UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA ESCUELA DE ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA



"Estudio en Estructuras de Hormigón Armado Mediante el Uso de un Radar de Penetración Terrestre"

Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero Electrónico

Profesor Patrocinante: Sr. Rodrigo Zamora Maric

Guisella Fabiola Gacitúa Lovera

VALDIVIA

2006

Comisión de Titulación

Sr. Rodrigo Zamora Maric Profesor Patrocinante

Sr. Franklin Castro Rojas Profesor Informante

> Sr. Raúl Urra Ríos Profesor Informante

A mis padres por su gran esfuerzo y apoyo a lo largo de toda mi formación.

Agradezco a todos los que me acompañaron, ayudaron y enseñaron o simplemente confiaron en mí. En especial al CECS, quienes otorgaron los fondos necesarios para poder realizar este proyecto, y al Laboratorio de Glaciología, Dr. Gino Casassa y Rodrigo Zamora.

Índice

Resumen	VI
Abstract	VII
1. Introducción	1
1.1. Introducción	
1.2. Objetivos	
1.2.1. Objetivos Generales	
1.2.2. Objetivos Específicos	
2. Fundamentos	4
2.1. Introducción	
2.2. Propiedades Eléctricas	
2.2.1. Permitividad Dieléctrica	
2.2.2. Permeabilidad Magnética	
2.3. Materiales Dieléctricos	
2.4. Propagación de la Onda	
2.5. Características de Propagación	
2.6. Velocidad de Propagación de la Onda	
2.7. Refracción y Reflexión de la Señal	
3. Sistema de Radar	19
3.1. Introducción	
3.2. Sistema GPR	
3.3. Antenas	
3.3.1. Direccionalidad de la Antena	
3.3.2. Ganancia de la Antena	
3.3.3. Antenas Monoestáticas y Biestáticas	
3.3.4. Polarización de la Antena	
3.4. Unidad de Control	
4. Instrumentación	27
4.1. Introducción	
4.2. Sistema de Adquisición de Datos SIR-3000	28
4.3. Configuración de Parámetros de Medición	
4.4. Selección de Antena	
4.5. Accesorios	30
4.5.1. Cables	31
452 Odómetro	31

5. Método de Medición	32
5.1. Introducción	32
5.2. Aspectos Prácticos de la Antena 5100	
5.3. Modo de Medición	
5.4. Tasa de Transmisión	34
5.5. Diseño del Trazado	35
5.6. Medición 3D	36
6. Procesamiento e Interpretación	38
6.1. Introducción	
6.2. Términos Asociados a Registros de GPR	
6.2.1. Traza	
6.2.2. <i>Samples</i>	
6.2.3. Radargrama	
6.2.4. Rango del Registro	41
6.2.5. Resolución Horizontal y Vertical	42
6.3. Aspectos Básicos de Procesamiento de los Datos	42
6.3.1. Identificación de Características del Radargrama	43
6.3.2. Coeficiente de Reflexión	44
6.3.3. Polaridad de la Señal	45
6.3.4. Hipérbolas de Difracción	45
6.4. Aplicación de Procesos	48
6.4.1. Corrección de la Superficie	49
6.4.2. Filtrado de la Onda Directa	
6.4.3. Migración	51
7. Uso del GPR en Hormigón	53
7.1. Introducción	53
7.2. Respuesta del Material a la Onda Electromagnética	53
7.3. Hormigón	55
7.4. Barras para Hormigón Armado	56
7.5. Evaluación en Estructuras de Hormigón	56
7.6. Aplicación de GPR en Hormigón	
8. Análisis de las Mediciones Efectuadas	62
8.1. Introducción	62
8.2. Método Utilizado	62
8.3. Resolución en Hormigón para la Antena 5100	63
8.4. Descripción de las Mediciones	
8.4.1. Clasificación de Hormigones Estudiados	
8.5. Análisis de Losa del Laboratorio de Glaciología	
8.6. Análisis de Mediciones sobre Pilares	
8.6.1. Perfiles en Dirección y	
8.6.2. Perfiles en Dirección x	
8.6.3. Resultado General	

8.6.4. Descripción de Resultados	78
8.7. Losa Edificio Martha Muse (Ex Hotel Schuster)	81
9. Resultados y Conclusiones	87
Bibliografía	89
A1. Fundamentos de Radiación Electromagnética	
A2. Especificaciones Técnicas y de Funcionamiento del Equipo de Medición	95
A2.1 Especificaciones Técnicas del SIR 3000 de GSSI	95
A2.2 Especificaciones Técnicas de la Antena 5100 de GSSI	96
A2.3 Antecedentes del Comportamiento de la Antena 5100	

RESUMEN

El paisaje urbano actual se basa principalmente en un componente común, el hormigón. Este tipo de construcciones y emplazamientos tienen una vida útil y su deterioro es un efecto inevitable del cual corresponde estar al tanto. Específicamente en las construcciones de hormigón armado, normalmente intervienen materiales de uso común, tales como el acero, el PVC y la madera. Por lo tanto, su identificación es también un objetivo importante en la evaluación del estado de la estructura.

La investigación en desarrollo tecnológico e informático ha permitido considerar procesos cada vez más efectivos que proporcionan seguridad y rapidez, además de desestimar el producir daño estructural en la obtención de una visión interna.

El Radar de Penetración Terrestre (*Ground Penetrating Radar*, GPR) es un término general para la técnica que utiliza ondas electromagnéticas de extremadamente altas frecuencias (*Ultra High Frequency*, UHF) orientadas a detectar las características interna de un determinado medio. Las aplicaciones de esta tecnología, así como su funcionamiento, están limitadas por las características propias del medio, y responde básicamente al principio de reflexión de la onda en las discontinuidades dieléctricas.

El presente estudio está orientado al uso del GPR como método de prospección no destructivo en estructuras de hormigón, permitiendo detectar la armadura de acero del hormigón armado así como tuberías de PVC u otros elementos, evaluando el estado en el que se encuentran, por ejemplo, deformaciones o fisuras internas.

ABSTRACT

The current urban landscape is based mainly in one common component, the concrete. This kind of buildings and facilities has a given lifetime and its damage is an inevitable effect which is necessary to be aware of. In buildings of reinforced concrete specifically, materials of common use like rebar, concrete, PVC and wool usually take part. Therefore their identification is also one major goal to the assessment in the state of the structure.

The research upon technology development and informatics has allowed considering increasingly effective processes which give higher giving security and speed. These processes do not cause structural damage to obtain an internal view; this is one of the most important characteristics to consider.

The Ground Penetrating Radar or GPR is a general term applied to the technology that uses UHF's electromagnetic waves oriented to detect the internal characteristics within one specific material. The applications of this technology as well as its performance, are limited by the material's features itself, and respond basically to the principle of wave's reflection into the dielectric discontinuities.

The present investigation aims to use GPR as a non-destructive exploration method, in concrete structures that allow detecting the rebars of structures concrete reinforced, as well as PVC pipelines or other buried objects, in order to assess their condition, for instance, deformations or internal cracks.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

La utilización de un radar de penetración terrestre (GPR, según su sigla en inglés), tiene como propósito la exploración y monitoreo bajo la superficie, permitiendo conocer la estructura interna sin intervención física. Este método ha sido ampliamente usado principalmente en Europa y Norte América en aplicaciones del tipo, geológicas, arqueológicas, glaciológicas, mineras, y de ingeniería, entre otras. Sin embargo, hasta el momento, es una tecnología muy poco conocida en Chile.

En materiales como hormigón armado existen técnicas convencionales de evaluación que incluyen el uso de rayos X y sondeo, o toma de muestras de material. GPR supera a éste tipo de métodos ampliamente en ventajas y beneficios, dadas las características propias del material asociado a una buena elección del equipo, que permiten obtener datos de alta resolución de forma rápida y segura. El avanzado desarrollo de este tipo de tecnología y de los softwares de procesamiento amplía cada vez más las aplicaciones, posibilidades de análisis y uso de los datos de radar. Una herramienta especialmente interesante de utilizar en este tipo de estructuras es el análisis de 3D, en el cual se puede de forma digital, reconstruir completamente la estructura metálica interna de un bloque radiado.

El presente trabajo de titulación corresponde al estudio de estructuras de hormigón armado. Para la evaluación en terreno del método se ha utilizado un GPR de alta frecuencia sobre superficies de diferentes condiciones, tales como losas, muros y pilares.

El desarrollo del estudio está constituido por tres etapas. Una primera fase de investigación teórica que permita establecer un marco conceptual sobre los principios de funcionamiento de esta tecnología. En la segunda fase se realizarán mediciones utilizando el equipo GPR disponible en el Laboratorio de Glaciología y Cambio Climático (LGCC) en el Centro de Estudios Científicos (CECS) y finalmente se desarrolló el procesamiento, análisis e interpretación de los resultados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

- Aplicar una técnica de validación en hormigón armado, no utilizada en Chile, permitiendo abrir un campo de investigación y control de calidad.
- Utilizar GPR en estructuras de hormigón armado, evaluando los resultados a través de dos Softwares, para realizar una comparación entre las ventajas que ambos otorguen.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar recopilación de datos y trabajos teóricos del comportamiento de las ondas electromagnéticas en hormigón armado.
- Identificar posibles aplicaciones y usos del sistema asociado al hormigón.
- Captura y procesamiento de datos utilizando el GPR SIR-3000 y los Software RADAN
 5.0 y REFLEX 4.
- Identificar las características de propagación de las ondas electromagnéticas y estimar la profundidad aproximada que se puede alcanzar en hormigón.

- Relacionar la velocidad y la frecuencia de los registros experimentales con algunas propiedades físicas de los medios: saturación, compactación y composición.
- Definir las dependencias del estudio con las características propias del equipo y las capacidades del mismo sobre este tipo de materiales.
- Concluir el estudio relacionando los resultados con las propiedades físicas y electromagnéticas de los materiales.

Capítulo 2

Fundamentos

2.1. Introducción

El radar funciona bajo el principio de la propagación de ondas electromagnéticas (anexo A1). En general, estas ondas se encuentran gobernadas, principalmente, por las características eléctricas del medio de propagación. En el caso de radares de penetración terrestre (GPR), éstas cobran mayor importancia por lo variable que pueden ser sus características. Estas variaciones, dentro de un medio de propagación, dan sentido al uso de GPR ya que indican cambios de material o presencia de objetos, que no pueden ser observados, al interior de un medio.

En este capítulo se entrega una aproximación teórica de las propiedades eléctricas más importantes que determinan el comportamiento de la onda electromagnética y en particular la trascendencia que éstas tienen, en estudios con GPR, en estructuras de hormigón. Además se analizan las características de propagación y eventos, como reflexión y refracción, que sufre la onda en su trayectoria.

Este análisis proporciona una referencia útil para la comprensión del comportamiento de las ondas de GPR que generan los registros a interpretar.

2.2. Propiedades Eléctricas

Las propiedades eléctricas de los materiales pueden ser descritas por la dependencia del valor de permitividad dieléctrica $\varepsilon(\omega)$, permeabilidad magnética $\mu(\omega)$, conductividad $\sigma(\omega)$, frecuencia ω ,

además de variables externas tales como, temperatura, presión, humedad, etc. Todos estos parámetros, pueden ser relacionados unos en términos de otros. Los tres primeros son propios del medio o material de propagación y determinan el comportamiento de la onda electromagnética en su interior. En estudios con GPR, las condiciones extrínsecas e intrínsecas del hormigón, permiten que estos parámetros cobren relevancia posibilitando aproximaciones con el resto de las propiedades.

2.2.1. Permitividad Dieléctrica

La permitividad dieléctrica absoluta es una constante de proporcionalidad entre la intensidad de campo eléctrico externo \vec{E} y el vector de desplazamiento eléctrico \vec{D} [10]. Ésta se define también, como el producto entre la permitividad relativa del material ε_r , (adimensional), y la permitividad dieléctrica del vacío, $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.

$$\varepsilon = \frac{\overline{E}}{\overline{D}} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \tag{2.1}$$

Permitividad dieléctrica relativa, ε_r , es la constante que indica la capacidad de polarización y que entrega un valor de la respuesta electroestática de un material, en presencia de un campo eléctrico externo.

La permitividad dieléctrica absoluta se compone de una parte real y una imaginaria, que se caracterizan por representar a las propiedades de refracción y absorción de la onda electromagnética en el material respectivamente. La componente real produce una corriente en fase respecto al campo eléctrico y la componente imaginaria provoca una corriente en desfase respecto a dicho a campo eléctrico.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \tag{2.2}$$

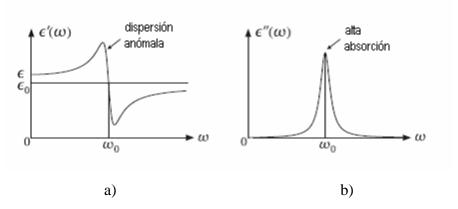


Fig. 2.1: a) Parte real $\varepsilon'(\omega)$, b) parte imaginaria de la permitividad dieléctrica absoluta $\varepsilon''(\omega)$.

La Figura 2.1 muestra la curva de $\varepsilon'(\omega)$ y de $\varepsilon''(\omega)$ alrededor de la frecuencia resonante ω_0 . En la figura a), $\varepsilon'(\omega)$ se comporta de manera anómala, es decir, se vuelve menor que la permitividad del vacío ε_0 , y el material exhibe una fuerte absorción.

La componente imaginaria considera los retardos en la respuesta a la polarización del material sometido a un campo electromagnético, es decir, indica el factor de pérdidas dieléctricas, denotado como ε_d ''(ω), que está relacionado con la respuesta frente a los fenómenos de relajación asociados con las moléculas de agua, también contiene el factor de pérdidas por conducción, definidas en función de σ_{dc} , que corresponde a la conducción estática y la pulsación del campo eléctrico ω .

$$\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_d''(\omega) + \frac{\sigma_{dc}}{\omega} \tag{2.3}$$

Por lo tanto, considerando las ecuaciones (2.2) y (2.3) se obtiene la siguiente expresión:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \left[\varepsilon''_d(\omega) + \frac{\sigma_{dc}}{\omega} \right]$$
 (2.4)

De la ecuación (2.4) se obtiene que para bajas frecuencias, aumenta la dependencia de la parte imaginaria en la permitividad y por ende de la conductividad, por el contrario a altas frecuencias, del orden de las utilizadas en estudios con GPR, disminuye esta dependencia.

En los materiales en que es viable utilizar radar de penetración terrestre, la permitividad dieléctrica es un factor determinante y su valor se encuentra dentro de un rango de 1 a 81, donde en el aire éste valor es mínimo y es máximo en el agua a 20° C.

2.2.2. Permeabilidad Magnética

La permeabilidad magnética μ , relaciona la inducción magnética (\overrightarrow{B}) con la intensidad de campo magnético (\overrightarrow{H}) [10]. Se mide en [Henry/m] y se define también como el producto de la permeabilidad magnética relativa del medio μ_r y la permeabilidad magnética del vacío μ_0 . (μ_0 =4 π x 10⁻⁷ [H/m])

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} = \mu_0 \mu_r \tag{2.5}$$

La permeabilidad magnética relativa del material, puede expresarse en función de la susceptibilidad magnética del material como, $\mu=1+\chi_m$. Donde la susceptibilidad magnética corresponde a la constante de proporcionalidad entre la imanación de un material \vec{M} y la intensidad de campo magnético externo \vec{H} .

$$\chi_m = \frac{\overline{M}}{\overline{H}} \tag{2.6}$$

La permeabilidad magnética relativa se compone de una parte real y una imaginaria que puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' \tag{2.7}$$

La parte real de la permeabilidad magnética relativa representa la energía magnética almacenada en el material, y se le denomina *permeabilidad magnética elástica*, mientras que la parte imaginaria indica la cantidad de pérdidas magnéticas debidas a corrientes parásitas y se denomina *permeabilidad magnética viscosa* [10].

2.2.3. Conductividad

La conductividad representa el movimiento de las partículas eléctricamente cargadas a través del medio. Este movimiento puede generar una corriente eléctrica, en respuesta a la aplicación de un campo eléctrico externo. La ley de Ohm describe la conductividad σ medida en [s/m] en función de la densidad de corriente \vec{J} (por área) debido a las cargas libres y el campo eléctrico \vec{E} . Este proporciona la medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica, es decir, el inverso a la resistividad del material.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{2.8}$$

La conductividad eléctrica $\sigma(\omega)$ puede ser expresada de forma compleja, como en la ecuación (2.9), donde σ ' indica la amplitud de la corriente en desfase con la intensidad de campo eléctrico externo y σ '' es la parte imaginaria, que indica la amplitud de la corriente en fase con respecto al campo eléctrico externo y considera el retardo en la respuesta de conducción que presenta el material en presencia de un campo eléctrico variable en el tiempo [10].

$$\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) - i\sigma''(\omega) \tag{2.9}$$

La componente imaginaria toma mayor importancia cuando los materiales contienen mayor cantidad de agua. Materiales porosos acumulan mayor cantidad de agua en su interior provocando un aumento en la conductividad influenciado por la naturaleza de los iones disueltos en el fluido, la temperatura y la geometría del medio en menor medida.

En general en los materiales en que se realizan estudios con radar de penetración terrestre pueden considerarse como aislantes debido a su baja conductividad, luego éste no es un parámetro relevante en los resultados [10].

2.3. Materiales Dieléctricos

Los dieléctricos son materiales eléctricamente neutros en que los electrones están ligados a los átomos o moléculas que lo forman [3]. De este modo, los electrones no pueden trasladarse libremente, por lo tanto, no crearán corriente de conducción convirtiéndose en materiales aislantes. El efecto de los campos eléctricos sobre estos materiales se limita a un pequeño desplazamiento de las cargas respecto a sus posiciones originales. Este efecto se conoce como polarización [10].

En general la permitividad compleja, ϵ , y la conductividad compleja, σ , puede ser expresada como:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{2.10}$$

y

$$\sigma = \sigma' - j\sigma'' \tag{2.11}$$

La naturaleza del parámetro ε' relaciona a la permitividad dieléctrica, la cual también puede ser expresada en términos de la permitividad relativa. El parámetro ε'' es relativo a las pérdidas asociadas a la conductividad y la frecuencia. Para propósitos prácticos a frecuencias superiores a 1GHz y conductividades inferiores a 0,1 sm⁻¹ el efecto de ε' será pequeño y puede ser despreciado.

Cuando son medidos sobre un dieléctrico conduciendo, los parámetros medidos son la permitividad aparente y la conductividad aparente:

$$\overline{\varepsilon} = \varepsilon_{e}^{\prime} - j\varepsilon_{e}^{\prime\prime} \tag{2.12}$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_e' - j\sigma_e'' \tag{2.13}$$

El comportamiento de un material puede ser especificado por su permitividad aparente o de manera equivalente, por su conductividad aparente [2],

$$\overline{\sigma} = j\omega\overline{\varepsilon} \tag{2.14}$$

La parte real de la permitividad dieléctrica y la parte imaginaria de la conductividad provocan una corriente en fase con el campo eléctrico. Estas corrientes producen una conductividad denominada *conductividad efectiva*, que corresponde al valor medido por el GPR [8].

La parte imaginaria de la permitividad dieléctrica y la parte real de la conductividad generan una corriente en desfase con el campo eléctrico, la cual, además del efecto de las cargas libres para altas frecuencias producen un retardo del campo eléctrico.

2.4. Propagación de la Onda

La propagación de un campo electromagnético E_0 originado a x = 0, t = 0 en un dieléctrico conduciendo puede ser descrito por E(x,t) a distancia x y tiempo t, [2] por:

$$E(x,t) = E_0 e^{-\alpha x} e^{j(\omega t - \beta x)}$$
(2.15)

La primera función exponencial es el término de atenuación y el segundo el de propagación.

De la primera función exponencial se ve que a la distancia $x = 1/\alpha$ la atenuación es 1/e. Esta distancia se conoce como la *profundidad superficial*, d, o profundidad de penetración, que indica, tal como lo dice su nombre, la profundidad de penetración de un sistema GPR. Sin embargo, hay una gran cantidad de otros factores que influyen en el alcance de profundidad de penetración

efectiva, así como en la fuerza de reflexión desde un blanco y el grado de eliminación de *clutter* que tiene el sistema. Estos pueden reducir el cálculo de profundidad y eventualmente deben ser considerados.

El movimiento de la energía electromagnética bajo la superficie está gobernado por la constante de propagación con la que viaja a través del medio. Esta constante de propagación básica de las ondas electromagnéticas en el espacio libre se define como:

$$\kappa_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \tag{2.16}$$

En un material distinto al vacío, la propagación electromagnética es compleja, debido al nivel de conductividad eléctrica a través del cual viaja [2]. Por lo que el cálculo de la constante de propagación está dada por:

$$k = \omega \sqrt{\mu(\varepsilon' + j\varepsilon'')} \tag{2.17}$$

El número de onda puede ser separado en una parte real y una imaginaria:

$$jk = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\mu \varepsilon' \left(1 + j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)}$$
 (2.18)

Donde α es el factor de atenuación y β es la constante de fase.

De esta forma α y β pueden ser expresados de la siguiente forma:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon'}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]$$
 (2.19)

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right]}$$
 (2.20)

El factor ϵ''/ϵ' es comúnmente llamado pérdidas tangentes presentes en el material. Las expresiones anteriores pueden ser modificadas para proveer la constante de atenuación α en dB m^{-1} y la velocidad de la onda, v, en ms^{-1} .

En las expresiones (2.19) y (2.20), la constante de atenuación de un material está linealmente relacionada (en dB m⁻¹) a la frecuencia. No es suficiente considerar sólo la conductividad de baja frecuencia σ_0 cuando se intenta determinar las pérdidas tangentes sobre el rango de frecuencia $1x10^7$ a $1x10^{10}$ Hz. En el caso de una material que está seco y tiene pérdidas relativamente menores, puede ser razonable considerar que $tan \delta$ es constante sobre el rango de frecuencia. Sin embargo, para materiales que contienen gran cantidad de agua, esta aproximación es inválida, debido a que la saturación de agua en un determinado material poroso permite la conducción interna que genera este tipo de pérdidas en mayor medida [2].

$$\tan \delta = \frac{\sigma' + \omega \varepsilon''}{\omega \varepsilon' - \sigma''} \tag{2.21}$$

Es importante considerar la magnitud de σ " y ϵ " intentando determinar el valor de $\tan \delta$. En general para materiales terrestres $\tan \delta$ es mayor a bajas frecuencias, siendo mínimo a $\sim 1 \times 10^8$ Hz, incrementando a un máximo a algunos GHz y permaneciendo constante después de esto. La exactitud en la determinación de la atenuación debe considerar todos los coeficientes, que comprenden la expresión de $\tan \delta$. Se debe hacer notar que la constante dieléctrica compleja, y por lo tanto, el factor de pérdidas de la tierra es afectado por ambos parámetros temperatura y contenido de agua. El efecto general del incremento de la temperatura es reducir la frecuencia de la relajación dieléctrica. A medida que incrementa el contenido de agua, aumenta proporcionalmente el factor de pérdidas, mientras que si la frecuencia se hace máxima el factor de pérdidas baja [2].

 $tan \delta = pérdidas por conductividad + pérdidas dipolar$

$$tan \ \delta = \frac{\sigma_{dc}}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} + \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$
 (2.22)

Una aproximación válida para la indicación de magnitud, es la siguiente cuando σ es pequeño

$$\tan \delta \approx \frac{\sigma'}{\omega \varepsilon'} \tag{2.23}$$

Para las condiciones a las que normalmente se realizan estudios sobre hormigón, utilizando un GPR y considerando un medio de propagación en estado seco, es común despreciar el término de pérdidas tangentes.

2.5. Características de Propagación

Una onda propagada en la dirección positiva del eje x en un dieléctrico perfecto puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$E(x) = E_0 e^{-jkx} \tag{2.24}$$

donde k es la constante de propagación [2],

$$k = \frac{\omega}{v} = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \ m^{-1}$$
 (2.25)

Esto describe el cambio en fase por unidad de longitud para cada componente de onda; esto puede ser considerado como una constante del medio para una frecuencia particular y es entonces conocida como el número de ondas. También puede ser referido como el factor de propagación para el medio.

La longitud de onda, λ se define como la distancia que recorre la onda propagada en un período de tiempo de oscilación:

$$k\lambda = 2\pi \tag{2.26}$$

Reordenando,

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v}{f} \tag{2.27}$$

La longitud de onda en un medio dado, λ , determina la resolución vertical del GPR y dependerá de la velocidad de fase, de la frecuencia de la onda transmitida e indirectamente de la constante dieléctrica efectiva del mismo.

La propagación de ondas electromagnéticas a través de un medio material experimenta pérdidas para ambos campos, eléctrico (E) y magnético (H), generando atenuación de la onda electromagnética original. Para muchos materiales de interés en radar de penetración terrestre, la respuesta magnética es débil y no necesita ser considerada como una cantidad compleja, al contrario de la permitividad y conductividad que sí representan un factor determinante en la propagación de la onda. En el caso de pérdidas en materiales dieléctricos, la absorción de la radiación electromagnética es causada por ambos efectos la conducción y el valor dieléctrico [10]. No es posible distinguir, midiendo a una simple frecuencia, los componentes de pérdida por separado para tales materiales.

2.6. Velocidad de Propagación de la Onda

La velocidad de la onda en un determinado medio puede obtenerse a través de la siguiente relación en función de la constante de fase β ,

$$\beta = \frac{\omega}{v} \tag{2.28}$$

Donde v es la velocidad de fase de la onda electromagnética, de esta forma se obtiene la parte real en la siguiente expresión, en función de las pérdidas tangentes descritas anteriormente (2.23):

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2 + 1}\right]}}$$
 (2.29)

Cuando los medios son dieléctricos o poco conductores, el término asociado con la conductividad es pequeño, considerando que las frecuencias habituales de trabajo están situadas aproximadamente entre los 10 MHz y los 1000 MHz, excepto en los medios que contienen materiales ferromagnéticos, se puede considerar que $\mu_r = 1$. Por lo que la ecuación (2.29) puede ser simplificada, quedando sólo en función de las propiedades dieléctricas del medio:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.30}$$

Dadas las condiciones de permeabilidad magnética y permitividad dieléctrica en el vacío, se obtiene el valor numérico de la velocidad de propagación de la luz:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 2,998 \times 10^8 \, m/s \tag{2.31}$$

Los valores de mínimo y máximo de permitividad dieléctrica en los distintos materiales existentes, corresponden al aire y agua con 1 y 81 respectivamente, en ellos se obtiene por lo tanto, la máxima y mínima velocidad de propagación de la onda electromagnética 0,3 m/ns y 0,03 m/ns, valores intermedios corresponden a la velocidad de propagación en el resto de los materiales.

2.7. Refracción y Reflexión de la Señal

Cuando la señal electromagnética que se envía a través de la antena GPR, encuentra una discontinuidad en las propiedades dieléctricas en el medio por el cual se propaga, una parte de esta señal es reflejada y otra refractada, la energía refractada continúa su trayecto y posiblemente parte de ella será también reflejada más tarde en alguna otra discontinuidad.

La amplitud de la onda que se recibe en la antena es también dependiente del porcentaje de energía que se ha reflejado en cada una de las discontinuidades del medio. Los coeficientes de reflexión y refracción son el porcentaje de energía reflejada y refractada respectivamente, respecto a la energía incidente en una superficie determinada, ambos son dependientes de las impedancias electromagnéticas de los campos incidente y refractado o incidente y reflejado, juntamente con los ángulos de incidencia y refracción.

En la estimación del nivel de la señal recibida es necesario considerar los coeficientes de reflexión y transmisión cuando la onda pasa a través del dieléctrico al objeto, como muestra la figura 2.2.

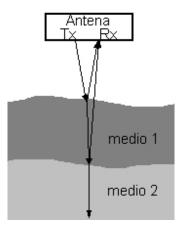


Fig. 2.2: Esquema del efecto de reflexión y refracción de la onda electromagnética incidente sobre medios de distintas características.

Para obtener este valor se necesita considerar la impedancia intrínseca de varios materiales, la cual es la relación entre los campos eléctrico E y magnético H.

$$\eta = \frac{E}{H} \tag{2.32}$$

Por lo que,

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\mu} \left(\varepsilon' \left(1 - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right) \right)^{-\frac{1}{2}}$$
 (2.33)

En el límite entre dos medios distintos, una parte de la energía será reflejado y el remanente transmitido. La intensidad del campo reflejado se describe por el coeficiente de reflexión, R:

$$R = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1 + \eta_2} \tag{2.34}$$

Donde η_1 y η_2 son las impedancias de los distintos medios 1 y 2, respectivamente.

Como se vio anteriormente en un medio no conductor, tal como suelos secos u hormigón seco, μ =1, cuando se considera solo una frecuencia simple de radiación, por lo que, la anterior expresión puede ser simplificada y reescrita sólo en función de las premitividades dieléctricas relativas a los medios [2], como:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r2}} - \sqrt{\varepsilon_{r1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r2}} + \sqrt{\varepsilon_{r1}}}$$
 (2.35)

El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales.

El coeficiente de reflexión tiene un valor positivo cuando $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1}$, por ejemplo, donde hay un espacio de aire dentro de un material dieléctrico como el hormigón. Por el contrario, si $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$, el coeficiente de reflexión será negativo, en este caso, el efecto sobre la forma de onda del impulso

es el cambio de fase de la onda reflejada, así los objetos con menor constante dieléctrica al medio principal muestran un cambio de fase en la señal recibida, con respecto a la señal original. Por otro lado, la amplitud de la señal reflejada es afectada por la propagación dieléctrica del material, las características geométricas del objeto y sus parámetros dieléctricos.

Capítulo 3

Sistema de Radar

3.1. Introducción

Un sistema de radar es un sistema electrónico que permite detectar objetos fuera del alcance de la vista y estimar la distancia a que se encuentran. Todos los sistemas de radar funcionan bajo un mismo principio, la propagación de la onda electromagnética. La palabra *radar* corresponde a las iniciales en ingles de "*radio detection and ranging*", lo que en español se conoce como Radio Detección y Rastreo.

Un radar utiliza un transmisor de radio de alta frecuencia que emite un haz de radiación electromagnética, con una radiación de longitud de onda comprendida entre algunos centímetros y cerca de 1m. Los objetos que se encuentran en la trayectoria del haz reflejan parte de las ondas emitidas y éstas son capturadas en un receptor de señales. Tal como se ha mencionado anteriormente, el radar basa su funcionamiento en las leyes de la reflexión de las ondas de radio, implícitas en las ecuaciones que controlan el comportamiento de las ondas electromagnéticas, planteadas por el físico británico James Clerk Maxwell en 1864. Estas leyes quedaron demostradas en 1886 a la vista de los experimentos del físico alemán Heinrich Hertz y continuados por Guglielmo Marconi quien posteriormente demostró la propagación de ondas electromagnéticas a grandes distancias y por primera vez le dio utilidad como método de comunicación en 1895.

El *Radar de penetración terrestre* o GPR es el tipo de radar que normalmente se utiliza en medios terrestres o materiales sólidos. La primera descripción del uso para ubicación de objetos

enterrados apareció en 1910 con patente Alemana. Sus autores, Leimbach y Löwy, describieron una técnica alternativa, que usa un par de antenas (transmisora y receptora) montadas sobre una determinada superficie, para detectar la reflexión desde una interfase subterránea debido a agua o algún otro depósito [2]. Una extensión de esta técnica llevó a determinar la profundidad de la interfase, a través de un estudio de la interferencia entre la onda reflejada y la señal original. La principal característica de este trabajo es el uso de efectos de difracción o apantallamiento debido a las características subterráneas y a las variaciones producidas por dispersión (*scattering*).

El trabajo de investigación desarrollado por Hülsembeck en 1926 parece ser el primer uso de las técnicas de pulso para determinar las estructuras subterráneas. El notó que algunas variaciones dieléctricas, no necesariamente involucrando conductividad, podrían también producir reflexiones [8].

A partir de los años 30 esta técnica fue usada y desarrollada para determinar profundidades de hielo, agua, depósitos de sal, desiertos y formación de rocas. Podría considerarse que desde la década del 70 hasta el presente esta técnica ha sido mejorada y el rango de aplicaciones se ha expandido considerablemente a áreas tales como glaciológica, geológica arqueológica, minera, civiles, etc.

3.2. Sistema GPR

Los equipos de radar están compuestos básicamente por una antena transmisora, antena receptora y un controlador. El transmisor emite un haz de ondas electromagnéticas a través de una antena que las concentra en un haz coherente que apunta en la dirección deseada. Cuando las ondas chocan con un objeto que se encuentra en la trayectoria del haz, algunas se reflejan y forman una señal de eco. La antena capta la energía contenida en dicha señal y la envía al receptor. Mediante un proceso de amplificación y tratamiento informático, el receptor del radar genera una señal en algún dispositivo de visualización, al que se haya conectado.

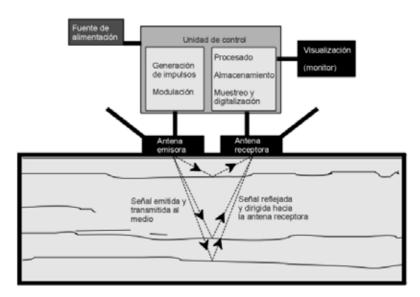


Fig. 3.1: Esquema de componentes de un sistema GPR.

El tipo de radar utilizado está sujeto a las características y propósitos de la medición. En cualquier caso el transmisor emite una gran cantidad de energía hacia una cierta dirección. De ella es posible recibir, detectar y cuantificar una mínima fracción de toda la energía devuelta en forma de eco en el receptor.

3.3. Antenas

La antena transmisora es el equipo transductor que transforma los pulsos eléctricos provenientes de la unidad central en impulsos electromagnéticos. La antena receptora es la que capta la onda electromagnética y la transforma en pulsos eléctricos que son enviados a la unidad central que los procesa como información.

La generación de los impulsos que serán transmitidos está a cargo del modulador de impulsos, dispositivo que se encarga de extraer continuamente corriente de una fuente de potencia, para alimentar el magnetrón del transmisor con impulsos del voltaje, potencia, duración e intervalo precisos. El impulso debe comenzar y finalizar de manera abrupta, pero la potencia y el voltaje no deben variar de forma apreciable durante el impulso [8].

Existen distintos tipos de antenas según el tipo de aplicación en el que se trabaje, por ejemplo, antenas isotrópicas, es decir, que radian energía en todas direcciones, y antenas direccionales. Es necesario que las antenas utilizadas en estudios con GPR sean muy directivas.

3.3.1. Direccionalidad de la Antena

La direccionalidad o directividad de una antena se define como el cociente entre la densidad de potencia que se tiene a una cierta distancia de la antena direccional emisora y la densidad de potencia que se tendría en ese mismo punto si la antena emisora fuese isotrópica y radiase la misma cantidad de potencia [10]. La direccionalidad es un factor importante en los estudios con GPR, porque un haz de emisión estrecho permite concentrar la mayor cantidad de energía hacia el interior del subsuelo, que es el área de interés, de este modo se disminuye la relación señal/ruido. La disminución del ruido se produce porque al emitir la energía sólo al interior del medio de estudio se evitan las reflexiones en objetos externos. Por este motivo es necesario el uso de antenas direccionales y apantalladas.

En un sistema GPR, la antena genera un haz aproximadamente cónico y de sección elíptica. La dirección de desplazamiento de la antena suele corresponder con la del semi eje mayor de su huella (área elíptica de incidencia en la superficie reflectora). La mayor parte de la energía radiada queda comprendida dentro de la zona definida por el ángulo de radiación, que varía según la antena, entre 45° y 90°, en la dirección de desplazamiento de la antena [6].

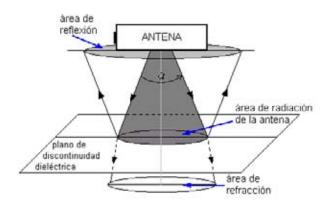


Fig. 3.2: Esquema simplificado de radiación de la antena transmisora, con ángulo de radiación α.

Las antenas se conectan a la unidad de control mediante un cable que puede ser metálico u óptico. El cable óptico es más favorable cuando se utilizan bajas frecuencias para rangos mayores de tiempo doble de propagación (menores a 100 MHz) [10], ya que los metálicos generan corrientes parásitas que quedan registradas en la recepción como ruido electrónico de fondo, sin embargo, éste es relativamente intrascendente a frecuencias del orden de GHz, como las utilizadas en el presente estudio.

3.3.2. Ganancia de la Antena

La ganancia de la antena es un parámetro que determina la efectividad de una antena, definido como el cociente entre la máxima potencia radiada por unidad de ángulo sólido y la potencia total que distribuye en todo el espacio [10]. Esto equivale a considerar el cociente entre la potencia por unidad de ángulo sólido que emite la antena y la potencia por unidad de ángulo sólido que emite una antena isotrópica radiando la misma potencia.

La ganancia de una antena y su direccionalidad, en la misma dirección del espacio, están relacionadas por un parámetro que relaciona la potencia que es entregada a la antena y la que es radiada por ésta. Este parámetro representado en la ecuación (3.1) con η_{ef} se define como la magnitud de la eficiencia de la antena y permite estimar las pérdidas de potencia que tienen lugar en su interior.

$$\eta_{ef} = \frac{G}{D} \tag{3.1}$$

Donde G es el factor de ganancia y D el factor de direccionalidad. Estos representan la cantidad de potencia de salida de la antena y la cantidad de potencia que es entregada a la antena respectivamente. En antenas reales, por efecto de las pérdidas internas, el factor de ganancia es algo menor que el de direccionalidad.

Las antenas quedan determinadas por la frecuencia del pulso que emite al radiar, ya que la longitud de onda de la energía radiada dependerá de las características del medio por el que se

propaga. Normalmente en los radares de penetración terrestre el ancho de banda es aproximadamente igual al valor de la frecuencia central.

El ancho de banda de la antena determina la duración del pulso, a mayor ancho de banda menor duración del pulso emitido y mejor resolución del registro. La frecuencia central de la antena depende del dipolo de la antena, este parámetro limita el rango y resolución del radar. Las emisiones a bajas frecuencias se atenúan en menor medida que las altas frecuencias, es por esta razón que una antena de baja frecuencia central tiene mayor alcance de profundidad de penetración de la señal.

3.3.3. Antenas Monoestáticas y Biestáticas

La diferencia principal entre una antena biestática y una antena monoestática es que se refiere a dos antenas o a una antena, respectivamente. Las antenas biestáticas corresponden a dos módulos separados, una antena emisora y otra receptora. Con este tipo de antenas se puede variar fácilmente la distancia entre emisor y receptor para realizar mediciones del tipo CMP (*Common Mid Point*), técnica utilizada en el cálculo de velocidad de propagación de la onda en el medio, entre otras.

Las antenas monoestáticas se refieren a un sistema que contiene la antena transmisora y receptora de la energía. Dentro de las antenas monoestáticas existen las de conmutación y las que poseen dos dipolos. Las de conmutación tienen una única espira que actúa como emisora, que emite un impulso de energía durante un lapso de 0,1 a 5 microsegundos, durante el cual transmisor y receptor quedan aislados por el conmutador, a continuación la espira actúa como receptora de la señal, permaneciendo en silencio durante unas centésimas o milésimas de microsegundo[10]. En las antenas de dos dipolos uno de ellos actúa como emisor y el otro como receptor de la señal siendo separados por una distancia fija dentro de la carcasa que los contiene. Las antenas monoestáticas son utilizadas en estudios de tramos cortos y a altas frecuencias, siendo especialmente útiles en estudios de características similares a las del hormigón, por su mayor capacidad de captura de datos y eficiencia.

3.3.4. Polarización de la Antena

Los campos electromagnéticos son polarizados, esto significa que el campo eléctrico es un vector que apunta en una dirección particular. Generalmente el campo magnético es perpendicular al campo eléctrico y la dirección de propagación es, a su vez, perpendicular a la dirección de ambos campos. Muchos sistemas de GPR comerciales usan sus antenas linealmente polarizadas. El arreglo de antena más común tiene los campos eléctricos de la antena transmisora y receptora alineados en paralelo uno a otro, paralelo a la superficie y con dirección de desplazamiento perpendicular a la dirección del campo eléctrico, ver figura 3.3.

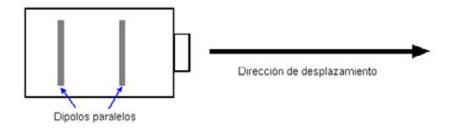


Fig. 3.3: Esquema de una antena GPR monoestática de dipolos paralelos.

Esto resulta en una onda propagada perpendicularmente a la superficie y hacia su interior. Si un arreglo es llevado por sobre un objeto enterrado, tal como una barra metálica, con los campos alineados en paralelo a la longitud de la barra, éste aparece en el registro del radar como un excelente reflector, con forma hiperbólica. Si la antena es rotada en 90° los dipolos cruzarán la barra con la dirección del campo eléctrico en ángulo recto a la longitud del eje de la barra y no es posible visualizarla. El campo eléctrico alineado en paralelo es también una excelente polarización para medir capas de material. Si el arreglo es reconfigurado con una antena con el campo eléctrico perpendicular a otro (cross-polarizadas), éstas se vuelven insensibles a las capas y más sensibles a los elementos dispersores (*scatterers*) como barras, independiente de su alineación con la antena. En general, se puede usar tres configuraciones de medición según la orientación de las antenas (relativo a los campos eléctricos), paralelo a la superficie de la tierra: dipolos paralelos uno a otro y perpendicular a la dirección de desplazamiento, dipolos paralelos uno a otro y paralelos a la dirección desplazamiento también y dipolos perpendiculares entre sí [8].

3.4. Unidad de Control

La unidad de control, consiste básicamente en una consola electrónica que funciona a través de un procesador central, que es manejada por un teclado de funciones básicas y controlada a través de una pantalla. La o las antenas se conectan a esta unidad de control a través de cables metálicos u ópticos.

Este es un sistema especialmente desarrollado para enviar pulsos electromagnéticos de potencia sumamente baja y ultra ancho de banda (UWB) dentro de un determinado material. La señal es recibida en la antena receptora, midiendo el tiempo que tarda en ser reflejada desde las discontinuidades dieléctricas del medio, para luego almacenar los datos.

La emisión de los pulsos es coordinada desde aquí hacia la antena mediante un reloj interno. Cada uno de estos pulsos activa el o los dipolos de la antena para emitir la señal a la frecuencia central que corresponde al modelo de antena utilizado. Mientras no se emiten pulsos, el sistema continúa recibiendo las reflexiones provenientes de los distintos reflectores del medio.

Capítulo 4

Instrumentación

4.1. Introducción

Cuando se planifica realizar mediciones con algún tipo de radar, tanto el equipo empleado como el método dependen de los objetivos de la medición y de las condiciones en las cuales se desarrolla el proceso. El factor determinante para la elección del equipo es la eficiencia en la colección de datos, que está condicionada por las características propias del material.

El equipo utilizado en el estudio de estructuras ha sido el *Subsurface Interface Radar* SIR 3000 de *Geophysical Survey System Inc.* (GSSI), diseñado para la investigación del subsuelo. Este equipo de medición se encuentra disponible en el Laboratorio de Glaciología del Centro de Estudios Científicos (Valdivia) para el estudio de estratigrafía interna de neviza y detección de grietas como función principal. Las distintas aplicaciones en que puede ser utilizado este equipo dependen principalmente de la frecuencia central de la antena que se conecte al módulo de medición (ver anexo A2).

El objetivo del presente estudio está centrado en la prospección en estructuras de hormigón. Este es un material que presenta características muy específicas que definen las necesidades del equipo de medición. En primer lugar el espesor de cualquier estructura de hormigón no supera los 60 cm., por lo tanto, no es necesario un gran alcance de profundidad del equipo de medición, por el contrario, es muy importante la alta resolución de los datos obtenidos. Estas características permiten discriminar el tipo de antena necesaria.

4.2. Sistema de Adquisición de Datos SIR-3000

La empresa GSSI desarrolla y fabrica sistemas de radar de penetración terrestre (GPR) orientados al estudio de interfases bajo la superficie. El SIR-3000, es especialmente útil para prospección bajo superficies tales como estructuras de hormigón.



Fig. 4.1: Sistema de adquisición de datos SIR-3000.

El SIR-3000 tiene una pantalla a color donde es posible controlar la configuración, ingresando los datos a través de un teclado básico para la selección de las funciones, y luego visualizar los registros a medida que estos son recibidos en la antena.

Dentro del menú de selección existen 6 opciones de medición, para distintas condiciones: TerraSIRch, Concrete Scan, Structure Scan, Utility Scan, Geology Scan y Quick 3D. En este estudio, sobre estructuras de hormigón, se han utilizado el módulo TerraSIRch para hacer las pruebas de medición y principalmente el módulo Quick 3D, con el cual es posible generar, mediante procesamiento de los datos, reconstrucción gráfica de planos internos a la estructura estudiada, en cualquiera de los planos x, y o z bajo el área de la superficie trazada.

4.3. Configuración de Parámetros de Medición

Los parámetros de medición definen las características que tendrán los registros del radar. Dentro de los más importantes se encuentra la frecuencia central y la tasa de transmisión, ambos dependen exclusivamente de la antena.

El modo de medición es un parámetro que indica como se recolectarán los datos, existen 3 posibilidades de configuración:

- Point: el radar captura una única traza por cada vez que se activa el radar, este modo es
 útil en terrenos o materiales que no tienen una superficie plana que facilite el
 desplazamiento de la antena, es decir, para realizar mediciones localizadas o bien, para
 técnicas de medición CMP (Common Mid Point) o CDP (Common Depth Point).
- *Distance*: aquí es necesario conectar un odómetro a la antena, que indique al sistema, que está siendo desplazada sobre la superficie, así el radar sólo captura información de puntos adyacentes en una línea de desplazamiento.
- *Time*: El modo *time* permite capturar trazas de forma constante en el tiempo.

Los Parámetros acerca del tamaño que tendrán los registros incluyen la cantidad de puntos digitales con los que será reconstruida cada traza, el formato del registro en bits (8 o 16 bits). El rango del registro en nanosegundos define la máxima longitud que tendrá el registro en el eje vertical, limitando el tiempo máximo de reflexión de las señales recibidas.

4.4. Selección de Antena

Las antenas son fundamentales dentro del sistema de radar. Son los elementos que emiten la señal y la reciben luego de reflectarse en medios con diferencia en sus valores dieléctricos.

Según el tipo de material y las condiciones a las cuales se realizaron las mediciones para este estudio, la antena disponible en el laboratorio de radares de glaciología, más apropiada para este estudio es la antena modelo 5100, de GSSI, con frecuencia central aproximada 1,6 GHz. Esta

antena proporciona gran resolución de los registros, ya que la resolución es un parámetro que depende de la longitud de onda de la señal transmitida.



Fig. 4.2: Antena Modelo 5100 acoplada a un odómetro y conectada al SIR-3000.

La antena 5100 fue desarrollada por GSSI para aplicaciones tales como las que se realizan en hormigones. Esta es una clase de antena apantallada y direccional lo que le permite tener un haz de emisión bastante estrecho. Esta característica es importante en estudios de GPR porque permite obtener datos más puros, ya que al tener un haz de emisión más enfocado, la antena receptora guarda las reflexiones provocadas de un área más específica bajo su trayectoria, evitando las reflexiones provenientes de interfases adyacentes que se transforman en ruido.

4.5. Accesorios

Adicionalmente al equipo y la antena es necesario el uso de accesorios indispensables como cables y otros opcionales para el mejoramiento de la medición y de la interpretación de los resultados. Entre los accesorios opcionales al equipo de medición se encuentra el uso de un odómetro, GPS, carro de desplazamiento o brazo metálico para la extensión de la antena. Dependiendo del tipo y características en las que la medición se realice, son necesarios otros elementos, tales como cámara fotográfica, huincha de medir, marcadores (tiza) para realizar una grilla en caso de ser necesario, etc.

4.5.1. Cables

La antena se conecta a la unidad de control a través de cable metálico u óptico. El uso del tipo de cable depende de la frecuencia que se use y tiene por objetivo favorecer la calidad de recepción de la señal. El cable metálico genera corrientes parásitas que interfieren la señal de recepción y son registradas como parte del radargrama en forma de ruido termal [10]. Este es un tipo de ruido electrónico dependiente de la frecuencia, que en el receptor, limita la sensibilidad del radar. Para las frecuencias sobre 1 GHz, como las utilizadas en este estudio, este tipo de ruido no es determinante y puede usarse un cable metálico sin sufrir mayor distorsión de los datos.

4.5.2. Odómetro

Para dar mayor exactitud a las mediciones realizadas sobre hormigón es posible conectar un odómetro a la antena, cuando el radar ha sido configurado en modo *distance*, esto permite generar registros de radar de longitud horizontal exacta. Es decir, el radar captura información solo mientras la antena es desplazada sobre la superficie. Este es una herramienta indispensable si se quiere realizar análisis de 3 dimensiones, debido a que el procesamiento de los datos requiere que todos los perfiles medidos en una dirección tengan igual tamaño.

Capítulo 5

Método de Medición

5.1. Introducción

El método de medición depende de los objetivos de la investigación, del material sobre el cual se llevará a cabo y del equipo del que se disponga. Para el desarrollo de este trabajo, el objetivo está orientado al uso de GPR sobre estructuras de hormigón, por lo tanto, los datos no superan una profundidad de 60 cm. y a su vez, requieren de mayor resolución y exactitud en la ubicación de blancos.

Antes de comenzar a registrar datos de radar se debe tomar una serie de decisiones relacionadas a la configuración del equipo (SIR-3000) y a las condiciones en que se trabajará en terreno, tales como el diseño del trazado, que depende del modo de medición, las características de la estructura o superficie, y también del equipo disponible para la investigación.

5.2. Aspectos Prácticos de la Antena 5100

La prospección en estructuras de hormigón requiere de una buena resolución por sobre la profundidad de penetración de la onda, es decir, una antena de alta frecuencia. El modelo 5100 de GSSI ha sido creado especialmente para estas características. El diseño de esta antena permite ser ubicada muy próxima a la superficie con un ángulo de radiación bastante estrecho de entre 60° – 90° [6], que permite mayor direccionalidad y menor pérdida de la energía. El ángulo de radiación es limitado por el valor de la constante dieléctrica del material radiado, en este caso, para el hormigón, dada su permitividad dieléctrica de entre 7 - 12 (en estado seco), el ángulo de radiación es cercano a los 60° , debido a que hay un alto contraste dieléctrico entre el aire (ϵ = 1) y

el hormigón, por lo tanto, un ángulo de radiación más abierto (mayor a 60°), es posible de encontrar en materiales con permitividad cercana a la del aire.

Para obtener resultados óptimos la antena debe estar sobre la superficie dentro de un décimo de longitud de onda [6]. Considerando que la longitud de onda para la antena 5100 en hormigón es aproximadamente de 20 cm. (ver anexo A2), se obtiene que la distancia óptima de la antena sobre la superficie, es aproximadamente de 2 cm. Espacios de aire superiores entre la antena y la superficie perjudican la transmisión de la energía, produciendo pérdidas y disminuyendo la calidad de los resultados.

Cuando se detectan objetos metálicos ubicados de forma lineal, como barras o cañerías paralelas bajo la superficie, la orientación de la antena toma importancia debido a la ubicación de los dipolos dentro de la antena, siendo predominantemente sensibles a los objetos metálicos que están paralelos a ellos, es decir, transversales a la línea de desplazamiento. Por el contrario, cuando el objetivo es el estudio de espesores o la ubicación de objetos que no son metálicos como por ejemplo, cañerías de PVC, fisuras u otros, es conveniente desplazar la antena con los dipolos perpendiculares a la dirección de estos, debido a que la antena se hace más sensible a identificarlos.

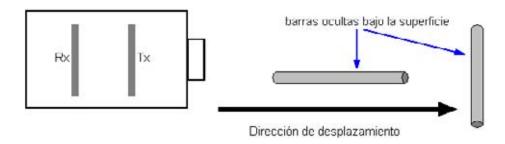


Fig. 5.1: Vista superior de la antena 5100 sobre la superficie con dirección de desplazamiento en x.

La alta frecuencia de la antena 5100 y las características del hormigón son favorables para realizar mediciones de análisis 3D. Para ello es necesario utilizar un odómetro conectado a la antena que permita obtener datos con alta precisión, es decir, datos con una longitud horizontal

exacta y eventualmente una serie de datos correspondientes a trazos paralelos de igual tamaño. En este caso se debe trazar una grilla sobre la superficie que se desea hacer la medición, esta grilla debe tener ciertas características y además el radar debe ser configurado según estas condiciones.

5.3. Modo de Medición

El modo en que se realiza la medición depende del objetivo del estudio. El sistema SIR-3000 tiene 3 opciones de modo de medición: *point, time* y *distance*; El modo *distance* es la mejor opción en estudios de hormigón u otros en que el recorrido horizontal de los perfiles es corto y se necesita precisión en la distancia recorrida por la antena. En este modo de captura, la antena es acoplada a un odómetro que se desplaza sobre la superficie, con el cual el radar solo capturará señal cuando el odómetro indique una distancia recorrida, registrando con exactitud la longitud recorrida por la antena. Este modo es necesario para realizar estudios de 3D, debido a que el tamaño del conjunto de perfiles paralelos en una dirección, debe ser igual para el ensamble del archivo.

5.4. Tasa de Transmisión

Este parámetro se configura en el radar antes de realizar la medición, donde se define la tasa de transmisión de la antena como la habilidad en la colección de datos. Este parámetro depende de la capacidad de la antena y la 5100 puede ser fijada a la más alta transmisión disponible en el SIR-3000 de 100 KHz [7].

Debido a la alta velocidad de propagación el radar no captura cada traza que ha sido reflejada a partir de un impulso emitido, sino que realiza un muestreo de una cierta cantidad de trazas con el cual se reconstruye una única traza.

5.5. Diseño del Trazado

El diseño del trazado es también dependiente del objetivo de la investigación, si lo que se desea es medir a lo largo de grandes extensiones, por ejemplo para medir espesor, puede ser suficiente con una o dos líneas de trazado paralelo, sin embargo, si lo que se desea es ubicar objetos con alta precisión, como en el caso de los estudios sobre estructuras de hormigón armado, se hace necesario el análisis de 3D. Este tipo de análisis implica el diseño de una grilla para realizar el trazado de líneas paralelas de igual longitud en dirección x e igual longitud en dirección y, además de una separación constante entre ellas. Esto permite generar una serie de perfiles paralelos que juntos e interpolados representan la estructura bajo la superficie en que se ha desplazado la antena, con medidas x, y, z; donde z es la profundidad que está limitada por las características de la antena y del medio.



Fig. 5.2: Grilla de 65 x 140 cm. con separación de 10 cm. entre líneas paralelas, dibujada sobre un pilar de hormigón armado sobre el cual se desplazará la antena.

Según la grilla trazada sobre la superficie se debe configurar el radar en modo *Quick3D* para las dimensiones correspondientes. Esto permite obtener un conjunto de datos en dirección x y otro en dirección y. Mediante procesamiento de los datos, posteriormente es posible reconstruir el volumen correspondiente a la extensión en profundidad de la superficie trazada, e identificar los objetos que generen reflexión producto del dieléctrico.

5.6. Medición 3D

Previo a las mediciones es necesario conocer las características del material sobre el cual se ejecutará la investigación. Dentro de las características se incluye el tiempo que ha transcurrido del fraguado del hormigón, condiciones ambientales a las que ha sido expuesto, componentes y medidas físicas que ayuden en la identificación del área involucrada. Es también útil información técnica adicional tales como planos y fotografías.

El módulo de medición 3D permite simular en la pantalla del controlador la grilla preparada para la medición. Para ello es necesario ingresar los parámetros que corresponden a distancia en dirección x, distancia en dirección y, además de la separación entre líneas paralelas. La antena es desplazada sobre cada una de las líneas trazadas, en una determinada dirección, tal como se indica en la pantalla, intentando seguir con la mayor precisión, el archivo es finalizado automáticamente cuando se obtiene la cantidad de trazas correspondientes a la distancia a la cual se configuró el radar. El archivo actual es guardado al comenzar un nuevo archivo.



Fig. 5.3: Antena 5100 acoplada a un odómetro, desplazada sobre las líneas trazadas en dirección y.

Luego de obtener el conjunto de datos, estos son almacenados en la memoria del equipo y es posible acceder a ellos a través de cualquiera de sus puertos disponibles (anexo A2). Una vez recuperados los datos, se procede al correspondiente procesamiento en cualquier software que sirva para este propósito.

Capítulo 6

Procesamiento e Interpretación

6.1. Introducción

La interpretación de los datos es una de las etapas más importantes dentro del análisis de los resultados obtenidos mediante el uso de un GPR, un correcto procesamiento de datos mejora la calidad de las imágenes obtenidas, siendo posible aclarar detalles a veces imperceptibles, para esto es necesario contar con un software adecuado que permita tratar los registros. En algunos casos, la interpretación de datos puede hacerse directamente en la consola del radar sin necesidad de procesarlos pero, dependiendo de los objetivos del estudio, muchas veces es preciso aplicar algún tipo de filtro o conversión que simplifique la visualización de él o los posibles blancos. Para elegir la herramienta adecuada para el procesamiento e interpretación de datos es necesario conocer los conceptos asociados a los datos GPR. Este capítulo resume los principales conceptos y herramientas utilizadas para la interpretación en el transcurso de este estudio.

6.2. Términos Asociados a Registros de GPR

6.2.1. Traza

En los sistemas GPR se usa el efecto avalancha del transistor para generar un impulso de corta duración similar a un monociclo. La traza o *scan* es la forma de onda que capta la antena receptora producto de la reflexión y es una combinación compleja de una forma de onda sinusoidal con reflexiones múltiples provenientes de las discontinuidades dieléctricas del medio [14]. La resolución horizontal del registro depende de la cantidad de trazas por unidad, sea de tiempo o distancia. Esto depende del modo en que se haya configurado el radar, trazas por

segundo significa la cantidad de trazas que se reciben por cada segundo y trazas por unidad de distancia es el modo que se usa cuando el radar es conectado a un odómetro, en el cual la antena receptora sólo capturará señales cuando éste indique que la antena se ha desplazado una cierta distancia.

6.2.2. *Samples*

La nitidez o resolución vertical del registro depende de la cantidad de puntos de muestreo o *samples* con los que se reconstruye una traza, ésta se asocia a la capacidad del sistema de radar. En el caso del SIR-3000 se puede seleccionar entre 256, 512, 1024, 2048, 4096 o 8192 *samples per scan*.

6.2.3. Radargrama

Una serie de trazas paralelas es representada como un radargrama y corresponde al registro de radar que contiene la información que se almacena a lo largo de una medición, en una imagen en dos dimensiones. El formato del registro y características tales como, alcance de profundidad y resolución, dependen del tipo de sistema y de la configuración de parámetros con el que se ha realizado la medición.

El número de trazas de un perfil está determinado por la velocidad de registro del radar, la cantidad de pulsos emitidos por la antena, la velocidad de desplazamiento de la antena y la distancia que haya sido desplazada la antena.

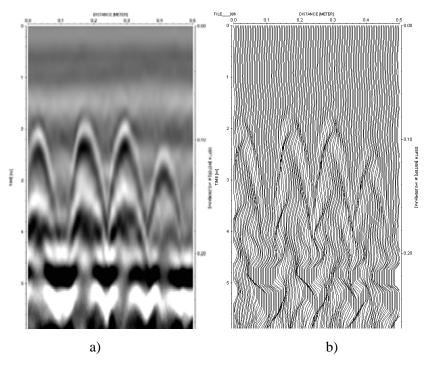


Fig. 6.1: Radargrama obtenido de un muro de hormigón armado. a) Visualización en modo punto a partir de una escala de colores grises. b) Representación de trazas paralelas, modo *wiggle*.

Un registro puede ser representado gráficamente en modo *wiggle* o en modo punto, el modo *wiggle* muestra la forma de onda de cada traza apilada en dirección horizontal. El modo punto asigna un determinado color a cada punto de la traza según su amplitud correspondiente.

En el radargrama es posible encontrar las características que definen el subsuelo estudiado, como se ha visto anteriormente, éstas corresponden a las reflexiones de la onda electromagnética producto de las discontinuidades en las propiedades dieléctricas del medio. Estas discontinuidades, conocidas como dispersiones o *scattering* son registradas en el radargrama y serán más evidentes a mayor contraste dieléctrico. El *scattering* tiene una forma hiperbólica más clara cuando la discontinuidad es abrupta y producida por un objeto de menor tamaño con respecto al medio estudiado.

El tamaño de un radargrama, así como su resolución, está determinado en el eje x, por la cantidad de trazas que lo constituyen y en el eje y, por el rango del registro.

6.2.4. Rango del Registro

El rango del registro está limitado por las propiedades eléctricas del medio de propagación, la frecuencia central de la antena y la configuración de la medición en el radar. Cuando se utiliza GPR con altas frecuencias, se considera importante solo la propiedad de permitividad dieléctrica relativa al medio, esta define la capacidad de polarización del medio, por lo que, a mayor valor de permitividad, mayor será la dificultad de propagación de la onda, limitando su alcance en profundidad [2].

La frecuencia de la antena es inversamente proporcional al alcance de profundidad y directamente proporcional a la resolución de los registros. De esta forma, una antena de alta frecuencia limita la profundidad de penetración de la onda. Esta información debe ser conocida antes de la configuración del modo de medición del GPR, en el cual se debe ingresar el rango máximo necesario para registrar el objetivo.

El rango de profundidad está medido como el tiempo doble de propagación de la onda, es decir, el tiempo de ida desde que es transmitida la señal más el tiempo de vuelta hasta el receptor desde que es reflejada producto de alguna interfase dieléctrica. Una conversión apropiada de este tiempo entrega la información de la profundidad a la que se encuentra el límite entre los materiales que han provocado la reflexión. La profundidad puede ser calculada por la ecuación (6.1), donde d es la profundidad, v la velocidad de propagación de la onda y tt el doble tiempo de viaje de la señal.

$$d = \frac{v \cdot tt}{2} \tag{6.1}$$

Uniendo las ecuaciones (2.30) y (6.1) se obtiene una expresión para la profundidad en función de la permitividad dieléctrica del medio de propagación:

$$d = \frac{tt \cdot c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{6.2}$$

En ambos caso, la estimación de la profundidad es una simple aproximación teórica, ya que se asume que la velocidad de propagación v es constante a través de todo el medio.

6.2.5. Resolución Horizontal y Vertical

La resolución está controlada por la longitud de onda y la polarización de la energía electromagnética, el contraste en las propiedades electromagnéticas, la geometría del objeto u orientación; además la presencia de ruido es un factor determinante en la resolución y claridad de los registros. La resolución aumenta proporcionalmente a la frecuencia (disminución de la longitud de onda), pero disminuye la profundidad de alcance de penetración de la onda. En algunos materiales en estado seco la resolución es aproximadamente constante con la profundidad [10], sin embargo, en la mayoría de los materiales la resolución es inversamente proporcional al incremento de la profundidad.

Objetos que generen alto contraste dieléctrico con el hormigón tales como, barras, tuberías o cables, deben estar orientados en la misma dirección que la polarización del campo eléctrico para óptima detección. Para objetos paralelos a la superficie, tales como capas estratigráficas o capas de agua, la resolución es una función del alineamiento geométrico y angular, del espesor de las capas y la rugosidad de la superficie [10].

6.3. Aspectos Básicos de Procesamiento de los Datos

Los resultados de mediciones de radar son almacenados en una memoria interna y luego traspasados a un computador para su procesamiento. Algunas veces esta etapa no es necesaria, sin embargo, en estudios de hormigón generalmente es importante debido a que se necesita exactitud en la interpretación de los datos y en algunos casos debe analizarse cada perfil en detalle, antes de obtener una aproximación de los resultados.

En caso de realizar procesamiento de los datos es necesario utilizar un software adecuado para esto. En el Laboratorio de Glaciología, existen dos opciones disponibles, ambos son programas

especializados para este tipo de estudios, RADAN 5.0 desarrollado por GSSI (USA) y REFLEX desarrollado por *Sandmeier Scientific Software*, (Germany).

6.3.1. Identificación de Características del Radargrama

Cada tipo de material condiciona la propagación de la onda, dadas sus características físicas tales como saturación (contenido de agua) y compactación (contenido de aire), así como también las características geológicas y de composición propia. Esto es debido a que la onda electromagnética se mueve a través del medio con una velocidad determinada que es limitada por el valor dieléctrico del medio de propagación. Estos parámetros, velocidad y dieléctrico, están relacionados de forma inversa, es decir, a mayor valor dieléctrico menor velocidad de la onda electromagnética.

La utilización de radar es favorable para medios con bajo valor de constante dieléctrica, considerando la dependencia a la elevación del valor dieléctrico, que provoca el contenido de agua en un determinado material, GPR es un método efectivo en materiales en estado seco, incluyendo materiales como el hormigón, en ellos es posible detectar fácilmente algún objeto metálico o cualquier otro que provoque una interfase dieléctrica con el medio en que se encuentre.

La reflexión de la onda electromagnética se produce en el límite entre dos tipos de material con distinto valor dieléctrico (Fig. 2.2), donde la velocidad de la onda cambia produciendo la refracción de una parte de la señal, la reflexión de otra parte y eventualmente la señal experimenta el proceso de dispersión.

La fuerza con la que la señal es reflejada es proporcional al contraste dieléctrico, éstas reflexiones pueden observarse dentro del registro, donde el programa de procesamiento asigna un color a cada píxel según la amplitud de cada traza a lo largo de cada punto, Figura 6.1 a). A mayor magnitud del contraste dieléctrico mayor será la amplitud de la señal reflejada.

Cada traza comienza con la "onda aérea" también llamada "onda directa", esta es la onda que pasa directamente de transmisor a receptor sin ser reflejada en ningún obstáculo. Posteriormente se recibe la primera reflexión proveniente de la superficie. Si la antena está muy cerca de la

superficie, la onda aérea normalmente ocultará a la onda superficial, debido a que la primera no es producto de una reflexión y por lo tanto, tiene mayor amplitud. A continuación se reciben las reflexiones producidas al interior del medio de prospección.

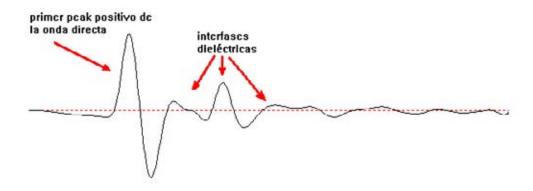


Fig. 6.2: Forma típica de una traza recibida producto de las discontinuidades del medio de propagación.

La cantidad de puntos por traza o *samples/scan* indica la cantidad de puntos digitales a lo largo del eje de tiempo, con los cuales se reconstruye una traza. Este es un valor importante, porque determina la resolución vertical de la imagen reconstruida.

6.3.2. Coeficiente de Reflexión

La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los medios que están en contacto. En estudios con GPR dadas las altas frecuencias de operación estas expresiones se simplifican y puede considerarse ángulos de incidencia y de reflexión normal (0°). De la cual se obtiene la ecuación (6.3) determinando la reflexión de la señal sólo en función de las permitividades dieléctricas relativas a los medios [10].

La polaridad con la que se recibe la señal entrega también información importante acerca del objeto bajo la superficie que provoca una reflexión. Cuando la antena emite un impulso, este tiene cierta polaridad, que puede ser positiva o negativa, la señal reflejada puede conservar o no la polarización del impulso original, esto depende de la diferencia entre el valor dieléctrico de los

materiales. El parámetro R indica la polaridad y amplitud de la reflexión, éste se conoce como coeficiente de reflexión.

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \tag{6.3}$$

Donde ε_1 es la permitividad dieléctrica relativa al 1° medio y ε_2 es la permitividad dieléctrica relativa al 2° medio.

La magnitud del factor de reflexión *R* está relacionada directamente con la amplitud de la reflexión de la onda recibida, es decir, la claridad con que se ve la hipérbola en el radargrama.

6.3.3. Polaridad de la Señal

Según el fabricante, cada antena tiene características propias, una de éstas es la polaridad de la señal transmitida, es decir, cada impulso emitido puede tener un primer peak positivo seguido de un peak negativo o inversamente. Al ser reflejada la energía en alguna interfase dieléctrica, está puede sufrir un cambio de fase. Este cambio de fase está indicado según la ecuación (6.3) por el signo resultante del coeficiente *R*.

Esto significa que si la permitividad del medio 2 es mayor al valor de la permitividad del medio 1, el factor de reflexión R, es positivo, manteniendo la polaridad de la señal original. Por el contrario, si el valor de la permitividad del medio 2 es menor a la permitividad del medio 1, el factor de reflexión, resulta negativo, lo que significa que se invirtió la polaridad de la señal original.

6.3.4. Hipérbolas de Difracción

Cuando la antena es desplazada sobre una superficie de forma transversal a los objetos que se encuentran dentro de un determinado medio, y que generan una discontinuidad dieléctrica,

aparecen como hipérbolas en el radargrama. El radar recibe, a través de la antena receptora, las señales producto de las reflexiones internas del subsuelo, cada una de estas señales o trazas registradas, entrega información de cada punto por el que fue desplazado el radar. Al unir estas trazas en un solo archivo se obtiene un perfil del subsuelo de cierta longitud que contiene hipérbolas como indicador de un cambio brusco en las propiedades eléctricas entre dos materiales. Cuya representación matemática está dada por la siguiente ecuación:

$$t^{2}(x) = t^{2}(x_{0}) + 4\frac{x^{2}}{v_{m}^{2}}$$
 (6.4)

Donde t(x) es la coordenada temporal de la hipérbola en ns, x es la coordenada horizontal, correspondiente a la distancia (m) de cada uno de los puntos de la hipérbola, x_0 la coordenada horizontal del vértice de la hipérbola y v_m es la velocidad media de propagación de la onda en el medio en cual ha sido reflejada por un objeto reflector que ha generado la hipérbola [2].

La forma hiperbólica es registrada durante el desplazamiento de la antena sobre la superficie (Fig. 6.3), es decir, cuando la antena se aproxima de un extremo a otro, a lo largo de una línea de desplazamiento, y detecta un blanco bajo la superficie. Hasta antes de pasar la antena por sobre el objeto se forma un lado de la hipérbola que muestra como disminuye la distancia entre la antena y el objeto, el ápice de la hipérbola representa la posición del blanco y luego cuando la antena se aleja forma el otro lado de la hipérbola indicando el aumento de la distancia entre la antena y el objeto. Este efecto es producido por el tiempo que tarda la onda antes de ser reflejada desde el blanco hasta la antena receptora.

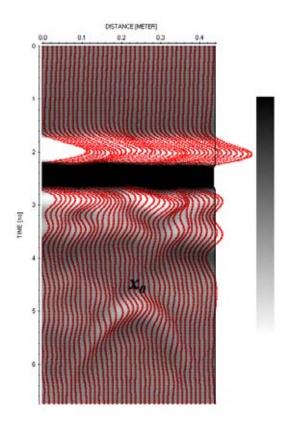


Fig. 6.3: Radargrama en escala de grises, con tonos claros para amplitudes positivas y tonos oscuros para amplitudes negativas. Sobre el radargrama se han marcado con color rojo las trazas que muestran la amplitud en cada punto.

La Figura 6.3, muestra un típico radargrama en escala de grises, de un objeto detectado a cierta profundidad dentro de una estructura de hormigón, donde además se ha ingresado la opción de ver la traza correspondiente a la posición en dirección x. En ellas se puede distinguir claramente la onda aérea, onda superficial y más abajo en el centro la reflexión producida por un objeto aislado. Esta figura muestra como se forma el radargrama al asignar un determinado color, dentro de una escala de colores, proporcional a la amplitud de la traza en cada punto.

La onda aérea contiene gran parte de la energía porque es la señal recibida directamente de transmisor a receptor sin sufrir pérdida de reflexión, por lo tanto, se puede ver que para el primer peak positivo el radargrama asigna el color blanco y al primer peak negativo de la traza se ha

asignado el color negro. Otras amplitudes contenidas dentro de este rango variaran en grises de forma proporcional.

La forma de la hipérbola está en función de la velocidad de desplazamiento de la antena sobre la superficie, del valor dieléctrico y del valor de scan/unit asignado en la configuración del radar previo a la medición. El radar emite señales de forma constante en el tiempo, por lo tanto, a menor velocidad de desplazamiento, más ancha será la forma gráfica de la hipérbola, porque se obtiene mayor cantidad de trazas de un mismo punto en la dirección de desplazamiento. Mientras que un alto valor de ε_r minimiza la velocidad de propagación de la onda electromagnética y más enfocado será el haz de radiación dentro del medio, limitando el ancho de la hipérbola. Por otra parte, el scan/unit es el parámetro que ajusta la resolución horizontal del registro, una mayor cantidad de trazas por unidad implica mayor información contenida en la unidad que se haya configurado el radar (tiempo o distancia), por lo tanto, hay más posibilidades de detectar hipérbolas correspondientes a objeto pequeño.

6.4. Aplicación de Procesos

La interpretación de un registro incluye desde la identificación de blancos, cálculo de profundidad, determinación de la velocidad de propagación y realización de una reproducción gráfica que represente las condiciones del medio que han sido registradas por el radar. Aquí se presentan algunos de los procesamientos más comunes, necesarios en la interpretación de registros.

En el análisis de datos de radar obtenidos para el estudio de estructuras de hormigón, requiere de filtros sirvan en la determinación, con la mayor exactitud posible, de las características de las discontinuidades detectadas, tales como la superficie o profundidad a la que se encuentra un determinado objeto.

6.4.1. Corrección de la Superficie

Cuando se obtiene un radargrama, este tiene un rango que no corresponde al rango real del registro, la verdadera posición de la superficie a lo largo del eje de tiempo no está al inicio del registro, debido a características inherentes de la generación de señal electromagnética, la transmisión y recepción de las antenas, y variaciones de las propiedades eléctrica del material [14]. Por lo tanto, se debe identificar el origen (*zero*) del registro, es decir, la verdadera posición de la superficie en el eje de tiempo. Este es uno de los procesos más comunes que se debe realizar a un perfil en el análisis para la determinación de resultados como profundidad o distancia.

La corrección estática actúa sobre las diferencias de tiempo entre trazas a lo largo del eje x, para obtener la topografía real dentro del perfil. Este es un proceso que permite reconstruir la topografía de la superficie trazada cuando el terreno tiene distintas alturas. En el caso de superficies de hormigón, éstas son normalmente planas por lo que la corrección estática actúa de forma constante en x

$$t_n' = t_n - t_{zero} \tag{6.5}$$

De esta forma, el filtro actúa sobre cada traza independientemente cortando las trazas en un determinado punto del eje de tiempo.

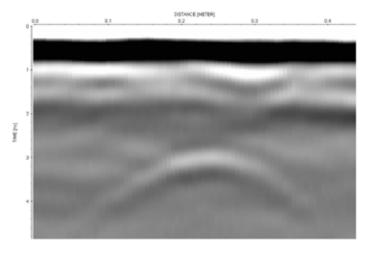


Fig. 6.4: Radargrama de la figura 6.3, al que se ha aplicado un filtro static correction a 1,89 ns.

La elección de este punto sobre la traza es importante, porque de él depende la posterior determinación de profundidades y debe ser seleccionado basado en la geometría de la medición y realizando pruebas en terreno ya que varía para cada antena.

La onda superficial entrega información acerca de la ubicación exacta de la superficie dentro del radargrama, pero cuando no es posible identificarla a simple vista se hace necesaria la aplicación de un filtro especial que despeje la onda superficial del registro.

6.4.2. Filtrado de la Onda Directa

La recepción de la señal reflejada contiene información de las discontinuidades de los medios de propagación. Esto significa que la traza recibida se compone en primer lugar de una fuerte reflexión conocida como la onda directa producto de la recepción de la energía que pasa de transmisor a receptor antes de ser reflejada, cuando la antena ha sido desplazada muy cerca de la superficie, ésta normalmente oculta a la reflexión de la interfase aire-superficie convirtiéndose en *clutter* o ruido indeseado. Dadas estas condiciones se hace necesaria la utilización de un filtro que elimine la onda aérea.

El *Background Removal* permite eliminar este efecto, básicamente consiste en la estimación de un promedio de la señal de fondo por medio de filtros 2D y luego la substracción de ésta de la imagen original. Después de que el *clutter* es removido el píxel genérico es:

$$A'(x, y) = A(x, y) - \hat{B}(x, y)$$
 (6.6)

Donde $\hat{B}(x,y)$ indica ruido de fondo estimado, esto es, aplicando operaciones específicas (característicos de cada filtro) por medio de una ventana deslizante 2D, sobre los píxeles colectados [1].

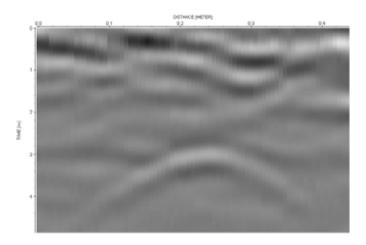


Fig. 6.5: Imagen de la figura 6.4 en que se ha aplicado un filtro background removal.

Luego de la aplicación de este filtro se puede ver detalles del registro correspondientes a la cercanía de la superficie, antes ocultos tras la fuerte reflexión de la onda aérea.

Esta imagen de radar ha sido tomada sobre un muro de hormigón que tiene un recubrimiento de estuco con textura, por lo tanto, las manchas más oscuras entre los 0 y 1 ns son pequeños espacios de aire que generan reflexión.

6.4.3. Migración

La forma de la hipérbola está en función del medio dieléctrico, por lo tanto, la velocidad de propagación, puede ser estimada por técnicas de escalada geométrica que involucra "migración" de datos del GPR [2]. Este efecto hiperbólico es producido por el ancho del haz de emisión de la antena, ésta es información útil al determinar la verdadera posición de un reflector, que se ubica sobre el ápice de la hipérbola. Sin embargo, este efecto puede resultar en ruido indeseado dentro del registro cuando impide la identificación de otros reflectores.

La migración de datos es un proceso que permite borrar el efecto de las hipérbolas trasladando las reflexiones producidas desde el objeto a su posición real e intensificándolo. Este proceso de enfocar la energía en un punto es similar al obtenido mediante radar de apertura sintética [2]. Existen varias técnicas de migración, en la figura 6.6, se ha utilizado la Migración de Diferencias Finitas (FD), disponible bajo la opción de procesamiento dentro del software REFLEX.

La migración FD se realiza sobre un perfil de 2 dimensiones, basado en una distribución de velocidad 2D. El perfil debe representar un así llamado perfil de *zero-offset*, es decir, mínima separación entre transmisor y receptor al momento de la medición. El objetivo de la migración es regresar la energía de reflexión a su "fuente" [11].

La migración FD actúa basada en la ecuación de onda escalar y requiere de un ajuste interactivo sobre el perfil de hipérbolas de reflexión o también llamado adaptación de velocidad [2], que consiste en hacer coincidir el tamaño de hipérbolas de distintas velocidades, sobre las hipérbolas del perfil, de esta forma se obtiene una aproximación de la velocidad de propagación de la onda.

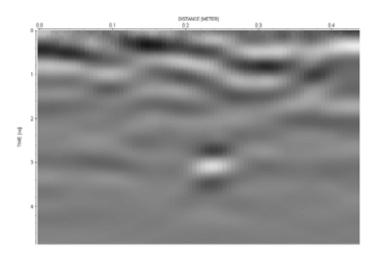


Fig. 6.6: Aplicación de migración FD sobre el perfil de la imagen 6.5.

Luego de aplicar migración y eliminar el efecto hiperbólico provocado por las barras puede verse el área circular correspondiente a la barra metálica.

La aplicación de otros filtros o procesos depende estrictamente del tipo de medición y de las características de los resultados. Normalmente es necesario eliminar el ruido de fondo o acentuar algunos aspectos del radargrama aplicando ganancia o aumentando el contraste del perfil.

Capítulo 7

Uso del GPR en Hormigón

7.1. Introducción

Las características propias del hormigón permiten que sea un excelente medio de propagación para la onda electromagnética, estas condiciones pueden variar según los componentes y entorno en el cual se realice la medición. El contenido de agua es uno de los principales desestabilizadores del valor dieléctrico del material.

Basado en antecedentes de estudios de laboratorio, recogidos de referencias bibliográficas, se describen los aspectos principales de la propagación electromagnética en el hormigón. Además se muestran datos de mediciones en estructuras de hormigón armado, analizando algunos de los primeros resultados del SIR-3000 a 1,6 GHz.

7.2. Respuesta del Material a la Onda Electromagnética

Muchas de las investigaciones realizadas acerca de las propiedades dieléctricas de los materiales terrestres han mostrado, experimentalmente, que para muchos materiales terrestres de no grandes profundidades, en este caso tomados a una profundidad de 100 m o menos, la atenuación de la radiación electromagnética aumenta proporcionalmente a la frecuencia, y que dada una frecuencia los materiales húmedos producen mayores pérdidas que los materiales secos [2]. Estas generalidades se cumplen para todo tipo de materiales, con las cuales se puede hacer una serie de predicciones sobre el comportamiento de un sistema de radar de penetración terrestre. Es necesario conocerlas antes del estudio práctico, para comprender las características del material el cual afecta a ambos la velocidad de propagación y la atenuación.

La velocidad de propagación está principalmente gobernada por la permitividad relativa de un material que a su vez depende, en muchos casos, de su contenido de agua. A bajas frecuencias de microondas, incluyendo el rango en el cual operan los sistemas GPR, el agua tiene una permitividad relativa de \sim 81, mientras que los componentes de muchos materiales de suelos y materiales creados por el hombre tienen, en estado seco, una constante dieléctrica relativa ϵ_r en el rango de 2 a 12 [2]. Los valores medidos de ϵ_r para suelos y materiales de construcción quedan principalmente en el rango de 4 a 40. La permitividad absoluta también varía con la frecuencia, pero es generalmente constante para la mayoría de los materiales sobre el rango de frecuencias utilizado para trabajos con GPR.

Los modelos físicos usados para predecir la propagación de ondas electromagnéticas en materiales dieléctricos tienen dos fuentes principales: la teoría de onda electromagnética y óptica geométrica. Este último método, es solo relevante cuando la longitud de onda de la radiación electromagnética utilizada es más corta que las dimensiones del objeto o medio radiado y cuando los materiales involucrados pueden ser considerados como aisladores eléctricos, es decir, para materiales secos. Los materiales que contienen cantidades apreciables de humedad, se comportarán como conductores dieléctricos, especialmente si el agua contiene iones. Las aguas conservadas naturalmente, tienen un grado de conducción iónica y actúa como electrólitos acuosos [2].

La variabilidad de los parámetros del material y las condiciones geológicas en que se encuentre son las causas de mayor dificultad para la exactitud en la predicción del comportamiento de la propagación. Este punto puede ser notado cuando se evalúa utilizando los métodos predictivos, por medio de una aproximación teórica, en cual, puede describirse una situación pero ésta podría resultar no adecuada si se busca precisión. Sin embargo, esta aproximación resulta muy útil como información preliminar acerca de una determinada medición.

Material	Permitividad ϵ_r	Conductividad σ_r (S/m)	
Aire	1	0	
Asfalto seco	2 - 4	10 ⁻² – 10 ⁻¹	
Asfalto húmedo	6 - 12	10 ⁻³ – 10 ⁻¹	
PVC	3	-	
Hormigón seco	1-10	10 ⁻³ – 10 ⁻²	
Hormigón húmedo	10-20	10 ⁻² – 10 ⁻¹	
Tuberías metálicas	1	100000	
Agua	81	10 ⁻⁶ – 10 ⁻²	

Tabla 7.1: Rango típico de características dieléctricas de algunos materiales medidos a 100 MHz [2].

Aunque todos los radares de ultra-ancho de banda transmiten energía sobre al menos un octavo de la banda de frecuencia [2] es posible hacer una estimación de magnitud de su comportamiento basado en la frecuencia central de operación.

7.3. Hormigón

El hormigón es un material compuesto, formado por la adición de agua a una mezcla de dos elementos básicos: cemento y agregados (arena y áridos), a los cuales eventualmente se agrega un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo, al unirlos y revolver la mezcla se introduce de manera simultánea un cuarto componente, el aire. La alta permitividad dieléctrica del agua contrastada con la mínima permeabilidad dieléctrica del aire, pueden hacer variar de manera importante el valor dieléctrico de la mezcla resultante.

Esta mezcla de componentes del hormigón convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad, pero gradualmente disminuye su contenido de agua perdiendo esta característica, hasta que transcurridas unas horas se hace rígida y adquiere el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el hormigón endurecido.

7.4. Barras para Hormigón Armado

Para reforzar el hormigón en construcciones comunes como puentes y edificios en general, se utilizan barras de acero. Las barras típicas para estructuras de hormigón son las denominadas con "resaltes" y varían en diámetro según su resistencia.



Fig. 7.1: Barras de acero con "resaltes", de diferentes diámetros, en la preparación de una losa de hormigón armado.

7.5. Evaluación en Estructuras de Hormigón

La evaluación de estructuras de hormigón ha sido de particular importancia en el uso de GPR, muchos trabajos han establecido las propiedades eléctricas de hormigones, especialmente a altas frecuencias. Tales técnicas han sido usadas para estudiar cambios en las características eléctricas de pegamentos de cementos y hormigones durante el estado inicial y subsiguiente al proceso de endurecimiento.

La hidratación es el efecto del agua sobre el cemento en la mezcla, produciendo una matriz de hidratos de varios componentes, referido colectivamente como pegamento de cemento, el cual sujeta los componentes junto a la forma dura del hormigón. El pegamento de cemento contiene un gran número de huecos interconectados, poros capilares, los cuales son remanentes de espacios llenos de agua presentes en el pegamento de cemento.

Después de realizar la mezcla, gran cantidad de agua es absorbida dentro de la mezcla, que es usado para el proceso de hidratación de los componentes. El agua también es perdida en los poros cuando fragua el hormigón. Esto ocurre por evaporación a una razón que depende de la cantidad de agua, razón de cemento del hormigón, su edad, el tipo de tratamiento al cual ha sido sometida la pieza, entre otros factores incluyendo el tamaño de la pieza y condiciones medioambientales.

Estudios de laboratorio en hormigones frescos muestran valores de resistividad en incremento con el tiempo, consiguiendo estabilidad después de aproximadamente 28 días, determinando el rol dominante en el pegamento de cemento, de las características eléctricas del hormigón [2]. La resistividad eléctrica de los agregados típicos, usados en hormigón, son de orden mayor que el hormigón. Por consiguiente la mayor parte del flujo de corriente circula a través del pegamento (la ruta de menor resistencia). En un modelo eléctrico simplificado, el hormigón puede ser considerado como un compuesto de partículas no conductoras en una matriz de pegamento conductor.

Así, la conductividad eléctrica del pegamento depende de los cambios que experimenta en la solidificación (evaporación de agua). Estos cambios están estrechamente ligados unos a otros. La composición y estructura de la fase sólida dependen de la cantidad de agua, ambos absorbidos y químicamente combinados dentro de la mezcla de cemento durante el proceso de hidratación.

Investigaciones realizadas en hormigón 'Green' indican que puede exhibir altos valores de permitividad relativa (ε_r = 10 a 20) y pérdidas de atenuación (α = 20 a 50 dB m⁻¹ a 1 GHz) [2]. Cuando la hidratación y el secado están efectivamente completos, aproximadamente 6 meses, valores menores pueden ser medidos, ε_r = 4 a 10 y α = 5 a 25 dB⁻¹ a 1 GHz.

7.6. Aplicación de GPR en Hormigón

En materiales tales como el hormigón armado es normal encontrar más de una malla metálica, esto es porque muros y losas necesitan mayor resistencia. Tal como se ha mencionado anteriormente las barras de acero usadas para la armadura del hormigón tienen alto valor dieléctrico, por lo que son impenetrables para la onda electromagnética. Esto puede ser un problema si la malla tiene una estrecha separación entre las barras porque posiblemente no sea posible identificar objetos que se encuentran bajo esta primera malla.

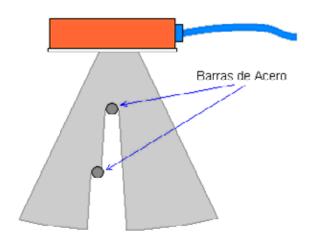


Fig. 7.2: El haz de emisión de la antena no cubre el área ubicada bajo elementos metálicos, en este caso barras metálicas del hormigón.

En este tipo de casos la malla inferior pierde resolución dentro del perfil y es más difícil su interpretación. La Figura 7.3, corresponde al perfil medido sobre un bloque de hormigón armado, con una doble malla de acero. La primera malla se encuentra a unos 5 cm. de profundidad desde la superficie y la segunda a 8 cm. En la figura b) es posible notar la diferencia entre la reflexión producida por la malla superior y la inferior, en la cual se refleja menor cantidad de energía. La barra de la izquierda en la malla inferior se ve ligeramente más clara que la derecha porque no se encuentra directamente bajo su correspondiente en la malla superior.

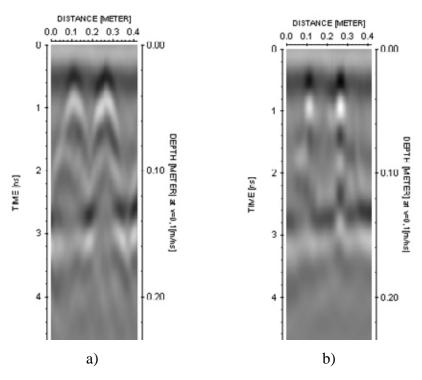


Fig.7.3: Perfiles obtenidos con el SIR-3000 a 1,6 GHZ. a) Imagen de las hipérbolas de dos barras paralelas a aproximadamente 15 cm. de separación. b) Imagen en la que se ha eliminado el efecto hiperbólico usando migración FD.

Dentro de un bloque de hormigón es normal encontrar también tuberías de PVC por lo que resultados como los de la figura 7.3 pueden resultar confusos en la interpretación.

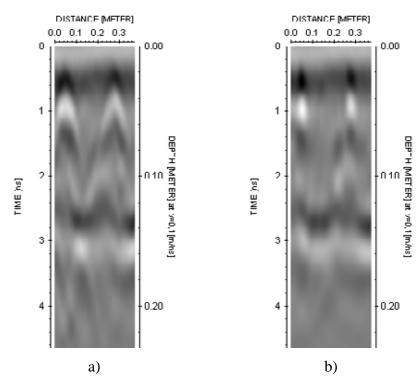


Fig. 7.4: a) Perfil de hipérbolas sobre un bloque de hormigón armado de doble malla que además contiene una tubería de PVC. b) Resultado de la Migración FD.

En la figura 7.4 se observan dos barras a 4 cm. de profundidad desde la superficie, correspondientes a la malla de acero superior. Bajo esta malla hay una segunda malla de acero, menos notoria producto de la pérdida de energía dada la reflexión de la primera malla, además a aproximadamente 9 cm. de profundidad hay una tubería de PVC para cables eléctricos.

Otra característica importante de determinar en un radargrama es el cambio de polaridad y magnitud de la señal recibida, es posible hacerlo de forma teórica calculando el factor de reflexión R o también gráficamente analizando la forma de onda de las trazas, en el software de procesamiento. Este es un dato importante para determinar las características del material que han provocado una reflexión.

Se realizó una prueba en un muro de hormigón armado de espesor 21 cm., conociendo este dato es posible obtener entonces la velocidad de la onda electromagnética en el interior del muro, que para este caso fue de 0,090 m/ns.

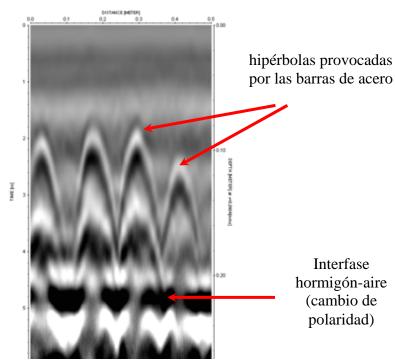


Fig. 7.5: Perfil del muro de hormigón armado con doble malla de acero.

En la figura 7.5 se observa la forma hiperbólica de la reflexión provocada por las barras de acero al interior de un muro de hormigón. En este radargrama es también posible notar la reflexión provocada por la interfase hormigón aire al otro lado del muro. La principal diferencia entre estas reflexiones es el cambio de polaridad que experimenta la señal.

En este caso la permitividad dieléctrica de las barras de acero es $\varepsilon_r=1$, sin embargo, la alta conductividad compensa la relación produciendo un alto contraste entre los materiales sin cambio de polaridad. Considerando que la polaridad de la señal emitida por la antena 5100, con la cual fueron realizadas las mediciones, tiene un primer *peak* positivo seguido de uno negativo, la interfase hormigón - acero mantiene la polaridad de la señal original, sin embargo la interfase hormigón – aire provoca un cambio de polaridad de la señal debido a que la permitividad del 1º medio por el que transita la onda electromagnética (hormigón) tiene mayor permitividad que el aire.

Capítulo 8

Análisis de las Mediciones Efectuadas

8.1. Introducción

La utilización de sistemas GPR en estructuras de hormigón está orientada a la medición de profundidad o espesor de algún bloque, así como también, a la ubicación de objetos como cables barras metálicas, cañerías plásticas, fisuras internas, etc. En general, el objetivo principal es la identificación de objetos y exactitud en su posición y profundidad.

En el proceso de medición de los siguientes resultados se utilizó el sistema SIR-3000 de GSSI. Este equipo pertenece al Laboratorio de Glaciología además de antenas de distintas frecuencias, especiales para estudios con GPR, que son utilizadas dependiendo del tipo de medición y los objetivos planteados. En este caso, se trabajó específicamente solo en estructuras de hormigón, por lo que la máxima profundidad de penetración de la onda necesaria, es de unos 30 cm., y la antena apropiada es el modelo 5100 de 1,6 GHz, debido a que entrega mayor resolución de los datos.

8.2. Método Utilizado

En el siguiente resumen de datos, se ha configurado el radar en modo *distancia*, para el cual la antena es acoplada a un odómetro y el radar captura una cierta cantidad de trazas por unidad de distancia, lo que permite medir con exactitud las distancias en el eje x, este es un requisito importante para realizar análisis de 3D, porque en este caso es importante que todos los perfiles paralelos, medidos en una misma dirección tengan el mismo tamaño.

En un principio se utilizaron los softwares RADAN desarrollado por GSSI (USA) y REFLEX desarrollado por *K. J. Sandmeier* (Alemania); evaluando las herramientas de cada uno para posteriormente elegir el más apropiado para el desarrollo del estudio. En este proceso de evaluación se consideraron la versatilidad y cantidad de herramientas de cada software, Finalmente se eligió el software REFLEX, por su amplia variedad de funciones, flexibilidad en las posibilidades de procesamiento y principalmente porque REFLEX incorpora un módulo de procesamiento 3D que en RADAN es necesario adquirir aparte. Esta herramienta es de gran importancia en el análisis de datos en los cuales se necesita alta resolución para su interpretación.

Los archivos originales tienen el formato del fabricante, DZT (GSSI), pero REFLEX permite importar datos de distintos formatos, incluidos éste.

Para la interpretación de datos 3D se realizó un análisis en dirección x e y de forma independiente, esto porque, como se ha visto anteriormente el radar es más sensible a detectar objetos que están perpendiculares a la línea de desplazamiento de la antena, en este caso, los perfiles de dirección x muestran las barras verticales de la armadura del pilar, así como a su vez, los perfiles tomados en dirección y muestran las barras horizontales. Cada uno de estos archivos fue revisado por separado para obtener imágenes independientes.

8.3. Resolución en Hormigón para la Antena 5100

La antena 5100 de frecuencia central 1,6 GHz, proporciona alta resolución de los radargramas en distintos materiales, dadas las condiciones del hormigón, el sistema permite cubrir una profundidad de hasta 0,6 m y es capaz de identificar objetos con resolución horizontal aproximada de 6 cm. y resolución vertical de ¼ λ, es decir, puede detectar dos objetos ubicados verticalmente a una separación aproximada de 2 cm. En ocasiones, un objeto puede ser invisible si está directamente bajo otro o muy cercano en dirección horizontal, menos de 2,5 cm. En casos como una malla cruzada de barras metálicas, puede aparecer como una lámina homogénea si la separación entre las barras es menor a la longitud de onda de la señal, ocultando posibles blancos bajo ella [6].

8.4. Descripción de las Mediciones

Al inicio del estudio se realizaron distintas mediciones de prueba y calibración del equipo en el material. En general, se estudiaron 3 tipos de estructuras: muros, losas y pilares.

N°	Nombre genérico	Ubicación	Dimensiones m
1	Muro exterior	Frontis Bioterio, 1° piso	(variadas pruebas)
2	Losa interior	Pasillo principal del laboratorio de Glaciología	1x1
3	Pilares	Local comercial en Valdivia	0,6x1,2-0,6x2,7
4	Losa exterior	Hall de acceso al edificio Martha Muse (ex Hotel Schuster)	0,9x4

Tabla 8.1: Descripción general de estructuras de hormigón armado sobre las que se utilizó GPR.

8.4.1. Clasificación de Hormigones Estudiados

El hormigón se clasifica según su porcentaje de calidad y resistencia, estos parámetros son medidos por laboratorios autorizados durante el período de fraguado del hormigón.

Tipo	Resistencia	Calidad (%)	Compresión a 28 días (Kgf/cm²)	Diámetro de la grava (mm)
Muro exterior	H-25: 250 Kg/cm ²	90	252	20
Losa interior	H-25: 250 Kg/cm ²	90	269	40
Pilares				
Losa exterior	H-25: 250 Kg/ cm ²	90	269	40

Tabla 8.2: Detalle técnico del tipo de hormigón.

En el muro exterior (1º piso), ha sido agregado a la mezcla un tipo de aditivo. Sikament FF 86, éste es un producto sintético que permite trabajar con menor cantidad de agua en el amasado, normalmente es utilizado en muros para dar mayor fluidez a la mezcla. Químicamente es una solución acuosa de condensado de melamina-formaldehído [15]. Esta sustancia tiene valor de permitividad dieléctrica entre 4,7 – 10,9 en estado líquido. Es considerado un material de alta

rigidez dieléctrica, es decir, que se comporta como un aislante tal como el hormigón. Por lo tanto, este aditivo no afecta en la velocidad de propagación de la onda electromagnética.

8.5. Análisis de Losa del Laboratorio de Glaciología

Estas mediciones se realizaron en el pasillo, como primera prueba, para detectar la estructura metálica interna de la losa del primer piso del Laboratorio de Glaciología.

La geometría de la malla trazada corresponde a un cuadrado de lado 1 m, de 11 líneas paralelas de dirección x e y, con separación de 0,1 m.

El radar fue configurado en módulo *Quick3D* para capturar datos que posteriormente puedan ser representados en 3D, en él se utilizaron los siguientes parámetros:

- rango máximo de 10 ns
- muestreo de 512 samples y
- 170 *scan/unit*.

El resultado fue un total de 22 perfiles de 171 trazas cada uno, en la Figura 8.1 se muestran dos ejemplos de la forma original de estos perfiles, estos no han sido procesados aún y claramente se observan las hipérbolas que representan las barras metálicas. El eje horizontal indica la distancia recorrida por la antena sobre la superficie en metros y el eje vertical izquierdo indica el tiempo doble de propagación de la onda. Es importante notar que estos archivos no han sido corregidos al "tiempo cero", por lo que, la superficie no se encuentra a 0 ns del perfil. La escala de colores con la que se ha reconstruido el perfil, corresponde a una escala tonos de grises, en el cual los tonos claros son proporcionales a las reflexiones positivas y los oscuros a las reflexiones negativas.

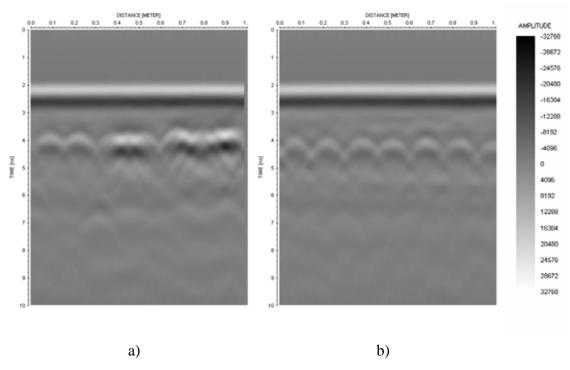


Fig. 8.1: Ejemplo de perfiles individuales en escala de grises. a) Primer perfil en dirección x.
b) Primer perfil en dirección y.

De forma inicial se obtiene una serie de perfiles correspondientes a los trazados de la antena en dirección x e y por separado. Los archivos correspondientes a una misma dirección se unen en un archivo para ser analizado en 3D. Luego de ensamblados se obtiene un cubo en el cual se pueden seleccionar diferentes vistas de las 3D, agregando eventualmente una 4º dimensión correspondiente a la conversión del tiempo de propagación en profundidad.

En la Figura 8.2 se ha seleccionado la vista de 2 de los 11 perfiles registrados en dirección y. En este caso el 5 y 9, además se muestra un plano de corte perpendicular a la profundidad, como producto de la interpolación del conjunto de 11 perfiles. Para generar el eje de profundidad se ha corregido la posición de la superficie, cortando los perfiles originales a 2,07 ns, es decir a -0,1 ns sobre el primer peak positivo de la onda directa (ver anexo A2). El cálculo de velocidad resultó ser de 0,1 m/ns. Tal velocidad de propagación de la onda indica que el valor de permitividad dieléctrica es $\varepsilon_r = 9$. Así se puede agregar el eje z, correspondiente al espesor, a la imagen y observar que las barras se encuentran a 10 cm bajo la superficie.

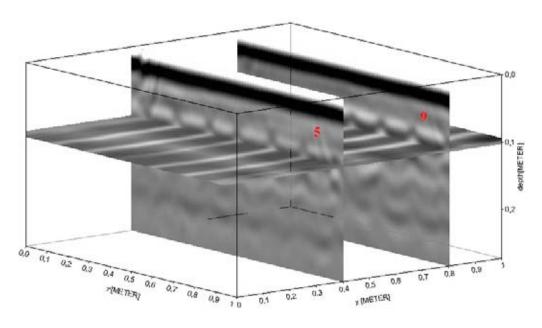


Fig. 8.2: Cubo generado a partir de los 11 perfiles en dirección y.

De la misma forma se realizó el proceso de los 11 perfiles medidos en dirección x, para generar un cubo que permita tener las vistas en profundidad y analizar la disposición de las barras en la estructura. La Figura 8.3 muestra el cubo 3D con la selección de los perfiles 1, 6 y 11 además de un plano en dirección z a 8 cm. de profundidad.

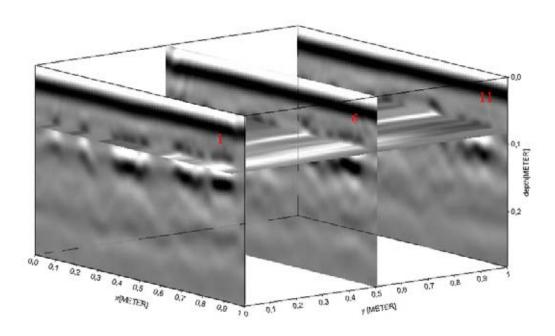


Fig. 8.3: Cubo 3D generado a partir de los 11 perfiles medidos en dirección x.

El plano z indica que las barras tienen una leve inclinación en dirección y, que se hace evidente al comparar los perfiles 1 y 11. Se puede ver que las primeras barras se encuentran a 8 cm. de profundidad con una diferencia máxima entre la altura de las barras paralelas de aproximadamente 1 cm., lo que además indica que las barras tienen un diámetro de 1 o 1,2 cm. En general, en un estudio con este método se puede confiar en la exactitud en centímetros, sin embargo, es difícil asegurar detalles del orden de milímetros.

Con la vista de planos de profundidad es posible ver con claridad la separación horizontal entre las barras. En la Figura 8.4 a) y b), se ha diseñado una escala de colores que represente solo las reflexiones positivas de la señal producidas por las barras metálicas, para ver con mayor claridad su posición y separación.

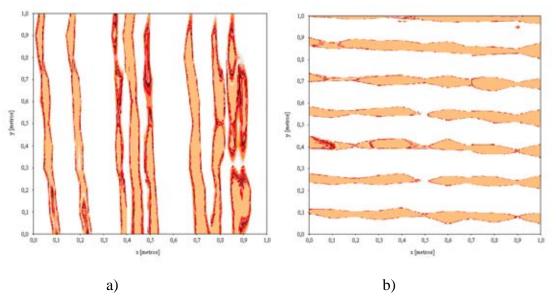


Fig. 8.4: Imágenes de planos de profundidad de los cubos en 3D. a) Imagen del ensamble de los perfiles de dirección x, a 8 cm de profundidad. b) Imagen del ensamble de los perfiles de dirección y, a 10 cm de profundidad.

En la Figura 8.4 a) se puede distinguir fácilmente que la separación de las barras no es constante. Observando en detalle, desde izquierda a derecha las primeras dos barras tienen una separación de aproximadamente 13 cm., separadas de la siguiente por unos 15 cm., la que a su vez tiene una separación notablemente menor de unos 2 a 3 cm. de la 4º barra y esta igual separación con la 5º.

Luego se puede ver una separación de unos 15 cm. nuevamente entre la 5° y 6° barra. Las 3 últimas barras a la derecha de la imagen están muy juntas entre ellas produciendo cierta interferencia destructiva entre sus reflexiones, por lo que no es posible ver nítidamente su sombra dentro del perfil. Es posible concluir que este efecto es provocado por una bolsa de aire entre la estrecha separación de las barras que no permitió la completa distribución del hormigón en la etapa de construcción.

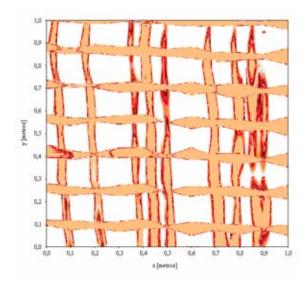


Fig. 8.5: Superposición de los planos z adquiridos en ambas direcciones de desplazamiento.

La figura 8.5 muestra la reconstrucción completa vista desde la superficie, de la armadura metálica de la losa radiada en un área de 1 m².

8.6. Análisis de Mediciones sobre Pilares

Se realizaron mediciones de radar sobre un pilar elegido al azar dentro de una serie de pilares disponibles, con similares condiciones. Los pilares se encuentran en etapa de construcción, es decir, una estructura de hormigón armado descubierto, de base cuadrada de 0,65 m de ancho y altura aproximada de 4 m.

Para realizar medidas se trazó una grilla que permita identificar el trazado de la antena para cada perfil independiente, en el primer experimento sobre el pilar la grilla tiene las dimensiones de 0,5 x 1,4 m con separación de 0,1 m entre cada línea.

Las medidas fueron planificadas en los 4 costados, del ancho del pilar con altura 1,4 m sobre el suelo considerando una separación de 10 cm. entre perfiles. Un total de 15 perfiles en dirección x y 6 perfiles en dirección y, para cada lado del pilar.

Como el radar se configuró para realizar un trazado de separación de 10 cm y el pilar tiene un ancho de 65 cm, solo se han registrado los 50 cm centrales del pilar en dirección y, en 6 perfiles.

8.6.1. Perfiles en Dirección y

Para obtener la imagen de la Figura 8.6 se procesó cada perfil por separado antes del ensamble de 3D. Debido a lo estrecho del pilar, en el primer perfil medido, la antena tuvo mayor contacto con el aire y el registro perdió ganancia, por lo que fue necesario un ajuste ganancia de los archivos y un análisis de migración de datos para borrar el efecto de la hipérbola. Además se diseñó una escala de colores que representara solo las amplitudes correspondientes a las máximas reflexiones provocadas por las barras.

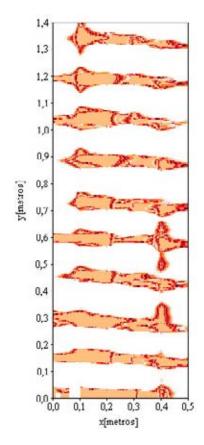


Fig. 8.6: Vista del plano z (eje de profundidad) de imagen analizada en 3D de los perfiles trazados en dirección y.

De la imagen anterior se puede obtener información como la profundidad a la que se encuentra la armadura del hormigón, inclinación u otra anomalía de la estructura. Tal como muestra la imagen 8.6, en una altura de 1,4 m hay un total de 10 barras horizontales con separación aproximada de 13 cm. y una leve inclinación horizontal de 2 a 3 cm.

Según el ajuste de hipérbolas, la velocidad de la onda electromagnética alcanzó un valor de 0,098 m/ns al interior del pilar, con lo que se obtiene un valor dieléctrico del material aproximadamente de 9. Con estos datos es posible hacer la transformación del eje temporal en profundidad en cm.

8.6.2. Perfiles en Dirección x

Se ha realizado un análisis por capas de profundidad en el que se ha detectado la malla metálica con barras de un 1 cm. de diámetro a 3 cm. de profundidad, y tiene una ligera inclinación de derecha a izquierda, con un ángulo de 2,3° (aproximadamente 2 cm.).

En el análisis de los datos en dirección x ha sido más complicada la determinación de las barras, debido a una aparente desorientación de la dirección de estas, por lo cual, tampoco es posible hacer directamente análisis tales como migración ya que las hipérbolas no están claras dentro de todos los perfiles y el análisis no ofrece muy buenos resultados en un caso como éste, por lo tanto, es necesario analizar cada archivo por separado antes del ensamble de todos los perfiles.

Al revisar cada archivo es posible corregir las desviaciones producto de la medición. Cuando se realiza una medición es necesario desplazar la antena por la grilla trazada sobre la superficie, es por eso que estas mediciones pueden tener errores, ya que los puntos de inicio y de término de la medición, son difíciles de hacer coincidir con exactitud, errores de milímetros se vuelven importantes cuando los trazados son cortos y los archivos contienen pocas trazas. Sin embargo, al corregir este tipo de detalles y depurar el ruido, se puede obtener una imagen con una buena aproximación.

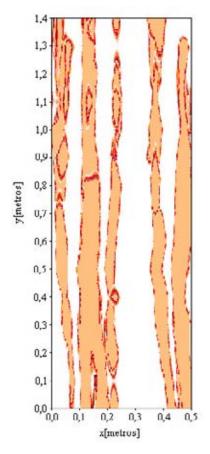


Fig. 8.7: Plano de profundidad de los perfiles trazados en dirección x, a una profundidad mínima de 4,5 cm.

8.6.3. Resultado General

El análisis de profundidades indica que las barras horizontales se encuentran sobre las barras verticales. Esto se muestra gráficamente en la superposición de las imágenes en dirección x e y, de aquí se obtiene una imagen que representa la malla con la barras horizontales y verticales.

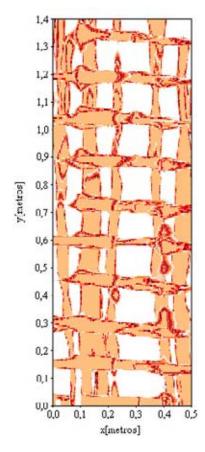


Fig. 8.8: Reproducción de la armadura de un costado del pilar.

Como los anteriores resultados muestran irregularidades en la disposición de las barras verticales, se realizó una segunda medición en la que se estudió el mismo pilar pero abarcando un área mayor (0,6 x 2,7 m) en tres costados del mismo pilar y un segundo pilar elegido de forma aleatoria.

En este caso se han procesado los resultados de igual forma que las anteriores, ensamblando los perfiles correspondientes a la misma dirección, x e y, en un mismo archivo para formar un archivo de 3 dimensiones (x, y, z). A ambos archivos se ha aplicado migración FD para eliminar el efecto de las hipérbolas. Este proceso es exitoso en archivos en que las barras están dispuestas a la misma altura y distancia constante entre una y otra, este es el caso de las barras horizontales (medidas en dirección y), por el contrario, nuevamente es necesario un manejo más cuidadoso al procesar los archivos de barras verticales (medidas en dirección x), debido a lo irregular de su disposición dentro de la armazón.

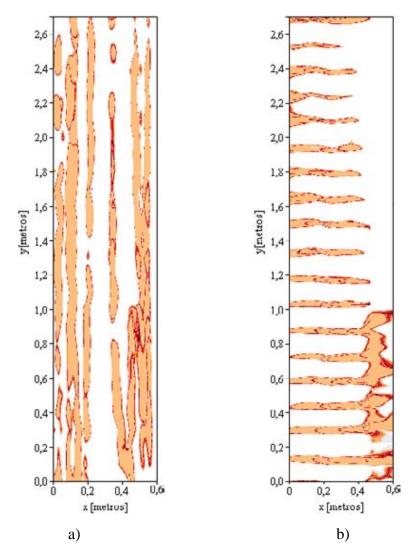


Fig. 8.9: Resultados de nuevas mediciones sobre el pilar analizado anteriormente sobre un área de 0,6 m de ancho y 2,7 m de altura. a) Plano en dirección Z del análisis 3D de perfiles trazados en dirección x. b) Plano en dirección Z del análisis 3D de perfiles trazados en dirección y.

En estas imágenes se hacen menos evidentes los detalles de la medición anterior porque en este caso se abarcó un área mayor de medición, sin embargo, es posible ver algunas anomalías principalmente de las barras de posición vertical.

Mediciones en un segundo costado del mismo pilar entregan información similar acerca de la disposición de las barras verticales y horizontales. En las imágenes se puede ver claramente la forma de las barras y detalles como separación entre ellas y cantidad de barras.

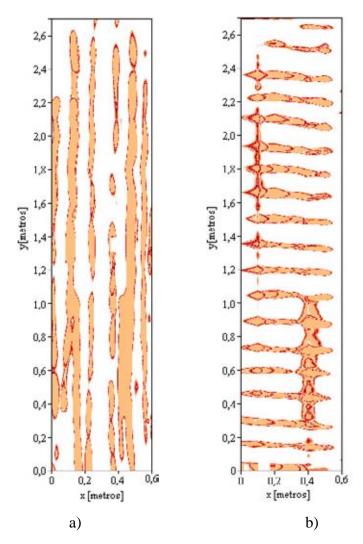


Fig. 8.10: Resultados de mediciones en un segundo pilar elegido de forma aleatoria. a) Recorrido de la antena en dirección x y b) Recorrido de la antena en dirección y.

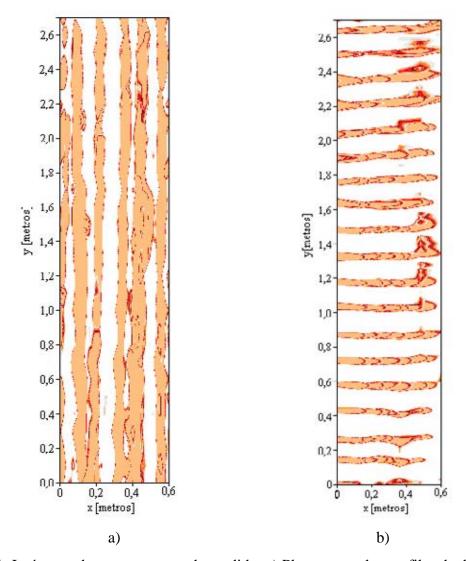


Fig. 8.11: Imágenes de un tercer costado medido. a) Plano z para los perfiles de dirección x. b)

Plano Z para los perfiles de dirección y.

Las barras horizontales o estribos han sido chequeadas en los planos correspondientes. En los cuales, se puede ver que estos arreglos recorren el pilar de forma horizontal envolviendo las columnas de barras verticales. Los estribos están separados cada 15 cm (≈13 cm de separación determinada por la imagen de radar), Además las barras verticales tienen un diámetro de 25 mm las de las esquinas y 22 mm las laterales.

8.6.4. Descripción de Resultados

Las mediciones realizadas sobre pilares de hormigón armado representan una clara muestra de eventos propios de una construcción posibles de detectar con GPR. Se han seleccionado los resultados de dirección x en los costados del pilar. Primero se ha escogido el que tiene mayor evidencia de detalles perceptibles al radar y luego se muestran los 3 caras restantes del pilar, reproducidas a partir de los radargramas. La figura 8.12 muestra los resultados de una segunda medición realizada para confirmar la información obtenida en un primer experimento.

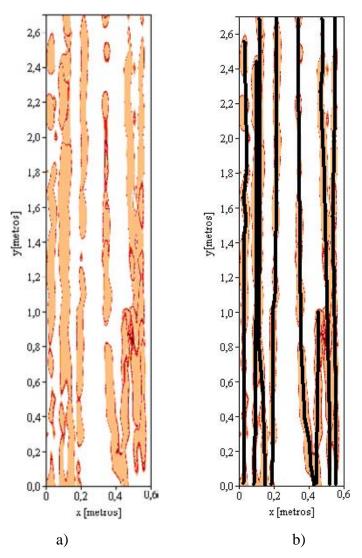


Fig. 8.12: Plano de profundidad reconstruido con perfiles de dirección x. a) imagen a escala de colores, b) imagen sobre la cual se han dibujado las barras siguiendo el resultado de radar.

Posteriormente si se observa detenidamente la figura 8.12 b) se pueden notar los siguientes puntos:

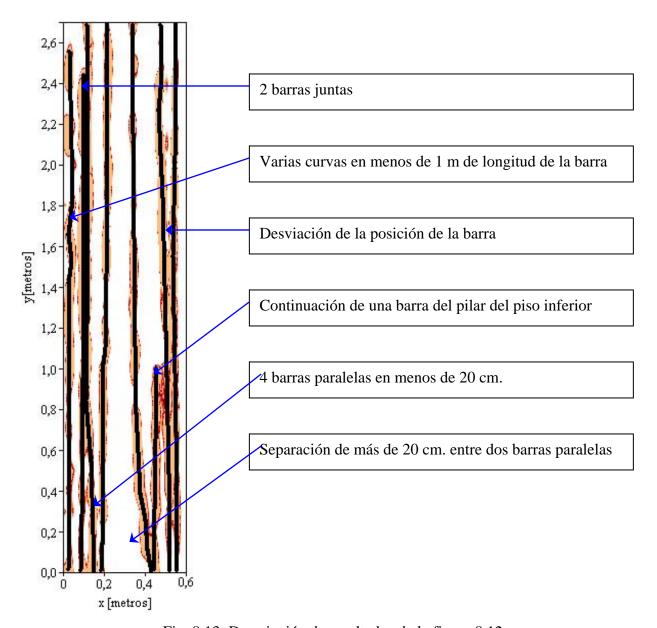


Fig. 8.13: Descripción de resultados de la figura 8.12.

Resultados similares se han obtenido en los planos de profundidad de los cuatro costados de un mismo pilar, de las mediciones de trazado en dirección x.

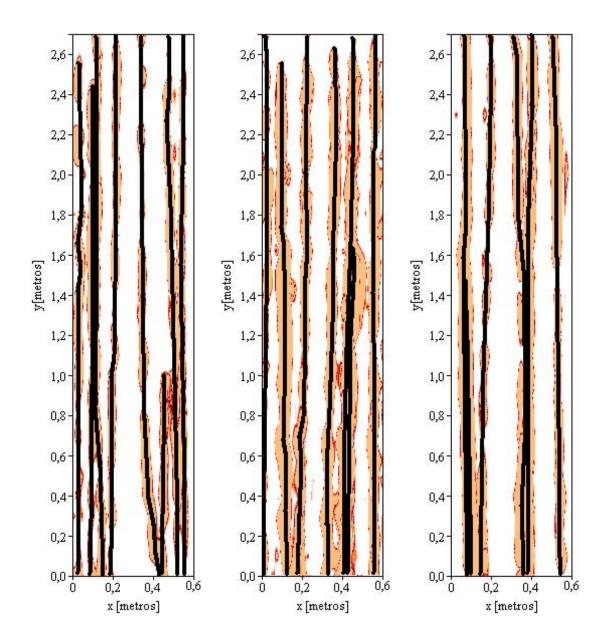


Fig. 8.14: Planos de profundidad correspondientes a los costados restantes del pilar de base cuadrada.

8.7. Losa Edificio Martha Muse (Ex Hotel Schuster)

La remodelación del edificio Martha Muse (ex Hotel Schuster), en el interior del CECS, consideró la reconstrucción de una losa de hormigón armado en el hall de acceso, la cual fue medida con GPR luego de ser hormigonada. Como información adicional, se tomaron fotografías de la malla metálica armada antes de ser hormigonada para realizar comparaciones con los resultados de GPR.



Fig. 8.15: Estado de la malla metálica antes del proceso de hormigonado.

Esta es información útil en la interpretación de los resultados de GPR. En ella se observa la dirección de las barras.

Se tomaron datos con GPR sobre un área de 0,9 x 4 m, sobre la cual se marcó una grilla con separación de 0,1 m entre líneas paralelas, capturando un total de 41 perfiles en dirección x y 10 perfiles en dirección y.

Una simulación de la disposición de las barras permite comparar por partes los resultados correspondientes a la reconstrucción en REFLEX para las barras de la malla superior e inferior.

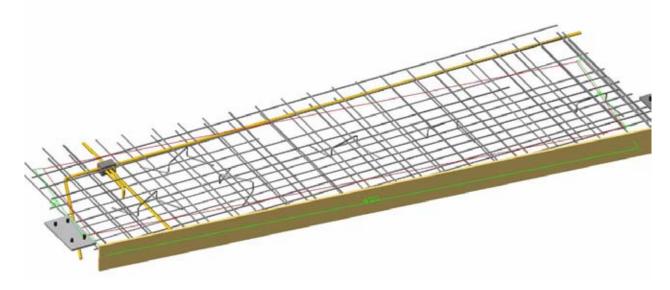


Fig. 8.16: Visión 3D de la simulación a escala, del área de estudio sobre la losa.

Esta parte de la losa de hormigón está constituida por una malla superior y una inferior además de los correspondientes separadores también metálicos, entre ellas. Además es posible ver algunas de las conexiones plásticas del tendido eléctrico. El área correspondiente al trazado del radar se muestra delimitada con líneas rojas y tiene dimensiones 90x400 cm.

Las figuras 8.17 y 8.18 muestran la representación de la vista superior y a su derecha se muestran la imagen obtenida del GPR y procesada en REFLEX para dos distintos niveles de profundidad respectivamente.

En el croquis realizado se muestra sólo la posición de las barras además de la posición de algunos de los separadores y otros objetos que causaron el efecto de refracción de la señal de radar. Cabe hacer notar que la imagen simulada es una aproximación teórica y no responde a las condiciones reales en que se encuentran las barras al momento de la medición producto de la deformación

típica que sufren al momento de su manipulación y armado, tampoco se consideran las uniones de barras (traslapos).

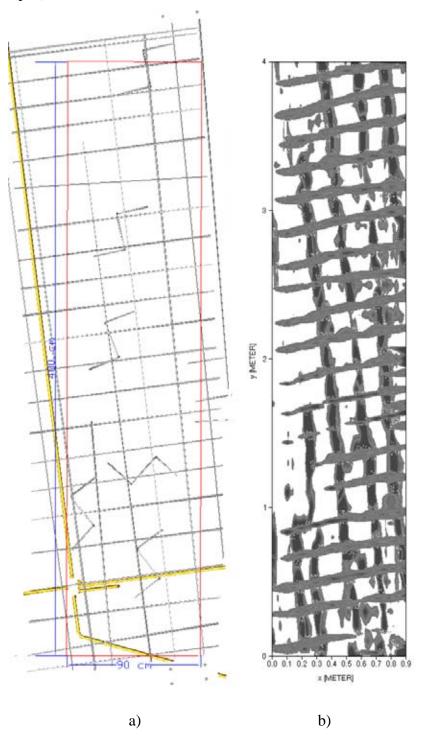


Fig. 8.17: a) Vista de las barras de la malla superior y separadores. b) Plano en eje Z a unos 4 cm. profundidad, correspondiente a las reflexiones provocadas por la malla de barras superior.

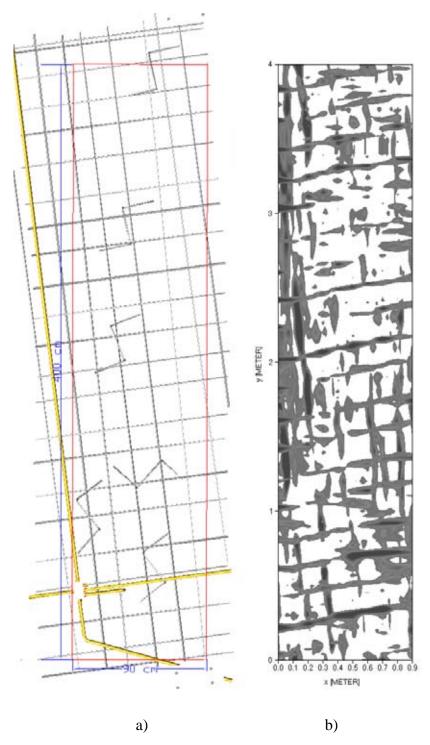


Fig. 8.18: a) Vista superior de barras de la malla inferior y separadores. b) Plano en eje Z a unos 9 cm. de profundidad, correspondientes a las reflexiones provocadas por la malla de barras inferior.

Por causas normales las barras de acero tienden a deformarse al ser ensambladas para la estructura del hormigón, así la malla no tiene exactamente la misma altura en toda su extensión, por lo que, para reconstruir la imagen de radar anterior se debió superponer varias capas correspondientes a distintas profundidades.

Las figuras 8.17 a) y 8.18 a) corresponden a la vista superior del cubo 3D, que muestran las barras superiores e inferiores respectivamente, además se incluye la posición de los separadores que son también detectados por el GPR, de los cuales se registra la parte intermedia que se encuentra a la misma altura de la malla superior. La línea roja encierra el área sobre la cual se obtuvieron los datos representados en las figuras 8.17 b) y 8.18 b).

Claramente la figura 8.17 b) es más nítida que la 8.18 b), esto es debido a dos razones principales, la primera es que parte importante de la energía es reflejada a la profundidad de la primera malla, como consecuencia, menor cantidad de energía continúa desplazándose a través del bloque de hormigón hasta la segunda malla. Así, los efectos de reflexión y dispersión distorsionan los resultados, generando pérdidas de señal e ingresando ruido a los resultados.

La losa de hormigón de 0,9 x 4 m, sobre la cual se trazaron perfiles cada 0,1 m, en ambas direcciones, tiene irregularidades que quedan a la vista en los resultados de radar y que pueden ser demostrados usando fotografías de la malla antes del hormigonado.

Observando la reconstrucción de la malla superior a partir de los resultados de radar es posible verificar algunos de los detalles detectados por el GPR en la figura 8.19.

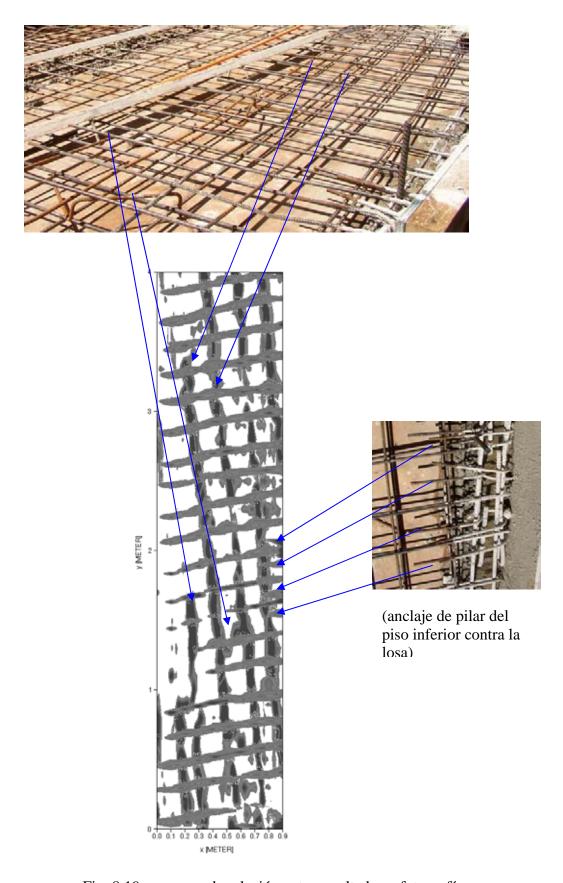


Fig. 8.19: esquema de relación entre resultados y fotografías.

Capítulo 9

Resultados y Conclusiones

Al término del estudio realizado es posible concluir que se ha demostrado en terreno la efectividad del GPR en estructuras de hormigón, confirmando que es un método que posibilita la detección y visualización de la estructura interna de este material, que posee características propias que hacen favorable y muy viable su utilización como un método de prospección no destructivo. Con este método se pueden hacer evaluaciones del estado de un determinado bloque de hormigón de manera rápida y efectiva.

La antena 5100 de 1,5 GHz resulta ser altamente recomendable si se desea hacer prospección en bloques de hormigón completos para su posterior reconstrucción gráfica, porque entrega alta resolución tanto vertical como horizontal, suficientes como para detectar características internas a un bloque de hormigón armado del interés asociado a éste.

Las condiciones generales, que determinan los resultados de GPR, fueron similares en casi todos los experimentos realizados. Sin embargo, diferencias entre sus características físicas influyen en sus propiedades eléctricas, generando variación en la respuesta de la onda electromagnética. Esto quedó en evidencia en el análisis para el cálculo de permitividades de los diferentes tipos de estructura.

Tipo de estructura	Espesor (cm)	з	Veloc. (m/ns)	λ (m)	Máxima resolución H (cm)
Muro exterior	21	9.37	0.098	0.065	1.6
Losa interior	13	9	0.1	0.067	1.6
Losa exterior	13	9.37	0.098	0.065	1.6
Pilar	65	9	0.1	0.067	1.6

Tabla 9.1: Cálculo de relación entre permitividad dieléctrica y velocidad con respecto a la resolución horizontal del radargrama.

En la tabla 1, se muestra el detalle de los cuatro diferentes tipos de estructuras, con distintos espesores, sobre los cuales se llevo a cabo el estudio.

Conociendo el espesor de la estructura se hizo el cálculo de velocidades de propagación que resultaron ser ligeramente distintas para dos de las estructuras. Esta diferencia responde a las condiciones ambientales en las que se encuentran las estructuras al momento de la medición. En el caso del muro y la losa, ambos exteriores, se registra una menor velocidad de propagación lo que a su vez indica mayor valor dieléctrico. Por lo tanto, se concluye que este resultado es producto del contenido de agua (saturación) que tiene la superficie al momento de la medición. Así también, se observa en la tabla que esta diferencia en las velocidades no alcanza a ser trascendente ni perjudica la resolución horizontal de los radargramas.

Si bien al momento de la medición las superficies se encontraban aparentemente secas, el clima de Valdivia, de alta humedad ambiental, mantiene una pequeña cantidad imperceptible de agua absorbida por el hormigón. Según lo anterior y los resultados de la tabla 1, se puede constatar el efecto provocado por el agua en una medición de GPR, debido al alto valor dieléctrico que posee, varía fácilmente el valor dieléctrico del material en el cual ésta se encuentra. En síntesis, el método GPR demostró ser aplicable en forma exitosa tanto en estructuras de hormigón ubicadas en el interior de edificios como en el exterior.

En la elección de la herramienta de software que se utilizaría para el procesamiento e interpretación de los resultados se consideraron aspectos relacionados a la cantidad de herramientas disponibles y la versatilidad de la aplicación en general, considerando dos programas: RADAN y REFLEX. Finalmente se eligió el software REFLEX v4, que se ajusta más a las necesidades de este estudio principalmente porque incluye un módulo de análisis 3D que permitió el análisis y reconstrucción gráfica de las estructuras estudiadas. La versión disponible de RADAN no posee un módulo 3D, el cual debe ser adquirido en forma aparte. REFLEX al principio puede parecer no ser una herramienta de fácil manejo, debido a que no ha sido diseñado siguiendo las características de un programa que da facilidades al usuario, sin embargo, la práctica permite aprovechar de mejor forma las múltiples utilidades del programa.

Bibliografía

- [1] N. Acito, Experimental Performance Analysis of Clutter Removal Techniques in IR Images, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Pisa, Pisa, Italy.
- [2] D. Daniels, Ground Penetrating Radar 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 772 p., 2004.
- [3] F. Dios, Campos Electromagnéticos, Edicions de L'Universitat Politècnica de Catalunya SL, 476 p., 1998.
- [4] M. Gehrig, D. Morris, J. Bryant, Ground Penetrating Radar for Concrete Evaluation Studies, Texas, US, 17p., 2003.
- [5] http://www.geophysical.com/
- [6] Geophysical Survey Systems, Inc., Handbook for Radar Inspection of Concrete, New Hampshire, US, 31 p., 2001.
- [7] Geophysical Survey Systems, Inc., User's Manual, New Hampshire, US, 2004.
- [8] http://www.g-p-r.com/
- [9] J. Hugenschmidt, Non-destructive-testing of traffic-infrastructure using GPR, EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, International Symposium: Non Destructive Testing in Civil Engineering, Duebendorf, Switzerland, 2003.

- [10] V. Pérez Gracia, Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 955 p., 2001.
- [11] K. Sandmeier, REFLEX's Manual, Karlsruhe, Germany, 379 p.,2005
- [12] J. Sophocles Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University, New Jersey, USA, 820 p., 2003.
- [13] G. van der Zwan, Theories for the Dielectric Constant, paper, 29 p, 2003.
- [14] R.Yelf, Where is True Time Zero?, Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, ciudad, The Netherlands, 279-282, 2004.
- [15] Sikament FF-86, Ficha técnica, Versión Diciembre, 2005.

Anexo A1

Fundamentos de Radiación Electromagnética

Según Newton, la radiación electromagnética (REM), es una forma de energía que se propaga en el espacio exterior en forma armónica como ondulaciones transmitidas de un lugar a otro en forma continua a la velocidad de la luz, conteniendo un plano eléctrico ortogonal a otro de carácter magnético [12].

Una onda plana es una buena aproximación a las ondas reales en muchas situaciones prácticas, particularmente en medios resistivos y de bajas pérdidas tales como arena y piedra secas

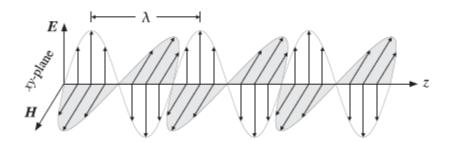


Fig.A1.1: Figura de la onda electromagnética.

Las ecuaciones de propagación de una onda plana y armónica y las relaciones de Maxwell explican este fenómeno, en que su comportamiento depende del medio material sobre el cual se propague.

Correspondiente a medios materiales y considerando un medio no homogéneo con propiedades de variable dieléctrica $\varepsilon(\vec{r})$, magnética $\mu(\vec{r})$ y ohmica $\sigma(\vec{r})$; se definen las ecuaciones (A1.1) en el dominio del tiempo. La primera es la ley de inducción de Faraday, la segunda es la Ley de Ampère corregida por Maxwell e incluye la corriente de desplazamiento $\partial \vec{D}/\partial t$, las tercera y cuarta son las leyes de Gauss para los campos eléctrico y magnético.

El término de corriente de desplazamiento $\partial \overrightarrow{D}/\partial t$, en la ley de Ampère, es esencial en la predicción de la existencia de la propagación de ondas electromagnéticas. Su rol es establecer la conservación de cargas [3].

$$\nabla x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla x \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_{el}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$
(A1.1)

Las cantidades \vec{E} y \vec{H} son las intensidades de campo eléctrico y magnético medidas en unidades de [V/m] y [A/m], respectivamente. Las cantidades \vec{D} y \vec{B} son las densidades de flujo eléctrico y magnético, y están en unidades de [coulomb/m²] y [weber/m²], o [tesla], \vec{D} es también llamado vector de desplazamiento eléctrico y \vec{B} inducción magnética.

Las cantidades ρ_{el} y \vec{j} son la densidad de carga eléctrica libre y densidad de corriente, (flujo de carga) de alguna carga externa, medidas en $[C/m^3]$ y $[A/m^2]$ respectivamente. La densidad de carga y densidad de corriente ρ_{el} y \vec{j} , puede verse como las fuentes de los campos. Por problemas de propagación de onda, estas densidades son localizadas en el espacio, restringidas al flujo sobre una antena mientras que los campos eléctricos y magnéticos son propagados lejos desde sus fuentes y se pueden propagar a largas distancias.

Las denominadas ecuaciones constitutivas relacionan la intensidad del campo eléctrico y magnético con el desplazamiento eléctrico y la inducción magnética, respectivamente.

Para medios homogéneos e isótropos, las ecuaciones constitutivas tienen una expresión sencilla, relacionando estas magnitudes por medio de la permitividad dieléctrica $\varepsilon(\vec{r})$, la conductividad $\sigma(\vec{r})$ y la permeabilidad magnética $\mu(\vec{r})$ del material [3]:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$
(A1.2)

En general, los medios en los que se usa la energía electromagnética para análisis por GPR, los medios son anisótropos. En este caso, la relación que existe entre estas magnitudes se expresa a través de los tensores de la permitividad, permeabilidad y conductividad [10].

$$\vec{D} = \tilde{\varepsilon} * \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{B} = \tilde{\mu} \vec{H}$$

$$\vec{j} = \tilde{\sigma} * \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}_{m}$$
(A1.3)

Donde $\vec{j}_{\rm m}$ es la densidad de corriente debida tanto a polarización como a magnetización del material a consecuencia de los campos eléctrico y magnético aplicados, y las expresiones $\tilde{\varepsilon}, \tilde{\mu} \ y \ \tilde{\sigma}$ suelen aproximarse por tres tensores de dimensión 3x3 [10].

En su teoría unificada de Electromagnetismo, Maxwell predijo la existencia de las Ondas Electromagnéticas como consecuencia natural de las leyes fundamentales expresadas en las cuatro ecuaciones definidas anteriormente (A1.1).

Posteriormente Hertz y Righi se encargarían de corroborar este fenómeno. Maxwell demostró que las ondas electromagnéticas, propagándose a lo largo de una dirección z, con campos eléctrico (E) y magnético (H) perpendiculares en el espacio libre, como muestra la figura A1.1 se describirían por medio de las siguientes ecuaciones [12]:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$
(A1.4)

Anexo A2

Especificaciones Técnicas y de Funcionamiento del Equipo de Medición

A2.1 Especificaciones Técnicas del SIR 3000 de GSSI

GENERAL

- Número de canales: 1
- Memoria interna: Flash 512 Mb
- Procesador: 32-bit Intel StrongArm™ RISC processor @ 206 MHz
- Pantalla: Enhanced 8.4" TFT, 800 x 600 resolution, 64K colors
- Modos de Visualización: Linescan, O-scope, 3D

ADQUISICION DE DATOS

- Formato: RADAN (dzt)
- Tamaño del Sample: 8-bit o 16-bit, seleccionable
- Intervalo de *Scan*: seleccionable
- Número de samples por scan: 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192
- Modo de operación: modo libre (tiempo), *survey wheel* (odómetro) y modo punto.
- Ganancia: Manual o automática, 1-5 puntos de ganancia (-20 a +80 dB)
- Filtros:
 - Vertical: Low-Pass y High-Pass IIR y FIR
 - Horizontal: Stacking, Background Removal

OPERACION

■ Temperatura: -10 a 40 °C

• Potencia: 15 V DC, 4 A

Batería: 10,8 V DC, interna.

Tasa de transmisión: Sobre 100 KHz.

I/O

Puertos disponibles: Antena, DC, Ethernet, RS232, Memoria Flash Compacta, USB.

DIMENSIONES

31,5 (Largo) x 22 (Ancho) x 10,5 (Alto) cm.

A2.2 Especificaciones Técnicas de la Antena 5100 de GSSI

- Frecuencia Central Aproximada: 1,6 GHz
- Duración del Pulso Aproximado: 0,6 ns
- Potencia Peak Radiada: 0,1 Watt
- Potencia Promedio Radiada (a tasa de transmisión 50 KHz): 0,15 mWatt
- Potencia Promedio Radiada Aproximada por MHz: 0,51 uW/MHz
- Rango de Profundidad: 0 0,5 m
- Dimensiones físicas: 3,8 x 10 x 16,5 cm.
- Offset T –R: 58 mm.
- Peso: 1,8 Kg.

A2.3 Antecedentes del Comportamiento de la Antena 5100

A2.3.1. Polaridad de la Señal

La antena 5100 tiene dos dipolos paralelos Tx y Rx. La polaridad tiene como patrón un primer peak positivo seguido de uno negativo dentro de la señal radiada [6].

A2.3.2. Tiempo Cero de la Señal Recibida

Este tiempo indica la posición de la superficie en el radargrama, debe ser probado en terreno, según los parámetros y condiciones de cada medición. Teóricamente una buena aproximación para la ubicación de la superficie es – 0,1 ns antes del primer peak positivo [14].

A2.3.3. Características de la Señal Recibida según el Material

El cálculo de la longitud de onda varía según la velocidad de propagación de la señal al interior de un determinado medio, según la fórmula:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$
,

Según las distintas premitividades registradas en las diferentes estructuras de hormigón armado estudiadas, se obtiene la siguiente tabla:

Tipo de estructura	Espesor (cm)	3	Veloc. (m/ns)	λ (m)	Máxima resolución H (cm)
Muro exterior	21	9.37	0.098	0.065	1.6
Losa interior	13	9	0.1	0.067	1.6
Losa exterior	13	9.37	0.098	0.065	1.6
Pilar	65	9	0.1	0.067	1.6

Tabla A2.1: Comparación de los distintos tipos de superficies que se estudiaron.