METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN DE TÚNELES

METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN DE TÚNELES

José Miguel Galera. U.P.M. – Geocontrol, S.A.
Franciso Peral Alvaro. In Situ Testing, S.L.
Ángel Rodríguez Soto. In Situ Testing, S.L.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN 1

2.- LEVANTAMIENTO GENERAL 2

3.- TÚNEL SCANNER 7

3.1.- CANAL VISUAL 11
3.2.- CANAL PROFILE 11
3.3.- CANAL TERMOGRÁFICO 13

4.- TÉCNICAS GEOFÍSICAS 13

4.1.- GEORRADAR 17
4.1.1.- Fundamentos del método *17*
4.1.2.- Aplicaciones para el control de sostenimiento *19*
4.1.2.1.- Control del espesor del hormigón 19
4.1..2.2.- Control de la calidad del sostenimiento 23
4.2.- MÉTODOS DE ULTRASONIDOS 23
4.2.1.- Fundamentos del método *23*
4.2.2.- Aplicaciones para la auscultación de túneles *27*
4.3.- MÉTODOS GEOELÉCTRICOS 29
4.3.1.- Fundamentos del método *29*
4.3.2.- Aplicaciones del método *29*
4.4.- TÉCNICA POR IMPEDANCIA MECÁNICA 32
4.5.- SÍNTESIS DE LAS CONDICIONES DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS GEOFÍSICAS 34

METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN DE TÚNELES

José Miguel Galera. U.P.M. – Geocontrol, S.A.
Franciso Peral Alvaro. In Situ Testing, S.L.
Ángel Rodríguez Soto. In Situ Testing, S.L.

1.- INTRODUCCIÓN

En numerosas ocasiones, tras periodos más o menos prolongados en los que se han venido utilizando túneles hidráulicos, ferroviarios, de carretera, ... surgen dudas acerca del estado en que se encuentran, bien por haberse apreciado indicios de que algo falla, pequeños desprendimientos, fisuras, ...; o bien por simple prudencia de los responsables, especialmente agudizado cuando surgen problemas en túneles similares.

En el presente articulo se describen diferentes métodos de inspección de túneles cada uno con un objetivo específico y que en su conjunto van a cubrir prácticamente todas las posibles anomalías que pueden surgir en los túneles.

2.- LEVANTAMIENTO GENERAL

El levantamiento de las particularidades y en especial de las anomalías existentes en un túnel es la fase preliminar a realizar en el momento en el que surgen las primeras evidencias acerca del posible mal estado en que se encuentra un determinado túnel.

Este reconocimiento previo debe definir las zonas en las que se ha de investigar mediante técnicas especificas de auscultación de túneles (geofísicas, ...) o bien, si los problemas son evidentes, proporcionar los datos necesarios para redactar el correspondiente Proyecto de Reparación.

Básicamente, este reconocimiento previo suele efectuarse en dos fases:

- Establecimiento de marcas identificativas y referencias
- Inspección del túnel

Establecimiento de referencias

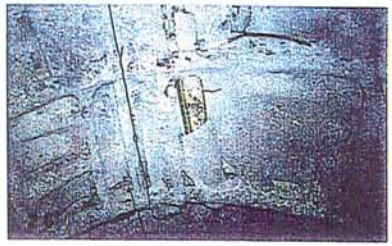
Con carácter previo al resto de los trabajos de campo se debe proceder a la comprobación del balizado de los túneles objeto de estudio y en caso de no existir o resultar insatisfactoria, se efectuará de nuevo.

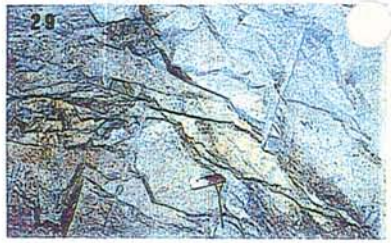
Este balizado puede efectuarse con spray reflectante, a 1,5 m sobre la solera, en uno de los hastiales.

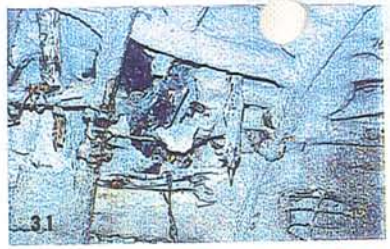
Inspección del túnel

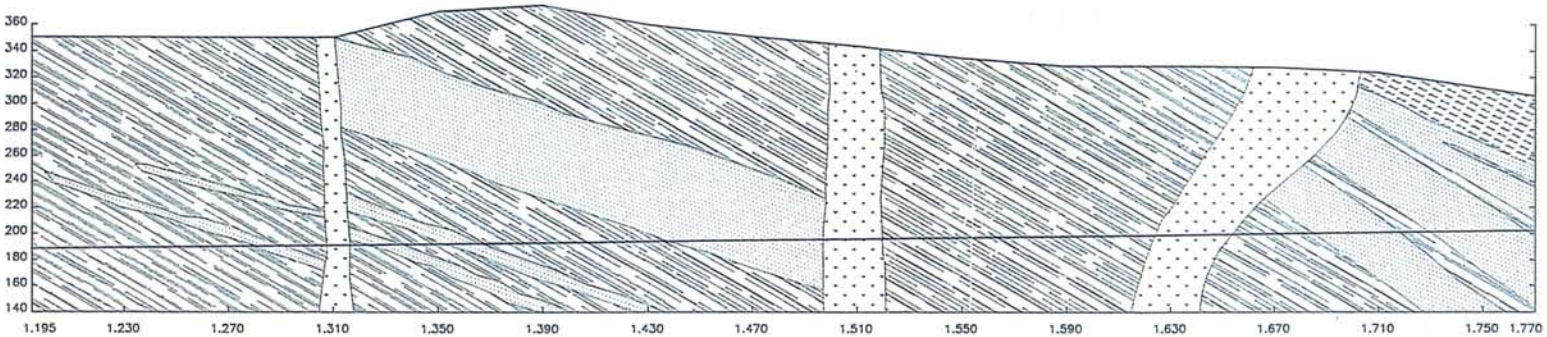
Durante el reconocimiento del túnel debe realizarse un levantamiento de todas las discontinuidades existentes en el revestimiento de la clave y ambos hastiales, según el criterio habitual de mapeado empleado en túneles. Para la ejecución de este tipo de trabajos, Geocontrol, S.A. habitualmente sigue la metodología de levantamiento de daños y del estado de túneles puesta a punto por la AFTES (Asociación Francesa de Túneles y Obras Subterráneas).

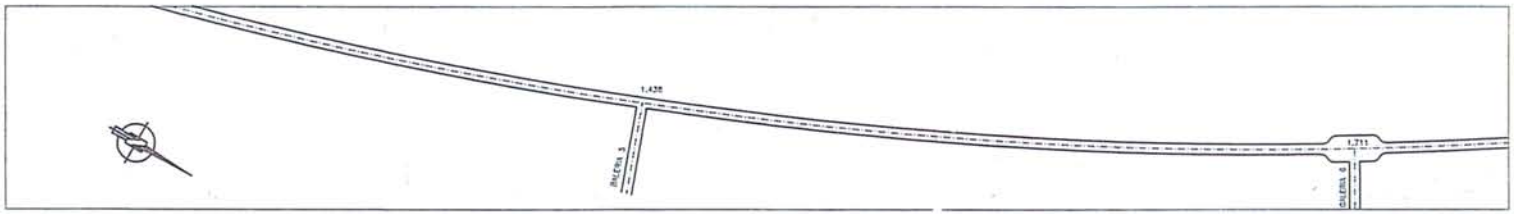
En la **Figura Nº 2.a** se muestra un ejemplo de uno de estos levantamientos, efectuados para el acondicionamiento de la galería auxiliar del Túnel de Vallvidriera en Barcelona; y en la **Figura Nº 2.b** se muestra otro levantamiento efectuado en el Túnel de Peñarrubia en Gijón, como parte del Proyecto de Acondicionamiento para su puesta en carga.











P.K.	1.195	1.230	1.270	1.310	1.350	1.390	1.430	1.470	1.510	1.550	1.590	1.630	1.670	1.710	1.750	1.770
TRAMO	LXXX	LXXXI	LXXXII	LXXXIII	LXXXIV	LXXXV	LXXXVI	LXXXII	LXXXIX	XC	XCI	XCII	XCIII	XCIV	XCV	XCVI
LONGITUD (m)	48	18	25	35	54	18	25	17	7	24	8	18	76	41	9	11
SOSTENIMIENTO																
REFUERZO DEL SOSTENIMIENTO																
ESTADO DE LA GALERIA: CERCHAS	P.T.		P.T.				MOV.		M.T.C.		MOV.					
GUNITA		GR.	D. GR.	D.		GR.	D.		D.		GR			GR.	GR. JA.	D.
TRESILLONES						M.E.								T.S.		T.S.
MACIZO ROCOSO			P.S.		P.S.		P.S.					P.S. J.A.				
AGUA		R.		F.D				G			E		R.			
OTROS		H.T.				H.T.		H.T.			H.T.	H.T.				
ESCLEROMETRIA (MPa)		26				20							22			
FOTOGRAFIAS N						26			27	28		29		30		31

P.K.	1.630	1.670	1.710	1.750	1.770
TRAMO	XCVII	XCVIII	CI	CII	CIII	CIV	CV	CVI
LONGITUD (m)	22	7	11	21	22	18	6	25
SOSTENIMIENTO								
REFUERZO DEL SOSTENIMIENTO								
ESTADO DE LA GALERIA: CERCHAS							M.T.	
GUNITA			D.		D.			
TRESILLONES	T.S.				P.S. J.A.			J.A.
MACIZO ROCOSO		P.S.						
AGUA					G		G	
OTROS								
ESCLEROMETRIA (MPa)								
FOTOGRAFIAS N	32						33	

ACCIONES RECOMENDADAS

SOSTENIMIENTO

- HORMIGON
- CERCHAS Y GUNITA
- CERCHAS, GUNITA Y MADERA
- GUNITA
- GUNITA Y BULONES
- OTROS (MALLA, CHAPA ETC...)
- LOCALMENTE GUNITA
- LAMINA IMPERMEABLE
- SIN SOSTENIMIENTO

REFUERZO DEL SOSTENIMIENTO

- BULONES
- ZOCALO DE HORMIGON
- SOLERA
- GUNITA EN HASTIALES
- GUNITA, BULONES, PERFILES Y MALLA EN HASTIALES
- GUNITA EN TODA LA SECCION

SIMBOLOS LITOLOGICOS

- GRANITO DESCOMPUESTO SAULO
- GRANITO ALTERADO
- GRANITO SANO
- PORFIDO GRANITICO Y GRANODIORITICO
- CORNEANA Y CORNEANA MOTEADA
- DIQUE DE APLITA
- ESQUISTO MOTEADO
- CONTACTO PROGRESIVO
- CONTACTO PROGRESIVO
- FILITA
- CUARCITA Y ANFIBOLITA
- PIZARRAS SERICITICAS

ESTADO DE LA GALERIA

Ap.C = APOYO IRREGULAR DE CERCHAS
B = BIDON EN EL REFUERZO
B.C.D. = BASE DE CERCHA DEFORMADA
Bl. S = BLOQUES SUELTOS
C.D. = CERCHA DOBLADA
CH. OX. = CHAPA OXIDADA
C.S.A. = CERCHA SIN APOYO
D. = DESPEGUES
D.C. = DESPEGUES EN CLAVE
E.M. = ENTIBACION EN MAL ESTADO
F. = FLUJO
F.D. = FLUJO DEBIL
G. = GOTEO PUNTUAL
G.B.M. = FALTA GUNITA EN BASE DE HASTIALES
GR = GRIETAS
H. y H.T. = HUECOS EN TRASDOS DEL SOSTENIMIENTO
H.D.R. = HASTIAL DERECHO ROTO
H.R. = HORMIGON ROTO
J.A. = JUNTAS ABIERTAS
M.E. = TRESILLONES EN MAL ESTADO
MOV = CERCHAS MOVIDAS
M.S. = MATERIAL SUELTO
M.S.R. = MATERIAL SUELTO EN EL REFUERZO EN HASTIAL IZQUIERDO
M.T.C. = MADERA EN TRASDOS DE LAS CERCHAS
P.G. = POBRE EN GUNITA
R. = REZUME
SBEXC. = SOBREEXCAVACIONES
P.S. = PIEDRAS SUELTAS
P.T. = PIEDRAS EN TRASDOS DE CERCHAS
T.S. = TRESILLONES SEMICUBIER.
T.R. = TRESILLONES ROTOS

geocontrol s.a.
Alonso 1 2º Izq. MADRID-28003 Tfnos 553.17.63 553.15.89

CLIENTE: TABASA

TRABAJO: RECONAIXEMENT DE GALERIA AUXILIAR

DIBUJADO
FECHA JUNIO-1.992
AUTOR
ESCALA H=1:1000 V=1:2000

TITULO: LEVANTAMIENTO GEOTECNICO DE LA GALERIA AUXILIAR

CLAVE 9237

PLANO Nº 4

Figura Nº 2.a.- Levantamiento para el acondicionamiento de la galería auxiliar del túnel de Vallvidrera.

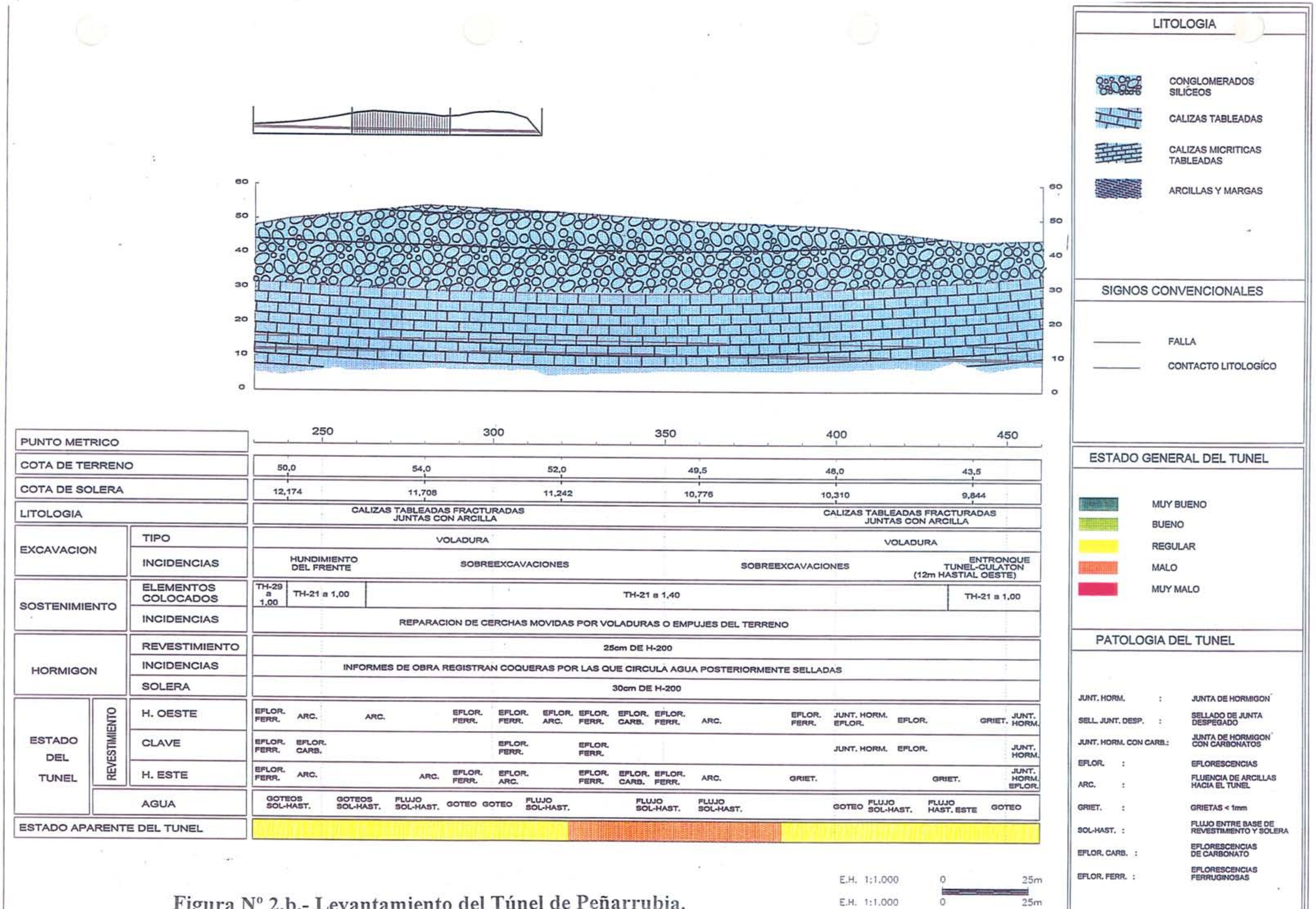


Figura Nº 2.b.- Levantamiento del Túnel de Peñarrubia.

Cuando se trata de un túnel con revestimiento de hormigón se presta especial atención al estado de las juntas transversales, discontinuidades (grietas y fisuras), eflorescencias, juntas frías de hormigonado y unión solera-hastial.

De cada uno de estos elementos deben obtenerse los siguientes datos:

- Apertura y salto entre labios.
- Esclerometría del hormigón existente en los bordes de la discontinuidad.
- Discontinuidades asociadas.
- Rebaba, sellado de juntas...
- Flujo de agua, arcillas, óxidos o carbonatos a través de la discontinuidad.

En todos los casos se evalúa el riesgo de formación de lajas, cuñas, placas o bloques de hormigón susceptibles de ser inestables.

Donde se detecten fisuras conviene determinar su estado para lo cual pueden colocarse testigos de yeso y en su caso realizar medidas periódicas con fisurómetro de hilo vibrante o similar.

En las zonas donde se aprecie la degradación del revestimiento, cabe instalar estaciones de convergencia, realizándose la lectura del sistema de secciones de convergencia al menos una vez al mes.

Las lecturas de convergencia conviene realizarlas con cinta extensométrica que proporcione una precisión de 0,05 mm o superior.

En las **Fotografías Nº 2.c** y **Nº 2.d** se presentan dos imágenes durante la ejecución de medidas de convergencia y con el fisurómetro.

Como resultado se obtiene una valoración tramificada de la problemática del túnel, analizando la evolución previsible en el tiempo de las fracturas y grietas observadas.

Las filtraciones de agua al interior de los túneles además de las molestias que ocasionan, originan el desgaste prematuro de las instalaciones. Puntos que frecuentemente favorecen la circulación de agua son: las juntas en la mampostería y los taladros perforados en el revestimiento para el anclaje de instalaciones auxiliares.

Fotografías Nº 2.c y 2.d.- Medida de convergencias y de grietas con el fisurómetro de cuerda vibrante, en la Galería de Reconocimiento de Le Boulou en el tramo de AVE Figueras-Perpignan.

Por esta razón se debe prestar especial atención a las humedades durante todas las inspecciones que se efectúen en el interior de túneles, clasificando cualitativamente estas afecciones como humedades, filtraciones o surgencias y cuantitativamente mediante un registro con la superficie afectada o los caudales surgentes. Las fichas de cada una de estas surgencias deben incluir la fotografía de la misma.

En la **Figura Nº 2.e** se presenta una ficha tipo, realizada durante la ejecución del Proyecto de Impermeabilización de Galerías en el Aeropuerto de Barajas.

Los informes correspondientes deben incluir un análisis de la situación de los mismos, proponiendo las medidas correctoras de las anomalías que se hayan detectado o, en su caso, las actuaciones especiales de control que se consideren necesarias.

3.- TÚNEL SCANNER

El sistema "Túnel Scanner 360" desarrollado por la compañía alemana SPACETEC y representado en España y Portugal por GEOCONTROL, S.A. permite reconocer el estado del revestimiento de los túneles y su geometría de un modo rápido y preciso.

Este sistema dispone de los tres canales siguientes:

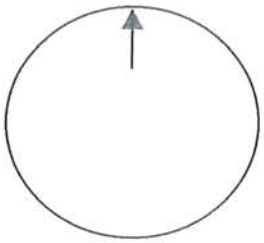
- VISUAL: Registra la imagen real del perímetro interior del túnel.
- PROFILE: Proporciona un perfil geométrico continuo del túnel.
- THERMOGRAPHY: Mediante la medida de la variación de las temperaturas en la superficie externa del revestimiento del túnel es capaz de determinar su estado y las zonas donde existen anomalías en su trasdós.

Los dos primeros canales, VISUAL Y PROFILE emplean la técnica del láser, mientras que el denominado THERMOGRAPHY aplica la técnica de los infrarrojos.

Este equipo posee un espejo giratorio que dirige el haz hacia el perímetro de la excavación. El haz reflejado se recoge y se envía al procesador interno donde es registrado y digitalizado.

GEOCONTROL S.A. CONSULTORES EN CIENCIAS DE LA TIERRA	IMPERMEABILIZACIÓN DE GALERÍAS DE SERVICIO DEL AEROPUERTO MADRID-BARAJAS.
	LEVANTAMIENTO DE HUMEDADES, FILTRACIONES Y SURGENCIAS.

SITUACIÓN: GALERÍA DE SERVICIOS CIRCULAR.		
DOVELA Nº : 391	P.K.: 0+462,2	FECHA: 22/07/98

LOCALIZACIÓN EN EL ANILLO		DESCRIPCIÓN
	Clave.	Surgencia.

OBSERVACIONES	Surgencia en paso de cables , florecencia de carbonatos y oxido en el cableado.

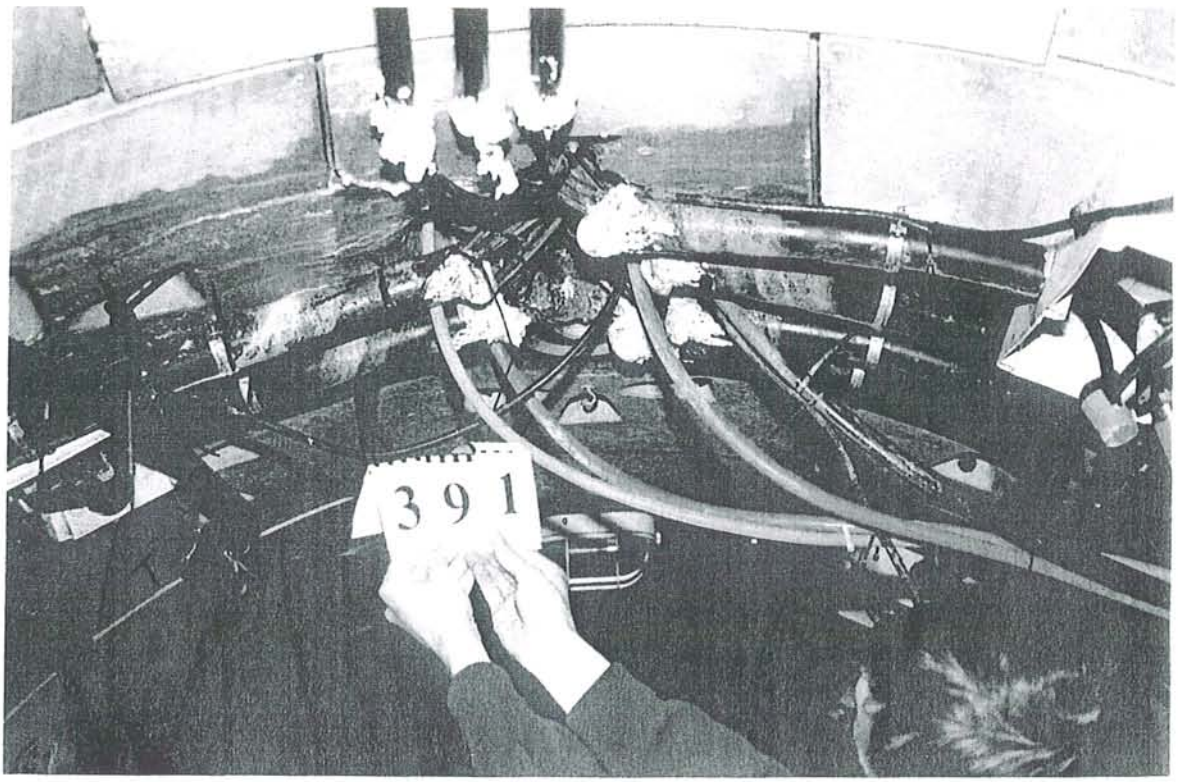


Figura Nº 2.e.- Ficha de levantamiento de humedades.

En la **Figura Nº 3.a** se presenta el principio de funcionamiento del método y en la **Fotografía Nº 3.a.** una imagen de su instalación sobre una unidad del metro.

Las principales características técnicas del equipo son:

- Ángulo de registro: 360º
- Velocidad de rotación: 200 c/s
- Puntos registrados: 2.500 - 5.000 - 10.000 puntos /revolución.
- Distancia de medida (Radio del túnel): De 0,5 m a 10 m.
- Reflectividad de la superficie: 5 a 100%
- Resolución: Es función de la resolución escogida (2.000/5.000/10.000pixel), del radio del túnel y la velocidad de circulación del equipo, tal como se muestra en el **Cuadro Nº 3.I.**

RADIO DEL TÚNEL (m)	RESOLUC. (Pixel)	VELOCIDAD (km/h)	RESOLUCIÓN (cm)	
			TANGENCIAL	RADIAL
2	2.500	3,6	0,5	0,5
	5.000	1,8	0,25	0,25
4	2.500	7,2	1,0	1,0
	5.000	3,6	0,5	0,5
6	2.500	10,8	1,5	1,5
	5.000	5,4	0,75	0,75

Cuadro Nº 3.I.- Resolución del TS 360 BP para distintos tamaños de túnel, velocidades de circulación y las dos resoluciones más habituales

Por ejemplo, si se registra con una resolución de 5.000 pixel y el radio medio del tramo de túnel en estudio es de 5 m, la velocidad adecuada para obtener una resolución similar en sentido tangencial y radial es de unos 4,5 km/h. Estos datos suponen que **un túnel de 1.000 m puede reconocerse en un tiempo inferior a 15 minutos**.

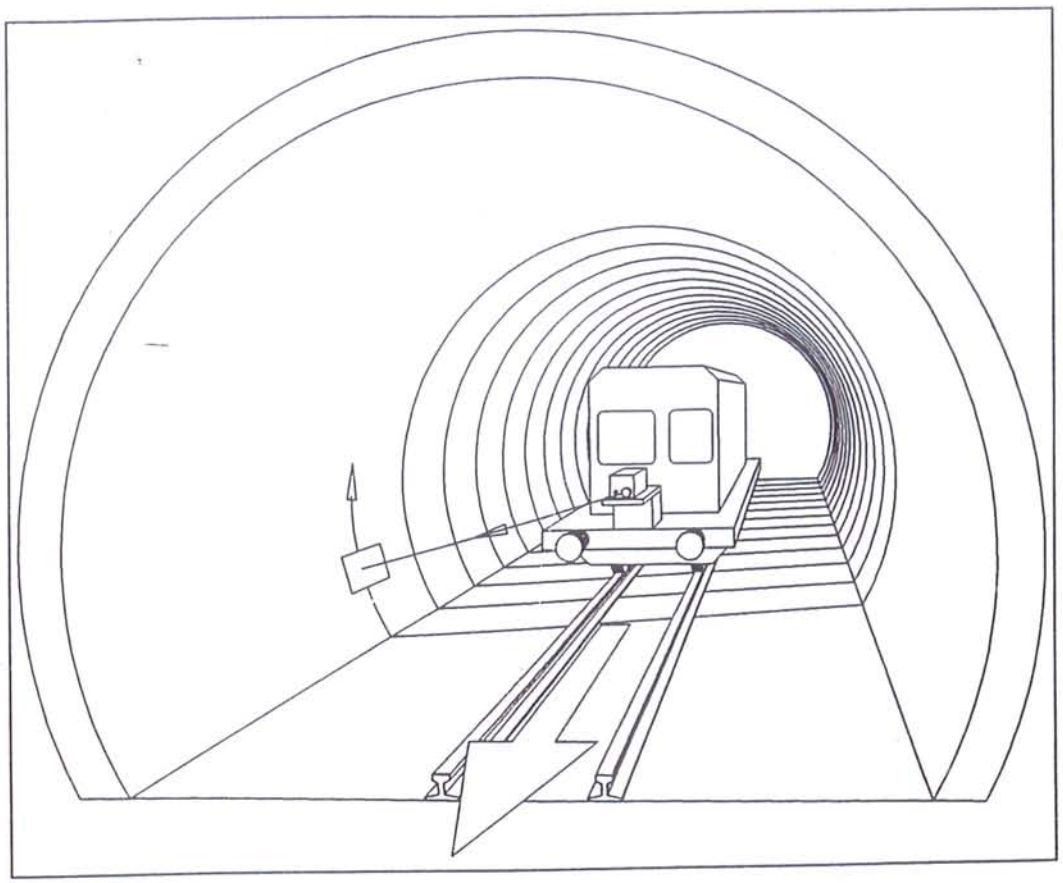


Figura Nº 3.a.- Principio de funcionamiento del "Tunnel Scanner".

Fotografía 3.a.- Tunnel Scanner instalado en una unidad del metro de Madrid.

Un elemento básico de este equipo es el sistema de posicionamiento instalado en la rueda del vehículo motriz, el cual una vez calibrado permite conocer el punto exacto al que corresponde cada medida registrada.

En los apartados siguientes se describen los tres canales de los que dispone este equipo.

3.1.- CANAL VISUAL

Su funcionamiento se basa en la radiación de un rayo láser, enviado al exterior a través de un espejo giratorio. Este haz ilumina secuencialmente todo el perímetro del túnel, captando el mismo espejo por fotogrametría la imagen visual del contorno. La señal recogida se envía al procesador interno que la digitaliza, consiguiendo un contraste óptimo entre puntos, fundamental para su posterior interpretación.

La recolección simultánea de los datos de imagen visual y de los geométricos, proporciona una perfecta ubicación de cada punto, necesaria para la correcta interpretación de la información.

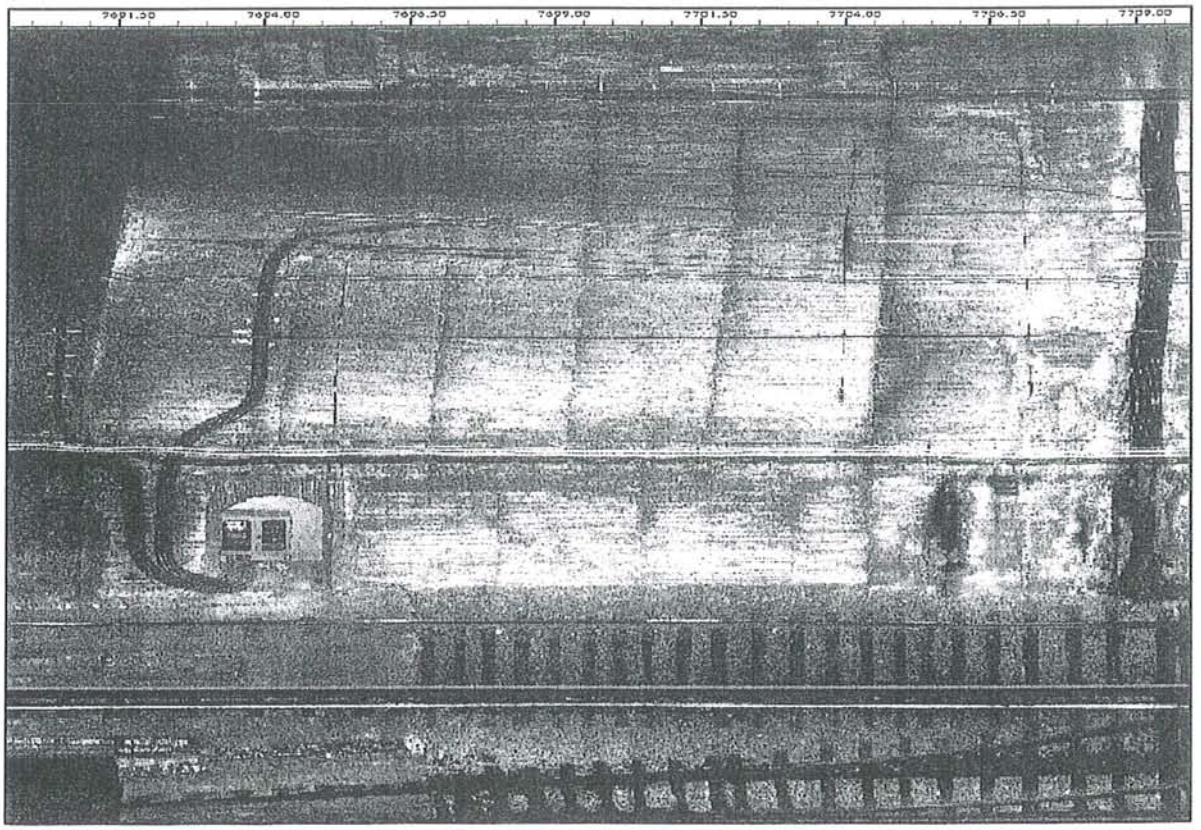
En la **Figura Nº 3.1.a** se presentan dos imágenes captadas por el canal VISUAL durante los trabajos efectuados. Ambas corresponden al entorno de la estación de Plaza de España, habiéndose representado la imagen desarrollada del contorno del túnel en 2D y en 3D de la estación de Plaza de España.

3.2.- CANAL PROFILE

Este canal dispone de un modulador en alta frecuencia del haz, que permite a partir del desfase entre las señales transmitida y recibida, determinar con precisión la distancia a cada uno de los puntos registrados.

Esta información, combinada con la proporcionada por el sistema de posicionamiento del vehículo motriz, consigue una perfecta representación tridimensional del túnel gracias a :

- Los 2.500/5.000 puntos tomados en cada revolución.
- Al espaciado entre dos perfiles sucesivos, inferior a 1 cm.



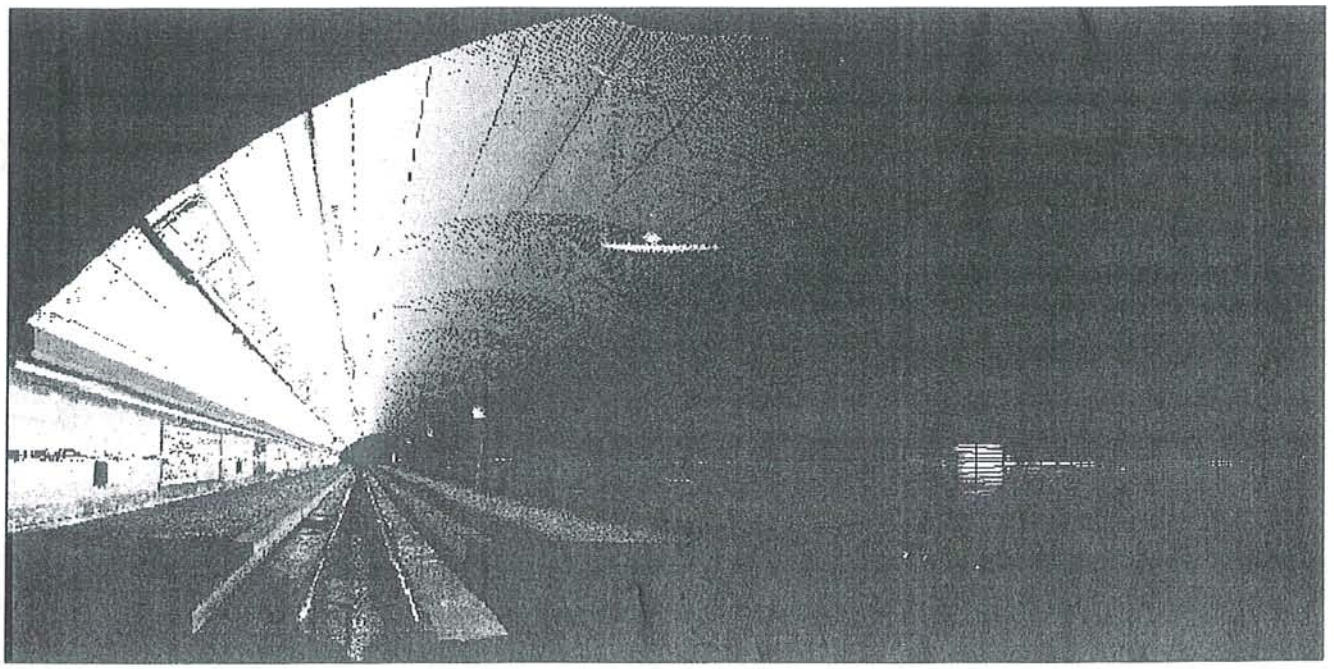


Figura Nº 3.1.a.- Imágenes en 2D y 3D de un tramo del túnel.

Como es fácil comprobar, si el espejo gira a 200 revoluciones por segundo y en cada vuelta se registran 2.500 puntos, se están tomando 500.000 puntos durante cada segundo de reconocimiento, lo que da una idea de la magnitud de los archivos informáticos generados.

En la **Figura Nº 3.2.a** se presenta un ejemplo de perfiles obtenidos cada 5 m mediante el canal PROFILE del Tunnel Scanner, disponiéndose de múltiples perfiles, 1 cada cm que no se han representado en este plano. En la **Figura Nº 3.2.b** se presenta el mapa de gálibos de un tramo del túnel estudiado.

3.3.- CANAL TERMOGRÁFICO

Las imágenes térmicas muestran los cambios en la temperatura de la superficie externa del revestimiento mediante imágenes de colores, graduados en función de la temperatura.

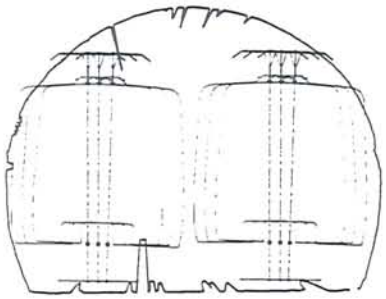
Estos cambios de color proporcionan información vital como es la presencia de agua tras el revestimiento, huecos y otros daños que pasarían desapercibidos con una inspección visual.

En la **Figura Nº 3.3.a** se presentan dos registros del mismo tramo de túnel, obtenidos con 6 años de diferencia.

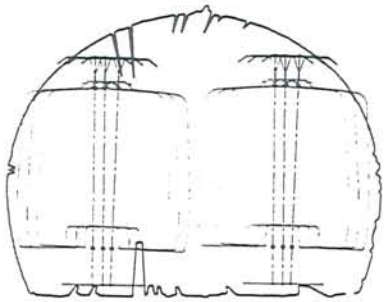
4.- TÉCNICAS GEOFÍSICAS

Existen varías técnicas geofísicas que se pueden aplicar para realizar una inspección de túneles.

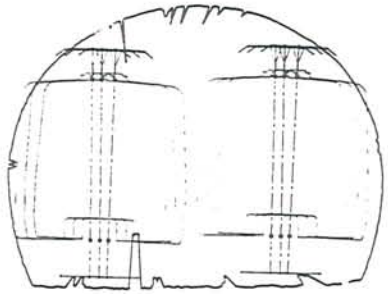
Según la técnica empleada y las características del sostenimiento será posible realizar un control, continúo o puntual, del espesor de hormigón, verificar la calidad de éste (existencia de una capa dañada, detección y caracterización de grietas, detección las zonas de humedad) y tener información sobre el terreno situado en el entorno de la excavación.



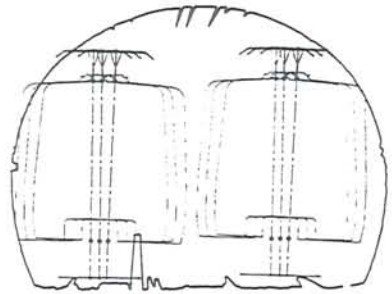
TS360 PROFILE SCANNER
OBJECT: MetroMadrid
DATE : 13.11.97
METRE : 7715.00



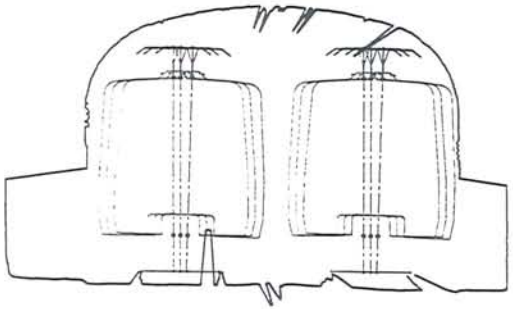
TS360 PROFILE SCANNER
OBJECT: MetroMadrid
DATE : 13.11.97
METRE : 7720.00



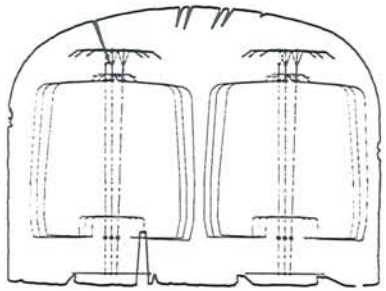
TS360 PROFILE SCANNER
OBJECT: MetroMadrid
DATE : 13.11.97
METRE : 7725.00



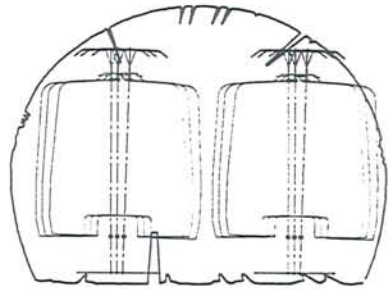
TS360 PROFILE SCANNER
OBJECT: MetroMadrid
DATE : 13.11.97
METRE : 7730.00



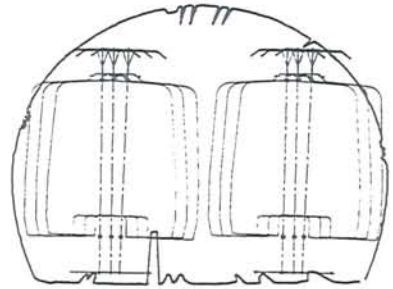
TS360 PROFILE SCANNER
OBJECT: MetroMadrid
DATE : 13.11.97
METRE : 7695.00



TS360 PROFILE SCANNER
OBJECT: MetroMadrid
DATE : 13.11.97
METRE : 7700.00

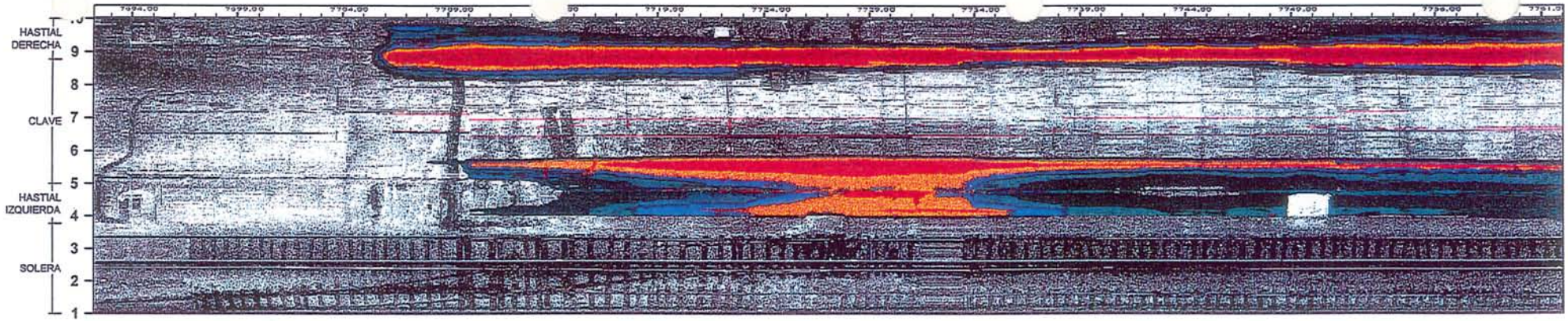


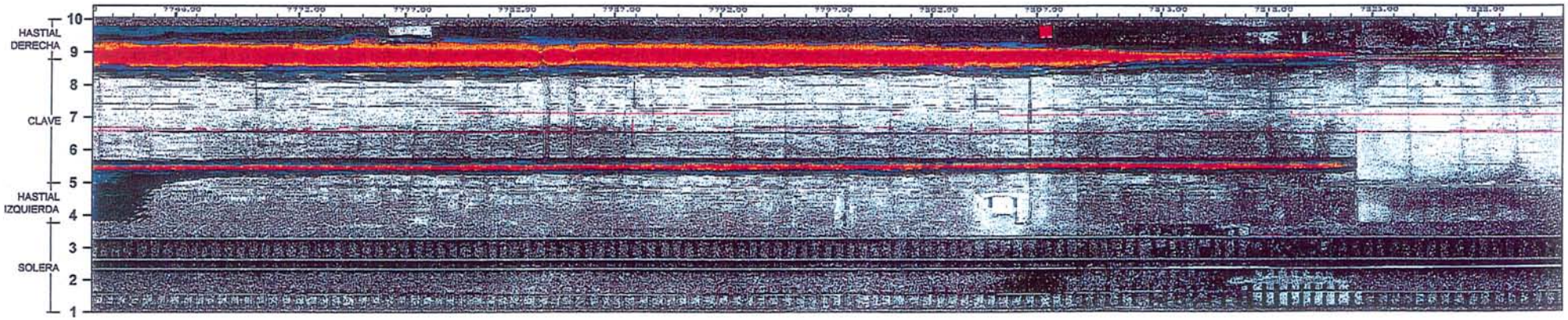
TS360 PROFILE SCANNER
OBJECT: MetroMadrid
DATE : 13.11.97
METRE : 7705.00

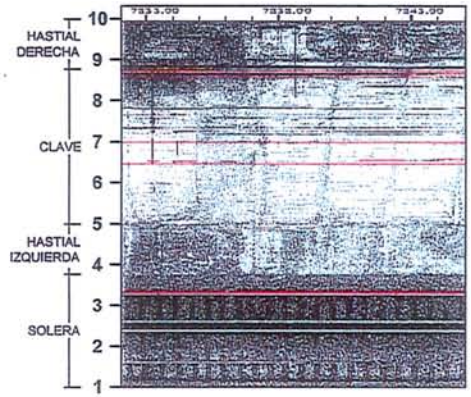


TS360 PROFILE SCANNER
OBJECT: MetroMadrid
DATE : 13.11.97
METRE : 7710.00

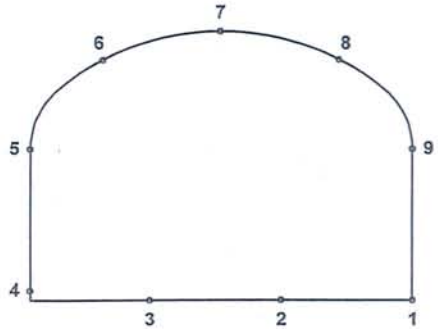
Figura Nº 3.2a.- Perfiles obtenidos cada 5 m con el canal PROFILE del "TUNNEL.SCANNER"







P.K. 7+692 - 7+845 ESCALA 1:200



ESQUEMA DESARROLLO DE LA SECCION

DENTRO DE GÁLIBO

- 10 - 20 cm
- 5 - 10 cm
- 0 - 50 cm

FUERA DE GÁLIBO

- 0 - 10 cm
- 10 - 25 cm
- >25 cm

CONSEJERIA DE OBRAS PÚBLICAS URBANISMO Y TRANSPORTES Comunidad de Madrid	DIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS DEL TRANSPORTE SERVICIO DE PROYECTOS	Vº Bº EL JEFE DE SERVICIO DE PROYECTOS J. TRABADA GUIJARRO	DIRECCION DEL PROYECTO J. TRABADA GUIJARRO	EL CONSULTOR	ESCALAS	TITULO ADECUACIÓN DE GÁLIBO DE LA LÍNEA 10 DEL METRO DE MADRID	CLAVE FECHA	DESIGNACION MAPAS DE GÁLIBOS	Nº DE PLANO HOJA Nº ..... DE .....

Figura Nº 3.2.b.- Mapa de gálibos.

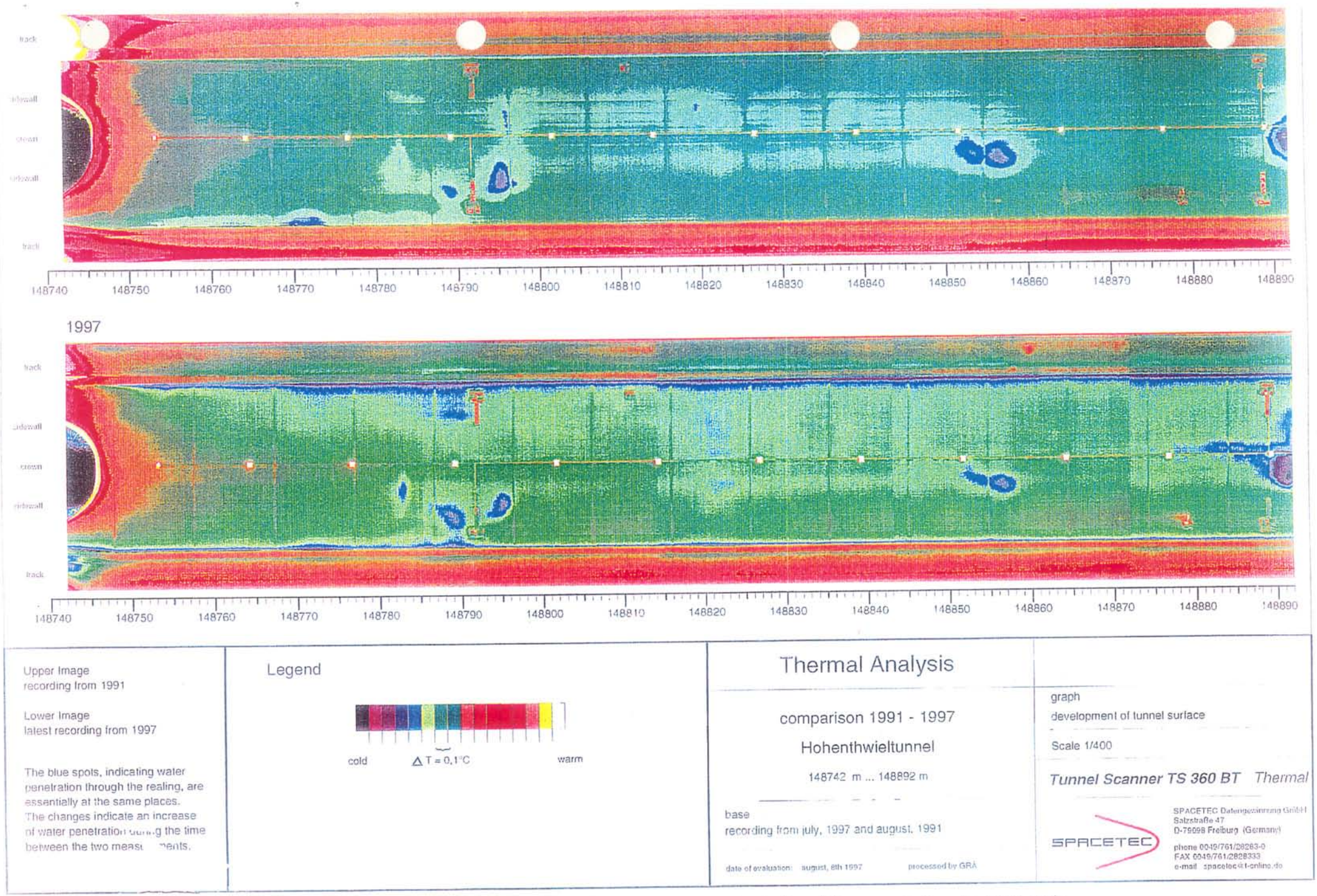


Figura Nº 3.3.a.- Registro termográficos de un mismo tramo de túnel obtenidos con 6años de diferencia.

Las principales técnicas que se vienen utilizando para la inspección de túneles son:

- el georradar
- métodos de ultrasonidos
- la prospección geoeléctrica

En este punto se hará también referencia una cuarta técnica, la impedancia mecánica, que está todavía en desarrollo pero que podría llegar a ser utilizada para el control del revestimiento de túneles.

4.1.- GEORRADAR

La técnica del georradar es idéntica a la empleada, desde tierra, para la detección de objetos que navegan en el espacio. En el georradar, el emisor y el receptor constituyen una unidad en la que la frecuencia de las radiaciones electromagnéticas condicionan la penetración de las ondas en el terreno, esto es, cuanto mayor sea la frecuencia de la radiación, mayor atenuación sufre al propagarse por el medio correspondiente y por tanto su penetración es menor.

4.1.1.- Fundamentos del método

Básicamente, la utilización del georradar supone la emisión mediante una antena, de una onda electromagnética que penetra en el material a analizar; su reflexión es recogida por la antena receptora, íntimamente en contacto con este material. De esta forma se registra una señal que, una vez analizada, permite detectar los cambios de material, huecos ó singularidades existentes en el interior del terreno sobre el que se desplaza el emisor-receptor.

Desde un punto de vista práctico, moviendo la antena en paralelo con la superficie, a lo largo de una alineación determinada, se puede obtener un perfil del terreno en profundidad.

En la **Figura Nº 4.1.1.a.** se muestran unas señales típicas emitidas y recibidas por el georradar al desplazar la antena. El pulso emitido por el georradar se refleja, en primer lugar, en la superficie del material y posteriormente en cualquier discontinuidad que encuentre al propagarse por éste, siempre que exista un contraste de conductividad dieléctrica apreciable.

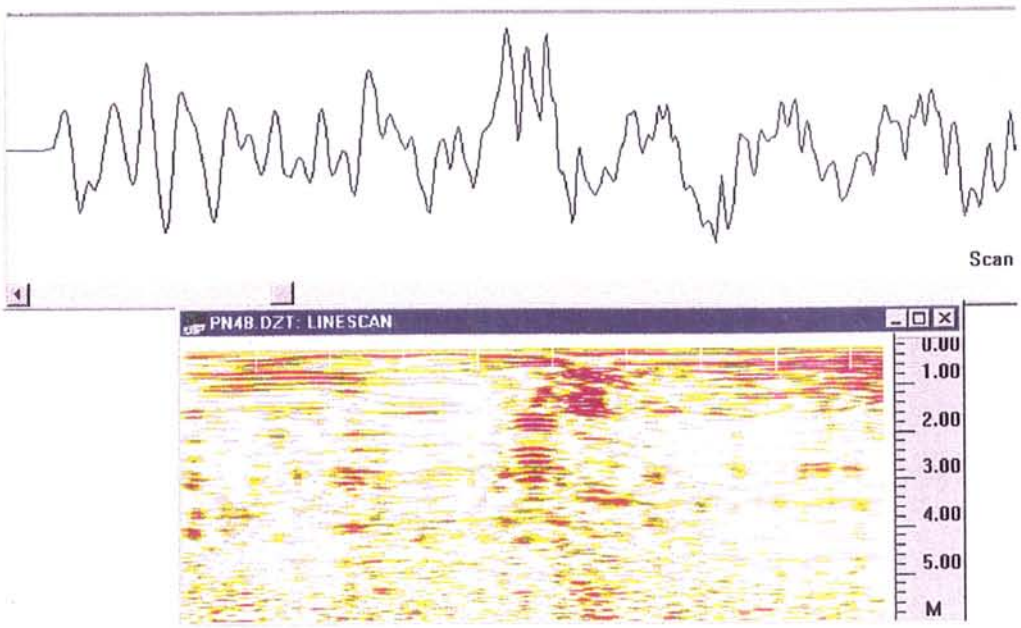


Figura 4.1.1.a.- Imagen de un impulso de radar y sus reflexiones en el terreno.

Debido a la alta frecuencia de las señales emitidas por el georradar, que van desde 16 a 2 GHz, su atenuación es muy rápida y por lo tanto, la profundidad del terreno a la que pueden penetrar estas señales produciendo ecos interpretables, está limitada.

El comportamiento seguido por un impulso al penetrar en el terreno, depende de los parámetros que se describen a continuación.

La **conductividad eléctrica** es la medida de la facilidad de paso que encuentra un impulso electromagnético al atravesar un material, y se expresa numéricamente como el inverso de la resistividad. Su unidad en el S.I. es el Siemens/m.

La **constante dieléctrica** es la magnitud física en la que se basa el georradar y representa la permitividad al paso de un impulso electromagnético con respecto a la permitividad que presenta el vacío, y por tanto, se expresa con un factor adimensional. En la práctica esta constante depende de la conductividad eléctrica y del espesor de material atravesado.

La utilización del georradar se fundamenta en las reflexiones inducidas sobre un impulso electromagnético al pasar de un material a otro, entre los que existe un contraste de sus respectivas constantes dieléctricas.

La **velocidad de propagación** de una onda electromagnética depende del material atravesado y de la frecuencia de la señal emitida. En general, esta velocidad es mayor en el aire ó en materiales secos, que en agua ó materiales húmedos.

El **coeficiente de atenuación** del material expresa la pérdida de energía que sufre la señal emitida, al atravesar el medio de transmisión. La unidad en la que se mide es el dB/m. Este coeficiente aumenta con: el contenido en agua; la conductividad eléctrica; la dispersión producida por una composición heterogénea; y el contenido de partículas metálicas.

Las ondas medidas pueden ser representadas de dos maneras: como trazas; o bien utilizando escalas de color. En la **Figura Nº 4.1.1.b** se muestra la relación entre ambas.

El fundamento de la detección de anomalías (huecos, bolos...)y de la caracterización de los diferentes reflectores se ilustra en la **Figura Nº 4.1.1.c.**

4.1.2.- Aplicaciones para el control de sostenimiento

El georradar tiene la ventaja de realizar perfiles continuos, rápidos (velocidad de una persona caminando). Además para la auscultación de túneles, las antenas utilizadas son de alta frecuencia (de 900 Mhz a 2 GHz) por lo que el tamaño de éstas es muy reducido, como se puede comprobar en la **Fotografía Nº 4.1.2.a**.

4.1.2.1.- Control del espesor del hormigón

Para el control del espesor del hormigón con georradar es preciso considerar el tipo de sostenimiento utilizado: mallazo, cerchas, utilización de fibras de acero... y las características dieléctricas del terreno situado detrás.

Antes de cualquiera exploración con georradar es preciso extraer una muestra del hormigón y del terreno situado detrás para comprobar la existencia de un contraste dieléctrico entre los dos materiales que producirá las reflexiones de las ondas al paso de un material a otro. Además esta muestra permitirá determinar la velocidad de las ondas electromagnéticas en el hormigón y así poder hacer la conversión de tiempo medido a espesor de hormigón.

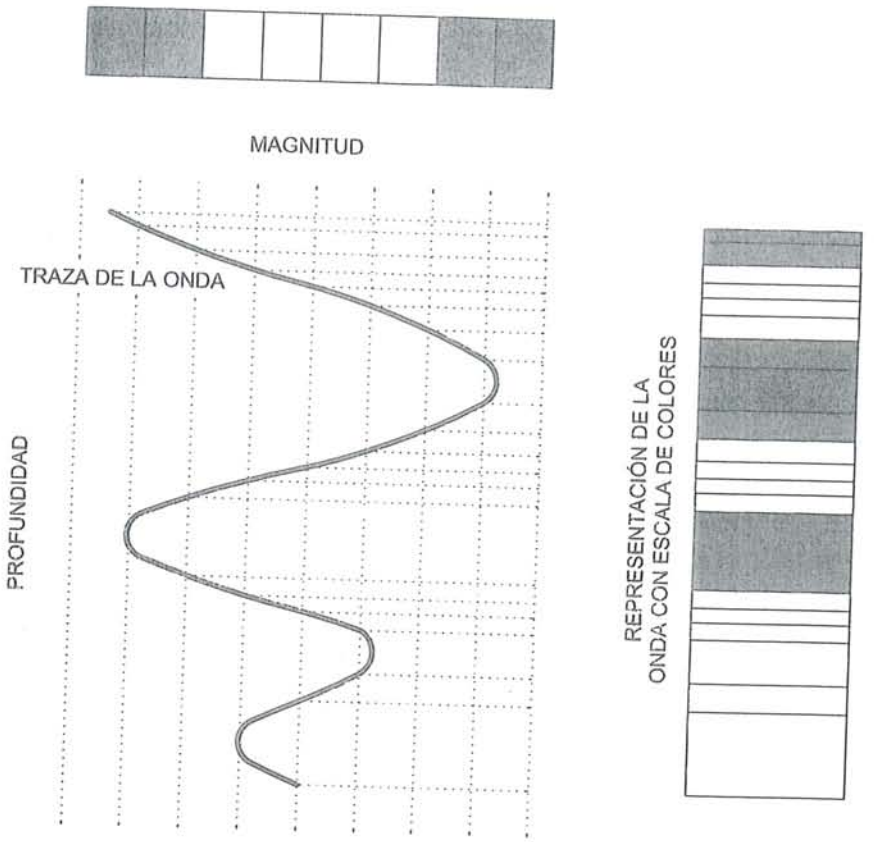


Figura Nº 4.1.1.b.- Representación por escala de colores.

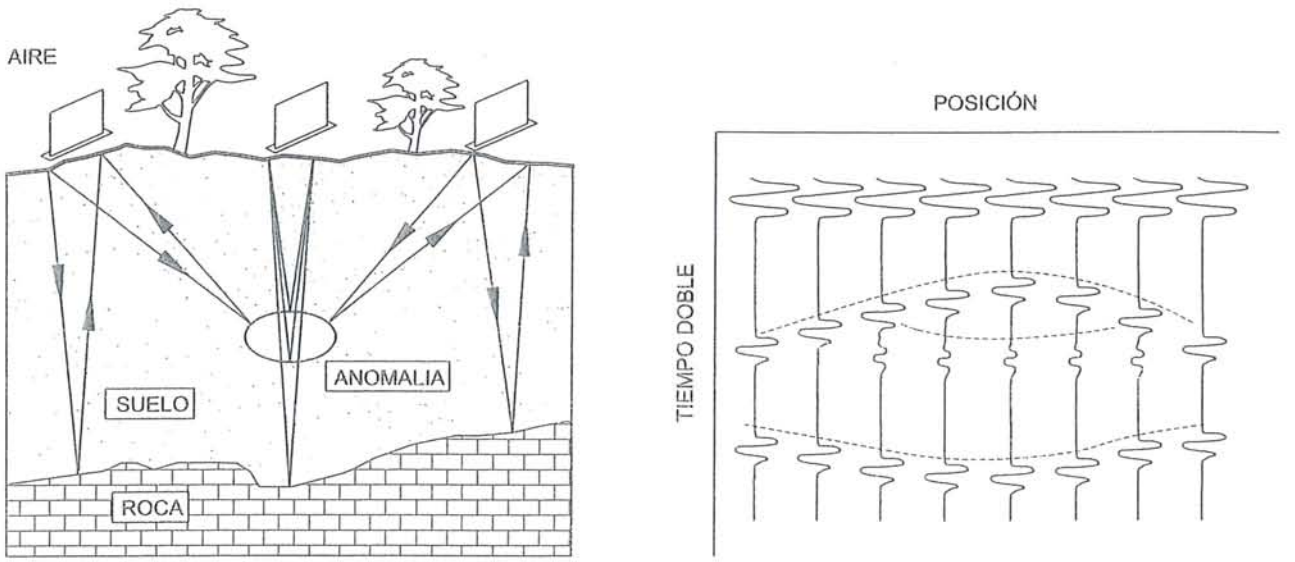
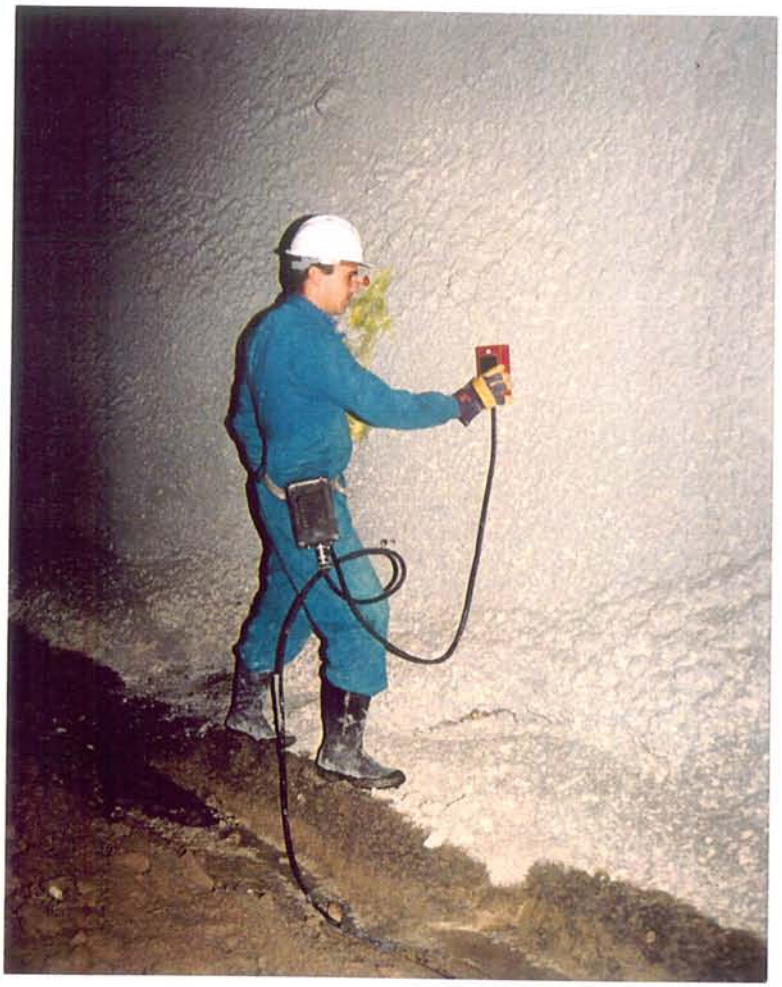


Figura Nº 4.1.1.c.- Ilustración del proceso de toma de datos y de la sección de reflexiones resultante.



Fotografía Nº 4.1.2.1.a.- Toma de datos con antena de 1 GHz.

A continuación se detallan los diferentes tipos de sostenimiento posibles y se comenta la efectividad del georradar en cada uno de estos casos.

- Hormigón proyecto sin fibras de acero

Es la configuración más adecuada para el uso del georradar, que constituye entonces una herramienta muy rápida para el control del sostenimiento.

- Hormigón proyecto reforzado con fibras de acero

La presencia de una elevada densidad de fibras de acero provoca una fuerte atenuación de la señal, limitando así la profundidad de investigación a unos 20-30 cm, y crea difracciones que dificultan o impiden la interpretación.

- Hormigón proyectado sobre mallazo

Si la malla no es demasiado cerrada no existen problemas par el uso del georradar. Si se han utilizado varios mallazos solapados o con una malla inferior a 10 x 10 cm el mallazo puede actuar de pantalla. En este caso se conseguiría tener el espesor del hormigón, ya que el mallazo está entre el hormigón y el terreno, pero no se obtendría información sobre el estado del terreno.

En la **Figura Nº 4.1.2.1.a** se muestra una imagen de georradar sobre hormigón con mallazo. En la parte central del perfil se pueden ver 3 huecos situados entre el hormigón y el terreno.

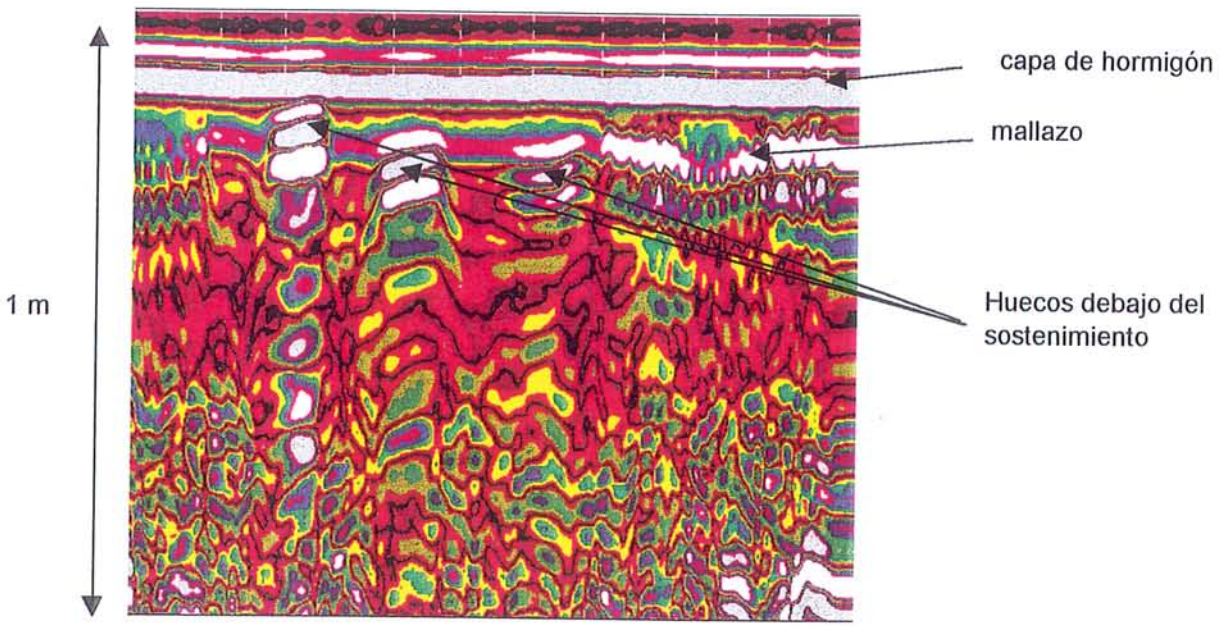


Figura Nº 4.1.2.1.a.- Control de sostenimiento mediante georradar.

- Hormigón proyectado con cerchas

En este caso se puede utilizar el georradar con la única limitación que se tiene que hacer perfiles discontinuos. En efecto al pasar de un conjunto hormigón/terreno a hormigón/metal con características dieléctricas muy diferentes el aparato pierde su sincronización.

Por lo tanto es preciso hacer perfiles sobre el hormigón y después realizar medidas puntuales sobre cada cercha.

- Hormigón proyectado con bulones

Al tratarse de un tipo de sostenimiento discontinuo no existe problema ninguno ya que la antena no tiene por que pasar sobre un bulón.

4.1..2.2.- Control de la calidad del sostenimiento

Si no existe limitaciones debidas al tipo de sostenimiento utilizado el georradar permite también estudiar el estado del terreno. Se puede así detectar posibles huecos situados detrás del sostenimiento como se mostró en la Figura Nº 4.1.2.1.a pero también localizar zonas alteradas, ver fracturas de cierta entidad y, según los casos, ver la zonas con infiltraciones de agua. En la **Figura Nº 4.1.2.2.a** se muestra un ejemplo de caracterización del terreno en un túnel mediante georradar.

Sin embargo con el georradar es muy difícil estudiar la calidad del hormigón y determinar la presencia de zonas dañadas dentro de éste.

4.2.- MÉTODOS DE ULTRASONIDOS

Este método se basa en la medida del tiempo de recorrido de las ondas ultrasónicas refractadas dentro de los materiales a estudiar.

4.2.1.- Fundamentos del método

Con este método se trata de determinar la velocidad de las ondas en los distintos medios y determinar las anomalías en los tiempos de llegada de la onda ya que éstas podrán ser asociadas a la existencia de zonas de hormigón alterado (velocidad menor), o a la presencia de grietas (retrasos en el tiempo de llegada).

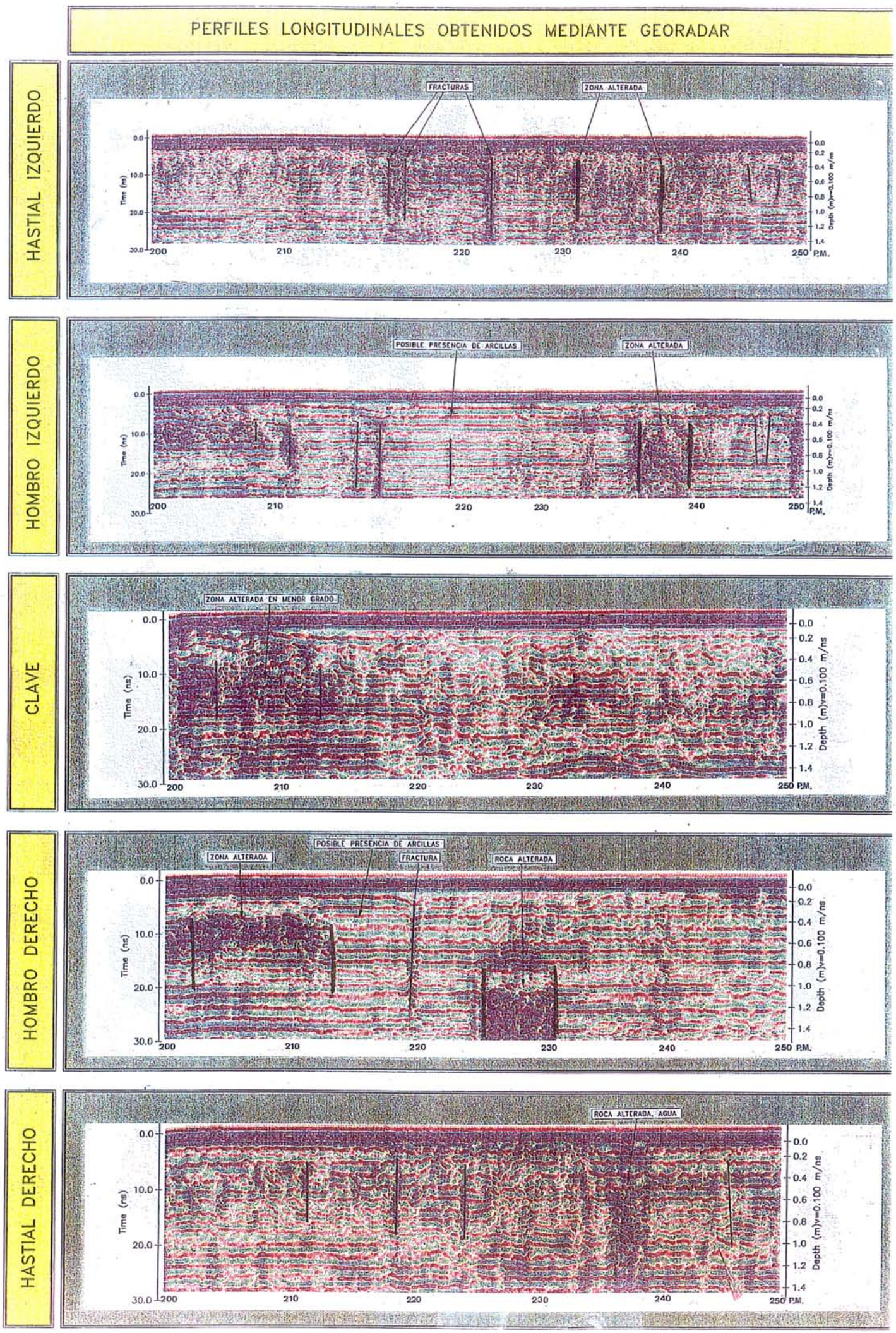
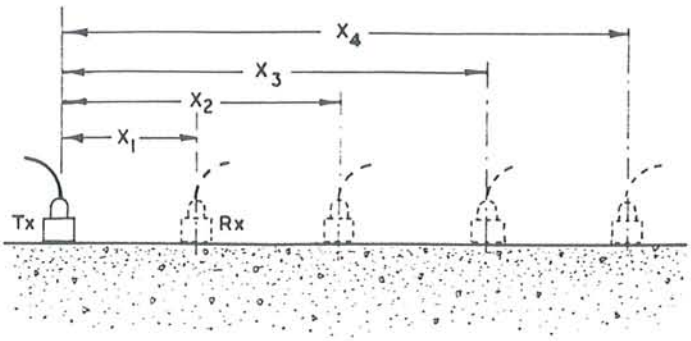


Figura Nº 4.1.2.2.a.- Caracterización del terreno en un túnel.

El equipo consta con dos palpadores, uno emisor y otro receptor. La toma de datos consiste en medir, para una misma posición del emisor, el tiempo de la primera llegada de la onda en función de la distancia emisor-receptor.

En la **Figura Nº 4.2.a** se ilustra la toma de datos. Si existen dos materiales con velocidades de propagación distintas y crecientes con la profundidad , entonces, a partir de cierta distancia Xo entre los palpadores, las ondas que viajan por el segundo material llegaran antes de las que se desplazan por el material más superficial, **Figura Nº 4.2.b**.

Por último si existen grietas en el hormigón, el tiempo de primer llegada corresponderá a las ondas que han rodeado la grieta lo que implica un retraso en el tiempo de primer llegada proporcional a la profundidad de la grieta, como se muestra en la **Figura Nº 4.2.c**.



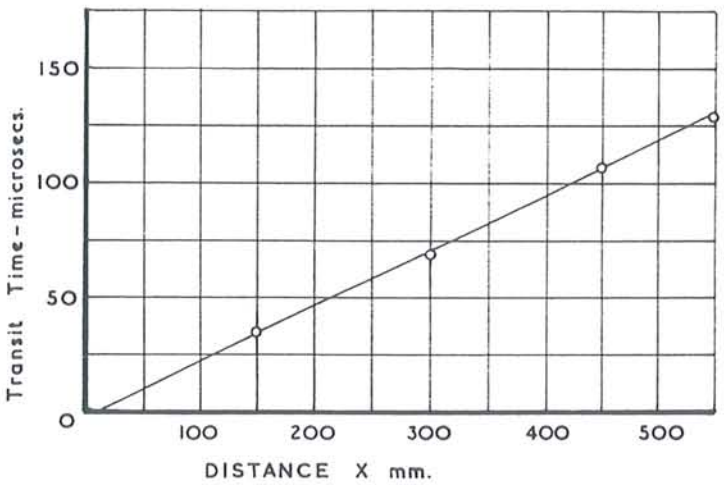


Figura Nº 4.2.a.- Determinación de la velocidad de pulsación por el método superficial o indirecto.

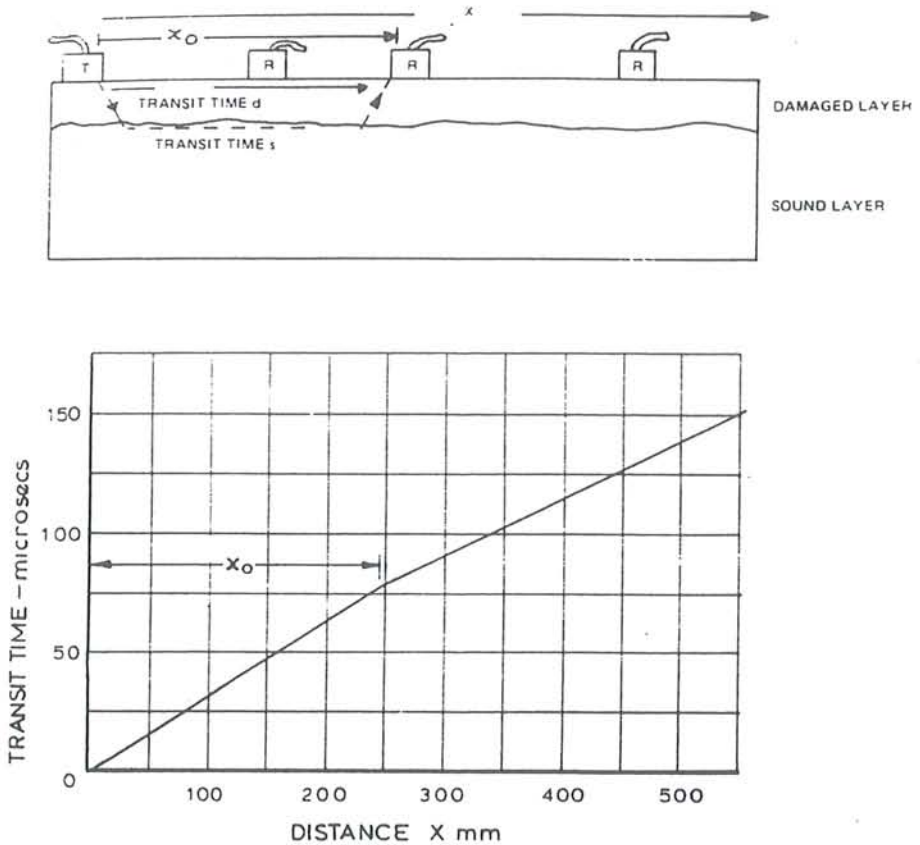


Figura Nº 4.2.b.- Determinación de la profundidad de la capa de hormigón dañada por el método indirecto.

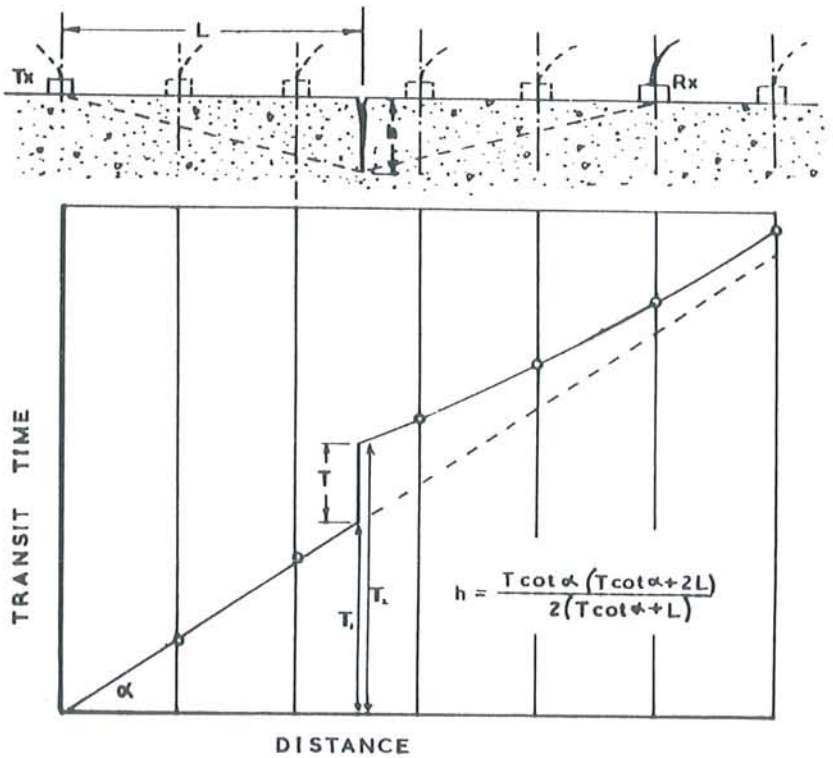


Figura Nº 4.2.c.- Determinación de la profundidad de las grietas.

4.2.2.- Aplicaciones para la auscultación de túneles

A partir de lo explicado anteriormente se deduce que este método puede ser utilizado para controlar:

- la homogeinidad del hormigón
- la presencia de huecos, grietas...
- las alteraciones del hormigón debidas al tiempo, ataques químicos, acción del fuego...
- espesores de hormigón

Para las dos primeras aplicaciones al única limitación reside en la precisión de las medidas, es decir la precisión del posicionamiento de los palpadores, que será función del tamaño de éstos, y en la calidad del contacto entre los palpadores y el hormigón. Si éste es muy rugoso y los palpadores utilizados son de varios centímetros de ancho es entonces preciso poner una pequeña capa de yeso para tener una buena superficie de contacto.

Para las medidas de espesores, bien sea del hormigón o de la zona dañada la única limitación reside en la necesidad de tener una distribución de velocidades creciente con la profundidad.

Esta condición se cumple siempre en el caso del estudio de una zona de hormigón dañado ya que la velocidad de éste es siempre inferior a la del hormigón sano. En el caso de la medida del espesor del revestimiento, dependerá del tipo de terreno en el que se realizó el túnel. Así pues si se trata de un túnel en suelo no hay posibilidad de cumplir la citada condición por lo que el método no es válido. En el caso de túneles en roca, la velocidad del hormigón suele ser inferior a la de la roca, excepto si ésta presenta un elevado grado de alteración o fracturación.

A continuación se presenta un ejemplo de un perfil realizado en un mina con hormigón proyectado con fibras de acero en un terreno calizo. Se realizaron dos perfiles en sentido inverso para tener más precisión y poder contrastar las medidas. Como se puede comprobar en la **Fotografía Nº 4.2.2.a** se utilizó yeso para tener una superficie de contacto plana y se sacaron dos muestras con el fin de comprobar lo resultados de la medias realizadas. En la **Figura Nº 4.2.2.a** se muestran los resultados y se observa que existe un muy buen ajuste entre los espesores calculados y las medidas realizadas sobre los testigos.

Fotografía Nº 4.2.2.a.- Dispositivo utilizado.

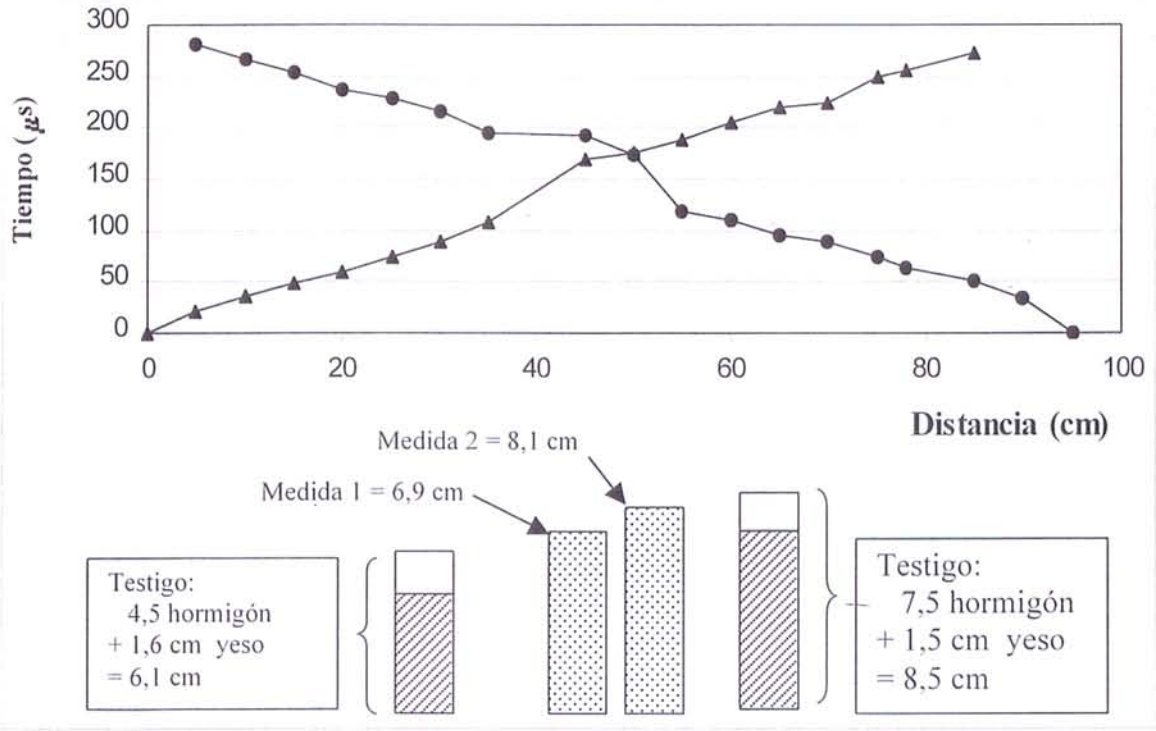


Figura Nº 4.2.2.a.- Medidas y resultados obtenidos en la medida de espesores de hormigón.

4.3.- MÉTODOS GEOELÉCTRICOS

Los métodos eléctricos que pueden ser utilizados para la auscultación de túneles son los micro sondeos eléctricos verticales (S.E.V.) y sobre todo la tomografía eléctrica que permite tener una imagen en dos dimensiones de la distribución de resistividad en un plan perpendicular a las paredes del túnel.

4.3.1.- Fundamentos del método

La técnica de los Sondeos Eléctricos tiene por objetivo estudiar al distribución de resistividad de los materiales del subsuelo en la vertical del punto de medida, basándose en la existencia de un contraste entre los valores de resistividad característicos de las diversas capas del terreno.

El modo de actuar consiste en mandar una corriente al subsuelo mediante dos electrodos, A-B, y se mide con otros electrodos, M-N la diferencia de tensión, que se atribuye al centro del dispositivo (punto de medida). Cambiando el espaciado entre los electrodos es posible medir la resistividad del suelo en la vertical del mismo punto a diferentes profundidades, obteniendo así un Sondeo Eléctrico Vertical. En la **Figura Nº 4.3.1.a** se ilustra la toma de datos mediante la técnica de S.E.V.

En la **Figura Nº 4.3.1.b** se ilustra el proceso de toma de datos de las calicatas eléctricas donde se traslada el dispositivo para medir la resistividad del terreno a una profundidad constante.

La tomografía eléctrica consiste en la determinación de la resistividad de las distintas celdas en las que se puede dividir el terreno subyacente bajo un perfil determinado, mediante la utilización de calicatas eléctricas con múltiples dispositivos a lo largo de ese perfil. En la **Figura Nº 4.3.1.c** se ilustra la toma de datos para la tomografía eléctrica.

4.3.2.- Aplicaciones del método

El método de tomografía eléctrica puede ser utilizado para determinar el espesor de hormigón pero no permite controlar la calidad de éste y permite estudiar cualitativamente la calidad del terreno situado detrás del hormigón (presencia de zonas húmedas).

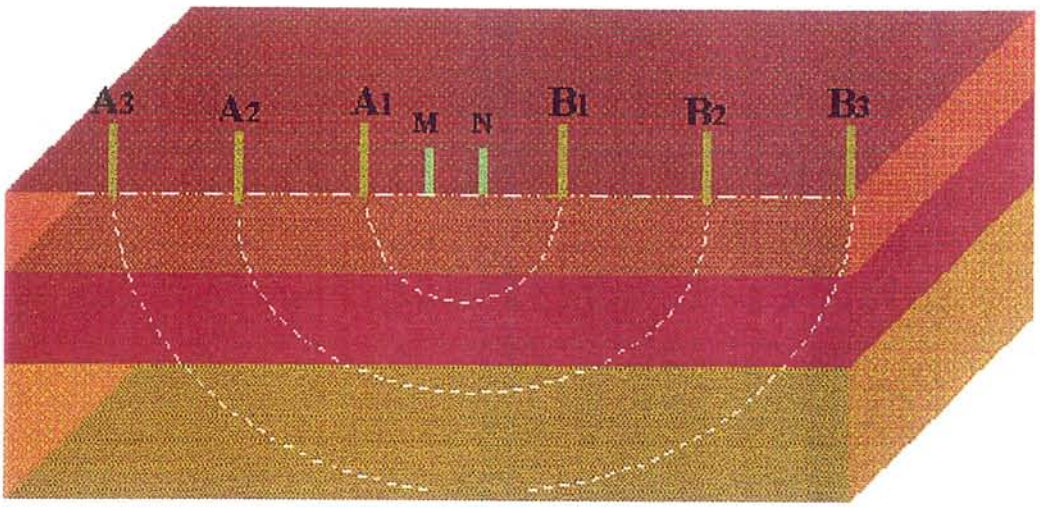


Figura Nº 4.3.1.a.- Dispositivo de medida para S.E.V.

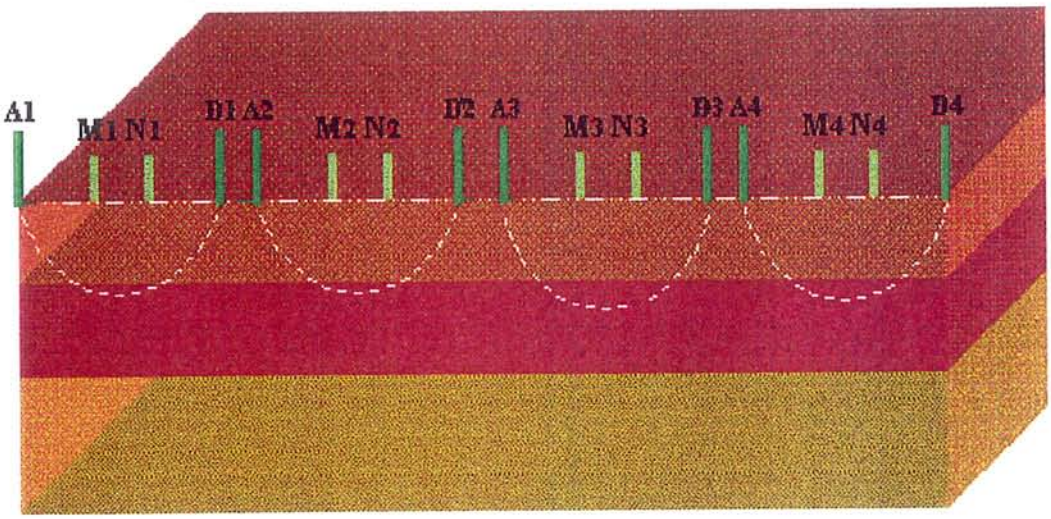


Figura Nº 4.3.1.b.- Dispositivo de medida para calicata eléctrica.

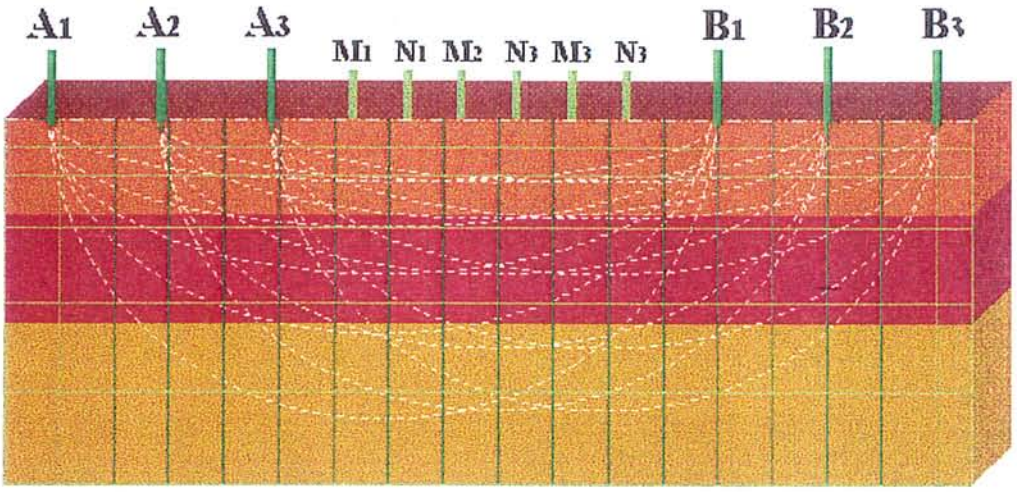


Figura Nº 4.3.1.c.- Dispositivo de medida para la tomografía eléctrica.

La realización de un perfil tomográfico supone la realización previa de unos taladros cortos para colocar los eléctrodos.

Para que este método sea económicamente rentable es importante optimizar la fase de adquisición de datos ya que la cantidad de medidas necesarias es muy elevada. Así es preciso utilizar una regla para posicionar con precisión los electrodos, y disponer de un equipo multicanales para realizar numerosas medidas de manera automatizada.

En la **Fotografía Nº 4.3.2.a** se muestra una regla y en la **Figura Nº 4.3.2.a** se presenta un ejemplo de perfil de resistividad obtenido por tomografía eléctrica para determinar espesores de hormigón proyectado, y sobreimpreso los espesores de hormigón medido sobre testigo, y la interpretación propuesta.

Como todo método geofísico existen ciertas limitaciones. La primera es que se necesita un contrate de resistividad entre el hormigón y el terreno. Además para optimizar el dispositivo es necesario saber aproximadamente el rango de espesor de hormigón. Por último la resistividad del hormigón puede variar mucho en función de su composición, estado y grado de humedad. Por estas razones es necesario para utilizar este método extraer previamente algunos testigos de hormigón y del terreno para medir sus propiedades eléctricas y así ver si el método puede ser utilizado y diseñar un dispositivo adecuado.

Fotografía Nº 4.3.2.a.- Regla utilizada para la realización de tomografía.

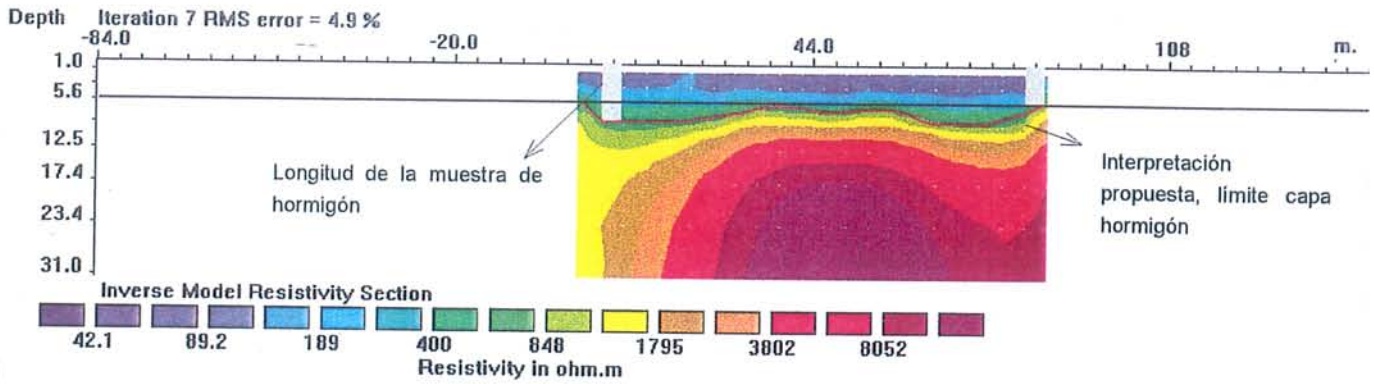


Figura Nº 4.3.2.a.- Sección de resistividad calculada mediante tomografía eléctrica.

4.4.- TÉCNICA POR IMPEDANCIA MECÁNICA

El método está basado en las propiedades de propagación, en un medio homogéneo, de una onda de velocidad "C".

Básicamente consiste en proporcionar un choque mecánico, sobre la superficie de hormigón, por medio de un mazo o martillo equipado con un sistema de medición de la fuerza proporcionada, es decir, de un captador de fuerza.

A su vez, a cierta distancia del punto de golpeo, se coloca un geófono o un acelerómetro, solidario con la superficie de contacto. Esta unión suele realizarse con algún producto adherente como por ejemplo el yeso.

Para determinar espesores de hormigón proyectado utilizando esta técnica, es necesario obtener la curva de vibración del hormigón. El principio de este ensayo para el cálculo de espesores se muestra en la **Figura Nº 4.4.a**.

Tras el golpe con el martillo sobre la placa de reparto, se produce una onda de reflexión entre el hormigón y la roca, siempre y cuando exista el suficiente contraste de impedancias entre ambos medios.

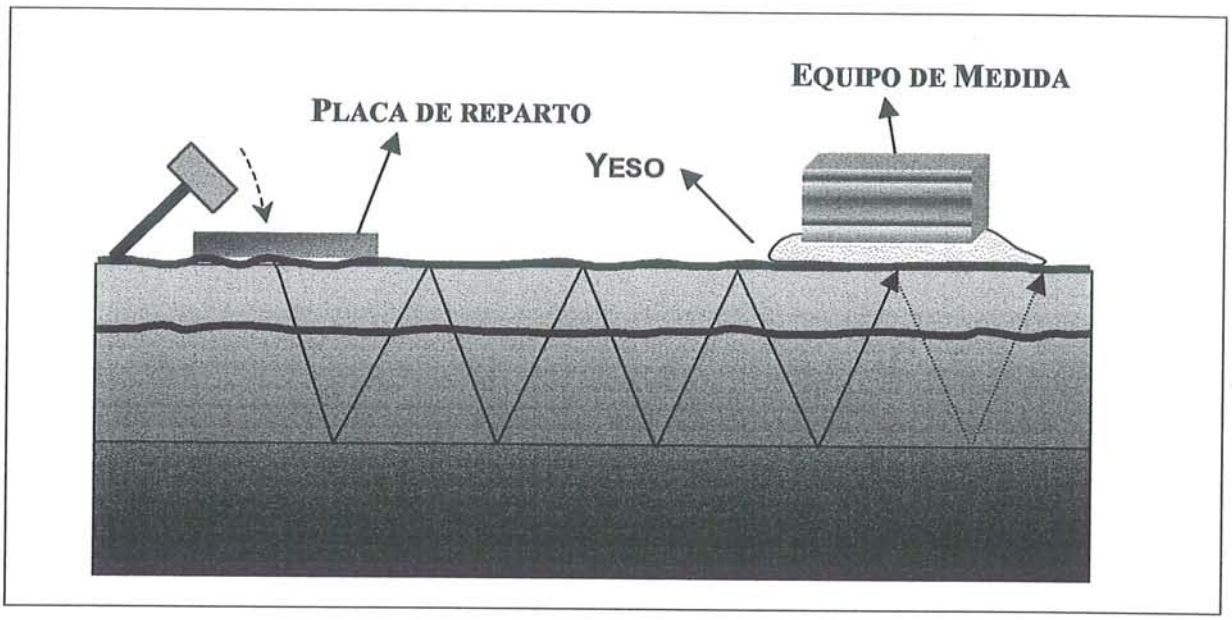


Figura 4.4.a.- Dispositivo necesario para la medida del espesor del hormigón.

En el equipo de medida se recoge la velocidad de desplazamiento debido a la vibración. Al producirse la reflexión, la onda viajará a la velocidad de transmisión del hormigón y su amplitud, como se puede apreciar en la Figura Nº 4.4.a, se corresponderá con el espesor de la capa de hormigón existente. En la **Figura Nº 4.4.b**, se representa gráficamente la onda recibida.

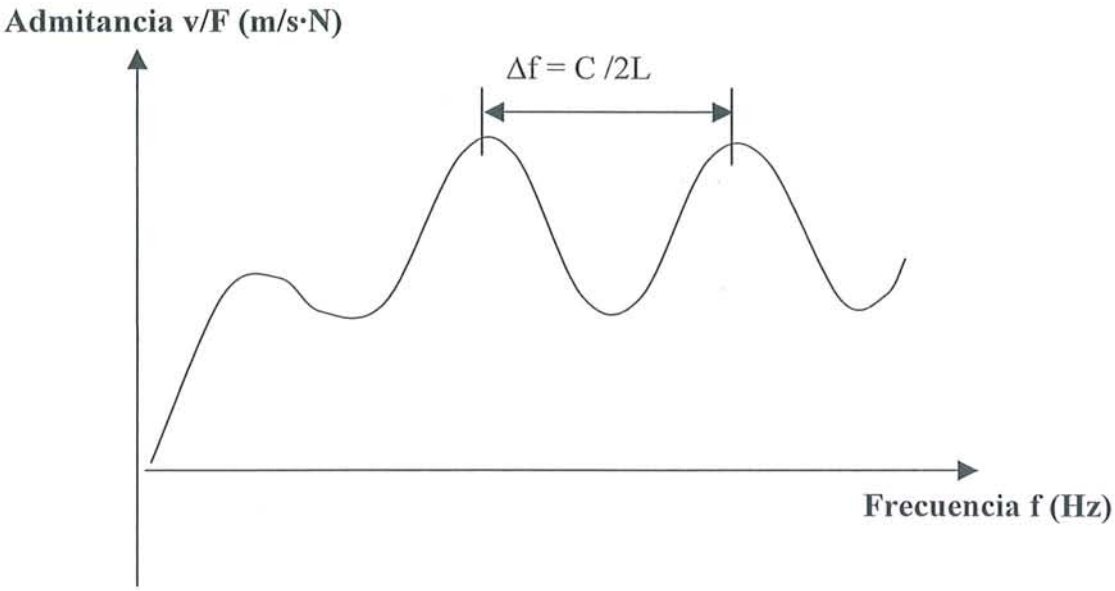


Figura Nº 4.4.b.- Respuesta frecuencial de una estructura de hormigón.

El cálculo de la distancia L al punto de reflexión de la onda en relación al punto de impacto se realiza analizando las señales después de haber escogido la velocidad "C" de las ondas planas en el hormigón (a falta de datos se suele tomar C =4000 m/s). Para el cálculo de los espesores de hormigón se puede aplicar la siguiente expresión:

$$L = \frac{0{,}5 \cdot C}{\Delta f}$$

Siendo:

C = La velocidad de las ondas en el hormigón en m/s (normalmente a falta de datos se toma C = 4000 m/s).

L = Distancia al punto de reflexión (espesor de hormigón) en m.

Δf= Intervalo de frecuencias, entre dos máximos o mínimos consecutivos, de la amplitud de la señal en el dominio de la frecuencia (Hz).

Los espesores esperados de hormigón oscilan entre los 5 cm y los 30 cm. Según la expresión anterior, si tomamos como velocidad de trasmisión de las ondas en el hormigón C = 4000 m·s-1 la diferencia de frecuencias entre dos máximos o mínimos consecutivos tendrá un valor que oscilará en torno a los 20 kHz.

Todavía no se llevaron a cabo pruebas satisfactorias con este método que, en teoría, solo puede proporcionar medidas puntuales del espesor de hormigón y de su rigidez pero con una operatividad muy grande.

4.5.- SÍNTESIS DE LAS CONDICIONES DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS GEOFÍSICAS

Como se ha comentado existen varias geofísicas que pueden ser utilizadas para la auscultación de túneles.

Cada método tiene sus ventajas y sus limitaciones que es preciso conocer para poder utilizar el método más adecuado en función del objetivo y de las condiciones del entorno. Para eso se presentan los **Cuadros Nº 5.a** y **Nº 5.b** donde se resumen las principales características, ventajas y limitaciones de cada método.

TECNICA	UTILIZACIÓN SEGÚN EL TERRENO			TIPO DE SOSTENIMIEN TO		
	SUELO	ROCA SANA	ROCA FRACTURADA	HP SIN FIBRAS	HP CON FIBRAS	HP + BULONES
GEORRADAR	Si	Si	Si	Si	No	Si
ULTRASONIDOS	No	Si	Comprobación previa sobre testigos	Si	Si	Si
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Cuadro Nº 5.a.- Posibilidades de utilización de las diferentes técnicas para medir espesores de hormigón proyectado (H.P.).

TECNICA	Operatividad del método	Necesidad de sacar muestras	Posibilidad de detectar zonas de HP dañado	Caracterización de grietas del H.P.	Posibilidad de caracterizar el estado del terreno
GEORRADAR	Alta	Si	Imposible	Media	Alta
ULTRASONIDOS	Media	Aconsejable	Alta	Alta	Imposible
TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA	Media	Si	Baja	Imposible	Baja

Cuadro Nº 5.b.- Adecuación de las diferentes técnicas para la auscultación de túneles.