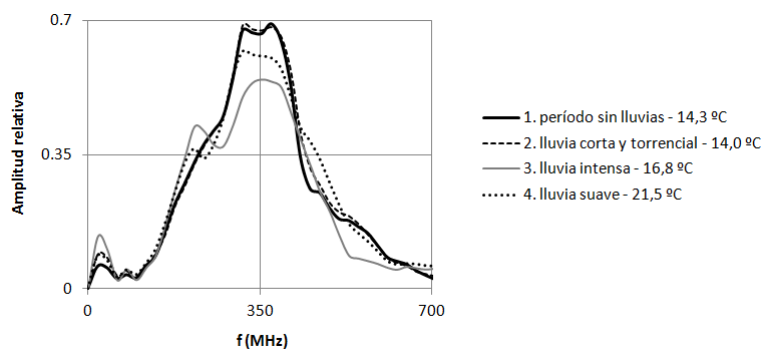


Figura 5.17: Diagramas espectrales de las trazas obtenidas sobre la tubería en el lado del terraplén.

Un análisis detallado muestra que, mientras que la frecuencia central en los cuatro casos se mantiene en torno a los 350 MHz, la amplitud del espectro se reduce en el caso del ensayo 4 y, de forma aún más acusada, en el del ensayo 3, realizado después de dos jornadas de lluvia intensa.

La reducción de la amplitud del espectro no se acompaña de un cambio apreciable del ancho de banda, que se mantiene parecido en todos los casos. Sin embargo, en los perfiles 3 y 4 aparece un pico en torno a los 200 MHz que, dada su baja frecuencia y considerando los resultados del ensayo anterior, podría asociarse con el efecto del agua contenida en la explanada.

b) Estudio en el lado del desmonte

En la figura 5.18 se presentan los radargramas registrados en el lado del desmonte. En ellos se observa un reflector continuo situado entre 7 y 10 que se correspondería con la sección conjunta de las capas bituminosas y granulares (con un espesor variable entre 40 y 60 cm).

Por otro lado, en todos ellos se observa la anomalía hiperbólica producida por la reflexión de la señal en la tubería enterrada, y que en este caso se sitúa a una profundidad cercana a los 70 cm.

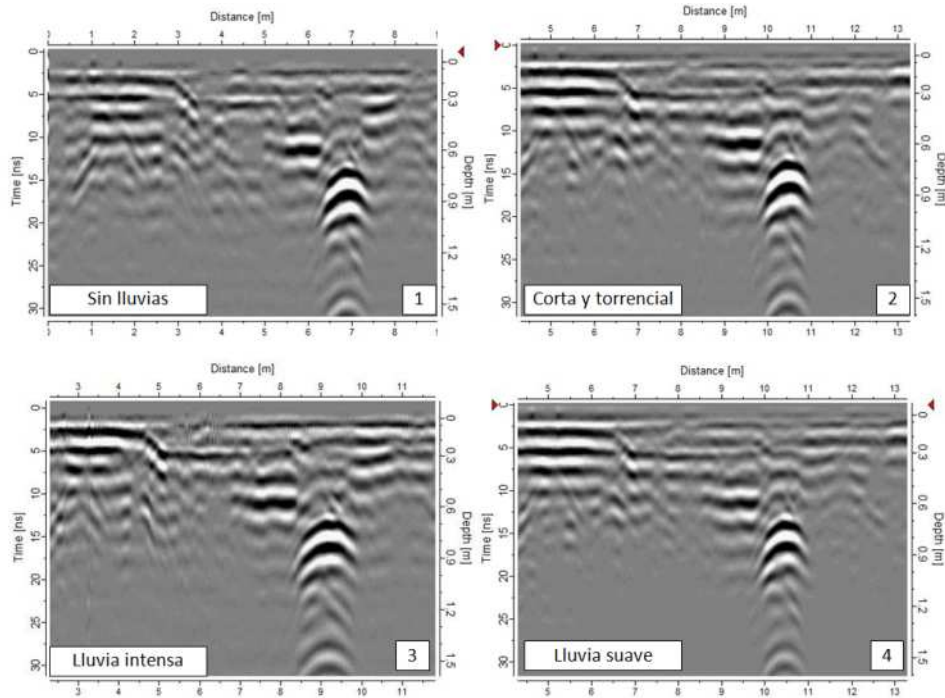


Figura 5.18: Radargramas obtenidos en el lado del desmonte.

Los radargramas de la figura 5.18 no presentan diferencias apreciables. Únicamente destaca un mayor tamaño de la anomalía hiperbólica asociada a la reflexión de la señal en la tubería en el caso del ensayo 3 y una mayor atenuación de onda en el caso 4.

En la figura 5.19 se presentan los diagramas de amplitudes obtenidos sobre la vertical de la tubería en el lado del desmonte. A unos 13 ns se observa un cambio en la señal debido a la llegada de una onda reflejada. Dicho cambio estaría asociado a la presencia de la tubería enterrada.

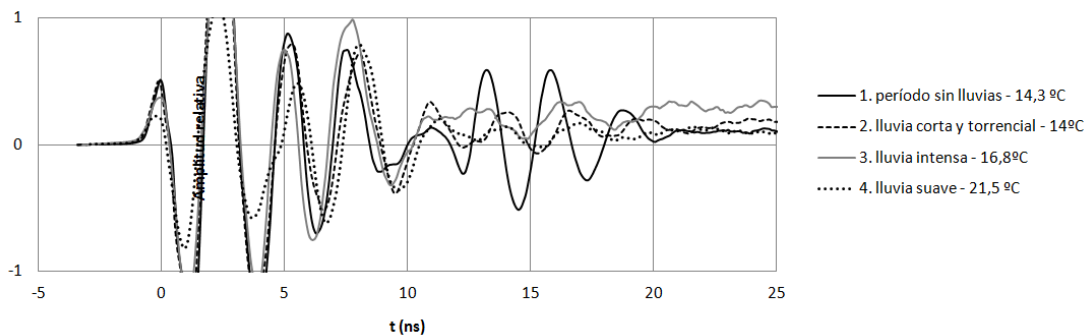


Figura 5.19: Diagramas de amplitudes obtenidos sobre la tubería en el lado del desmonte.

Puede verse que el comportamiento de todas las trazas es similar hasta los 12 ns, tiempo asociado a la reflexión de la señal en el contacto entre la capa granular y la explanada. En este punto se observa un valor de amplitud mucho más elevado en el ensayo 3.

Las trazas obtenidas en los ensayos 1 y 2 siguen un patrón sinusoidal hasta atenuarse casi por completo, aunque en el caso de la onda 2, la señal debida a las reflexiones tiene una amplitud mucho menor.

Sin embargo, la traza correspondiente con el ensayo 3 presenta un patrón más irregular, con menor amplitud, que parece el resultado de la superposición de dos señales de diferentes frecuencias, una de ellas de ellas de más alta frecuencia y menor amplitud, en especial, a partir de los 15 ns de tiempo de propagación.

En la figura 5.20 se presentan los espectros de las señales obtenidas sobre la vertical de la tubería en el lado del desmante. Destaca la similitud de los espectros de los ensayos 1 y 2, aunque en este caso el espectro del ensayo 2 presenta una amplitud menor y una frecuencia central también algo menor que la correspondiente al registro del ensayo 1.

Tal como sucede con las tres trazas comparadas, la forma del espectro correspondiente al ensayo 3, difiere del resto.

En general, se comprueba que, mientras que la frecuencia central en los tres casos se mantiene en torno a los 370 MHz, la amplitud de los espectros es menor conforme se van acumulando litros de lluvia por metro cuadrado.

Por otro lado, no se observa una disminución considerable del ancho de banda comparando los tres resultados del lado del desmante, aunque sí que se aprecia cómo el ancho de banda se reduce notablemente respecto del de los perfiles realizados en el terraplén. Esta diferencia se puede explicar considerando la diferencia de espesores de los materiales que se encuentran bajo las capas de firme en la sección del desmante respecto al terraplén.

Si se observan los máximos de los espectros, en el perfil 3 aparece de nuevo un pico en torno a los 200 MHz, tal como sucedía en el espectro de la señal adquirida en el lado del terraplén.

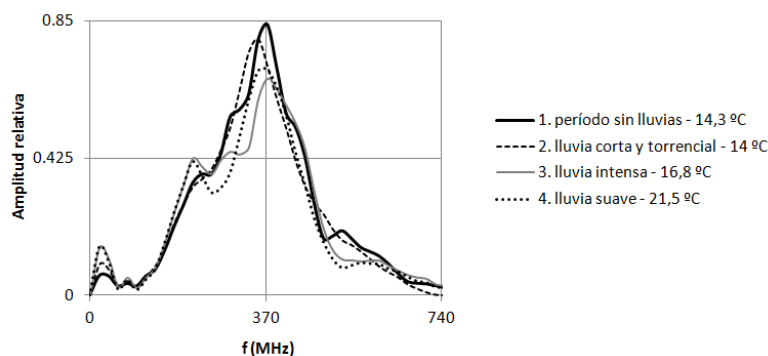


Figura 5.20: Diagramas espectrales obtenidos sobre la tubería en el lado del desmante.



5.4 Caso 3: Efecto del espesor de la capa superior en agua sobre el espectro

5.4.1 Introducción y objetivos

Este ensayo se ha realizado para simular el uso de una antena sobre una lámina de agua que cubre un pavimento. En este caso, el agua está retenida en una balsa y el pavimento viene representado por el fondo de la balsa. El espesor de la capa de agua se va variando conforme se vacía la balsa que la contiene. Sobre la superficie del agua se ha situado una antena de 500 MHz dentro de un recipiente estanco.

El experimento consiste en adquirir datos de forma continua durante el progresivo vaciado, con el objetivo de comprobar la afectación del espesor de la lámina de agua sobre el espectro.

El vaciado de la balsa produce una reducción progresiva del espesor de agua, partiendo de una lámina de agua de unos 80 cm, hasta los 20 cm de espesor mínimo, tal y como muestra la serie de fotografías, en orden cronológico (figura 5.8).

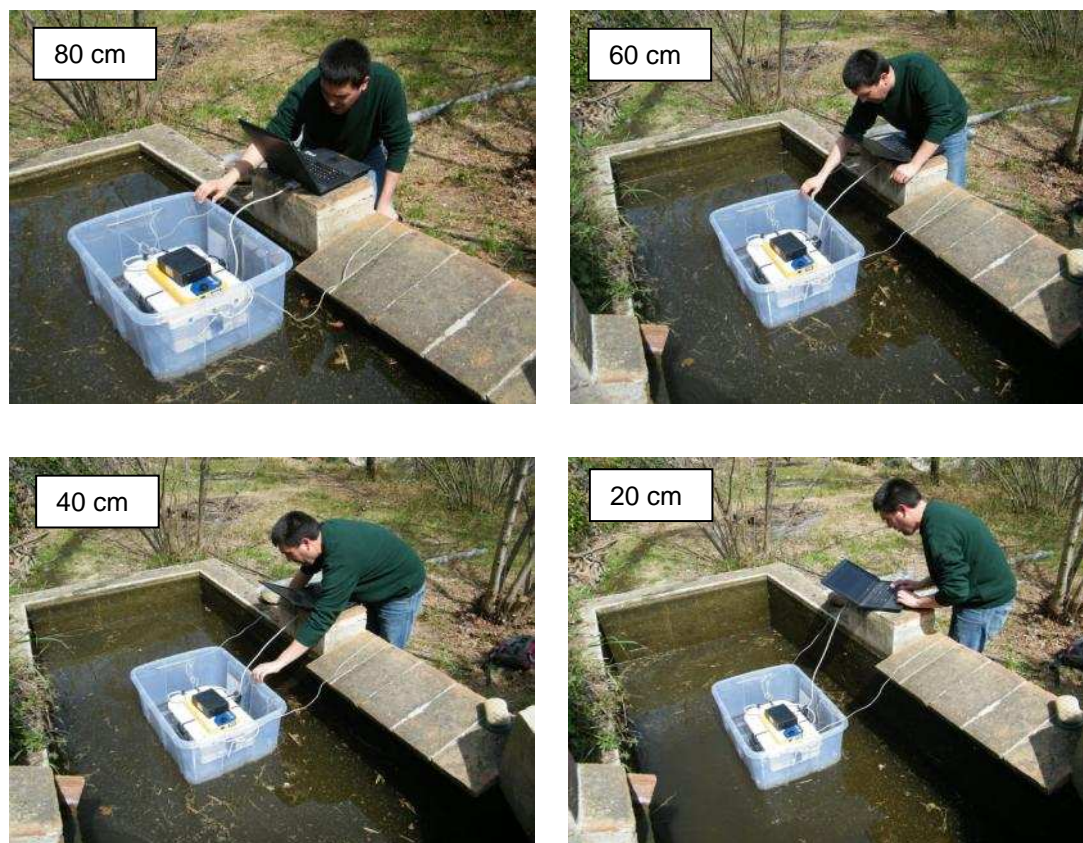


Figura 5.8: Proceso de vaciado de la balsa y adquisición de datos durante el ensayo.

5.4.2 Resultados obtenidos

Para interpretar los resultados, se realiza un estudio en los puntos con los espesores siguientes: 80, 60, 40 y 20 cm, marcados sobre el registro continuo obtenido durante el ensayo (figura 5.9). A partir del registro, se comprueba también que la velocidad de propagación de la onda en el agua, es de unos 4 cm/ns.

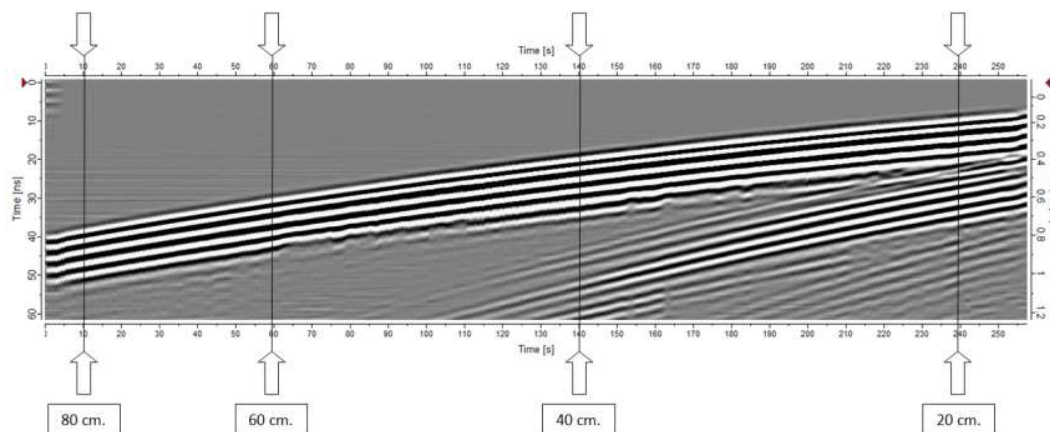


Figura 5.9: Radargrama filtrado, obtenido durante el vaciado de la balsa en el ensayo. Las líneas marcas las trazas que se han analizado puntualmente.

En la figura 5.10 se muestran los registros de las ondas en su dominio del tiempo. En ellas se observa la reflexión del contacto antena – agua, que es constante a lo largo de todas las mediciones, a los pocos nanosegundos.

Por otra parte, la reflexión asociada al contacto entre el agua y el pavimento del fondo de la balsa, se va acercando al reflector de contacto antena – agua y ganando amplitud de onda, conforme se va vaciando la balsa. Este fenómeno ocurre por las distintas causas de absorción de la onda descritas en esta tesis, en este caso y principalmente la dispersión de la señal y su absorción por parte del agua.

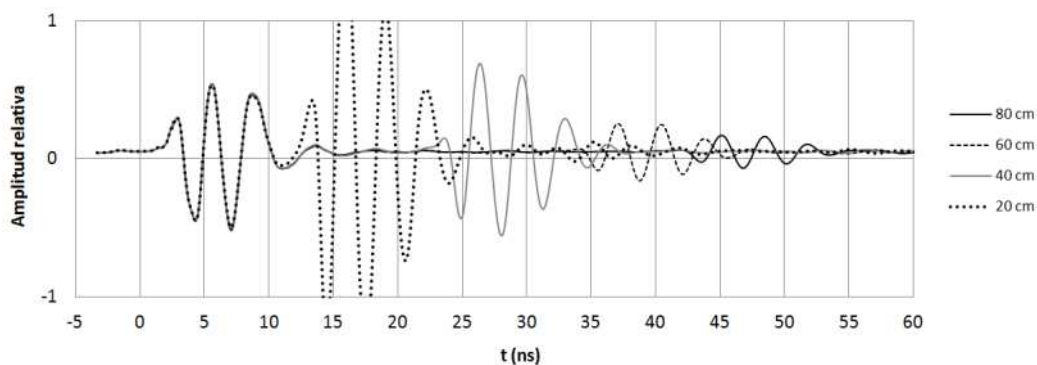


Figura 5.10: Ondas registradas durante el vaciado de la balsa, analizada en cuatro momentos puntuales del proceso.



En el dominio frecuencial, en primer lugar en la figura 5.11 se muestran dos espectros: el espectro de la onda directa (determinado durante los ensayos realizados en aire), propio de cada antenna, y el espectro de la onda registrada cuando la capa de agua era de 80 cm. de espesor. La figura tiene el interés de comparar los efectos en el espectro asociados a dos medios homogéneos con permitividades relativas extremas y opuestas ($\epsilon_r \approx 1$, en el caso del aire y $\epsilon_r \approx 60$ en el caso del agua), observándose tres interesantes particularidades:

- La acentuada pérdida de amplitud del espectro de la onda registrada con la balsa llena respecto al espectro de la onda directa.
- Un ancho de banda similar en los dos casos.
- Un desplazamiento de la frecuencia central, que decrece de los 450 MHz a los 300 MHz, aproximadamente. Este sería el resultado del efecto de filtrado de la señal que ejercería la presencia del agua en lugar del aire, como medio envolvente.

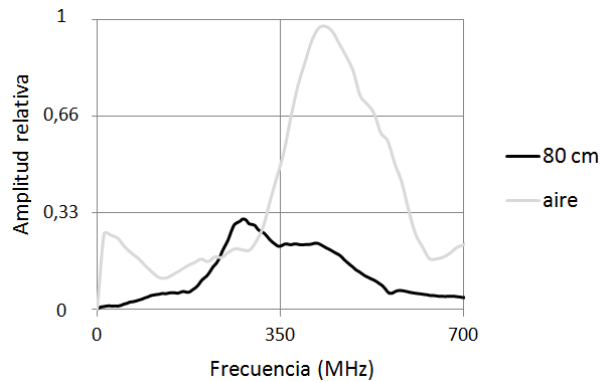


Figura 5.11: Espectro de la onda directa y espectro para un espesor de agua de 80 cm.

Por otro lado, en la figura 5.12 se puede observar la comparación de los espectros obtenidos en cuatro puntos seleccionados durante el vaciado de la balsa, con espesores de lámina de agua de 80 cm, 60 cm, 40 cm y 20 cm, respectivamente.

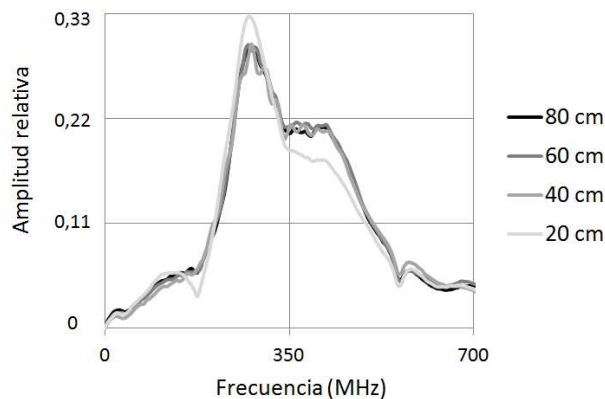


Figura 5.12: Espectros registrados en distintos puntos durante el vaciado de la balsa.

Comparando los espectros se puede observar que, por un lado, los correspondientes a los 80 cm, 60 cm y a los 40 cm. son muy similares, mientras que el asociado a los 20 cm muestra características diferentes.

Este resultado pone de manifiesto que, por encima de los 20 cm de espesor de lámina de agua, la propia agua actúa de medio envolvente, y el reflector de la superficie del pavimento de la balsa es el causante de la práctica totalidad de la energía reflejada. Es decir, sucede algo parecido al comportamiento observado en los ensayo de calibración de altura de la antena en la medición de pavimentos

Por tanto, el espectro de reflexión, poco o nada tiene que ver con los fenómenos producidos bajo la superficie del pavimento del fondo de la balsa.

5.5 Caso 4: Efecto del espesor de la capa superior de balasto sobre el espectro

5.5.1 Introducción y objetivos

En este apartado se presentan los resultados de un ensayo experimental sobre una plataforma de ferrocarril de alta velocidad, con el fin de comprobar las variaciones que puedan afectar a la onda de radar, modificando el espesor de balasto y utilizando distintas antenas de diferentes frecuencias.

El ensayo tiene la particularidad de poder calibrar el efecto de la antena en un medio constructivo muy transparente, dado el elevado volumen de aire existente en el medio y con un espesor de material y condiciones controladas.

Para ello se ha realizado un ensayo estático, generando un radargrama a través sucesivas mediciones separadas de centésimas de segundo con el equipo en reposo. Los ensayos se han realizado en ambos lados de la vía y en un tramo peraltado para obtener dos niveles de espesor suficientemente diferenciados.

Las antenas utilizadas en este ensayo han sido de frecuencias centrales 500, 800 y 1200 MHz y los espesores de aproximadamente 45 cm en el lado de menor espesor y 110 cm, en el lado de mayor. En total, se han tomado 6 registros.

En la figura 5.13 se muestra la sección constructiva de la plataforma ferroviaria y los puntos de ensayo:

.

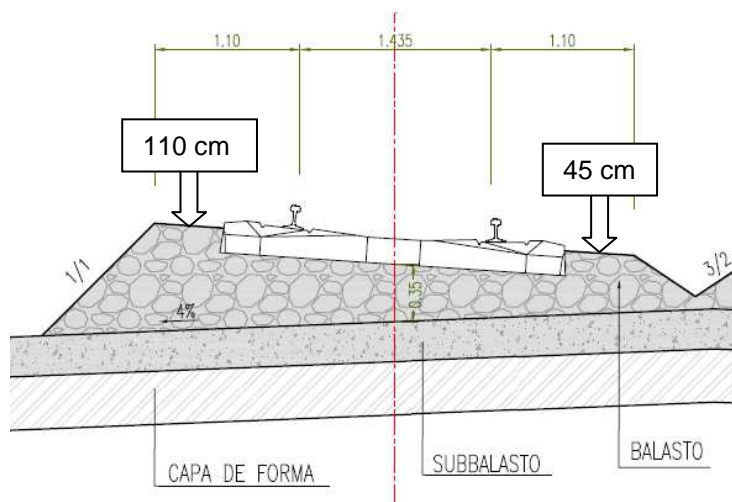


Figura 5.13: Sección constructiva de la plataforma ferroviaria y los puntos de ensayo.

En la figura 5.14, se muestra el dispositivo de medición con la antena de 500 MHz.



Figura 5.14: Dispositivo de medición con la antena de 500 MHz montada.

5.5.2 Resultados obtenidos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en el dominio temporal y frecuencial.

a) Estudio con la antena de 500 MHz

En la figura 5.15 se muestran los radargramas obtenidos en ambos lados de la vía.

En ellos se puede observar el reflector asociado al contacto entre el balasto y el sub-balasto, situado a un tiempo de 6 ns en el caso del espesor de 45 cm de balasto (izquierda) y a un

tiempo de 16 ns, en el caso del espesor de 110 cm de balasto (derecha). El cálculo de la velocidad de propagación de onda tiene un valor aproximado entre 14 y 15 cm/ns.

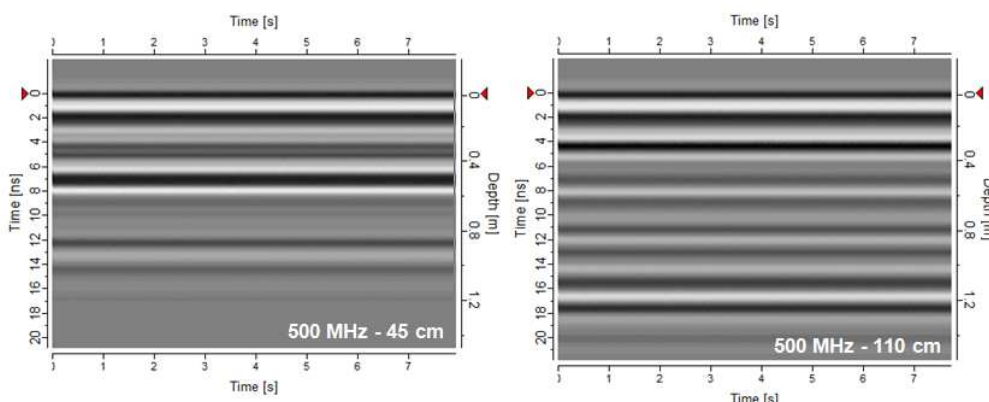


Figura 5.15: Radargramas obtenidos con un espesor de 45 (izquierda) y 110 cm (derecha).

En la figura 5.16 se muestran los diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha), para ambos espesores: 45 cm (en gris pálido) y 110 cm (en negro).

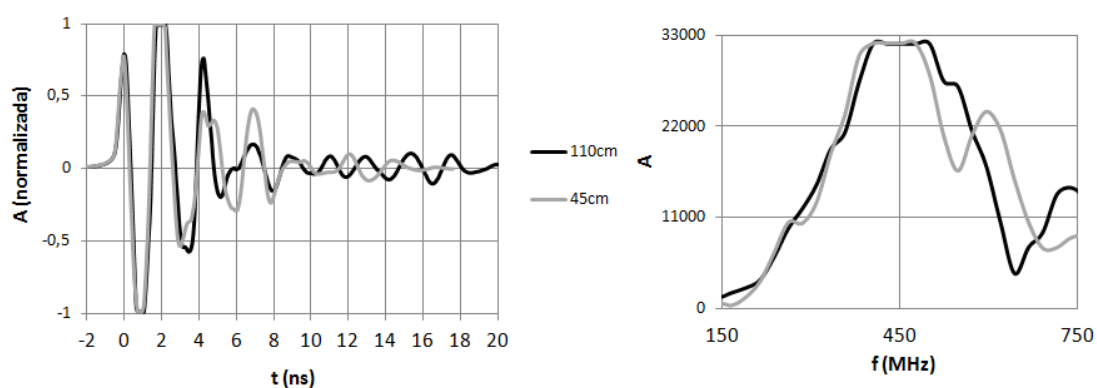


Figura 5.16: Diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha).

En el espectro de onda se observa un nivel de saturación de señal muy elevado, que, en el caso del espesor de balasto de 110 es único y centrado en los 450 MHz. Este hecho indicaría que la práctica totalidad del espectro representa tan sólo el reflector inicial asociado al contacto aire – balasto, sin prácticamente ninguna información contenida en el interior de la capa. Tan sólo un pequeño anomalía en torno a los 550 MHz indicaría la presencia de otro elemento reflector en el radargrama.

Sin embargo, en el caso del espesor de balasto de 45 cm, aparece un segundo pico situado en torno a los 600 MHz, representando el contacto entre el balasto y sub-balasto, con la información de interés para el estudio del interior de la capa de balasto.



b) Estudio con la antena de 800 MHz

En la figura 5.17 se muestran los radargramas obtenidos en ambos lados de la vía.

En ellos se puede observar el reflector asociado al contacto entre el balasto y el sub-balasto, situado a un tiempo de 5 ns en el caso del espesor de 45 cm de balasto (izquierda) y a un tiempo de 12 ns, en el caso del espesor de 110 cm de balasto (derecha). El cálculo de la velocidad de propagación de onda tiene un valor aproximado entre 16 y 17 cm/ns.

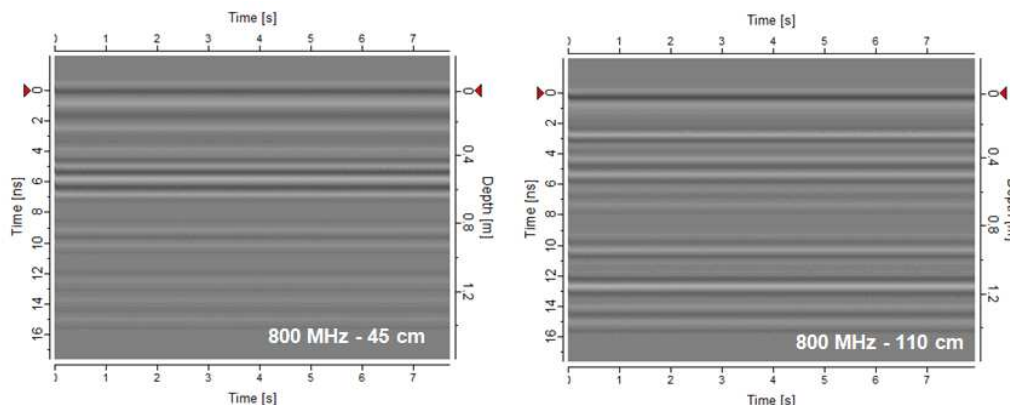


Figura 5.17: Radargramas obtenidos con un espesor de 45 (izquierda) y 110 cm (derecha).

En la figura 5.18 se muestran los diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha), para ambos espesores: 45 cm (en gris pálido) y 110 cm (en negro).

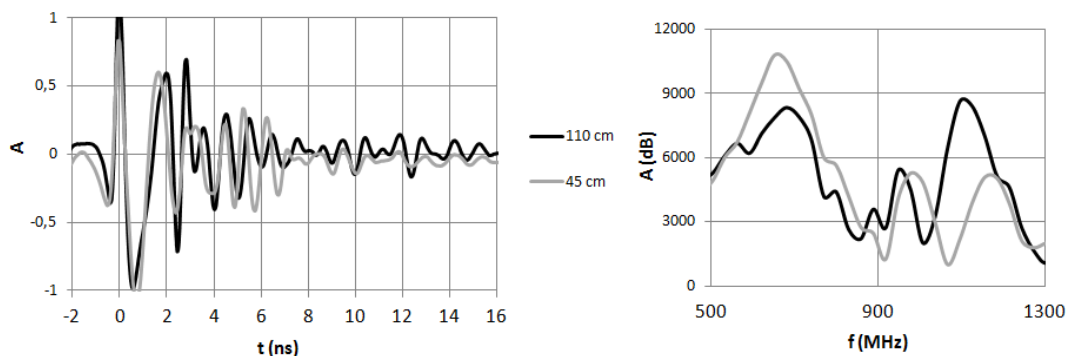


Figura 5.18: Diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha).

En este caso, tanto los diagramas de amplitudes como el espectro, ofrecen numerosos picos en un amplio espectro de frecuencias. Dadas las condiciones de medida y la antena utilizada, de longitud de onda: $\lambda/4 = 3$ cm en el aire (según la tabla 4.4 de este documento), se deduce que el diámetro de los huecos producidos en la capa de balasto generaría un efecto de “scattering”, con una elevada dispersión de la onda, y con resultados de comportamiento de onda, complejos de interpretar.

En la figura 3.7 se mostró un caso parecido, también en el estudio de una plataforma de ferrocarril y con una antena de características similares.

c) Estudio con la antena de 1200 MHz

En la figura 5.19 se muestran los radargramas obtenidos en ambos lados de la vía.

En ellos se puede observar el reflector asociado al contacto entre el balasto y el sub-balasto, situado a un tiempo de 4 ns en el caso del espesor de 45 cm de balasto (izquierda) y a un tiempo de 10 ns, en el caso del espesor de 110 cm de balasto (derecha). El cálculo de la velocidad de propagación de onda tiene un valor aproximado entre 19 y 20 cm/ns.

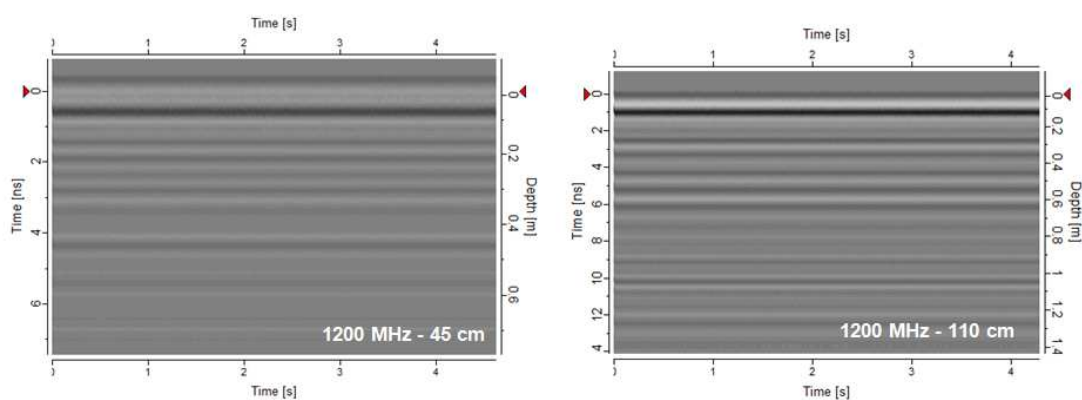


Figura 5.19: Radargramas obtenidos con un espesor de 45 (izquierda) y 110 cm (derecha).

En la figura 5.20 se muestran los diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha), para ambos espesores: 45 cm (en gris pálido) y 110 cm (en negro).

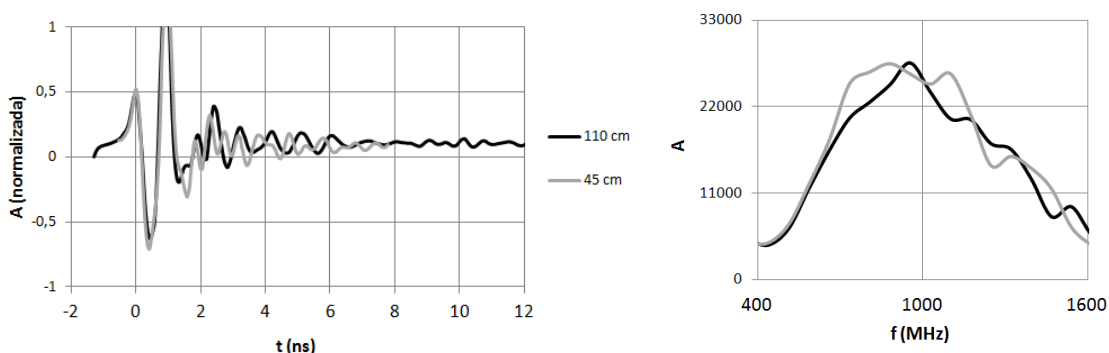


Figura 5.20: Diagramas de amplitudes de onda (izquierda) y el espectro (derecha).

El análisis de los espectros que ofrece el ensayo, muestran un patrón de comportamiento similar al ensayo realizado con la antena de 500 MHz. Por un lado, el espectro de onda del ensayo realizado con 110 cm de espesor es un espectro que podría asimilarse al de la onda directa, aunque con pequeños picos que podrían explicarse por las reflexiones de orden



menor producidas en el interior de la capa de balasto. Por otro lado, el espectro de onda del ensayo realizado con 45 cm de espesor, muestran un pico a 1300 MHz, que podría corresponder a la reflexión de contacto entre el balasto y el sub-balasto, de forma análoga al caso del ensayo realizado con la antena de 500 MHz.

5.6 Conclusiones

En este capítulo se han presentado los resultados de los ensayos realizados con el propósito de comprobar si existen en la señal efectos perceptibles debidos a la temperatura, a la humedad y al espesor de la capa superior del medio estudiado.

Los resultados demuestran que existen cambios muy perceptibles asociados a la temperatura del medio y al contenido de agua, debido a que la propagación de una onda electromagnética por un medio depende de la permitividad dieléctrica que, a su vez, depende de estos dos parámetros físicos. Por lo que variaciones en la temperatura y en la humedad del medio producirían pequeños cambios en su permitividad dieléctrica aparente que alterarían las características de la onda que se propaga a través de dicho medio, observándose variaciones en los registros de GPR, tanto en las trazas como en los espectros de las señales.

En concreto, se ha observado que un cambio en la temperatura del medio cuando se trabaja en el caso de temperaturas extremas parece afectar a las amplitudes de la señal, siendo mayor la atenuación en el caso de medios a más temperatura, y menor en el caso de medios por debajo de los cero grados. Este efecto de atenuación de las trazas también es mayor cuando el medio tiene un mayor contenido de agua.

En el caso del contenido frecuencial de las señales, se aprecia que la presencia de la humedad y los cambios de temperatura no afectan de forma apreciable ni a la frecuencia central ni al ancho de banda del espectro de las señales, aunque sí que afectan su amplitud.

Por otro lado, en los ensayos realizados sobre lámina de agua y balasto, se ha observado que el espectro obtenido de un ensayo de GPR responde de una forma muy evidente a las capas más superficiales, con una incidencia mucho más clara que en el resto de capas situadas debajo de ella. El motivo es la rápida atenuación de la señal y la menor amplitud de onda en los reflectores más profundos, que por lo general son visibles en los radargramas gracias a la aplicación de filtros de ganancia de señal.

Es relevante decir que, en este documento, los espectros se han obtenido partiendo de las trazas sin considerar la aplicación de filtros con el propósito de no introducir nuevas variables al estudio, que compliquen aún más el estudio de las señales.

Respecto a los espectros de respuesta en los ensayos en balasto y agua, cabe destacar una diferencia notable: mientras que en el ensayo en agua, la reducción del nivel de agua permite observar el nuevo pico asociado a la capa inferior en el rango del espectro de las bajas frecuencias, en el caso del ensayo en balasto no ocurre así. Los nuevos picos se generan independientemente del pico principal asociado al medio envolvente.

Este fenómeno podría ser debido al efecto del agua, con unos valores de permitividad dieléctrica muy elevados facilitando el filtrado de las altas frecuencias. Sin embargo, en el caso del balasto, los valores de permitividad dieléctrica del medio envolvente son muy bajos, con una menor capacidad de filtrado de la señal y un espectro inicial parecido a la reflexión directa generada por un ensayo en el aire.

Por otro lado, los resultados obtenidos con el ensayo en balasto, arrojan que la velocidad de propagación de onda, depende también de la frecuencia de la antena utilizada. En el caso del ensayo sobre balasto, se ha observado que, a mayor frecuencia de antena, mayor velocidad de propagación de onda. Este fenómeno afecta, de forma indirecta también a la permitividad dieléctrica que presenta el medio. Es decir, a mayor frecuencia de emisión de onda, menor es la permitividad dieléctrica relativa de respuesta del medio.



CAPITULO VI

Caracterización de firmes mediante el análisis espectral

Resumen

En este capítulo se presentan distintos casos de estudio y resultados obtenidos de la aplicación del ensayo de GPR en diferentes tipologías de firmes asfálticos. El objetivo principal es analizar la capacidad del método para detectar las distintas capas y materiales que conforman un firme asfáltico, así como identificar distintas patologías asociadas a su deterioro mediante el análisis del espectro de respuesta.

El primero de los casos compara los espectros de las señales obtenidas en el estudio de una pista aeroportuaria donde existe un tramo con sección de firme rígido y otro flexible. El objetivo es comprobar la segregación de la energía en rangos de frecuencias, y poderlos asociar a los distintos reflectores detectados en el medio.

El segundo caso se centra en encontrar un patrón de cambio en la forma de un espectro, asociado a las patologías clásicas de deterioro de los firmes asfálticos. Dicho estudio es discreto y se realiza en puntos localizados, donde se dispone de información aportada por deflectometría y extracción de testigos.

Finalmente, el tercer caso se centra en comprobar la evolución de la forma de un espectro de onda, a medida que las condiciones del firme van cambiando. Es un estudio que se realiza en medición continua y sobre tres secciones constructivas diferentes. Los datos se acompañan de un estudio sistemático de deflexiones.



VI. CARACTERIZACIÓN DE FIRMES MEDIANTE ANÁLISIS ESPECTRAL

6.1 Introducción

En términos generales, el ensayo de GPR, en ingeniería de firmes suele circunscribirse a la determinación geométrica de la estructura del propio firme para apoyar el cálculo del módulo de rigidez de cada una de las capas que lo forman mediante el método conocido como retro-cálculo, según indican las principales guías de diseño empírico-mecanicistas de firmes asfálticos.

Sin embargo, los principios geofísicos que sustentan el ensayo permiten, de forma indirecta y mediante la interpretación de variables asociadas a la respuesta física de los materiales frente a una onda electromagnética, obtener datos asociados al estado estructural de un firme. Dichas variables se asocian a patologías estructurales relacionadas, por ejemplo, con la presencia de humedad en las capas profundas o la falta de adherencia entre las capas más superficiales.

En este capítulo se utiliza el estudio del espectro de una onda de GPR como herramienta de análisis cualitativo.

6.2 Objetivos

El objetivo principal del capítulo es analizar la capacidad del método para detectar las distintas capas y materiales que conforman un firme asfáltico, así como identificar distintas patologías asociadas a su deterioro mediante el análisis del espectro de respuesta.

Para ello se presentan los resultados de tres ensayos, con los siguientes objetivos específicos:

- Comprobar, mediante un espectro de respuesta representativo, la segregación de la energía en rangos de frecuencias y poderlos asociar a los distintos reflectores detectados en un firme.
- Determinar un patrón de cambio de la forma de un espectro, asociado a la presencia de patologías de deterioro de los firmes asfálticos. Para ello se realiza un estudio discreto con información adicional de deflectometría y extracción de testigos.
- Comprobar la evolución de la forma de un espectro de onda, a medida que las condiciones del firme van cambiando. Para ello se realiza un estudio en medición continua, sobre secciones constructivas conocidas y segmentadas.

6.3 Caso 1: detección de capas y materiales a través del espectro

6.3.1 Introducción y objetivos

En este apartado se presentan los resultados de un ensayo experimental con las antenas apantalladas de 250 MHz y 800 MHz en la pista de aterrizaje del nuevo aeropuerto de la Araucanía, cercano a la ciudad de Temuco (Chile). El firme de la pista está formado por unas cabeceras de firme rígido formado por una losa de hormigón, mientras que toda la parte central está construida con un firme flexible de asfalto sobre una base granular.

El objetivo del ensayo es comprobar la segregación de la energía en rangos de frecuencias y poderlos asociar a los distintos reflectores detectados en un firme en función del espesor de la capa más superficial del firme y de la antena utilizada.

Para ello se ha medido sobre una sección de firme rígido que corresponde a una losa de hormigón de unos 40 cm de espesor sobre un suelo compactado y sobre una sección flexible que consta de una capa de asfalto de unos 12 cm. de espesor sobre una base granular de unos 28 cm. Por debajo del firme hay una explanada formada de suelo compactado.

En la figura 6.1 se muestra una representación ilustrativa de ambas secciones.

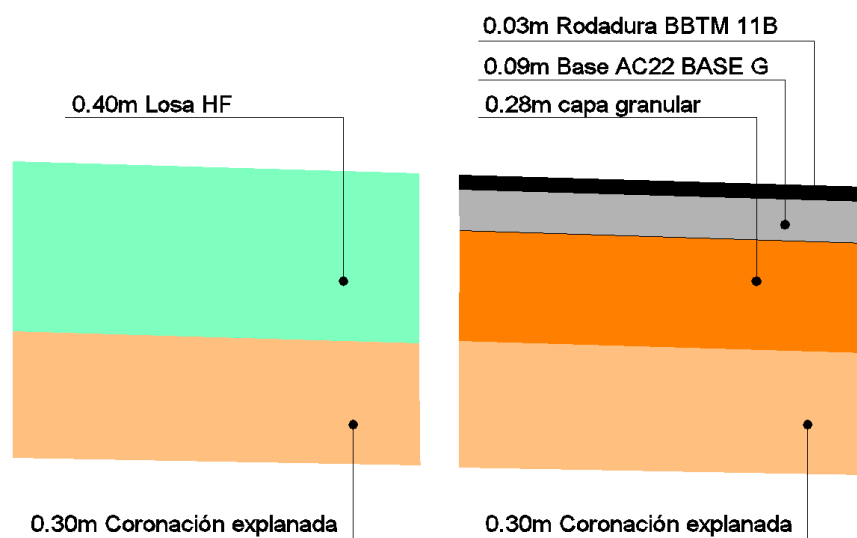


Figura 6.1: Secciones constructivas de las cabeceras (izquierda) y de la pista (derecha).

En la figura 6.2 se muestra el equipo de medición con antenas de 250 MHz (izquierda) y 800 MHz (derecha). Como la regularidad es muy buena y la velocidad de ensayo no necesitaba superar un valor mínimo, la adquisición de datos se ha realizado con las antenas situadas directamente sobre la superficie del firme.



Figura 6.2: Equipo GPR con antenas de 250 MHz (izquierda) y 800 MHz (derecha).

6.3.2 Resultados obtenidos

En la figura 6.3 se muestra un segmento de radargrama obtenido en la zona de transición entre la cabecera de la pista, de firme rígido (izquierda del radargrama), y la pista, de firme flexible (derecha del radargrama). El punto de contacto entre ambos firmes se sitúa en torno al metro 163 del perfil. El radargrama superior corresponde al perfil obtenido con la antena de 800 MHz, mientras que el radargrama inferior corresponde al mismo perfil obtenido con la antena de 250 MHz.

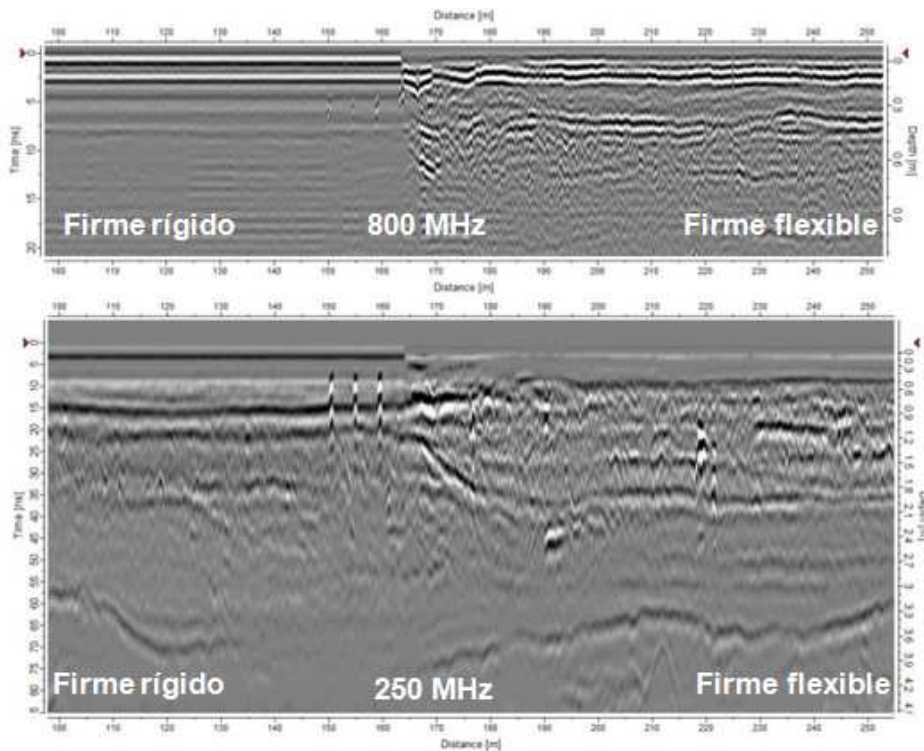


Figura 6.3: Registros con las antenas de 800 MHz (superior) y 250 MHz (inferior).

a) Antena de 800 MHz

En el perfil obtenido con la antena de 800MHz sobre el sector de firme rígido se observa, por un lado, la reflexión de contacto entre la losa de hormigón y la explanada, al límite de percepción visual, a un tiempo doble de propagación de unos 8 ns. También se observan las anomalías hiperbólicas causadas por la reflexión de la señal en los pasadores entre losas, entre los metros 150 y 160, a un tiempo de doble de propagación de unos 4 ns.

Los resultados en el sector de firme flexible presentan distintas anomalías correspondientes con reflexiones, asociadas a capas de firme y a la explanación; la primera -a unos 2 ns- se corresponde con el contacto entre la mezcla asfáltica y la base granular; la segunda -a unos 8 ns- se corresponde con el contacto entre la base de la base granular y la explanada; la tercera -en torno a los 12 ns- se corresponde con la capa de coronación de la explanada.

En la figura 6.4 se presenta el diagrama de amplitudes de onda en el dominio temporal, donde se observan grandes diferencias entre los promediados de las trazas sobre cada uno de los firmes, desde el inicio del registro hasta los 12 ns, punto desde el cual, las trazas se vuelven casi parejas. Por tanto, en las capas de firme es donde se hallan las diferencias. Por el contrario, a partir de los 12 ns, el medio de propagación pasa a ser el terraplén, que es el mismo para ambos.

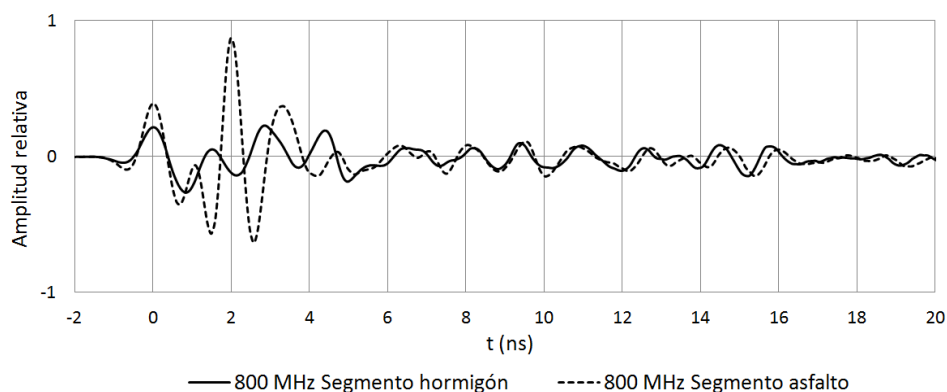


Figura 6.4: Diagramas de amplitud obtenidos con la antena de 800 MHz.

b) Antena de 250 MHz

En el perfil obtenido con la antena de 250MHz en el sector de firme rígido se observa una anomalía entre los 12 y los 15 ns correspondiente al límite entre la capa de coronación de la explanada y el terraplén. Por otro lado, se observa otra anomalía irregular entre los 60 y 70 ns (situada a una profundidad de unos 3 metros) que correspondería al límite entre el terraplén y el terreno natural.



Estos dos reflectores no son visibles en el registro obtenido con la antena de 800MHz. Sin embargo, con la antena de 800 MHz se detecta el límite inferior de la losa de hormigón, elemento que no es posible distinguir en el registro obtenido con la antena de 250 MHz, ya que queda oculto por las anomalías generadas en la reflexión que se ha producido en el contacto entre el aire y la superficie del firme.

Cuando se estudia el sector de firme flexible con la antena de 250 MHz, se observan distintas anomalías que pueden corresponderse con distintas capas de material, hasta llegar al terreno natural situado en torno a los 3 metros. Sin embargo, no es posible definir bien los espesores de cada una de ellas debido a que es un parámetro que, en este tipo de firmes, está en el límite de resolución de las antenas con esta frecuencia central.

La figura 6.5 permite comparar los dos registros adquiridos con la antena de 250 MHz, correspondientes con cada uno de los dos tipos de firme, donde la diferencia más relevante observada es un cambio de fase de la traza cerca de los 8 primeros nanosegundos en la parte de registro correspondiente al firme rígido. Dicho punto correspondería al contacto entre la losa de hormigón y la capa de coronación de la explanada.

Sin embargo, el pico de amplitud máxima que define el límite entre el firme y el terraplén se sitúa entre los 12,5 ns en el caso del segmento del firme flexible y 13 ns, en el caso del segmento de firme rígido. Es probable, aunque no se pueda contrastar, que el pico asociado a esta interfase llegue un poco antes en el caso del firme flexible, por tener una velocidad de propagación de onda superior a la del hormigón.

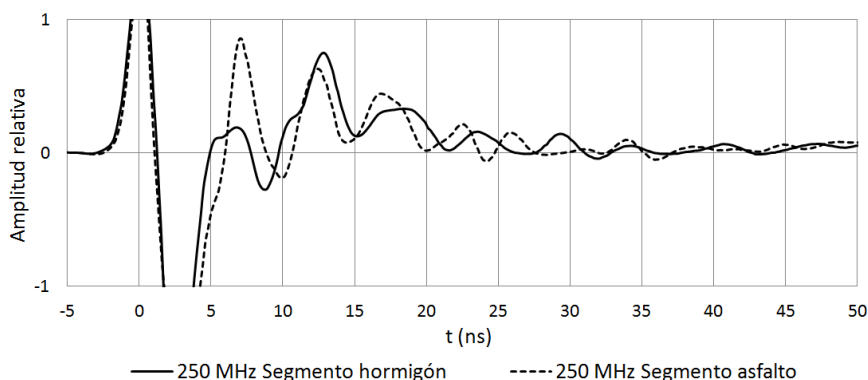


Figura 6.5: Diagramas de amplitud obtenidos con la antena de 250 MHz.

6.3.3 Conclusiones

En la figura 6.6 se presentan los espectros de las señales obtenidas con ambas antenas (antena 800MHz – diagrama derecha y antena 250 MHz – diagrama izquierda), en cada uno de los dos tramos analizados (firme rígido y firme flexible).

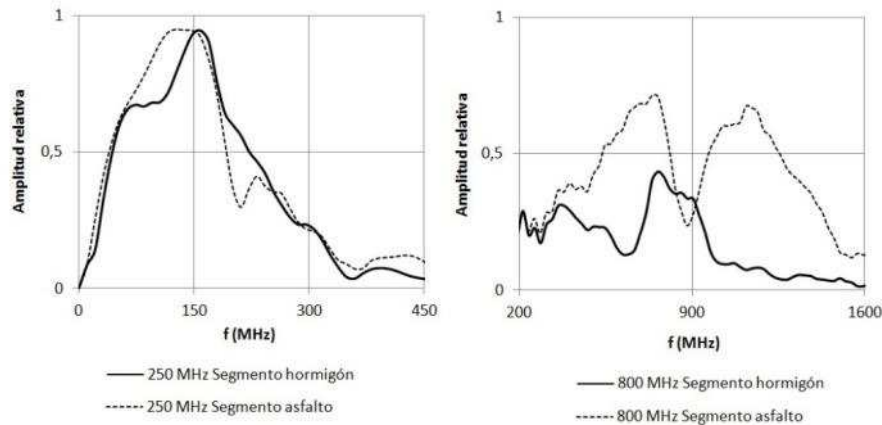


Figura 6.6: Espectros de amplitud de los registros obtenidos con las antenas de 250 MHz (izquierda) y 800 MHz (derecha).

Las diferencias más relevantes entre ambos espectros asociados a cada uno de los firmes se observan con el registro obtenido mediante la antena de 800MHz. El motivo es que la práctica totalidad de la energía reflejada por la antena de 800 MHz se concentra en las capas más superficiales del firme. En el caso de la sección de firme rígido, únicamente incide un pico, que representa la losa de hormigón. Sin embargo, en el caso de la sección del firme flexible, inciden dos picos, uno asociado a las mezclas bituminosas y el otro asociado a la base granular.

Por otro lado, los picos del espectro de frecuencias asociado al firme flexible, tienen una amplitud mayor, en concordancia con lo ocurrido en el diagrama de amplitudes del dominio temporal.

En el perfil obtenido con la antena de 250MHz, merece una especial atención el espectro de la señal registrada en el segmento de firme flexible, donde aparecen los dos mismos picos que presentaba la antena de 800 MHz. En este caso, el primero de ellos en torno a los 250 MHz, estaría asociado a las mezclas asfálticas, mientras que el segundo, más importante y de frecuencia central en torno a los 130 MHz, estaría asociado a la base granular. A diferencia de la antena de 800 MHz, que los dos picos tenían una amplitud similar, los resultados de la antena de 250 MHz permiten potenciar la amplitud de onda generada por la base granular, debido a su mayor alcance.

Por otro lado, el pico de mayor amplitud observado en el espectro correspondiente a la sección de firme rígida con la antena de 250 MHz, corresponde con la propia losa de hormigón, de forma homóloga al pico principal observado con la antena de 800 MHz.



6.4 Caso 2: cambio de la forma de un espectro según el deterioro de un firme asfáltico

6.4.1 Introducción

En este apartado se presentan las posibilidades del uso del espectro de respuesta de una onda electromagnética, utilizando el GPR, para la determinación de anomalías detectadas en el firme de una carretera. Para ello se realiza un análisis de sensibilidad del espectro de onda, bajo condiciones conocidas en un firme asfáltico de una autopista.

Se comprueba, por un lado, la modificación del espectro de onda a medida que la relación de espesores en un sistema bi-capa se modifica. Por otro lado, se comprueba cómo afecta la presencia de anomalías asociadas a fuentes de deterioro estructural detectadas mediante FWD sobre un espectro de referencia.

El estudio de las fuentes de deterioro se centra en la localización de zonas húmedas bajo el firme y la falta de cohesión entre las capas del firme, que son anomalías fácilmente identificables mediante el ensayo de FWD.

Las conclusiones del estudio se apoyan en los resultados de una campaña de extracción selectiva de testigos.

6.4.2 Objetivos

En este apartado se presentan los trabajos realizados para comprobar la sensibilidad del espectro de respuesta de una onda electromagnética en el dominio de las frecuencias en estudios de diagnóstico de patologías de firmes asfálticos.

El análisis se centra en determinar los cambios del espectro comparando el de la señal recibida con el de la señal emitida por un equipo de GPR. Estos cambios se relacionan con la proporción de elementos no deseados en el núcleo del firme (habitualmente, aire y agua), que son los que más afectan a la capacidad portante del firme de una carretera.

Para alcanzar los objetivos del trabajo, se han seleccionado determinados segmentos del firme de una autopista, utilizando datos de una campaña de mediciones con FWD. Posteriormente, se han adquirido datos con GPR y finalmente se realizó una campaña selectiva de extracción de testigos, para comprobar los resultados.

6.4.3 Metodología

a) Tipo de firme ensayado

Los ensayos se han realizado sobre un tramo de la autopista que es uno de los principales accesos al área metropolitana de Barcelona por el oeste de la ciudad. Se trata de un tramo de 2,5 km de autopista con un firme flexible, construido y puesto en servicio el año 2004 y con un diseño de vida útil a 20 años. La estructura de firme con espesores de material granular y asfáltico elevados.

El elevado espesor de las capas permite disminuir la incidencia de los efectos indeseables debidos a las discontinuidades y a factores de tipo constructivo en el espectro de frecuencias de la señal.

La sección estándar del firme está compuesta por distintas capas de mezcla asfáltica con un espesor de proyecto total de 30 cm sobre una base granular de un espesor de proyecto de 25 cm, como se muestra en la figura 6.7.

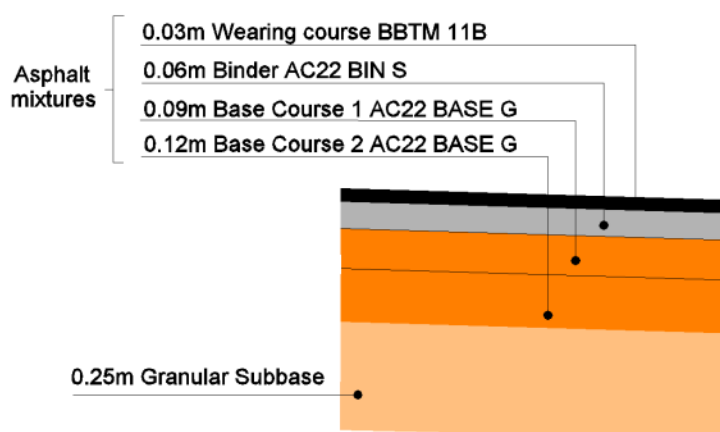


Figura 6.7: Sección de firme tipo ensayada.

En este tramo, bien delimitado, se detectan mediante los ensayos de FWD y GPR, las anomalías y condiciones físicas del firme requeridas para el propósito del estudio.

b) Ensayos realizados

Las dos campañas de prospección con GPR se han realizado sobre el mismo tramo de autopista de forma continua. Se ha utilizado un vehículo que desplaza la antena a una velocidad adecuada para no entorpecer el tráfico, adquiriendo una muestra cada 25 cm, con una frecuencia de muestreo de unos 15.000 MHz.



Los ensayos de GPR se realizaron en dos etapas. La primera en 2004, antes de abrir al tráfico la autopista. La segunda en 2013, análoga a una campaña de ensayos con FWD, correspondiendo a la mitad del período de vida útil prevista para la infraestructura.

En los dos ensayos se ha utilizado la misma antena apantallada de frecuencia central 800 MHz. El espectro de la señal emitida por la antena utilizada en los ensayos se presenta en la figura 6.8. Se observa la máxima amplitud para una frecuencia cercana a 850 MHz.

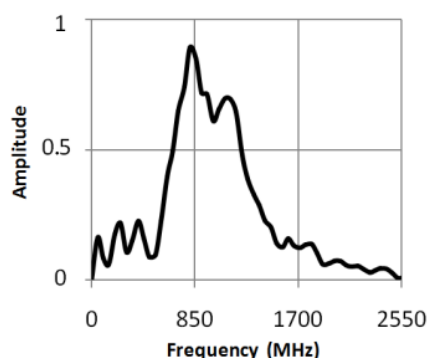


Figura 6.8: Espectro al aire de la antena utilizada.

La antena se ha colocado sobre la parte trasera de un vehículo tractor, alejada del ruido del motor y suficientemente separada del cuerpo del vehículo. La distancia entre la antena y la superficie del firme es la menor posible para minimizar los efectos de la dispersión de energía. En este caso, la distancia se ha dejado a unos 15 cm, para evitar eventuales impactos fortuitos de la antena con el suelo a velocidades elevadas (figura 6.9).



Figura 6.9: Dispositivo de GPR utilizado para los ensayos.

El estudio de deflexiones con FWD se ha utilizado para identificar los tramos más adecuados para los ensayos con GPR, atendiendo a los objetivos planteados.

Los valores de deflexión corresponden al punto de estudio y se presentan debidamente corregidos por temperatura y humedad según las ecuaciones del Instituto del Asfalto [Al, 2000].

La tramificación de resultados obedece al criterio del cálculo de las diferencias finitas acumuladas de aplicación normalizada según la guía de diseño de firmes AASHTO, en su versión de 1993 [AASHTO, 1993].

Se han extraído testigos según requerimientos del estudio, siguiendo las pautas de la norma ASTM D979 [ASTM, 2001], con la finalidad de comprobar los resultados obtenidos.

c) Procesado de la señal de GPR

La figura 6.10 muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos en un tramo de la autopista con sección estructural estándar y sin patologías constructivas detectadas. La sección constructiva que muestra el testigo (figura 6.10 a) se corresponde con los máximos de amplitud de la envolvente de la señal obtenida a partir del valor absoluto de la amplitud registrada en el dominio temporal t (ns) (figura 6.10 b).

En zonas puntuales pueden existir variaciones que ocasionarían una señal no representativa de la estructura estándar en el tramo.

Para evitar la presencia de posibles señales ocasionadas en reflexiones en estos elementos no característicos, la señal sobre la que se trabaja es el resultado de promediar las trazas registradas a lo largo 5 metros lineales. Es decir, como se ha adquirido una traza cada 25 cm, la gráfica final que se muestra en la figura 6.10 representa la media de 20 muestras. La transformada de Fourier de la señal promediada temporal permite determinar el espectro de amplitudes de la onda (figura 6.10 c).

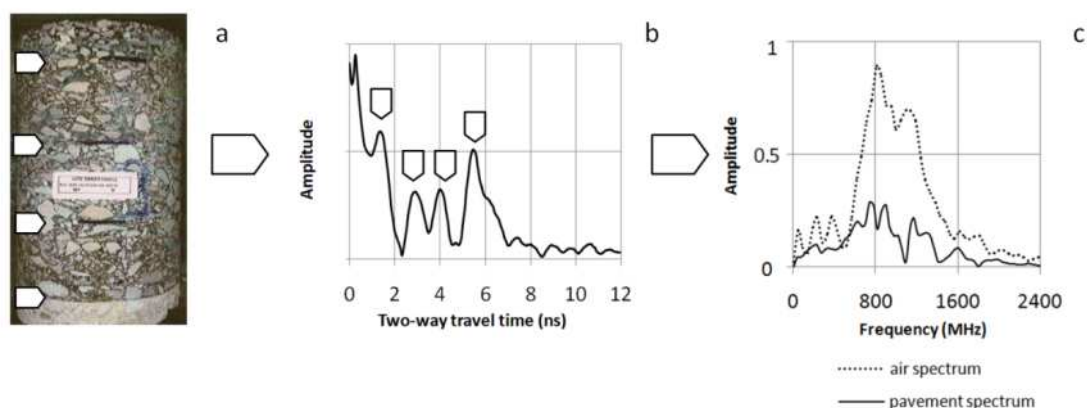


Figura 6.10: Resultados obtenidos en un tramo de sección estructural estándar. a) Testigo mostrando las capas de la estructura. b) Envolvente de la señal temporal de GPR promediada a lo largo de 5 m. c) Contenido frecuencial de la señal promedio obtenida.

El testigo de la figura 6.10-a muestra la existencia de cuatro capas de asfalto perfectamente adheridas entre ellas pero con mezclas distintas. De las cuatro capas, la más superficial o capa de rodadura es la que más se diferencia del resto por su composición granulométrica,



por su contenido en huecos y por el árido, que es de tipo granítico. Las otras tres capas están formadas por áridos calcáreos y se diferencian entre sí por la granulometría y por el contenido en huecos.

En la figura 6.10-b se puede comprobar la correspondencia entre el número de transiciones entre capas y el número de picos que las representan. El pico situado a un tiempo entorno a los 5,5 ns, corresponde a la transición entre la capa bituminosa inferior y la base granular. Los picos situados en tiempos anteriores corresponden a cada una de las transiciones entre capas bituminosas. El pico inicial situado a 0 ns se corresponde con la transición entre el aire y el firme.

Finalmente, en la figura 6.10-c se observa la distribución de las frecuencias de la señal recibida. La gráfica muestra dos zonas principales que pueden estar asociadas a la existencia de dos medios caracterizados por diferentes propiedades electromagnéticas: AC (Asphalt concrete) y GB (Granular Base).

De los dos rangos espectrales (cada una de las dos zonas observadas), la mayor parte de energía reflejada se sitúa entre los 700 MHz y 900 MHz, mientras que un segundo rango de energía reflejada, aunque de menor amplitud de onda, se sitúa entre los 1100 y 1300 MHz.

6.4.4 Resultados obtenidos

a) Efecto de las variaciones de espesor de capas en el contenido frecuencial

Con el fin de comprobar la sensibilidad del espectro de respuesta a la proporción entre dos capas de firme de naturaleza distinta, se analiza el espectro de las señales obtenidas variando la relación de espesores de las capas. Para ello, se aprovecha la presencia de una cuña de transición a una estructura de paso de hormigón.

La cuña de transición es un elemento constructivo que para resolver el contacto entre un firme flexible y una estructura de hormigón y consiste en aumentar progresivamente el espesor de asfalto de la sección tipo, decenas de metros antes de llegar a la estructura de hormigón. Su finalidad es aumentar progresivamente la rigidez del sistema para minimizar los efectos de transición entre una estructura flexible y deformable, hacia una estructura rígida no deformable.

En la figura 6.11 se representa el registro de radar obtenido sobre la zona de ensayo, donde se puede observar claramente la reflexión por el efecto del contacto entre las capas de mezcla bituminosa (MB) y la base granular (BG) y el incremento de tiempo de reflexión

progresivo. Sobre el radargrama se indican cuatro puntos de sondeo (A, B, C y D) separados 5 metros entre ellos.

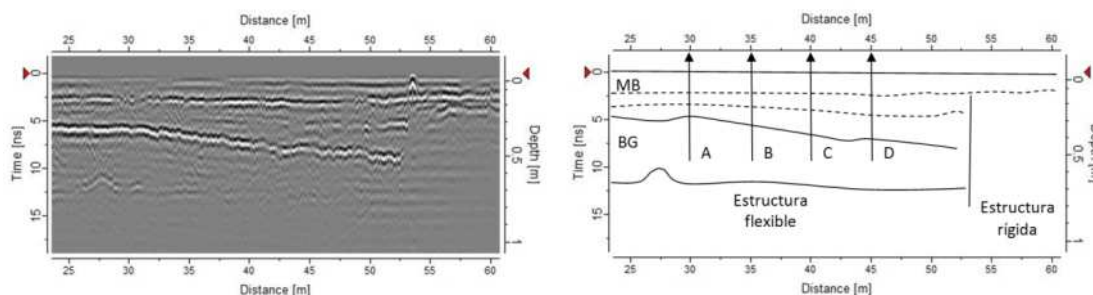


Figura 6.11: Radargrama obtenido sobre de la cuña de transición entre la sección tipo y un puente de hormigón. Las flechas señalan 4 puntos de la cuña (A, B, C y D) separados 5 metros entre sí.

Partiendo de los tiempos de reflexión medidos sobre el radargrama, donde el punto A es el espesor de la sección tipo y el D es el espesor de entrega a la losa de hormigón, se deducen los valores que se presentan en la tabla 6.2.

	Distancia a origen (m)	MB (cm)
Punto A	30	30
Punto B	35	35
Punto C	40	40
Punto D	45	45

Tabla 6.2: Coordenadas de los cuatro puntos de medida mostrados en la figura 5.8.

Dado que el ensayo de GPR se ha realizado antes de la puesta en servicio de la infraestructura, se asume un buen estado y elevada homogeneidad de los materiales de cada muestra. En consecuencia, los valores de las propiedades de respuesta electromagnética más relevantes de los elementos que forman las capas de MB y BG, pueden ser asumidos según valores de catálogo. Uno de los catálogos más utilizados es el publicado por Huang (2009), que presenta los valores mostrados en la tabla 6.3.

	Aire	betún	árido (limestone)	Agua
Permitividad dieléctrica relativa	1	3-5	7-9	81
Velocidad de propagación de onda (mm/ns)	300	134-173	100-113	30-35

Tabla 6.3: Valores de respuesta electromagnética [Huang, 2009].

Por otro lado, los materiales que componen las capas asfálticas y la base granular se consideran los previstos por las especificaciones técnicas españolas (tabla 6.4).



	Vacíos	betún	árido calizo (limestone)	Agua
AC (densas)	5%	5%	90%	0%
GB (base granular)	10%	0%	80%	10%

Tabla 6.4: Composición estimada de cada capa según las especificaciones españolas.

Considerando los datos de las tablas 6.3 y 6.4 se deduce que la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r) de MB es menor que la de BG y que, por tanto, en su conjunto, en la zona dónde se ha obtenido la traza A (Figura 6.7), ϵ_r será mayor. Además, ϵ_r se irá reduciendo conforme incrementa el espesor de asfalto.

En la figura 6.12 se muestra el espectro y la interpretación para las trazas correspondientes con cuatro puntos representativos de la cuña de transición: A, B, C y D, representados en la figura 6.11 junto con el espectro de la onda directa, tomado como referencia (en línea punteada).

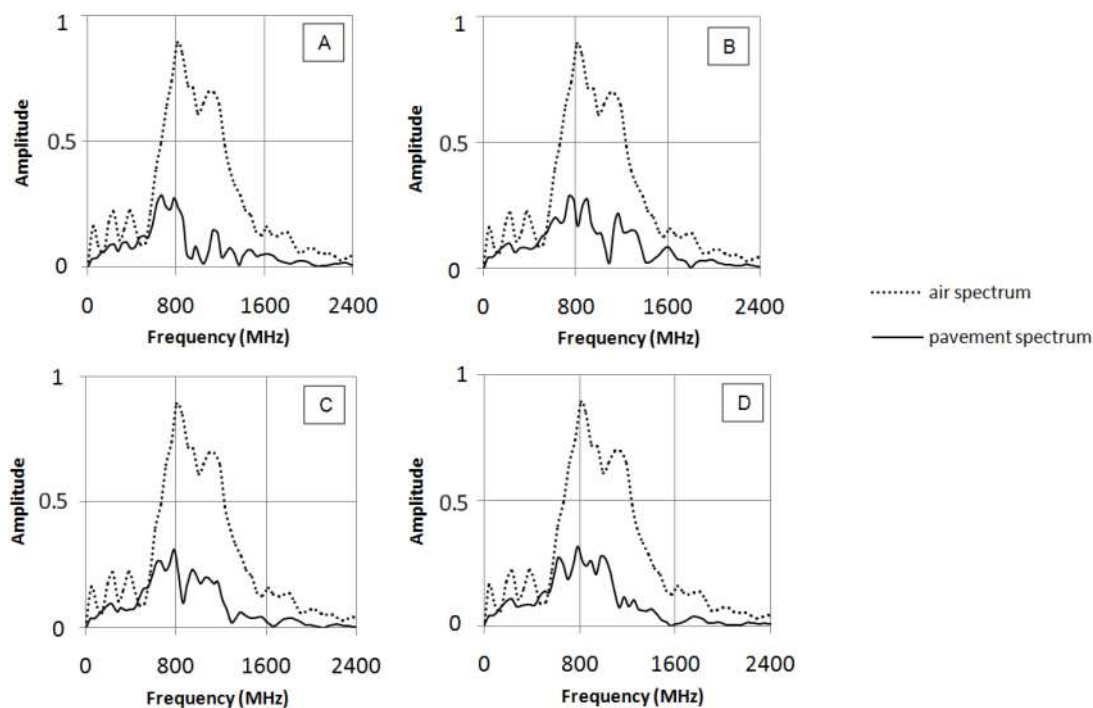


Figura 6.12: Espectros de respuesta obtenidos en los puntos de medición A, B, C y D

En los espectros de las cuatro trazas se puede observar una zona caracterizada por un pico principal de mayor amplitud, correspondiente a una frecuencia central próxima a los 800 MHz. El ancho de banda parecido, si se consideran las frecuencias de máxima amplitud alrededor de este pico máximo, puede considerarse que se corresponde con el espectro de la señal reflejada en el contacto entre la capa BG y capas inferiores, ya que sus características permanecen invariables en cualquiera de los puntos analizados.

Por otro lado, se aprecia una zona del espectro en un rango de frecuencias más elevadas, en el que aparece un segundo máximo de amplitud (un segundo pico), cuya amplitud cambia al comparar los espectros de las cuatro trazas, siendo mayor su amplitud conforme aumenta el espesor del conjunto de las capas de asfalto. Este efecto se observa entre los 1200 y los 1000 MHz. El ancho de banda de esta segunda zona del espectro también aumenta al aumentar el espesor de la capa. Estos efectos permiten asociarlo con la reflexión producida en el contacto entre las capas MB y BG.

El desplazamiento del segundo pico, asociado al contacto MB - BG, podría deberse a que el contacto es cada vez más profundo, según el comportamiento que se ha observado en los ensayos anteriores. Finalmente, la amplitud cada vez mayor podría corresponderse con la disminución del contenido de agua en el conjunto del sistema, por lo que la atenuación de la onda disminuye, produciéndose menos absorción de su energía.

b) Efecto de la presencia de agua en el contenido frecuencial

La presencia de agua en las capas más profundas de un firme es una de las causas que generan un mayor deterioro estructural, afectando de manera muy relevante a la capacidad portante de la carretera. Estas pérdidas de rigidez pueden llegar a ser superiores al 50% en función del momento en que se tomen los valores de la deflexión [Drumm et al., 1997].

Un cuenco de deflexiones obtenido en una zona con materiales que presentan un elevado porcentaje de agua en sus poros muestra valores de deflexión elevados en todos sus geófonos, presentando también un bajo nivel de recuperación en los sensores más alejados del punto de aplicación de la carga (figura 6.13-a).

Al analizar un tramo afectado por humedad, los testigos pueden proporcionar una idea del deterioro producido. En la figura 6.13-c se muestra un testigo extraído de una zona afectada por un elevado contenido en agua. La muestra, además de presentar saturación en el conjunto de la estructura, ha perdido absolutamente la cohesión entre las capas de AC y GB.

Observando el espectro respuesta correspondiente al registro de GPR en la zona (figura 6.13-b) puede comprobarse, por un lado, la significativa reducción del ancho de banda del rango correspondiente a GB. Por otro lado, se observa un relevante desplazamiento hacia las bajas frecuencias de los picos del espectro de máxima amplitud. Este desplazamiento es de 100 MHz, en el caso del pico asociado al contacto entre GB y capas inferiores: el pico centrado aproximadamente en los 800 MHz en el caso del firme nuevo, pasa a estar centrado cerca de los 700 MHz cuando el firme está deteriorado. Por otro lado, el pico asociado al contacto entre AC y GB, situado en el caso del firme nuevo cerca de los 1200 MHz, se localiza próximo a los 850 MHz cuando el firme está deteriorado.

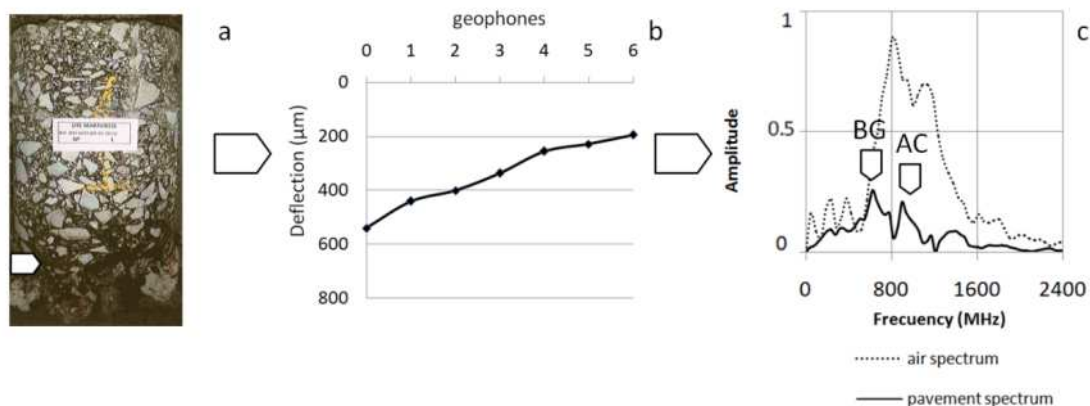


Figura 6.13: Registro de deflectometría (a), espectro de amplitudes de la señal de GPR (b) y testigo (c) en un tramo en el que existen problemas de humedad en la sub-rasante

c) Efecto de la presencia de aire en el contenido frecuencial

Otra causa de fallo de un firme es la pérdida de cohesión entre las capas por efecto del deterioro o mal estado de los riegos de adherencia. La vida útil de un firme bajo sollicitación por carga cíclica puede llegar a disminuir alrededor de un 50% cuando la unión entre capas se reduce en un 10% para cada condición de carga y rigidez de sub-rasante: Gomba et al. (2005).

Un cuenco de deflexiones obtenido en una zona con pérdida de cohesión entre capas muestra valores de deflexión elevados en los geófonos más cercanos al punto de aplicación de la carga, presentando una rápida recuperación en los sensores más alejados (figura 6.14-b). En consecuencia, la pérdida de cohesión ocasiona una sobrecarga en las capas inferiores que las debilita, reduciendo progresivamente su vida útil.

La figura 6.14 muestra los ensayos realizados en una zona con pérdida de cohesión. El testigo extraído en ese tramo, muestra el deterioro producido en la superficie de contacto entre las distintas capas de AC.

Observando el espectro respuesta (figura 6.14-c) puede comprobarse que, el rango que corresponde a la respuesta de GB permanece invariable respecto al firme en su estado original mientras que el rango que responde a AC se diluye en 3 picos de elevada amplitud, en frecuencias desde los 900 MHz a los 1300 MHz. Este fraccionamiento del ancho de banda correspondería a la segmentación de los materiales (figura 6.14-a).

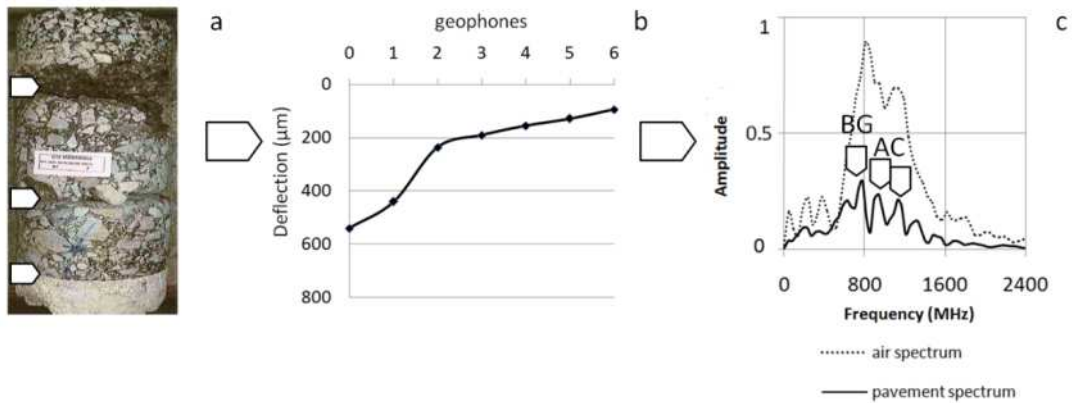


Figura 6.14: Registro en un tramo con sección estructural sometida a problemas de adherencia entre capas. a) Testigo que muestra la falta de cohesión entre las capas (señalada con una flecha). b) Registro de deflectometría. c) Espectro de amplitudes del registro de GPR

6.4.5 Conclusiones

Este apartado se dedica a determinar las diferencias en el espectro de frecuencias de las señales de GPR obtenidas en la evaluación de firmes, dependiendo de las características y condiciones de las capas que lo constituyen.

Los ensayos realizados revelan que esta tipología de análisis podría ser una herramienta útil, aunque se deberían llevar a cabo más estudios y análisis estadísticos sobre la base de los primeros resultados presentados.

La metodología utilizada consistió en medir un firme en dos etapas diferentes de su vida útil. La primera campaña se llevó a cabo justo antes de la puesta en servicio de la carretera, mientras que la segunda campaña se llevó a cabo cuatro años más tarde. Por lo tanto, los datos de radar obtenidos en la primera campaña se supone que corresponden a los materiales en condiciones óptimas, mientras que la segunda campaña proporciona datos de diferentes zonas caracterizadas por la presencia de patologías asociadas a su deterioro.

Las principales características deducidas en este estudio indican:

1. Cambios en el espectro de la señal registrada, asociados a los cambios en los espesores de las capas. Los materiales del firme actúan como un filtro pasa bajas y los picos del espectro se mueven a frecuencias más bajas en el caso de capas de mayor espesor. Por otra parte, el ancho de banda del espectro se incrementa a medida que se incrementa el espesor de la capa.



2. La existencia de más de una capa podría estar asociada a cambios en el espectro que muestran claramente dos o más zonas, cada uno más probable correspondiente a la energía reflejada en cada una de las discontinuidades. El análisis de una zona con una capa de espesor variable enfatizó la existencia de áreas del espectro sin cambios, mientras que en otras zonas varía en función del espesor. Por lo tanto, el análisis sugiere que diferentes zonas del espectro podrían estar asociados a la reflexiones sobre diferentes contactos.

3. Los cambios en el contenido de agua parecen estar asociados a los cambios en el ancho de banda del espectro que disminuye mientras que el contenido de agua aumenta. Además, el aumento de la humedad podría corresponder a un desplazamiento de los picos del espectro hacia frecuencias menores.

4. El aumento de la porosidad en las capas de firme causa un aumento del contenido de aire en los materiales. El análisis del espectro de zonas con diferentes porosidades parece indicar un incremento del número de picos asociados a la desunión entre capas.

Por último, este estudio sugiere la posibilidad de desarrollar algoritmos con el fin de carreteras segmento en función de la frecuencia espectro de señales GPR como una herramienta adicional en la evaluación de firmes, en base a los cambios en el ancho de banda y el número de picos de amplitud máxima a lo largo de una misma carretera.

6.5 Caso 3: El espectro de GPR en la monitorización de firmes asfálticos

6.5.1 Introducción y objetivos

En este apartado se presenta un estudio realizado en medición continua y a velocidades cercanas a los 50 km/h para comprobar la modificación del espectro de onda a medida que las condiciones físicas del firme varían. Dicho estudio está acompañado por una campaña de medición de deflexiones en continuo.

A diferencia de los ensayos realizados hasta el momento, discretos y en condiciones controladas, este se presenta asumiendo resultados basados en datos obtenidos de variables de tipo estadístico para comprobar el estado de integridad de un firme.

Este sistema de análisis, aún perdiendo precisión en la medida, permite tramificar la carretera en segmentos de comportamiento homogéneo. De esta forma, puede estudiarse la posibilidad de generar un indicador con valores asociados a los cambios de la forma en el espectro, de una longitud adecuada, y que sean útiles para identificar zonas con mayor o menor deterioro, de acuerdo a los criterios utilizados en un sistema de gestión de firmes.

Este indicador podría ser equiparable y compatible a otros tantos indicadores que se analizan de forma tramificada y que tienen que ver con el estado de conservación de un firme. Este es el caso de la deflexión característica, el índice de regularidad superficial, el CRT o el PCI, entre muchos otros.

6.5.2 Metodología

Para alcanzar los objetivos del trabajo se ha seleccionado un sector de una autopista con secciones de diseño y estados del firme conocidos. En este sector se ha realizado una campaña de prospección con GPR. Para el mismo sector se dispone de los resultados previos de ensayos de deflexión y de regularidad superficial, así como de información sobre el tráfico soportado.

Los registros de GPR se utilizan para realizar un estudio comparativo entre los espectros de las señales registradas medidos en los distintos sectores. Esta comparación permite evaluar pequeños cambios observados en la forma del espectro, respecto de un espectro patrón.

La autopista escogida para el estudio es uno de los principales accesos por el norte del área metropolitana de Barcelona con IMD de 15.000 con un 10% de vehículos pesados y puesta en servicio en el año 2006. Se ha seleccionado porque en un tramo corto (de unos 7800 m) coexisten tres tipos de sección de diseño, bien definidos y conocidos. Cada una de las secciones representa una de las tipologías de firme más conocidas.

Los sectores se definen considerando las tres secciones de diseño existentes en el tramo total analizado. Para cada sección se consideran tres subsectores de longitud de entre 700 m y 1000 m, atendiendo al estado de conservación del firme. La información que ha permitido definir los subsectores se ha obtenido mediante los ensayos previos de deflexión y de IRI.

El análisis se realiza comparando los espectros de frecuencia de los registros de radar, característicos de cada subsector, evaluando la influencia del diseño y del estado de conservación del firme.

Se ha utilizado el método normalizado de segmentación CDA, expuesto en la guía [AASHTO, 1986] para delimitar los subsectores. El criterio usado consiste en delimitar los cambios de pendiente de las desviaciones acumuladas del conjunto de valores registrados en las mediciones de deflexión. De esta manera se asegura la suficiente homogeneidad en las características de cada uno de los subsectores.

La tabla 6.5 muestra los tres sectores y los nueve subsectores considerados, su longitud y segmentación según los resultados de los ensayos de deflexión y regularidad.



	Stretch	INITIAL K.P. (km)	FINAL K.P. (km)	tested lenght (m)	deflections (p50) (mm)	IRI (p50) (m/km)
AC (35 cm)	Best	60+400	61+100	700	82	0,9
	Intermediate	61+100	61+800	700	94	1
	Worst	61+800	62+500	700	103	1
AC (25 cm) + GB (25 cm)	Best	71+600	72+600	1000	53	0,9
	Intermediate	66+000	67+000	1000	90	0,9
	Worst	68+200	69+200	1000	130	1,7
AC (20 cm) + CTB (25 cm)	Best	77+000	78+000	1000	26	0,7
	Intermediate	78+000	79+000	1000	24	1
	Worst	80+300	81+000	700	82	1,3

Tabla 6.5: Tramos estudiados con los resultados de los ensayos de deflexión y regularidad superficial (IRI).

a) Secciones de diseño consideradas

Las tres secciones de diseño existentes el tramo de carretera estudiado (denominadas A, B y C) se muestran en la figura 6.15.

La sección A consiste en un firme de tipo “full depth”, con un elevado espesor de mezcla bituminosa sobre una base de suelo compactada, formando la explanada. La sección de diseño del firme está compuesta por distintas capas de mezcla asfáltica con un espesor total de 35 cm (Figura 1, izquierda).

La sección B es un firme flexible. La sección de diseño está formada por varias capas de mezcla bituminosa formando un conjunto de 25 cm de espesor, sobre una base granular sin tratar de 25 cm, (Figura 1, centro).

La sección C es un firme semi-rígido. La sección de diseño está formada por una serie de capas de mezcla bituminosa con un espesor total de 20 cm, sobre una base granular tratada con cemento de 25 cm (Figura 1, derecha).

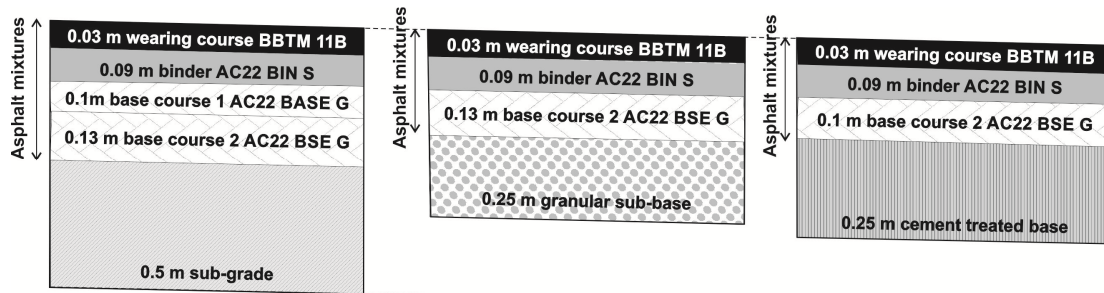


Figura 6.15: Secciones de diseño de tipo A "full depth" (izquierda), B flexible (centro) y C firme semirrígido con base de cemento tratado (derecha)

b) Estado de conservación de los sectores estudiados

La definición inicial de los nuevos subsectores del tramo de carretera estudiado considerando sus características constructivas y su estado de conservación se efectuó en base a los resultados de los ensayos de deflexión y regularidad, mediante histogramas de frecuencias acumuladas. Los valores presentados corresponden a la totalidad de las mediciones efectuadas en cada uno de ellos.

La figura 6.16 muestra los valores resultantes de la deflexión medidos con el equipo deflectógrafo Lacroix [Prandi, 1967] en cada uno de los subsectores considerados. Las gráficas en línea continua y en línea discontinua en la Figura 2 corresponden a los subsectores en mejores y en regulares condiciones, respectivamente. Las gráficas en línea punteada en la Figura 2 corresponden a los subsectores en peores condiciones.

Las deflexiones obtenidas en la sección A (Figuras 1 y 2) presentan valores bajos debido al elevado espesor del conjunto de capas bituminosas que le confieren al sistema una elevada rigidez.

Las deflexiones obtenidas en la sección B (Figuras 1 y 2) presentan una gran diversidad de estados. Se observa un subsector en muy buen estado con deflexiones bajas, un segundo subsector en condiciones regulares y un tercer subsector que contiene pocas zonas en buen estado. En el subsector en malas condiciones prácticamente no existen puntos por debajo del valor de los 100 μm .

En las deflexiones obtenidas en la sección C (Figuras 1 y 2), dos de los subsectores presentan muy buenas condiciones, mientras que el tercero presenta unas condiciones malas.

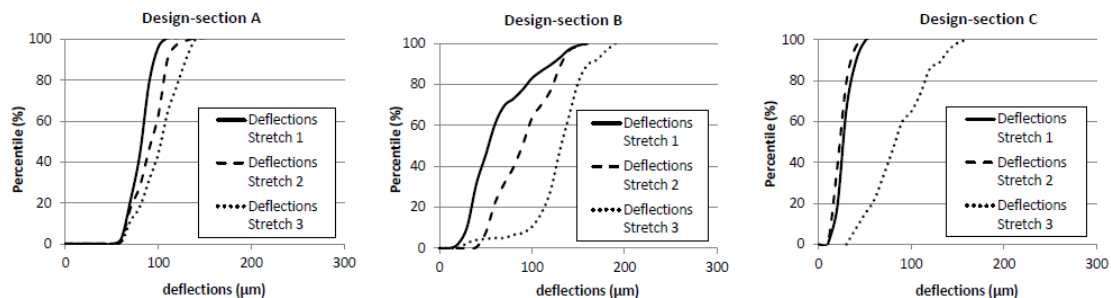


Figura 6.16: Histogramas de frecuencias acumuladas del ensayo de deflexión.

La figura 6.17 muestra los resultados de la regularidad superficial medidos con el índice IRI para las tres secciones de firme.

Considerando el percentil 50 del conjunto de valores, se aprecia una coherencia con los resultados de las deflexiones, es decir, los tramos en mejores condiciones también suelen mostrar mejor IRI, si bien no existe una correlación directa de valores.

El ensayo de regularidad superficial sólo se ha tenido en cuenta para este estudio como criterio para valorar el estado de conservación en tramos donde se considera que el ensayo de deflexión no es suficiente para permitir la clasificación, ya que se obtienen valores dentro de un mismo orden de magnitud.

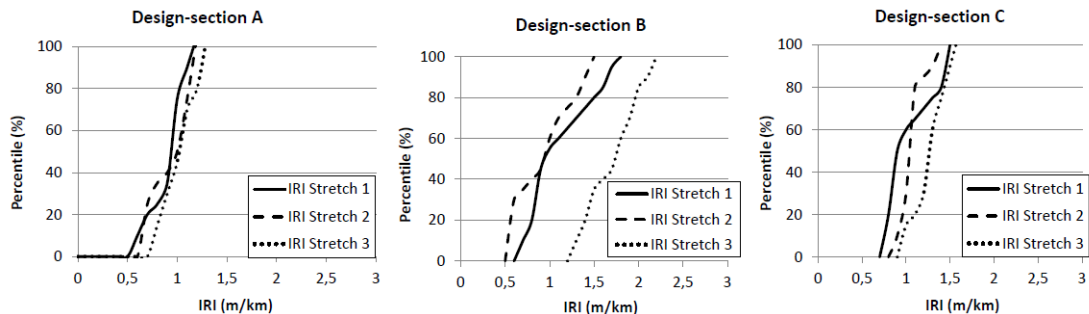


Figura 6.17: Histogramas de frecuencias acumuladas del ensayo de regularidad (IRI).

c) Metodología aplicada para la evaluación mediante GPR

Una vez definidos los subsectores en los que se divide cada sector (definido por una sección estructural característica), la campaña de inspección con GPR se ha realizado sobre cada uno de ellos de forma continua y a una velocidad adecuada para no entorpecer el tráfico, adquiriendo una muestra cada 25 cm, con una frecuencia de muestreo de unos 15.000 MHz.

La adquisición de datos del perfil se ha realizado de forma continua en el centro del carril derecho, que es el que recibe mayoritariamente a los vehículos pesados. Para el ensayo se ha utilizado una antena de 900 MHz de frecuencia central, previamente calibrada. Para ello se ha analizado la onda directa y la onda reflejada tras propagarse por el aire.

En la figura 6.18 se muestran los resultados obtenidos en la calibración, presentando la forma del pulso y su espectro de frecuencias. Puede verse que la onda presenta una frecuencia central (f) cercana a los 950 MHz, un ancho de banda (BW) de unos 350 MHz medidos a -3dB y una longitud de onda (λ) de aproximadamente 1,2 ns.

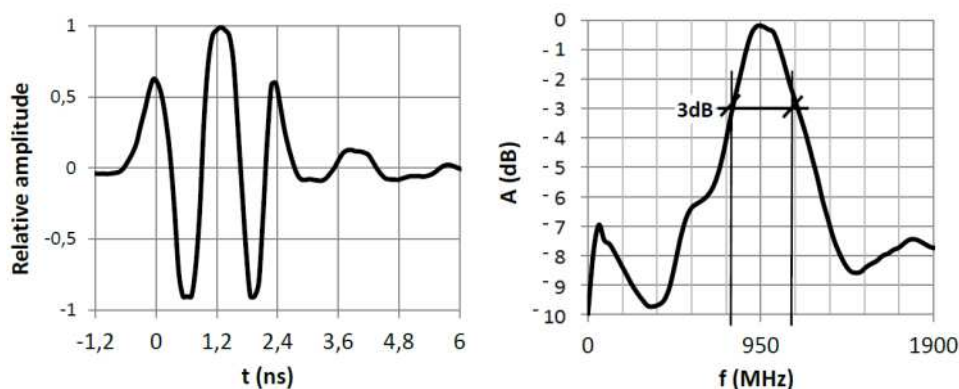


Figura 6.18: Características de la antena utilizada. Onda registrada (izquierda) y espectro de frecuencias (derecha)

d) Calibración de las señales en medios conocidos

Antes de efectuar la adquisición de señales se han estudiado los resultados que se obtienen en zonas puntuales. El análisis ha demostrado la existencia de una interesante correlación entre la forma del espectro de frecuencias y las diferentes características del firme.

La figura 6.19 muestra los resultados obtenidos en un punto quilométrico (KP) identificado y sin defectos constructivos. La sección constructiva que muestra el testigo (figura 6.19-a) se corresponde con la traza (A-scan) registrada en el dominio temporal (Figura 6.19-b). Un análisis pormenorizado de la frecuencia de la señal recibida muestra también unas variaciones en sus frecuencias de máxima amplitud que parecen corresponderse con las diferentes discontinuidades estructurales del firme. La figura 6.19-c muestra uno de los espectros analizados, comparado con el obtenido para el caso de una onda aérea. Los tres valores máximos se asocian con las tres capas observadas en el testigo.

La sección estructural definida por el testigo presenta dos capas asfálticas y el contacto con la sub-base granular. La capa asfáltica más superficial comprende el conjunto de las capas de "wearing" y "binder courses". Por debajo de ella hay una capa de base bituminosa extendida sobre una base granular.

La figura 6.19-b muestra la correspondencia entre el número de transiciones entre capas y el número de máximos de amplitud de la onda debidos a la reflexión de la señal en cada discontinuidad. El máximo situado a un tiempo entorno a los 4,3 ns, corresponde a la



transición entre la base bituminosa y la sub-base granular. El pico situado en torno a los 1,5 ns corresponde a la transición entre las dos capas de mezcla bituminosa y el pico inicial situado a 0 ns se corresponde con la transición entre el aire y el firme.

En la figura 6.19-c se observa la distribución de las frecuencias de la señal recibida. La gráfica muestra dos picos principales entorno a los 950 MHz. Cada uno de ellos corresponde a los dos materiales dominantes en el entorno: la mezcla asfáltica de la base (frecuencia mayor a 950 MHz) y la sub-base granular (frecuencia inferior a 950 MHz).

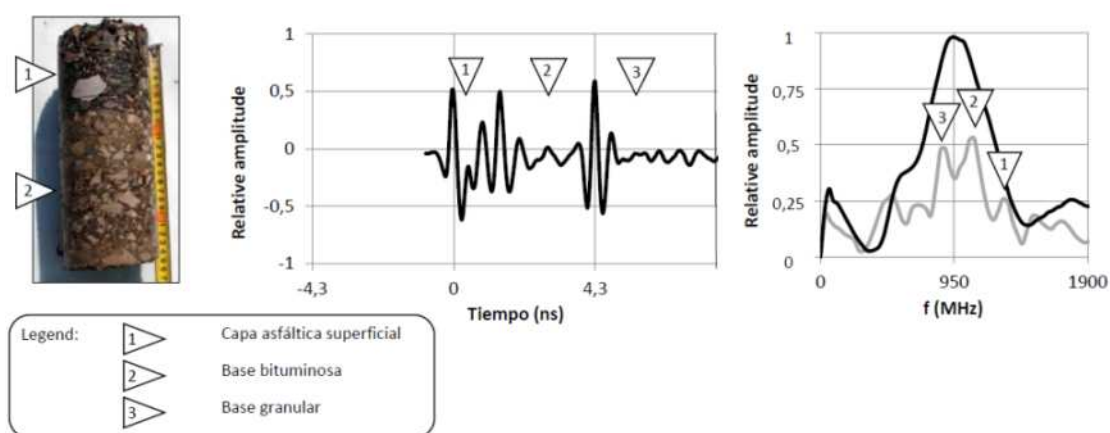


Figura 6.19: Resultados obtenidos en un tramo de sección estructural estándar. a) Testigo mostrando las capas de la estructura. b) Onda en el dominio temporal. c) Contenido frecuencial de la señal.

El material del medio por el que se propaga la onda actúa como un filtro paso bajas. Por este motivo, el resultado obtenido es lógico, ya que las capas situadas más cerca de la superficie parecen estar representadas en los espectros de frecuencia por las máximas amplitudes. En el espectro mostrado en la figura 5c, el máximo señalado como 1, localizado a unos 1200 MHz, representa el conjunto de “wearing” y “binder courses”, que son las capas más superficiales. El segundo máximo (2), a unos 1000 MHz, representa la mezcla de base. Finalmente, el máximo denominado 3, situado a unos 900 MHz, se corresponde con la sub-base granular.

e) Procesado de la señal

Procesado de cada A-scan

Las señales registradas en cada uno de los tramos se han procesado para corregir desviaciones de línea base de los registros. No se han aplicado otros filtros sobre las trazas. Los espectros de frecuencia se han obtenido mediante una transformada de Fourier. Posteriormente se han suavizado, para poder observar mejor los valores máximos obtenidos.

Procesado de cada B-scan

El análisis de los espectros de trazas individuales puede proporcionar resultados poco representativos del firme estudiado cuando el estudio se realiza sobre A-scans seleccionados al azar, escogidos de un radargrama. Un elemento anómalo en superficie, como puede ser una irregularidad del terreno o una zona encharcada, puede afectar a una traza o a un conjunto pequeño y limitado de trazas. Si en el análisis de firme se selecciona una de las trazas, el resultado será debido a elementos externos, y no mostrará las características promedio del tramo de carretera analizado.

Por este motivo se ha realizado un promediado de todos los A-scans obtenidos a lo largo de un mismo subsector (previamente determinado a partir de los datos de IRI y de FWD). En la traza promedio resultante se minimizan los efectos debidos a elementos de pequeño tamaño y a factores superficiales, mientras quedan representados aquellos elementos que son casi constantes en todo el subsector. De este modo se obtiene un registro con muy poco ruido que puede considerarse característico del tramo. Tras aplicar la transformada de Fourier a esta traza promedio, el espectro resultante comprende aquellas características que pueden asociarse con elementos distintivos del tramo: número de capas, espesor de las mismas, estado de conservación y humedad. Permite, por lo tanto, identificar cada uno de los subsectores que se habían diferenciado previamente por su tipología constructiva y por su grado de conservación.

6.5.3 Resultados obtenidos

El objetivo de estos ensayos es definir una posible metodología de estudio, basada en el análisis comparativo de las frecuencias, que permita identificar posibles cambios estructurales y la existencia de daños.

Con el fin de comprobar la sensibilidad del método propuesto, basado en el análisis frecuencial, se realiza un estudio comparativo de espectros de frecuencia obtenidos, según la tramificación de la carretera considerada. Por lo tanto, el estudio compara posibles variaciones en el espectro promediando los resultados obtenidos en un mismo subsector de carretera. La comparación de estos espectros con los datos de IRI, de FWD y con testigos puntuales muestra el efecto debido a la tipología de sección constructiva y, para una misma tipología de sección, el debido a los diferentes niveles de integridad.

a) Efecto de las variaciones de la sección constructiva

En el primer ensayo se estudia el comportamiento del espectro de frecuencias de la señal en el caso de variaciones en la estructura del firme.



Para evitar el efecto debido al estado de conservación del firme sobre el espectro, se realiza una comparación únicamente entre los tramos con mejor estado. Se analizan tres tramos conocidos con diferentes secciones (A, B y C en la figura 6.15). La Figura 6.20 muestra los resultados obtenidos, promediados para cada subsector seleccionado.

Las gráficas de la figura 6.20 se caracterizan por un mínimo o una inflexión a los 950 MHz. El espectro que presenta un mínimo a estas frecuencias muestra un comportamiento similar al del espectro de la figura 6.19. Sin embargo, al comparar las tres secciones en la figura 6.20, puede apreciarse un cambio notable en este comportamiento para cada sección. Dependiendo de la sección, el mínimo pasa a ser un cambio en la inflexión de la curva.

El máximo correspondiente a la frecuencia por encima de los 950 MHz asociado al conjunto de mezclas bituminosas, permanece casi invariable en las tres secciones de diseño. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el máximo asociado a las sub-bases, situados a unos 900 MHz. La amplitud de este máximo a menor frecuencia disminuye de forma considerable para la sección estructural de tipo A, siendo superior la amplitud en el caso de una sección de tipo B y aún mayor en el caso de una sección de tipo C.

Las diferencias de amplitud de los máximos del espectro asociados a las sub-bases en las secciones A y B son pequeñas y podrían ser consecuencia de la profundidad a la que se halla cada capa, ya que la profundidad de la base granular en la sección A se sitúa, en promedio, en unos 35 cm, mientras que en el caso de B se sitúa en unos 25 cm. Dado que en B está más cercana a la superficie es lógico que la amplitud del máximo asociado a la base granular sea mayor, ya que las altas frecuencias no han sido tan atenuadas por efecto del medio.

El caso de la sección C es distinto ya que el máximo que correspondería a la capa CTB es muy pronunciado y la diferencia de profundidad a la que se halla respecto a la sección B es poca (en promedio, unos 5 cm). Por tanto, una posible explicación de lo que se observa en el registro sería el efecto de la capa CTB en la señal. Esto indicaría que esta capa tiene unas características electromagnéticas lo suficientemente diferentes de las del resto de los materiales como para poder detectar cambios en el contenido frecuencial de los registros.

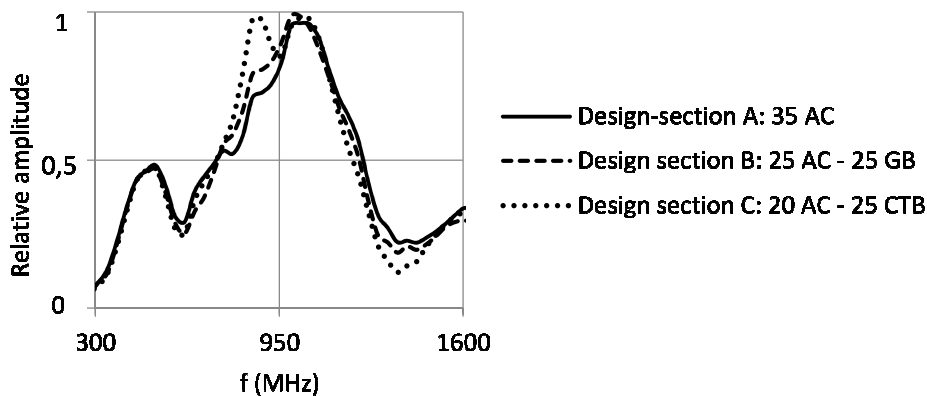


Figura 6.20: Espectros de frecuencia según la sección constructiva. Resultados promediados para cada subsector.

Aunque en estudios preliminares se analizó un caso similar, no hay estudios exhaustivos sobre el comportamiento frecuencial de señales GPR obtenidas en un firme con una capa de sub-base tratada con cemento (CTB).

Una valoración del resultado puede hacerse a partir de la composición de este tipo de capas. En la tabla 6.6 se presentan las características físicas (contenido de agua y de huecos) y electromagnéticas (permitividad dieléctrica) de una capa de mezcla asfáltica, de una base granular convencional y de una capa de suelo tratada con cemento:

	Vacíos	Contenido de agua	ϵ_r
AC	5%	2 %	5-7
GB	10%	10%	8-12
CTB	5%	0%	7-9

Tabla 6.6: Características de las capas AC, GB y CTB.

La permitividad dieléctrica relativa de las mezclas asfálticas es más parecida a la de una base tratada con cemento que a la de una base granular convencional [4], debido a que las bases granulares convencionales son más abiertas que el resto y contienen una cantidad de agua permanente entorno al 10%.

Los datos mostrados en la tabla 6.6 concuerdan con la menor diferencia en el espectro (figura 6.20) correspondiente a las capas GB y CTB.

b) Efecto de las variaciones del estado de integridad del firme

El análisis se realizó comparando promedios del espectro de frecuencias de los registros efectuados en un tramo de carretera. Este tramo se había dividido en sectores (atendiendo a la tipología estructural) de una longitud aproximada de 700 m. Se comparaban los resultados



obtenidos en un mismo sector, considerando tres niveles de conservación del firme: correcto, regular y mal estado. Esta separación permitía definir subsectores para cada sección estructural.

En las figuras 6.21, 6.22 y 6.23 se muestran los resultados obtenidos para cada sector, en función de su estado de conservación. En todas ellas se muestran las trazas (A-scans) diagramas de onda en su dominio temporal y los espectros de frecuencia. Todos ellos se corresponden con el promedio de todas las mediciones efectuadas en un mismo sector.

Para cada sección de diseño se consideran tres tramos que se representan de la siguiente manera: en línea continua el subsector que ofrece mejores condiciones estructurales. En línea discontinua el subsector que muestra condiciones regulares. Finalmente, en línea de puntos, el subsector que ofrece peores condiciones.

Los resultados obtenidos para el firme tipo A (figura 6.15) se resumen en la figura 6.21.

En el diagrama de la izquierda (figura 6.21-a) se comparan los A-scan de los tres subsectores determinados por el distinto grado de conservación. Se observa que el patrón del registro es el mismo en los tres casos, excepto en tres zonas concretas que aparecen marcadas con círculos en la figura 6.21-a. En estas tres zonas se producen los cambios de amplitud correspondientes a reflexiones de la señal. Estos cambios presentan discrepancias entre los tres promedios. Se localizan a 1 ns, 4 ns y 7 ns, correspondiendo con las superficies de contacto entre dos capas adyacentes del firme. A partir de las características de cada capa, mostradas en la Tabla 1, se consideran unas velocidades de propagación promedio para cada una de ellas, obteniendo con esta información su espesor. Estas velocidades son de 12 cm/ns para la capa AC, de 9.5 cm/ns para la capa GB y de 10.6 cm/ns para la capa CTB. Con estos resultados, la profundidad a la que se localiza cada contacto entre capas resulta ser de 6 cm, 20.3 cm y 36.2 cm.

Las trazas muestran claramente las interfaces entre capas. Sin embargo, el espesor de las capas más superficiales no se obtiene con la misma exactitud que el de la capa más profunda, y se observan diferencias con los valores esperados según el modelo presentado en la figura 6.15. Se considera que el error en la determinación de estos espesores es de ± 0.5 ns, considerando la longitud de la onda. Este error se corresponde con unos 3 cm en el caso de la determinación de la primera capa, y con un error de algo más de 2 cm en el caso de la segunda capa.

Al analizar los resultados para la misma tipología de firme, con diferentes estados de conservación, no se observa ninguna relación entre el tiempo doble de propagación de la onda reflejada y el estado estructural del firme, por lo que se deduce que el análisis de

tiempos de propagación no proporciona información relevante respecto del estado de conservación del firme.

En el diagrama de la Figura 6.21-b se muestra la variación del espectro de frecuencias para los tres niveles de deterioro considerados para el firme. El máximo registrado para las frecuencias más elevadas, asociado al conjunto de mezclas bituminosas, permanece casi invariable en los tres espectros. Sin embargo no es así en el pico máximo asociado a las sub-bases, situado a unos 900 MHz. Se observa que este segundo máximo va variando de forma, conservando una mayor amplitud en el tramo en mejores condiciones y perdiendo amplitud conforme la estructura se deteriora.

Estos resultados sugieren que el mayor deterioro de la estructura se encontraría en la sub-base, bajo la estructura de mezclas bituminosas. Una posible causa puede ser la pérdida de cohesión entre las capas o la disgregación de material en la sub-base, que genera un efecto de dispersión de la energía produciendo por tanto, una pérdida de energía.

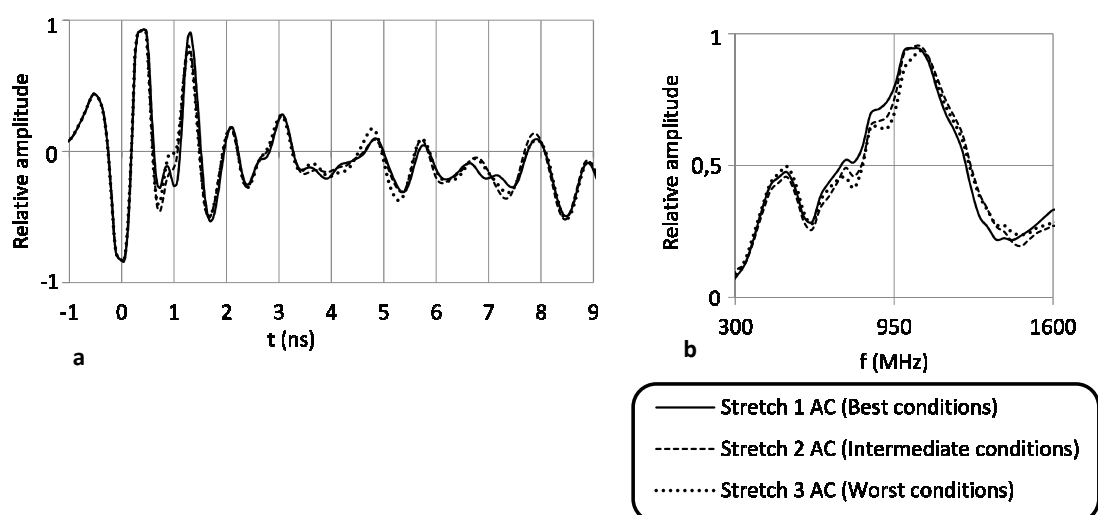


Figura 6.21: Dominio temporal (a) y espectros de frecuencia (b) en los tres subsectores de la sección tipo A.

En la figura 6.22 se representan los resultados obtenidos en el subsector estudiado, caracterizado por una sección de diseño tipo B.

En el diagrama de la figura 6.22-a se vuelven a observar tres cambios de amplitud en la traza. Los dos primeros se producen cerca de 1 ns y de 2,5 ns respectivamente. Sin embargo, el tercero es variable y se produce a los 4 ns en los subsectores de la carretera definidos como regular y malo y a los 5 ns en el que corresponde al subsector bueno.

Considerando unos valores de propagación medios para cada una de las capas (tabla 2), al transformar los tiempos dobles de propagación en profundidades, se obtiene un espesor del



conjunto de las dos primeras capas de unos 7.5 cm, siendo la profundidad hasta la base de la tercera capa de unos 27.5 cm en el subsector regular o malo (espesor de la capa de 20 cm), y de 32.5 cm (espesor de la capa de 25 cm) en el caso de un subsector bueno.

Estos resultados parecen indicar que, a diferencia de lo que se observa en la sección tipo A, en el caso de la sección tipo B el espesor parece ser un factor determinante del estado de conservación del firme, ya que se observa una relación entre el estado del firme y el tiempo registrado para la tercera anomalía en la amplitud, en cada subsector con diferente estado estructural. Esta tercera anomalía se relaciona con la superficie de contacto entre la penúltima capa y la capa asfáltica más profunda, la “base course” y se observa a un menor tiempo de propagación en los subsectores regular y malo.

En el diagrama de la figura 6.22-b se muestra también la variación del espectro de frecuencia de la señal en cada uno de los tres subsectores.

En este caso la forma del espectro y la situación de sus máximos, tanto el relacionado con el conjunto de mezclas bituminosas como el relacionado con las sub-bases, se modifican siguiendo un mismo patrón, es decir, conservando la amplitud y el ancho de banda en el tramo en mejores condiciones, que disminuyen conforme la estructura se deteriora.

Este resultado podría estar indicando que, a diferencia de lo que sucede en la sección tipo A, el fallo en la estructura se produce en el sistema en su conjunto, es decir, en las capas AC y GB.

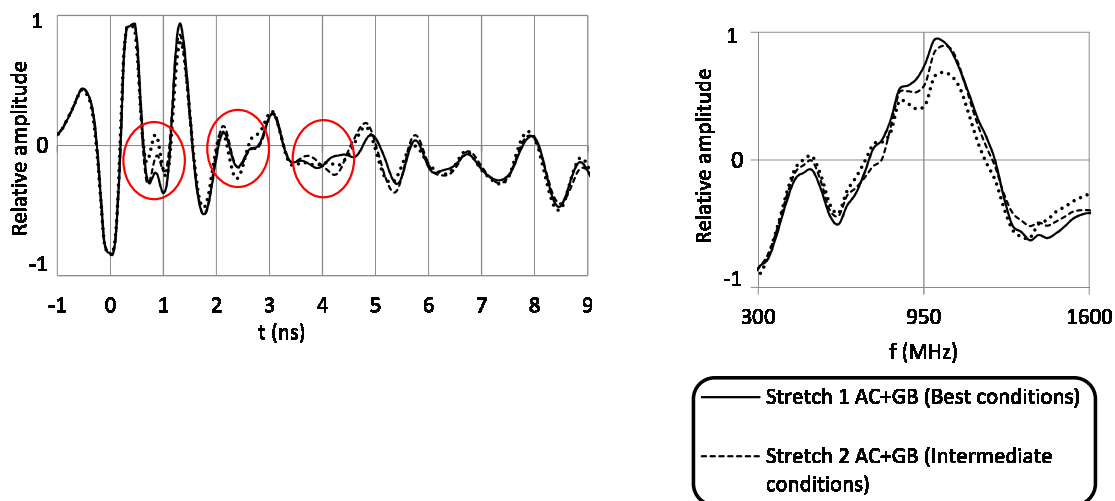


Figura 6.22: Dominio temporal (a) y espectros de frecuencia (b) en los tres subsectores de la sección tipo B.

Las gráficas obtenidas en el estudio en los tramos de sección tipo C se presentan en la figura 6.23.

En el diagrama de la figura 6.23-a puede verse que vuelven a producirse tres cambios en la amplitud, asociados a los contactos entre cada una de las capas de mezcla bituminosa que forman el firme. El último de ellos se sitúa en torno a los 4 ns, para el tramo bueno y regular, y a los 3.4 ns para el tramo malo. Un análisis similar al realizado en los otros ensayos proporciona un espesor de unos 20 cm en el caso de los subsectores bueno y regular, y de unos 17 cm para el subsector malo. Esto indica que, para el peor de los tres subsectores, el espesor de mezcla bituminosa que recubre la capa de CTB es muy relevante.

En el diagrama de la figura 6.23-b puede verse también cómo disminuye la amplitud del espectro y el ancho de banda en el caso de la gráfica que se corresponde con el subsector en peores condiciones.

Estos datos sugieren que el fallo en la estructura se podría producir, entre otros motivos, por el reducido espesor de mezcla bituminosa en ese tramo de carretera.

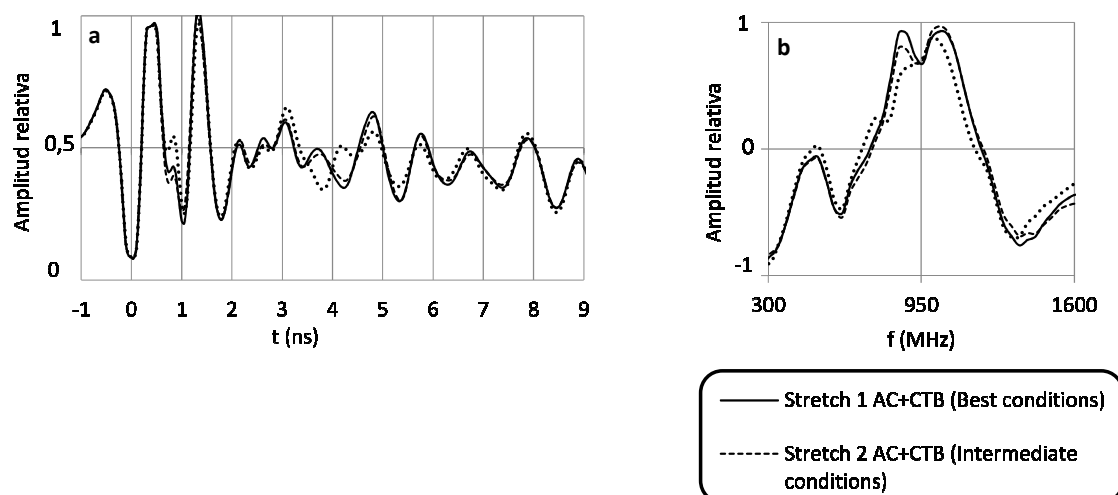


Figura 6.23: Dominio temporal (a) y espectros de frecuencia (b) en los subsectores de la sección tipo C.

6.5.4 Conclusiones

El trabajo ha tenido como objetivo el analizar el contenido frecuencial del espectro de las señales registradas en diversos sectores de un tramo de carretera, diferenciados por sus secciones constructivas. Cada uno de los sectores se ha subdividido en subsectores, seleccionados de tal manera que se pueda asegurar su homogeneidad, dentro de los criterios que marca la guía de diseño de pavimentos AASHTO. Estos subsectores se han seleccionado y ordenado según los resultados de ensayos de deflexiones y de regularidad, realizados para conocer su estado de conservación.



Se pretende, por lo tanto, analizar la sensibilidad del espectro de frecuencia de los registros de GPR frente a cambios en la tipología constructiva y en su estado de conservación. El estudio es un primer análisis para determinar la capacidad del método propuesto, por lo que no se determinan relaciones cuantitativas entre su sensibilidad y los parámetros estudiados. Sin embargo, los resultados son prometedores e indican la vía para aplicar estos estudios de forma sistemática.

La metodología propuesta ha consistido en un análisis estadístico de un conjunto de valores de deflexiones, de datos de IRI y de registros de GPR seleccionados tras decidir unos criterios comunes. A partir de esta selección se obtiene un diagrama de resultados en cada caso para poder evaluar la tipología y el estado de conservación de los tramos de pavimento estudiados. En el caso de los ensayos mediante GPR, se representan diagramas promedio en el dominio temporal y en el frecuencial, procurando que resulten suficientemente representativos de cada tramo. Los resultados han permitido definir las siguientes conclusiones:

1. El espectro de frecuencia es sensible a la tipología de material utilizado como base en un pavimento de carreteras. Se han realizado ensayos en tramos donde se utilizan como material de base diferentes materiales: mezclas bituminosas, zahorras artificiales y suelo-cemento. En el estudio comparativo se observan cambios en los máximos de amplitud del espectro, dentro del rango de frecuencias que se han asociado a esta capa.
2. Un estudio estadístico de la onda transmitida a cada medio permite determinar los cambios de amplitud registrados en el dominio temporal, como consecuencia de las reflexiones que se producen los contactos o en las zonas de transición entre las diferentes capas que forman parte del pavimento. Esto permite definir los espesores medios aproximados de cada una de las capas.
3. Al obtener el espectro de frecuencia de las señales temporales, mediante la transformada de Fourier, se pueden analizar sus variaciones cuando cambian las condiciones del medio, estudiadas a partir del registro temporal. Se observa que el espectro de frecuencia es sensible al estado estructural de un pavimento (este estado se ha definido previamente a partir de un ensayo normalizado de deflexión). En todos los casos analizados, a medida que el estado de deterioro aumenta, la amplitud del espectro de frecuencia disminuye al mismo tiempo que se reduce su ancho de banda. Los ensayos realizados parecen indicar que la causa de este fenómeno puede ser la pérdida de cohesión entre las capas o la disgregación de material en la sub-base. Este segundo problema produciría un aumento en la dispersión en la energía, atenuando la señal. El resultado sería una disminución de la energía registrada en el rango de frecuencia asociado al material afectado y, por lo tanto, una menor amplitud de la zona del espectro asociada a dicho rango.



VII. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

7.1 Conclusiones

El objetivo general de esta tesis es analizar la sensibilidad de las ondas electromagnéticas para comprobar la potencialidad del espectro de respuesta para el diseño de un futuro indicador de estado. Para alcanzar este objetivo, la metodología de trabajo se ha basado en observar variaciones en las frecuencias de la señal registrada, bajo la introducción de cambios controlados y conocidos en las superficies reflectoras que identifican las distintas capas que conforma un firme.

Por tanto, la tesis pretende asentar unas bases para el desarrollo de un indicador de apoyo a la toma de decisiones en la gestión de firmes, basado en la observación de las diferencias producidas en los espectros de respuesta y que éstos puedan ser asociados a los cambios de estado en una estructura de firme. Además, se han tenido en cuenta también distintos condicionantes externos que pueden existir durante las mediciones.

De forma general, puede decirse que el espectro sí es sensible, tanto a la sección constructiva como al estado de integridad estructural de las capas. Sin embargo, la elevada dependencia de dicho espectro, tanto a las condiciones de medición, como al equipo de medición en sí, hace aconsejable tomar una serie de medidas, tanto en el calibrado de las antenas como en las condiciones de medición. Dichas medidas implican que la planificación y los detalles de cada una de las campañas de medición deben ser de una elevada exigencia y la metodología de análisis de datos debe ser muy rigurosa.

Además, la elevada dependencia del espectro de respuesta a las condiciones instantáneas no controladas en el momento del registro y en particular en mediciones en continuo sobre un vehículo de inspección y a altas velocidades, indican la necesidad de realizar un tratamiento estadístico al conjunto de registros obtenidos. El procedimiento a seguir para realizar un tratamiento estadístico en campañas de mediciones de gran longitud no ha sido considerado, por quedar fuera del alcance de los objetivos de esta tesis.

Los objetivos específicos asociados al objetivo general se referían fundamentalmente, a:

- Las variables intrínsecas asociadas al equipo de ensayo.
- Las variables extrínsecas asociadas a las condiciones ambientales del medio.
- Las variables asociadas al estado de integridad de las capas del firme, a su naturaleza y su espesor.

7.1.1 Variables intrínsecas asociadas al equipo de ensayo

Se han comprobado los efectos de generación de cambios en el espectro relacionados con distintos efectos externos asociados al equipo de ensayo, y que son:

- Efectos debidos a las características propias de la antena.
- Influencia de la antigüedad del equipo de medición.
- Interacción de la señal electromagnética con el vehículo tractor.

Si bien el detalle de cada una de ellas se expone en el capítulo 4 de esta tesis, cabe decir que, por lo general, la elección de la antena a utilizar es una variable extremadamente importante en el estudio analítico de firmes, y de forma particular, si se desea realizar comparaciones entre mediciones realizadas en distintas campañas a lo largo del tiempo.

Por otra parte, se demuestra que el estudio del espectro mediante la obtención de la onda directa es una buena herramienta para escoger la antena a utilizar.

7.1.2 Variables extrínsecas asociadas a las condiciones ambientales

Se han comprobado los efectos de generación de cambios en el espectro relacionados con la humedad y la temperatura de las superficies reflectoras primeras con distintas condiciones de humedad y temperatura.

Las conclusiones extraídas de los ensayos referentes a estas variables se exponen en el capítulo 5 de esta tesis.

De los resultados se desprende que, en los ensayos realizados mediante equipo de GPR, por lo que respecta al procedimiento a seguir en estudios de firmes, es muy recomendable que las campañas realizadas para detectar fallos por pérdida de cohesión entre capas, comparando datos de diferentes épocas, deben realizarse en épocas de año y condiciones ambientales equiparables.

Por otro lado, los resultados de los ensayos muestran que es posible determinar cambios en la humedad de un medio comparando los espectros de las señales registradas, siempre que no existan otras patologías en el firme que pueda inducir interpretaciones erróneas.



7.1.3 Variables asociadas al estado de integridad de las capas de firme, a su naturaleza y su espesor

Se han comprobado los efectos de generación de cambios en el espectro relacionados tanto con la sección estructural de un firme como de su integridad estructural, asociada a su estado de conservación. Los diferentes aspectos considerados han sido:

- Efecto del espesor de las capas superficiales.
- Efecto la tipología de material de las capas de firme.
- Efecto de la descohesión de las capas que integran el firme.

Las conclusiones parciales para cada uno de estos apartados se discuten en los capítulos 5 y 6 de esta tesis.

Sin embargo, como conclusión general puede decirse que, las características de las capas más superficiales del firme pueden ser evaluadas con el espectro de respuesta mediante un tratamiento estadístico que permita comparar espectros locales con un espectro promedio que sea representativo de un tramo que pueda considerarse constructivamente homogéneo.

Por otro lado, la rápida atenuación que se produce durante la propagación de una onda provoca que el grueso de la información contenida en un espectro sea un reflejo de los dos primeros reflectores existentes en un registro. Particularmente en un firme bituminoso, el espectro responde a la reflexión producida en la superficie del pavimento y a la reflexión producida en la zona de contacto entre las mezclas bituminosas y la base granular.

Para generar un espectro que sea representativo del conjunto del firme y caracterizarlo estructuralmente de forma completa, es necesaria la aplicación de filtros que potencien la amplitud de las reflexiones generadas en capas profundas.

7.2 Líneas de investigación futuras

En esta tesis se ha conseguido asentar unas bases para generar un indicador de estado basado en la respuesta del ensayo de GPR aplicado a los firmes bituminosos.

Sin embargo, dado el acotado alcance de la tesis, han quedado algunos aspectos del estudio que sería conveniente profundizar para permitir, en un futuro, parametrizar los datos generados por el GPR y relacionarlos de una forma directa a indicadores asociados a la vida útil del firme. En este caso, el indicador más conocido y aceptado por la comunidad científica que trabaja en ingeniería de pavimentos para el estudio de la vida útil de los firmes es la deflexión.

Una vez cerradas las conclusiones basadas en los resultados de los ensayos realizados de la tesis, se han efectuado a posterioridad algunas mediciones sobre firmes a lo largo de decenas de kilómetros en autopistas y carreteras y se han analizado, a modo de estudio preliminar, que pueden servir para introducir esta propuesta de línea de investigación futura.

A modo de ejemplo se presenta un pequeño estudio realizado en una autopista urbana de Santiago de Chile, donde el objetivo era realizar una aproximación a su estado estructural y obtener un valor de vida útil del firme, proponiendo una segmentación por tramos con un estado equiparable.

Para ello se realizó una campaña de medición con GPR a lo largo de toda la longitud de la plataforma, junto con una campaña de ensayos de deflectometría con deflectómetro de impacto, únicamente en las zonas de mayor interés.

El análisis de los resultados de GPR ha consistido en un tratamiento estadístico y analítico de los datos, en tres fases:

- Fase 1: Identificación del rango de tiempos asociados a las reflexiones producidas en la sección del firme y segregadas de la subrasante y de la onda directa.

En la figura 7.1 se muestran las zonas de interés, entre los 40 y 95 cm de profundidad en el caso del firme y de 95 a 250 cm en el caso de la subrasante. El diagrama de amplitudes corresponde a la traza promedio en el dominio temporal en valores absolutos; es decir, considerando todas las amplitudes con valor positivo.

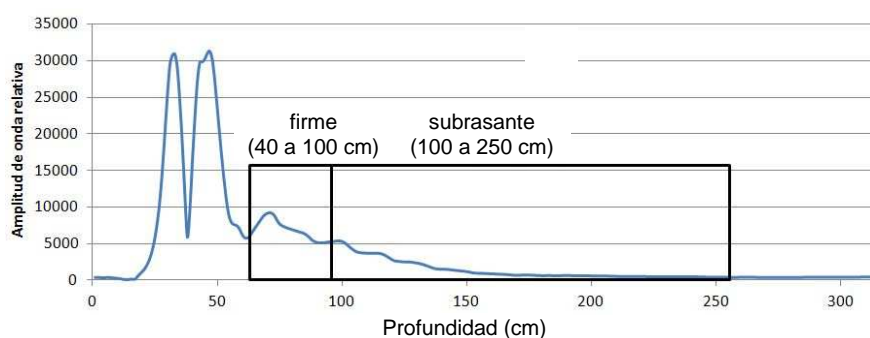


Figura 7.1: Identificación de los rangos de tiempo asociados al firme y a la subrasante sobre la traza promedio.

- Fase 2: Aplicación de un filtro de ganancia en el dominio temporal, en base al promedio de todas las trazas registradas, con el objetivo de amplificar los reflectores más lejanos y que generalmente tienen un menor peso en el conjunto del registro.

En la figura 7.2 se muestra la traza promedio ya filtrada.

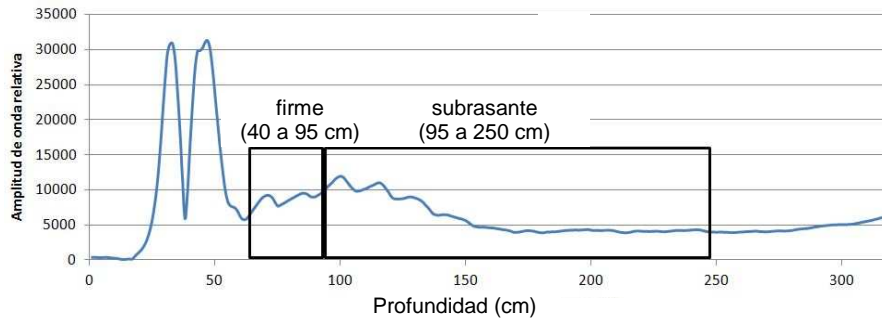


Figura 7.2: Trazas promedio, una vez aplicado el filtro de ganancia.

En la figura 7.3 se muestran los valores de amplitud promedios para cada traza, para todas las trazas realizadas en segmentos de 10 metros de longitud en un tramo de 4.000 metros. En color verde se muestran las amplitudes del rango de tiempo asociado al firme, y en azul del rango de tiempo asociado a la explanada.

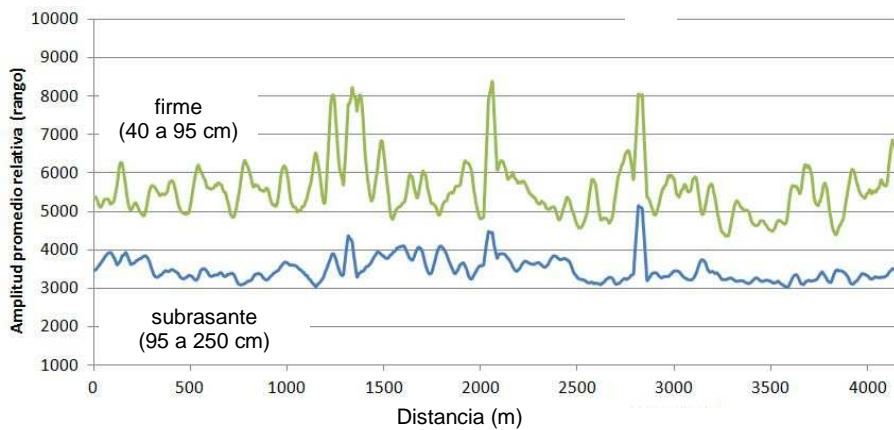


Figura 7.3: Amplitud de onda para todas las trazas realizadas en un tramo de 4.000 metros.

- Fase 3: Una vez optimizado el filtro, se ha realizado un estudio de correlación entre valores de deflexión obtenidos y valores de amplitud de onda asociados al rango de tiempos correspondientes al firme. El estudio se ha realizado sobre el 10% del conjunto del firme, es decir sobre un conjunto de 40 muestras.

En la figura 7.4 se muestra el diagrama de dispersión con una regresión lineal para determinar el grado de correlación entre la deflexión obtenida en el punto de aplicación de carga y los valores de amplitud de onda obtenidos en el ensayo de GPR en la dimensión temporal.

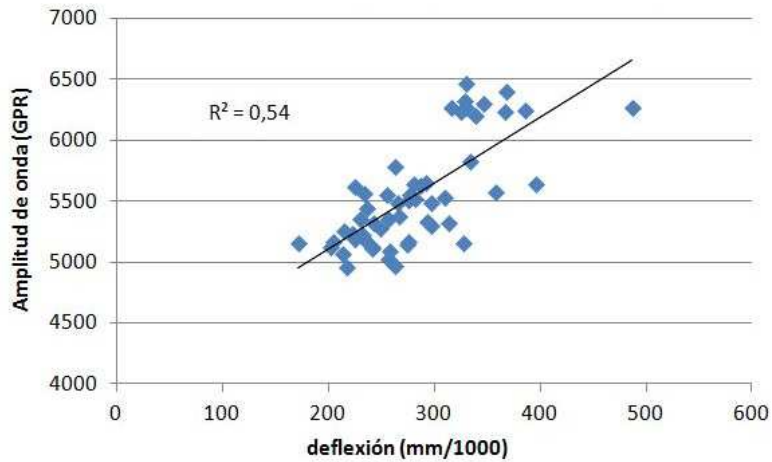


Figura 7.4: Diagrama de dispersión para determinar el grado de correlación entre la deflexión y la amplitud de onda.

Del diagrama se desprende que existe un cierto grado de correlación entre ambas variables, lo que permite asociar valores de elevada amplitud de onda con valores de deflexión altos.

Sin embargo, dicha correlación es probable que pueda ser mejorada aplicando nuevos filtros, por ejemplo de tipo pasa banda, que eliminen las reflexiones asociadas a ruido procedentes de fuentes externas con amplitudes de onda que enmascaran las amplitudes estrictamente procedentes de defectos constructivos o de deterioro del firme.

Por tanto, se propone como línea de investigación futura, diseñar secuencias de filtros que permitan asociar, de una forma más clara, las amplitudes medidas con el GPR con valores de deflectometría asociados al deterioro estructural de un firme bituminoso.

Una vez la traza esté debidamente filtrada, se procederá a estudiar su espectro de frecuencias para analizar su comportamiento y, en el caso de tener deflexiones altas, determinar la causa que las generaría.



Referencias

- [**AI, 2000**] Asphalt Institute. "Asphalt overlays for highway and street rehabilitation". Lexington, KY, USA; 2000.
- [**AASHTO, 1986**] American Association of State Highway and Transportation Officials "Guide for Design of Pavement Structures," Washington, DC, 1986.
- [**AASHTO, 1993**] American Association of State Highway and Transportation Officials "Guide for Design of Pavement Structures". Washington, DC, 1993.
- [**ASTM, 2001**] American Society for Testing and Materials. "Standard Practice for Sampling Bituminous Paving Mixtures". ASTM Standard D 979 – 01; 2001.
- [**ASTM, 2011**] American Society of Testing and Materials. "Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys". Document: D6433 – 11.
- [**Al-Qadi y Elseifi, 2006**] Al-Qadi, I. L., & Elseifi, M. A. "Mechanism and modeling of transverse cracking development in continuously reinforced concrete pavement". International Journal of Pavement Engineering, 7(4), 341-349. 2006.
- [**Al Qadi y Lahouar, 2005**] IL Al-Qadi, S Lahouar. "Measuring layer thicknesses with GPR—Theory to practice". Construction and building materials. Volume 19, Issue 10, December 2005, Pages 763–772. Elsevier. 2005.
- [**Al-Qadi et al, 2004**] Al-Qadi, I. L., Lahouar, S., Loulizi, A., Elseifi, M. A., & Wilkes, J. A. "Effective approach to improve pavement drainage layers". Journal of transportation engineering, 130(5), 658-664. 2004.
- [**Al-Qadi et al, 2008**] Imad L. Al-Qadi, Wei Xie, Roger Roberts "Scattering analysis of ground-penetrating radar data to quantify railroad ballast contamination". NDT&E International 41 (2008) 441– 447.
- [**Alonso, 2006**] Alonso, J. "Estudio del proceso de deformación y agrietamiento por fatiga de mezclas bituminosas sometidas a carga cíclica". Tesis Doctoral, Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2006.
- [**ASTM, 2004**] American Society of Testing and Materials. "Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems". Document E867-04., 2004.
- [**Benedetto y Pensa, 2007**]: A. Benedetto and S. Pensa "Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques". Journal of Applied Geophysics. Volume 62, Issue 2, June 2007, Pages 107–123. Elsevier. 2007.
- [**Benedetto y Tosti, 2013**] Benedetto F., Tosti F., "GPR spectral analysis for clay content evaluation by the frequency shift method". Journal of Applied Geophysics, 97, pp. 89–96. 2013.
- [**Boussinesq J., 1885**] Boussinesq J. "Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques". Gauthier-Villars: Paris, 1885.
- [**Brigham, 1974**] E. Oran Brigham. "The Fast Fourier Transform". Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey. ISBN: 012307496X, 1974.
- [**Brown et al., 2001**] Brown R., P. Kandhal and J. Zhang. "Performance Testing for Hot Mix Asphalt". NCAT Report 01-05, National Center for Asphalt Technology, 2001.
- [**Burmister, 1945**] Burmister, Donald M. "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems". Journal of Applied Physics 16, 1945.
- [**Bussian, 1983**] A. E. Bussian "Electrical conductance in a porous medium" EOPHYSICS, 48(9), 1258-1268. 1983.

- [Butler, 2005] Dwain K. Butler. "Near-surface geophysics" Investigations in geophysics, Vol. num. 13. Society of exploration geophysicists. 732 p. 2005.
- [CEDEX, 2003] CEDEX "Norma 6.3-IC: "Rehabilitación de firmes de la Instrucción de carreteras". Ministerio de Fomento, 2003.
- [Celaya et al., 2013] M. Celaya M., Ertem F.S., Nazarian S., Saltan M. "Feasibility of Detecting Debonding of Hot Mix Asphalt Layer with Nondestructive Testing". In: Nondestructive Testing of Materials and Structures. ISBN: 978-94-007-0722-1, pp 877-881. 2013.
- [Chen y Wimsatt, 2009] Chen, D. H., & Wimsatt, A. "Inspection and condition assessment using ground penetrating radar. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 136(1), 207-214". 2009.
- [Chen et al, 2009] Chen, D. H., Won, M., & Hong, F. "Investigation of settlement of a jointed concrete pavement". Journal of Performance of Constructed Facilities, 23(6), 440-446. 2009.
- [Chen et al, 2014] D.H. Chen, F. Hong, W. Zhou, P. Ying "Estimating the hotmix asphalt air voids from ground penetrating radar". NDT&E International, 68, pp. 120–127. 2014.
- [Clark et al., 2001] Clark M.R., Gillespie R., Kemp T., McCann D.M., Forde M.C. "Electromagnetic properties of railway ballast", NDT&E International 34, pp. 305-311. 2001.
- [Colagrande et al, 2011] Colagrande, S., Ranalli, D., & Tallini, M. "Ground Penetrating Radar Assessment of Flexible Road Pavement Degradation". International Journal of Geophysics, 2011.
- [Conyers and Goodman, 1997] Lawrence B. Conyers, D. Goodman. "Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists". AltaMira, Walnut. Creek, California. 1997
- [Daniels, 2004] David J. Daniels. "Ground Penetrating Radar". The Institution of Electrical Engineers. ISBN: 978-0-86341-360-5. Herts, UK 2004.
- [Diamanti y Redman, 2012] Diamanti, N., & Redman, D. "Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks". Journal of Applied Geophysics, 81, 106-116. 2012.
- [Dios et al, 1998] Dios, F., Artigas, D., Recolons, J., Comeron, A., & Canal, F. (1998). Campos electromagnéticos (Vol. 61). Univ. Politècnica de Catalunya.
- [Drumm et al, 1997] Drumm, E., Reeves, J., Madgett, M., and Trolinger, W. "Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 123(7), pp. 663–670; 1997.
- [Evans et al, 2006] Evans, R. D., Frost, M. W., Stonecliffe-Jones, M., & Dixon, N. "Ground-penetrating radar investigations for urban roads". Proceedings of ICE, Municipal Engineer, 159 (2), pp 105-111. UK, 2006.
- [Fauchard et al, 2003] Fauchard, C., Dérobert, X., Cariou, J., & Côte, P. "GPR performances for thickness calibration on road test sites". NDT & E International, 36(2), 67-75. 2003.
- [Fitch, et al, 1991] Fitch T.F., Yu H.T. Shahin, M.Y. "Evaluation of field inspection devices for use the paver pavement management system". Transportation Research Record No. 1311, pp. 196-204. 1991.
- [FHWA, 2003] Federal Highway Administration, "Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program", Publication N° FHWA-RD-03-031, USA, 2003.
- [García et al, 2009] Álvaro García, Erik Schlangen, Martin van de Ven, Quantao Liu. "Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers" Construction and Building Materials 23, 3175–3181. 2009.
- [Golgowsky 2003] Golgowski G "Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues". Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Straßenbau, Heft S 31. 22 p. 2003.
- [Gomba et al., 2005] Gomba, Stephen M., Liddle, John, Mehta, Yusuf A. "Evaluation of Interlayer Bonding in Hot Mix Asphalt Pavements". International Journal of Pavements, Volume 4, Issue Number: 1-2, University of Mississippi, University, ISSN: 1676-2797, pp. 13-24; 2005.



- [Grote et al, 2005] Grote, K., Hubbard, S., Harvey, J., & Rubin, Y. "Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques". *Journal of Applied Geophysics*, 57(2), 129-153. 2005.
- [Haas and Hudson, 1978] R. Haas and WR. Hudson. "Pavement management systems". ISBN: 0-07-025391-9. Transport and Road Research Laboratory (TRRL), 473 p. 1978.
- [Hammons et al., 2005] Hammons, M., I., Von Quintus, H., Maser, K., and Nazarian, S. "Detection of stripping in hot mix asphalt." Applied Research Associates Project Number 16355, prepared for: Office of Materials and Research, Georgia Department of Transportation. 2005.
- [Harvey, 2012] Mark O. Harvey, "Optimising Road Maintenance". Discussion paper 2012-12. Bureau of Infrastructure, Transport and Regional Economics (BITRE). Canberra, Australia. OECD, December, 2012.
- [Hereu A. 2006] Hereu Ferrer, A. "La gestión de la conservación en Cataluña. Implementación y desarrollo de sistemas de gestión". Sesión III, Ponencia 10. Jornadas sobre optimización en la planificación y gestión de carreteras. AEC. Barcelona, Spain. 2006.
- [Hogg, 1944] Hogg, A.H.A., "Equilibrium of a Thin Plate on an Elastic Foundation of Finite Depth," *Philosophical Magazine*, volume 35 (243), 1944, pp. 265–276.
- [Huang, 2009] Huang Yi "Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations". United States Army Corps of Engineers, University Press of the Pacific. 2009.
- [Huang Yang, 2008] Huang Yang, H "Pavement analysis and design". Pearson education. ISBN: 978-8-131-72124-7. 792p. 2008.
- [Huang y Kang, 2010] Huang, L. S., & Kang, Y. V. "Nondestructive evaluation of thickness and bearing capacity of roadway pavement structure". *J. Pavement Res. Technol.* 3(6):326-335. Chinese Society of Pavement Engineering. 2010.
- [IGC, 2013] José Rafael Menéndez Acurio. "Ingeniería de Pavimentos" Instituto de la Construcción y Gerencia. PT-65. 1ª Edición. Lima, PERÚ, Agosto 2013.
- [Jaselskis et al, 2003] Edward J. Jaselskis, Jonas Grigas and Algirdas Brilingas. "Dielectric Properties of Asphalt Pavement". *Journal of materials in civil engineering* 15(5): 427-434, 2003.
- [Jol, 2009] Harry M. Jol. "Ground Penetrating Radar: Theory and Applications" Elsevier Science, ISBN: 978-0-444-53348-7. Oxford, UK. 2009.
- [Kassem et al, 2008] Kassem, E., Walubita, L., Scullion, T., Masad, E., & Wimsatt, A. "Evaluation of full-depth asphalt pavement construction using X-ray computed tomography and ground penetrating radar". *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 22(6), 408-416. 2008.
- [Kerali, 2000] Kerali, Henry G.R. "HDM-4: Highway Development and Management. Volume One: Overview of HDM-4". París, France. Asociación Mundial de Carreteras (PIARC), 2000.
- [Kirk, 1964] Kirk, J.M.; "Calculating the Thickness of Road Courses," *Proceedings, XII Congress of the Permanent International Association of Road Congresses*, Rome. 1964.
- [Kyrsiński y Sudyka, 2013] Kyrsiński, L., & Sudyka, J. "GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks". *Journal of Applied Geophysics*, 97, 27-36. 2013.
- [Lai, et al., 2010] W. L. Lai, T. Kind, and H.Wiggenhauser. "A Study of Concrete Hydration and Dielectric Relaxation Mechanism Using Ground Penetrating Radar and Short-Time Fourier Transform". *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. Volume 2010, Article ID 317216, 14 pages. 2010.
- [Lahouar y Al-Qadi, 2008] Lahouar, S., & Al-Qadi, I. L. "Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data". *NDT & E International*, 41(2), 69-81. 2008.
- [Lai, et al., 2011] W. L. Lai, T. Kind, and H.Wiggenhauser. "Using ground penetrating radar and time-frequency analysis to characterize construction materials". *NDT & E International*. Volume 44, Issue 1, January 2011, pp. 111–120. 2011

- [Laurens et al., 2003]** S. Laurens, J.P. Balayssac, J.Rhazy, G.Klysz, G.Arliguie. "Non destructive evaluation of concrete moisture by GPR technique: experimental study and direct modeling". Non-Destructive Testing in Civil Engineering, BAM. International Symposium, 2003.
- [Leng y Al-Qadi, 2014]** Leng, Z., & Al-Qadi, I. L. "An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-coupled GPR systems". NDT & E International, 66, 90-98. 2014.
- [Liu y Sato, 2014]** Liu, H., & Sato, M. "In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array". NDT&E International, 64, 65–71. 2014.
- [Loizos y Plati, 2007]** Loizos, A., & Plati, C. "Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches". NDT & E International, 40(2), 147-157. 2007.
- [Maierhofer C., 2003].** Maierhopfer C. "Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating radar". Journal of Materials in Civil Engineering, 15(3), 287-297. 2003.
- [Martínez-Lainez, 2006]** Martínez Lainez, C. "Análisis del empleo de deflectometría en la implementación de un sistema de gestión de firmes" Tesis Doctoral, ETSECCPB - Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2006.
- [Maser y Scullion, 1991]** Maser KR & Scullion T, "Automated Detection of Pavement Layer Thicknesses and Subsurface Moisture Using Ground Penetrating Radar". Transportation Research Board Paper 1991.
- [Maser et al., 2012]** Kenneth Maser, Jason Puccinelli, John K Amestoy. "Accuracy of Ground Penetrating Radar Asphalt Thickness Data and Its Impact on Pavement Rehabilitation Design". Transportation Research Board. Monograph 12-1777. 2012.
- [McGennis et al., 1994]** McGennis R., R. Anderson, T. Kennedy and M. Solaimanian. "Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis". Publication No. FHWA-SA-95-003, November 1994.
- [Millard et al., 2003]** S.G.Millard, J H Bungey and A Shaari. "GPR Antenna médium coupling effects: experimental and 2DFDTD modelling results". Non-Destructive Testing in Civil Engineering, BAM. International Symposium, 2003.
- [Morcoux y Erdogmus, 2010]** Morcoux, G., & Erdogmus, E. "Accuracy of Ground-Penetrating Radar for Concrete Pavement Thickness Measurement". Journal of Performance of Constructed Facilities, 24(6), 610-621. 2010.
- [Moropoulou et al., 2002]** Moropoulou, A., Avdelidis, N. P., Kouli, M., Aggelopoulos, A., & Karmis, P. "Infrared thermography and ground penetrating radar for airport pavements assessment". Nondestructive Testing and Evaluation, 18(1), 37-42. 2002.
- [Odemark N., 1949]** Odemark, N. "Investigations of elasticity properties with different types of soil, and the theory for the calculation of road courses in accordance with the theory of elasticity". Statens Väginstytut, Stockholm. Report 77. 1949.
- [Pedret y Pérez, 2012]** Pedret, J., & Pérez, V. "Estudio de la sensibilidad del Ground Penetrating Radar al contenido en huecos de las mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras". Revista Ingeniería de Obras Civiles, 1, pp. 5-18. 2012.
- [Pedret, et al., 2015]** Pedret J., Pérez-Gracia V., Martínez-Reguero, A. "Evaluation of the GPR frequency spectra in asphalt pavement assessment". Construction and building materials. Volumen 96 pp 181 – 188. Octubre 2015.
- [Pérez, et al., 2009]** F. Pérez Jiménez, R. Miró, A. Martínez. "Proyecto, conservación y gestión de firmes". Asociación española de la Carretera. ISBN: 9758489875715. 2009.
- [Pérez-Gracia, 2001]** Vega Pérez Gracia, PhD. Thesis: "Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico." Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. 2001.



[Pinel et al, 2011] Pinel, N., Le Bastard, C., Baltazart, V., Bourlier, C., & Wang, Y. "Influence of layer roughness for road survey by ground penetrating radar at nadir: theoretical study". *Radar, Sonar & Navigation, IET*, 5(6), 650-656. 2011.

[Plati y Loizos, 2012] Plati, C., & Loizos, A. Using ground-penetrating radar for assessing the structural needs of asphalt pavements. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 27(3), 273-284. 2012.

[Plati y Loizos, 2013] Plati, C., & Loizos, A. "Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies". *Journal of Applied Geophysics*, 97, 3-10. 2013.

[Prandi, 1967] Prandi, E. "The Lacroix - LCPC Deflectograph", *Proc. 2nd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, University of Michigan, pp. 895-904. USA, 1967.

[Rao, 2009] SS Rao, "Vibrações mecánicas". Pearson Prentice Hall, 2009. ISBN: 978-8-576-05200-5. 424 pages. 2009.

[Reynolds, 1997] John M. Reynolds "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics". Wiley-Blackwell. ISBN: 978-0-471-48535-3. 710 pages. 1997

[Rial, et al., 2009] Fernando I. Rial, Henrique Lorenzo, Manuel Pereira and Julia Armesto. "Waveform Analysis of UWB GPR Antennas". *Sensors*. *Sensors* 2009, 9, 1454-1470; 2009.

[Roberts et al., 1996] Roberts F., P. Kandhal, E. Ray, D. Lee and T. Kennedy. "Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction". NAPA Education Foundation, Second Edition, 1996.

[Saarenketo y Scullion, 2000] T. Saarenketo, T. Scullion. "Road evaluation with Ground Penetrating Radar". *Journal of applied geophysics*. Volume 43, Issues 2-4, March 2000, Pages 119-138. Elsevier. 2000.

[Saarenketo, 2003] T. Saarenketo. "Measuring electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping". *TRB*. Article 03-0603. Washington, USA 2003.

[Saarenketo, 2006] Timo Saarenketo, PhD. Thesis: "Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure Surveys" University of Oulu, Oulu, Suomi-Finland. 2006.

[Sayers and Karaminhas, 1998] Michael W. Sayers and Steven M. Karaminhas; "The little book of profiling"; The Regent of the University of Michigan.; 100 p. 1998.

[Sayers, et al., 1986] Michael W. Sayers, Thomas D. Gillespie and Cesar A.V. Queiroz. "The International Road Roughness Experiment". *World Bank Technical Paper Number 45*, The World Bank, Washington, D.C., 1986.

[Shahin, et al, 1978] Shahin M.Y., Darter M.I., Kohn S.D. "Development of a pavement condition index for roads and streets". *Army Construction Engineering Research Laboratory*. Monograph 111 p. USA, 1978.

[Shalaby, et al., 1996] A. Shalaby, A.O. Abd El Halim and S. Easa; "Influence of thermal stresses on construction-induced cracks". *Reflective Cracking in Pavements*. RILEM, ISBN: 0419 22260X, pp.30-39, 1996.

[Shangguan et al., 2013] Pengcheng Shangguan, Imad L. Al-Qadi, Zhen Leng, Robert L. Schmitt, Ahmed Faheem. "Innovative Approach for Asphalt Pavement Compaction Monitoring with Ground-Penetrating Radar". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Volume 2347 / Construction 2013, pp. 79 - 87. 2013.

[Shangguan et al, 2014] Shangguan, P., Al-Qadi, I. L., & Lahouar, S. "Pattern recognition algorithms for density estimation of asphalt pavement during compaction: a simulation study". *Journal of Applied Geophysics*, 107, 8-15. 2014.

[Silvast et al., 2006] Silvast et al., 2006: M. Silvast, M. Levomäki, A. Nurmikolu, J. Noukka. "NDT Techniques in Railway Structure Analysis". *7th World Congress of Rail Research International Union of Railways*. Montréal, CANADA. 2006.

[Solla et al, 2014] Solla, M., Lagüela, S., González-Jorge, H., & Arias, P. "Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings". *NDT & E International*, 62, 55-65. 2014.

[Stryk et al, 2013] Stryk, J., Matula, R., & Pospisil, K. "Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements". *Journal of Applied Geophysics*, 97, 11-26. 2013.

[Sudyka y Krysiński, 2011] Sudyka, J., & Krysiński, L. "Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding". *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(3), 176-184. 2011.

[Sussmann, 1999] Sussmann TR. Application of ground penetrating radar to railway track substructure maintenance management. Doctoral dissertation, University of Massachusetts, Amherst, May 1999.

[The Finnish Geotechnical Society, 1992] "Ground Penetrating Radar - Geophysical Survey Methods" The Finnish Geotechnical Society and The Finnish Building Centre Ltd. Finland 64 p. 1992

[Tosti y Benedetto, 2012] Tosti, F., & Benedetto, A. "Pavement pumping prediction using Ground-penetrating Radar", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 1044-1053. 2012.

[Ullidtz, P., 1987] Ullidtz, P. "Pavement analysis". Elsevier Science, 330p. New York, NY. 1987.

[Wobschall, D., 1977] Darold Wobschall "A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water: The semidisperse model", *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, 15(1), 49-58. 1977.

[Zhen Leng, 2011] Zhen Leng, PhD Dissertation "Prediction of in-situ asphalt mixture density using Ground Penetrating radar: Theoretical development and field verification". University of Illinois at Urbana – Champaign, 2011.