



# Evaluación no destructiva y calidad en estructuras

Trabajo fin de curso doctorado  
Alumno: Juan Carlos Calvo Rivera

# LA EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE MATERIALES ESTRUCTURALES Y PUENTES

- TECNICAS PARA LA INSPECCIÓN DE PUENTES
  - 1.- RADAR DE PENETRACIÓN (GPR)
    - 1.1.- METODOLOGÍA HERMES
    - 1.2.- METODOLOGÍA PÉRES
  - 2.- SENSORES MAGNETO – RESTRICTIVOS
    - 2.1.- DETECCIÓN DE CORROSIÓN EN CABLES Y ARMADURAS
    - 2.2.- DETECCIÓN DE DEFECTOS EN CABLES Y ARMADURAS
    - 2.3.- EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE CURADO DEL HORMIGÓN
    - 2.4.- DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN EN CABLES Y TIRANTES
  - 3.- SENSORES DE CORROSIÓN
  - 4.- ANTENA ELECTROMAGNÉTICA



# TECNICAS PARA INSPECCIÓN DE PUENTES



## INTRODUCCIÓN:

Las técnicas tradicionales de detección de defectos mediante Ensayos No Destructivos se pueden aplicar en algunos elementos estructurales de los puentes, sin embargo es necesario puntualizar que se ha requerido el desarrollo de técnicas específicas para la inspección de algunos elementos que, por su difícil acceso o sus características propias, no se pueden evaluar con las técnicas tradicionales.

Los problemas que resultan de mayor importancia son:

- la detección y evaluación de grietas ocasionadas por fatiga en los elementos de acero
- la evaluación rápida de la losa de hormigón
- la evaluación del acero en el hormigón postesado
- la incorporación del monitoreo estructural dentro de sistemas integrales de conservación de la administración de puentes

# 1.- RADAR DE PENETRACIÓN (GPR)

- Introducción:

El radar de penetración se empleó inicialmente en investigaciones geofísicas en la minería y en estudios de paleontología. Es a partir de 1985 que se ha desarrollado como una importante herramienta de evaluación no destructiva del estado del hormigón en puentes. Sin embargo hasta la fecha no ha evolucionado lo suficiente debido al elevado coste de los sistemas que requiere para la aplicación de dicha técnica, y de la complejidad de análisis de la evaluación de datos que aporta.

Sin embargo, la investigación en torno a estos sistemas continúa por el potencial que tiene para evaluar la condición interna de puentes y carreteras, principalmente para detección de daño oculto, como el daño por corrosión.

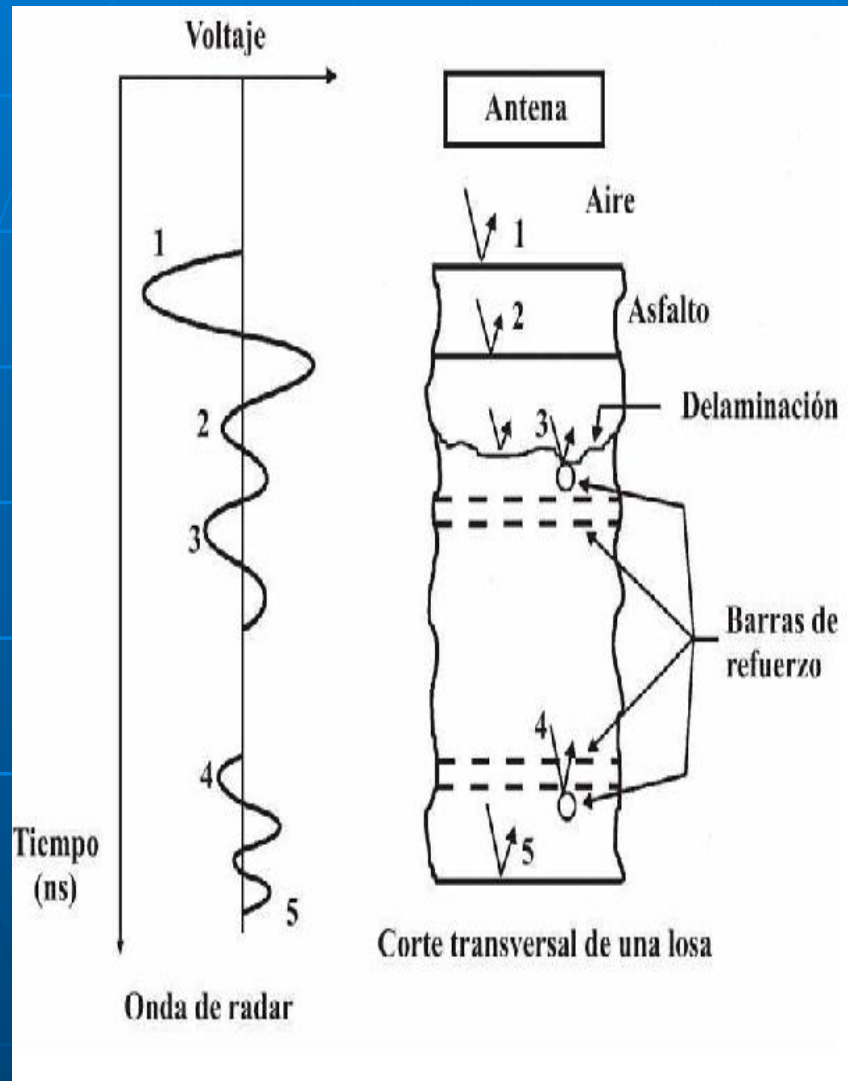


# Principios de operación del radar de penetración (GPR)

El principio de operación del radar de penetración (GPR), (figura 1) consiste en emitir una onda electromagnética, en un ancho de banda de 500 MHz a 6 GHz desde una antena colocada en la superficie de interés.

Las ondas electromagnéticas se reflejan y transmiten en las diferentes interfaces de la losa de hormigón debido a las variaciones en las propiedades dieléctricas de los diferentes materiales, y que influyen en la atenuación y dispersión de las ondas electromagnéticas.

El diagnóstico de la condición interna del concreto se realiza mediante la interpretación de las ondas reflejadas que se miden con una antena receptora.



En el modelo más simple, las ondas electromagnéticas se representan como ondas planas; y los sólidos, como una red de capas de extensión infinita, donde los materiales se clasifican como metálicos (buenos conductores) o dieléctricos (malos conductores).

Las ondas electromagnéticas se propagarán en el hormigón hasta que encuentre la frontera de otro material conductor (acero), donde una parte de la onda se reflejará, y otra será transmitida a través del mismo material.

La interpretación de la información de las ondas reflejas se analiza con base en la amplitud y polaridad de las mismas, que dependen de la relación de las constantes dieléctricas de los materiales por los que las ondas pasan.

# Pasos a seguir para obtener datos fiables:

## **1.- Emisión de las ondas electromagnéticas.**

Las ondas deben emitirse desde una antena con suficiente amplitud, sin distorsión y a una frecuencia constante.

## **2.- Posición y ángulo de la antena.**

Hay que colocarla en dirección transversal a la losa del puente, de tal manera que la altura y el ángulo permanezcan constantes. La posición relativa de la antena sobre los puntos de interés debe registrarse.

## **3.- Posición y ángulo de la antena receptora.**

La antena receptora puede ser la misma que la que emite las ondas electromagnéticas, pero es factible emplear una segunda antena que debe colocarse posición transversal a la losa del puente.

## **4. Procesamiento de las señales.**

Las señales deben procesarse de acuerdo con las características del equipo empleado, que por lo general es uno de cómputo portátil y algoritmos sofisticados de análisis.

## **5. Interpretación de las señales.**

Los datos de la inspección por radar de penetración deben correlacionarse con información complementaria del estado del puente o estructura. Estos datos generalmente provienen de una inspección visual, o de otras técnicas de evaluación destructiva (extracción de testigos), o no destructiva (identificación de armaduras por ultrasonido).

# 1.1.- METODOLOGÍA HERMES

La metodología Hermes utiliza un radar de penetración que contiene 64 antenas en canales independientes de registro y medición, a partir de los cuales se procesa una imagen simple en 2 o 3 dimensiones. Los datos se alinean geométricamente con la posición de cada antena.

Para formar la imagen del interior de la losa, con los datos sincronizados se alimenta a un programa de modelación que resuelve el problema inverso.

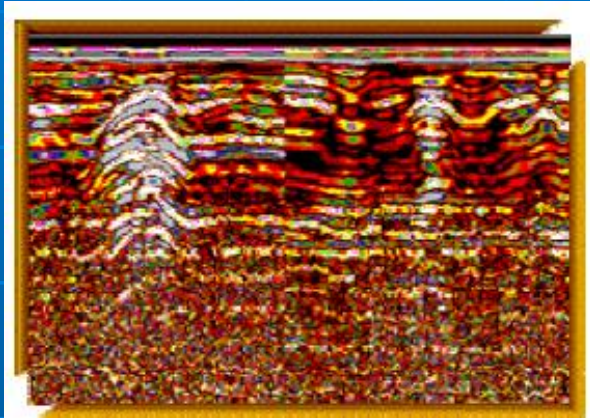
Las imágenes resultantes son referidas como reconstrucciones semejantes a las obtenidas con técnicas de resonancia magnética, o la tomografía computarizada.

Actualmente, el sistema Hermes se ha probado en varios puentes de los EEUU y, para ello, se remolca por un camión que circula sobre el puente a una Velocidad constante.

Durante la exploración de la losa, son necesarias varias pruebas para analizar el efecto de la velocidad, el espesor de la losa, y la configuración de las antenas, sobre la calidad de los resultados.



# Aplicación y resultados HERMES



Imágenes 2 D y 3 D una vez  
procesado los datos

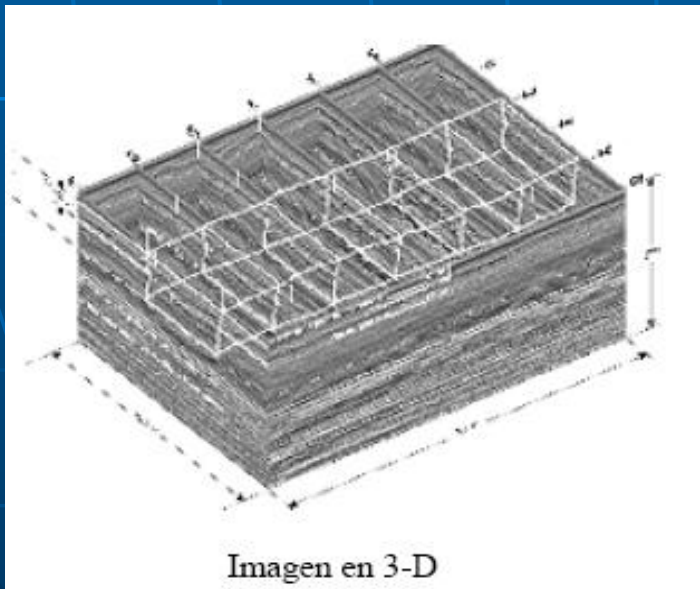


Imagen en 3-D



Auscultación tablero puente mediante Rádar de  
penetración HERMES

## 1.2.- Metodología Peres

Las pruebas con metodología Peres se han enfocado a inspecciones sobre losas prefabricadas. Para validar y calibrar los resultados se recurrió a losas de hormigón con defectos simulados que se prueban en laboratorio.

Parámetros como la altura de la antena; la frecuencia del pulso; el intervalo de muestreo a través de la superficie; las ganancias, y los filtros, se modifican fácilmente por el operador para dar gran flexibilidad a esta técnica.

El objetivo principal de este método es localizar zonas con huecos, así como predecir las áreas donde se formarán los mismos. Lo anterior es posible si se observan las condiciones que ocasionan la corrosión, como son la identificación de altos niveles de agua y/o cloruros, como parámetros que se espera medir ya que son indicativos de áreas en las que favorece la formación de huecos.



Para corroborar las indicaciones del radar de penetración, se realizan actualmente pruebas controladas de laboratorio, a la vez que hay programas de validación muy extensos en todo los Estados Unidos y Europa.

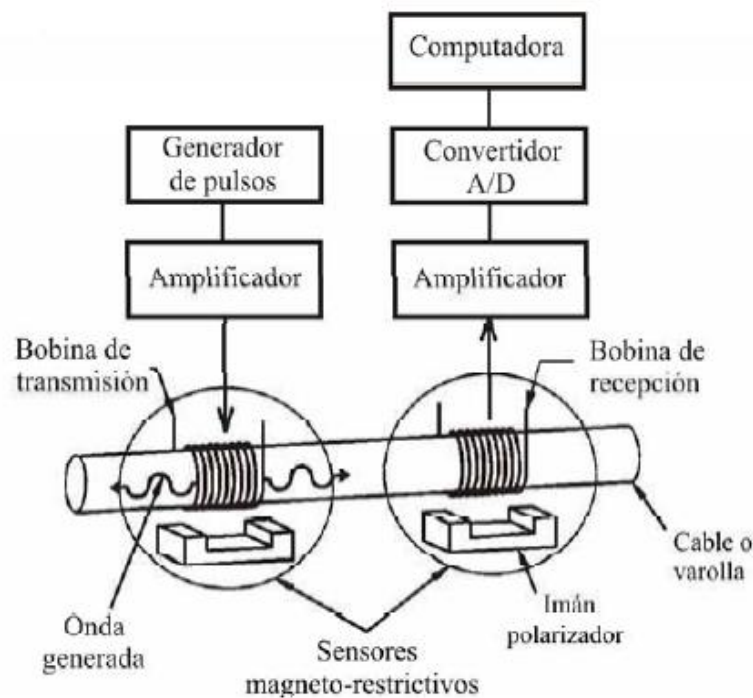
## 2.- SENSORES MAGNETO - RESTRICTIVOS

### **INTRODUCCIÓN:**

Fueron desarrollados en 1996 en Texas por el Southwestern Research Institute [32,33] para la evaluar la severidad de la corrosión en armaduras y cables de tesado. Este centro de investigación desarrolló una serie de experimentos para conocer los alcances y la sensibilidad de la técnica para detectar la corrosión en materiales embebidos hormigón, e inferir el tiempo de curado del hormigón, localizar fracturas en los cables o armaduras, y medir la tensión en cables.

La técnica consiste básicamente en generar ondas elásticas en un alto ancho de banda en el material de inspección, las cuales se detectan posteriormente con un sensor magneto-restrictivo. Las señales respectivas se analizan en el dominio del tiempo y de la frecuencia, con particular atención a los cambios de atenuación y dispersión de las ondas.





El sistema magneto-restrictivo está formado por dos bobinas que circundan al material de inspección, dos sensores magneto-restrictivos, un generador de pulsos eléctricos de corta duración, un amplificador, un acondicionador de señales, y un sistema para la adquisición y almacenamiento de datos.

En la aplicación de la técnica no es necesario que los sensores magneto-restrictivos estén en contacto directo con los materiales ferromagnéticos para medir las ondas elásticas; además, se pueden inspeccionar grandes longitudes empleando un sólo sensor sin necesidad de un acoplamiento especial y a un bajo costo. Todas estas ventajas la hacen muy atractiva esta técnica actualmente en desarrollo.



**El principio de funcionamiento consiste en generar un pulso eléctrico de corta duración, el cual se amplifica. El pulso amplificado pasa a través de la bobina, la que aplica un campo magnético al cable que genera una onda elástica en el acero por el efecto magneto-restrictivo.**

**La onda elástica se propaga en ambas direcciones del cable, pasa sobre el sensor de recepción magneto-restrictivo y cambia la inducción magnética del acero debido al efecto de Villari. Los cambios en la inducción magnética generan un voltaje eléctrico en la bobina receptora, que se amplifica, filtra y procesa.**

## 2.1.- Detección de corrosión en cables y armaduras

Para validar la detección de corrosión en cables y armaduras se realizó un estudio en el que se indujo corrosión a siete cables y diez armaduras.

Los elementos se enterraron y se indujo corrosión en ellos mediante un baño semanal de ácido sulfúrico y soluciones salinas. Cada semana se desenterraban y monitoreaban con los sensores magneto-restrictivos. Los resultados fueron favorables, ya que se identificaron de manera notoria, variaciones constantes en el aumento de atenuación de la señal de acuerdo con el grado de corrosión que se iba presentando en los cables y armaduras.

De ahí se concluyó que la técnica provee una alternativa para la inspección de estos elementos con base un método que no requiere el contacto directo.



Las figuras 1 y 2 muestran datos típicos de la señal en el dominio del tiempo y su espectro en frecuencia en diez cables de tesado sin corrosión.

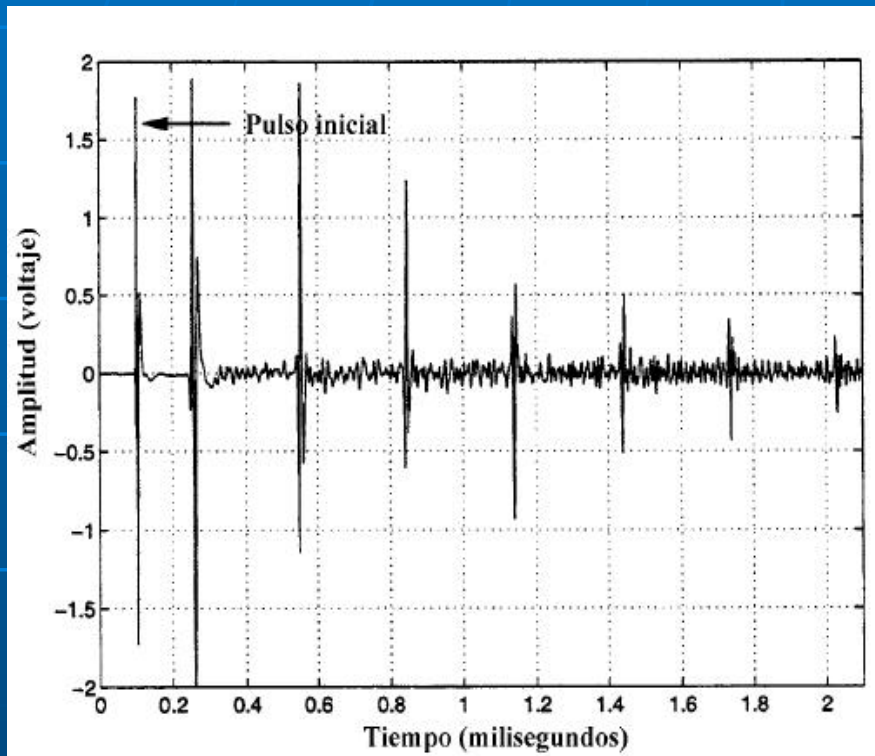


Fig. 1.  
Resultados típicos mediciones  
magneto – restrictivas en  
armaduras de acero no corroídas

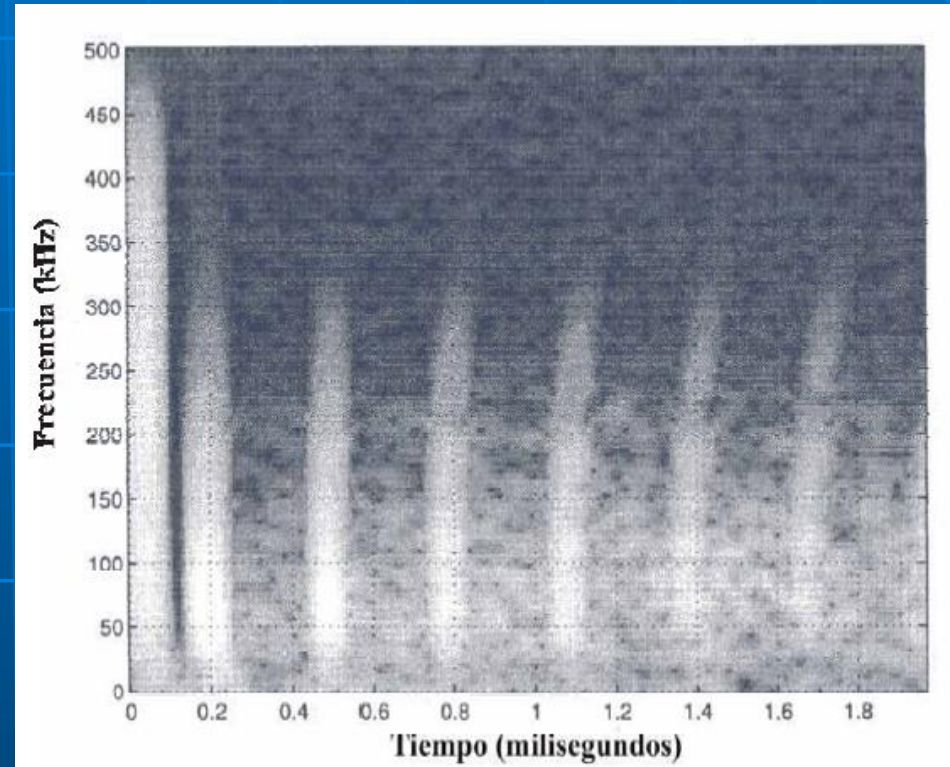
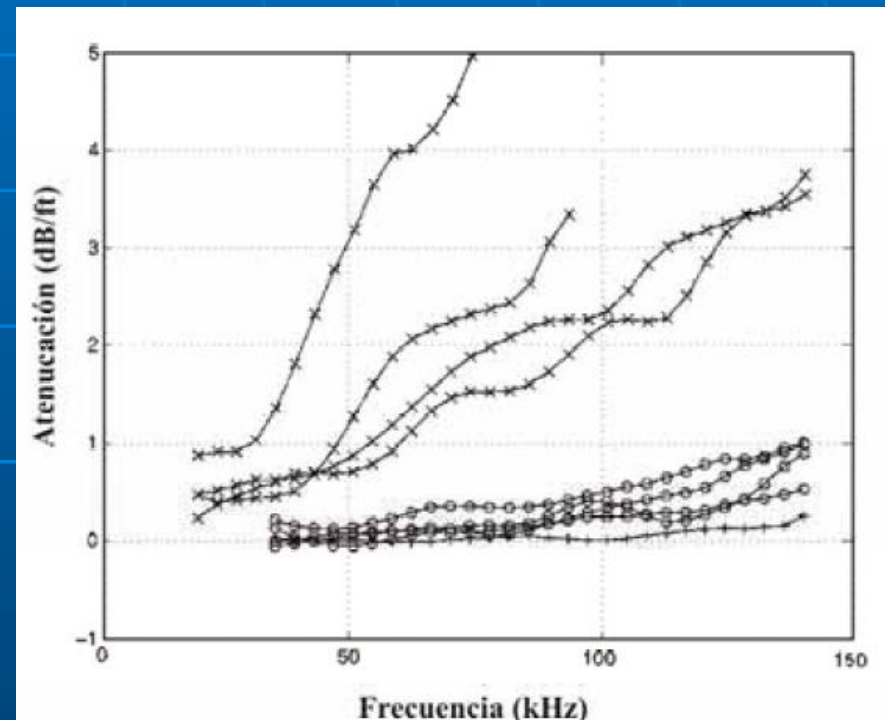
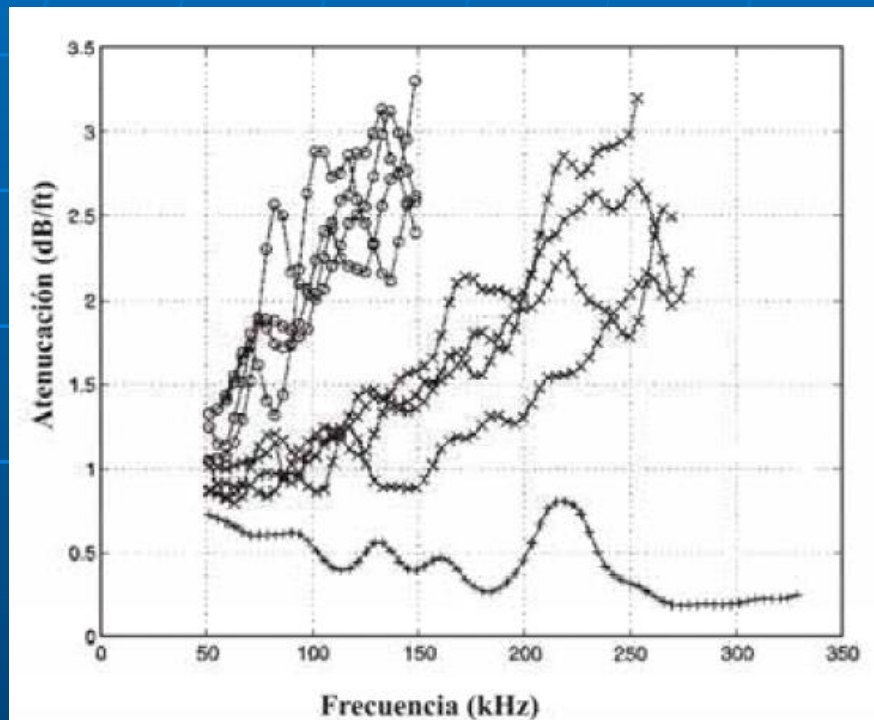


Fig. 2.  
Espectrograma de los resultados de  
la fig. 1

En la figura 3.a aparecen los resultados obtenidos con los cables, y en la 3.b los correspondientes a las armaduras. Se midieron tres condiciones de daño por corrosión: 0%, 5% y 10% para las armaduras, y 0%, 15% y 30% para los cables. Es importante notar en estas figuras las variaciones en la atenuación a medida que aumenta la corrosión, siendo más sensibles los cables al inicio del daño.



Atenuación vs frecuencia. (+) Sin corrosión, (o) Nivel Medio de daño por corrosión, (x) Nivel alto de daño por corrosión

## 2.2.- Detección de defectos en cables y armaduras

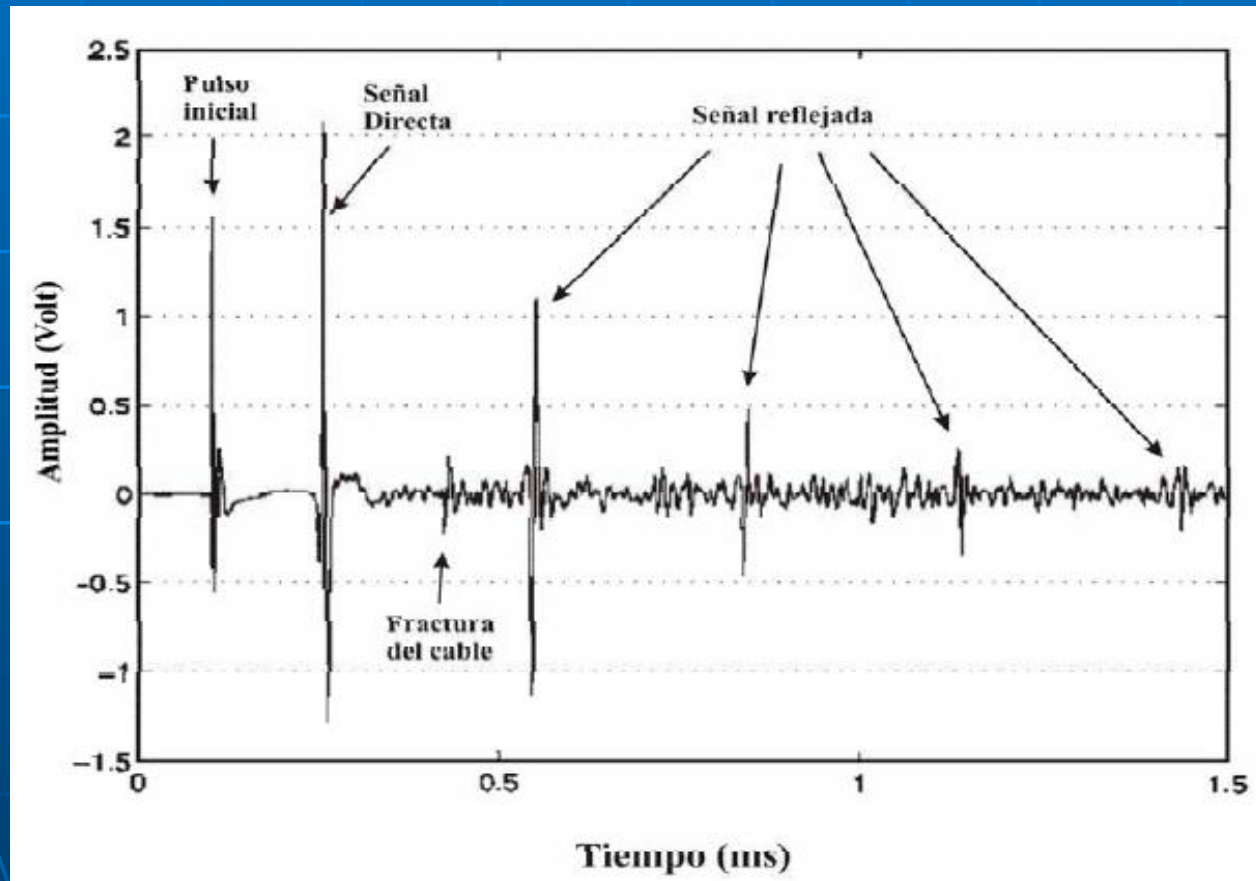
Para localizar defectos en estas geometrías, el conocimiento del comportamiento de la atenuación como función de la frecuencia, es importante para seleccionar la frecuencia de inspección.

Por ejemplo, en la de muestras sin corrosión, la frecuencia óptima está en un rango de 50 a 300 kHz, con la ventaja de que las altas frecuencias son capaces de inspeccionar distancias más grandes. Las curvas de atenuación proporcionan una línea base de la relación *ruido-señal* cuando se busca defectos en cables y armaduras con un nivel de corrosión conocido.

Es importante mencionar que la detección de defectos en los cables o armaduras embebidas en hormigón es difícil, ya que el hormigón genera dos problemas: el primero de ellos es el difícil acceso a los elementos para colocar la bobina, y el segundo es la alta atenuación de la señal que limita la capacidad de inspección a distancia.



Los sensores detectan defectos, o la falla de uno de los cables mediante el análisis de la señal medida en tiempo por el sensor receptor. La onda elástica transmitida en el cable se refleja donde se encuentra un cable roto. La ubicación del defecto se calcula a partir de la velocidad de la onda y el tiempo que tarda en llegar al sensor receptor.



Señal reflejada en un cable de 20 pies de largo, con un reflejo debido a la fractura de un hilo

## 2.3.- Evaluación del tiempo de curado del hormigón

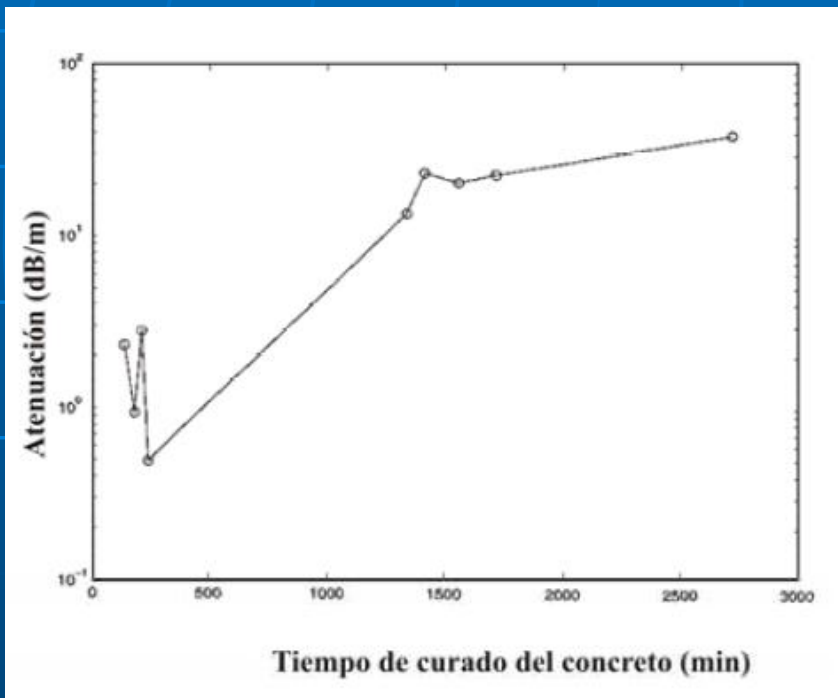
Para evaluar la capacidad de los sensores magneto-restrictivos para determinar el nivel de curado del hormigón, se han realizado pruebas en las que los sensores quedan embebidos en el hormigón y se mide su respuesta durante todo el proceso de curado. En este caso, por cada cable se colocan tres sensores Magneto-restrictivos, dos receptores, y un emisor. Cuando el hormigón comienza a curar se inducen las ondas elásticas, mediante un golpe sobre el hormigón.

Con estas pruebas se correlaciona el cambio de velocidad en la propagación de las ondas elásticas, y su atenuación con el tiempo de curado (figura 2.3.1).

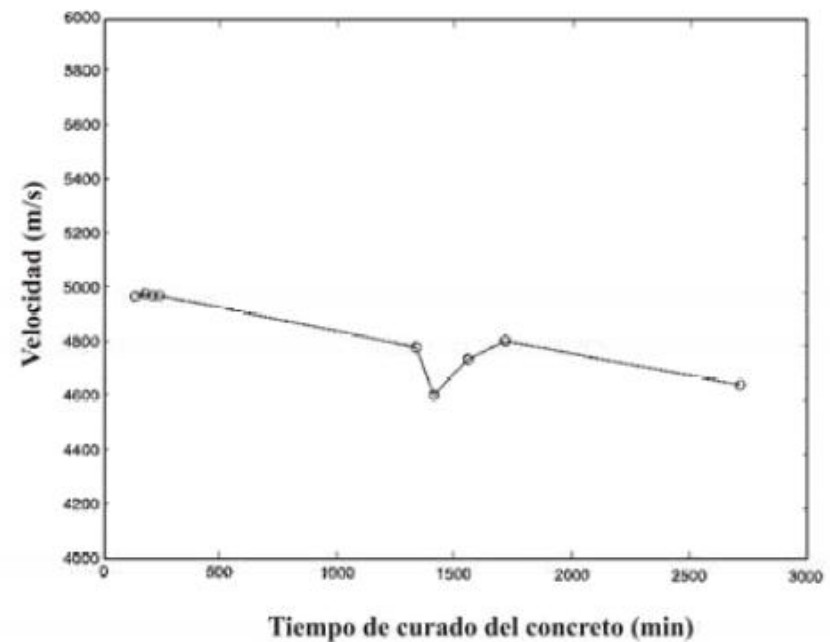
Se concluye que la técnica puede ser buena para determinar el curado del hormigón, sin embargo, se necesitan más pruebas para determinar los valores de calibración de los diferentes tipos de hormigón.

# Variaciones de la onda elástica, como función del curado del hormigón

Atenuación de la onda elástica



Velocidad de propagación de la onda elástica





## 2.4.- Determinación de la tensión en cables

El nivel de tensión de los cables puede determinarse con los sensores Magnetorestrictivos y estudios experimentales con cables sujetos a diferentes niveles de tensión en los que, se ha observado que la frecuencia de la señal aumenta a medida que la tensión se incrementa (figura 2.4.1).

Eso lleva a considerar que esta técnica puede servir como una nueva herramienta no destructiva en la evaluación de la tensión de los cables en puentes atirantados o postesados, aunque aún falta desarrollar la metodología específica de cada caso y determinar las curvas de calibración.

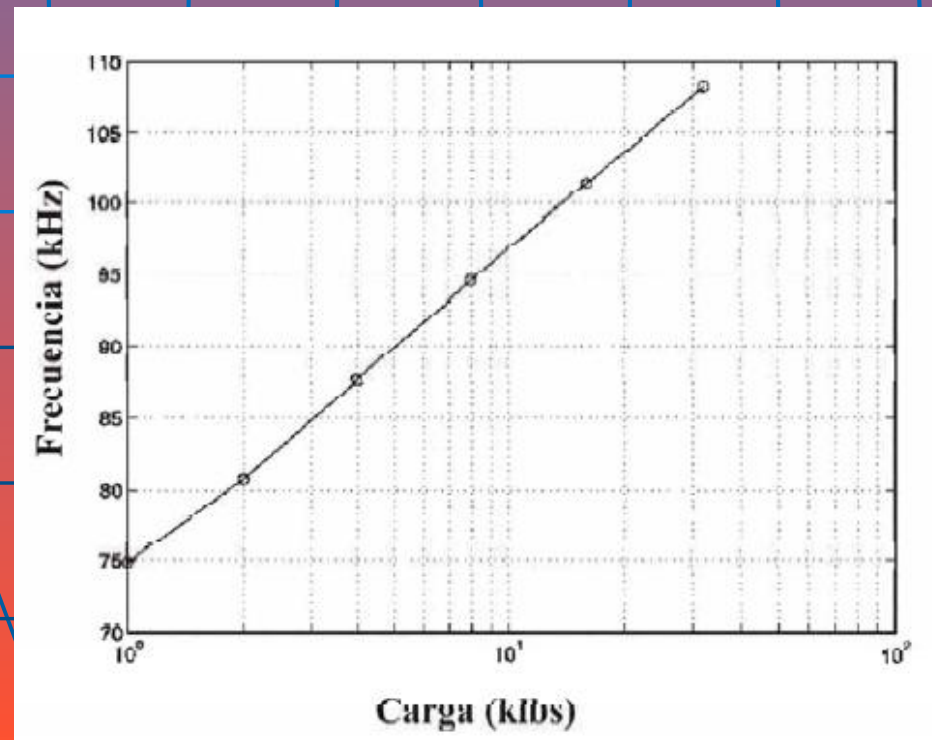


Figura 2.4.1

### 3. Sensores de Corrosión

La degradación del acero en el hormigón postensado representa un elevado costo en el mantenimiento no programado de la infraestructura. Esta degradación se incrementa considerablemente a medida en que la edad de la infraestructura es mayor. La tecnología actual para el monitoreo de la corrosión del hormigón se basa en la correlación entre parámetros químicos como la concentración de cloruros, y el grado de corrosión, o sobre variables externas e inclusive en el comportamiento de la armadura.

Aunque generalmente se acepta que el contenido de cloruros determina el avance de la corrosión, esta medida indirecta del grado de corrosión ignora otros efectos importantes como la carbonatación, que se presentan en diferentes condiciones. La corrosión es un fenómeno electroquímico en el que ocurren reacciones químicas en las que hay una transferencia de carga a través de una interfase, usualmente metal-electrolito. El potencial eléctrico a través de la interfase controla la proporción de la reacción y, por tanto, el avance de la corrosión. El potencial se mide generalmente con respecto a un electrodo de referencia, y se dice que cuando el valor del potencial es más positivo, las reacciones de oxidación se aceleran (disolución del metal), y que cuando es más negativo, se presentan reacciones de reducción.

La proporción de una reacción electroquímica depende de la facilidad de transferencia de carga a través de la superficie, el transporte de iones de la solución a la superficie y las reacciones químicas. Sólo la razón de Transferencia de carga aumenta con el potencial aplicado. En el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), la oxidación del metal es balanceada por la reducción de reacciones en la superficie del metal; por tanto, no se requiere de una corriente externa. De ello, es que el potencial de corrosión sea el parámetro para determinar la medida del nivel de daño en una estructura.

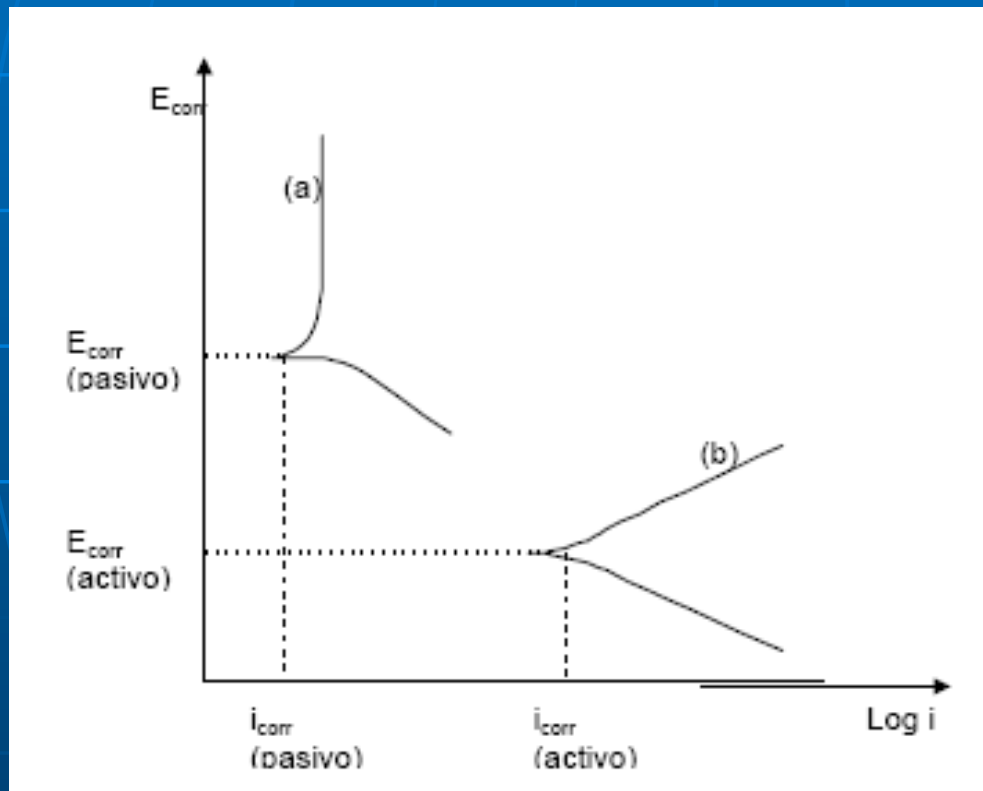
Si el metal se cubre con una densa capa de óxido y el contacto entre la solución y el metal se bloquea, el metal se mantiene en condición pasiva, y la razón de corrosión es baja. En esta última situación, los valores de  $E_{corr}$  son cientos de milivolts más altos que en los estados activos.

La corrosión puede investigarse a través del cambio de potencial en el electrodo de referencia, ya que la corriente cambia linealmente con el potencial tendiendo al valor de  $E_{corr}$ . De la pendiente del potencial/corriente, la resistencia de Polarización puede ser calculada, y la razón por el cual el metal se disuelve en el  $E_{corr}$ .

La curva corriente-voltaje muestra la formación de capas pasivas y permite conocer la naturaleza de las reacciones catódicas. Los valores de  $E_{corr}$ , por tanto, permiten establecer el grado de actividad del metal, y las mediciones obtenidas de las curvas de corriente/voltaje determinan la velocidad de la corrosión.



La figura 3.1 describe el significado por el cual las medidas electroquímicas pueden ser interpretadas para monitorear la corrosión en acero reforzado en el hormigón. Por el monitoreo de  $E_{\text{corr}}$ , la actividad de corrosión en el acero es evaluada. Desafortunadamente, la interpretación de tales mediciones suele ser difícil; sin embargo, la medición de la razón de corrosión se complementa usando la medición de la resistencia de polarización ( $R_p$ ).



En teoría, estas mediciones pueden hacerse remotamente, pero existen complicaciones en la interpretación cuando en estructuras hay una distribución espacial de las regiones activas y pasivas, como es usualmente el caso.

Medidas de la concentración de cloruros, en combinación con  $E_{\text{corr}}$  y  $R_p$ , son necesarias para determinar las regiones afectadas por corrosión en el concreto.

**Curvas corriente/ potencial para un acero en estado activo y pasivo**

Los tres parámetros principales para evaluar la corrosión emplean un circuito muy similar en sus lecturas. Un amplificador operacional es la base en el circuito; otro, con memoria provee una interfase de alta impedancia que mide los voltajes sin afectar las interfases bajo estudio. La lectura del  $E_{corr}$  se obtiene comparando el acero que trabaja como electrodo con el electrodo de referencia, la evaluación de los cloruros se logra cuantitativamente comparando el voltaje de un electrodo específico (Ag/AgCl) con el electrodo de referencia. En la lectura de la resistencia de polarización se requiere un potencióstato, y un amperímetro de resistencia cero.

A partir de los principios anteriores la Universidad de Virginia desarrolló varios sensores que pueden embeberse en hormigón y que miden en forma continua el potencial de corrosión.

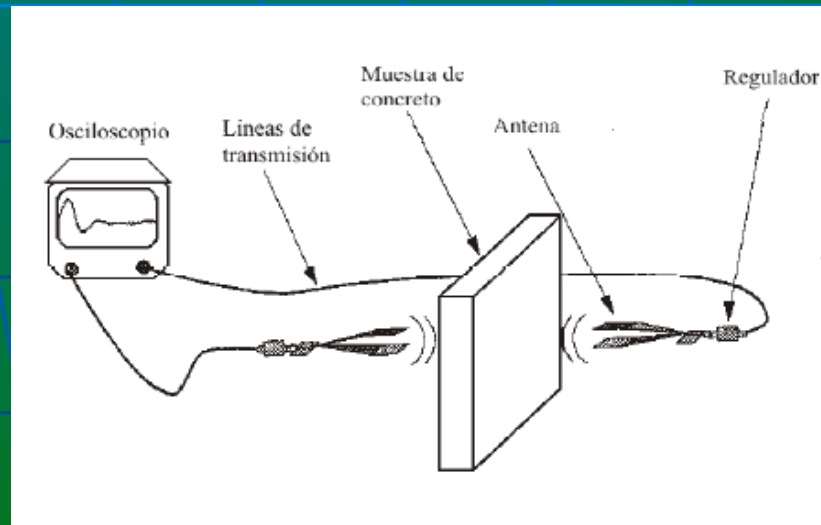
Entre las características más importantes de estos sensores es que son pequeños, utilizan transmisores inalámbricos que alcanzan una distancia de 15 metros y son relativamente de bajo costo.

Los sensores, tanto de corrosión como de conductividad, trabajan muy bien y presentan una buena alternativa para el monitoreo continuo en este tipo de estructuras, Actualmente se siguen aplicando para valorar su operación y prolongar su vida útil.

## 4. Antena Electromagnética

Para comprender las propiedades dieléctricas del hormigón y correlacionar sus propiedades con la severidad y el tipo de defectos internos, se han realizado estudios para medir la permitividad y permeabilidad magnética del hormigón en un rango de frecuencias de 100 kHz a 10 GHz, tanto en el dominio del tiempo como en el de frecuencia.

En uno de esos estudios del Instituto Politécnico de Virginia, se diseñó una antena electromagnética (figura 4.1.), que consiste en un capacitor con una placa paralela, una línea de transmisión con un cable coaxial y una antena que transmite ondas electromagnéticas. Para evaluar el desempeño de la antena se fabricaron losas de 60x75x14 cm con defectos y sin defectos. Los defectos colocados en las losas incluían huecos, huecos con agua, segregación y contaminación de cloruros.





La antena responde a impulsos cortos para preservar su frecuencia; por tanto, operar en el dominio del tiempo. Se construyó con dos elementos; cada uno está formado por una sección triangular (7.62 cm de base, y 30.26 cm de longitud), y una extensión de la placa paralela. Cada sección de la parte triangular de la antena consiste en dos vidrios con un recubrimiento de cobre en un lado. El ángulo entre las dos superficies de cada sección triangular es  $17.4^\circ$  y la parte final de las secciones se conecta a una placa paralela con una sección de (7.62 cm x 7.62 cm).

La sección paralela de sección tiene cuatro columnas de resistores, cada una con diez unidades para minimizar los efectos de resonancia así como las reflexiones secundarias de las señales en el dominio del tiempo, y que corresponderían a respuestas distorsionadas a baja frecuencia en el dominio de la frecuencia.

Para la geometría descrita, la impedancia de un elemento sencillo es de  $200\Omega$ ; pero como hay dos elementos en paralelo, la impedancia de la antena es de  $100\Omega$ . Un transformador se emplea para acoplar la señal transmitida a la entrada de la antena, que también permite balancear 100 W en la antena para ser alimentados a 50 W por un generador de pulso coaxial.

El diseño de la antena permite medidas en un rango de frecuencias de 0.5 GHz a 15 GHz. Sin embargo, las mediciones de la constante dieléctrica presentan irregularidades en el cálculo del coeficiente de propagación en frecuencias menores de 1GHz, y mayores de 10 GHz.

Por tanto, la evaluación de la constante eléctrica se mantiene en el rango de 1 a 10 GHz. De los resultados en las pruebas se concluye que la contaminación de cloruros pueden detectarse en el rango de microondas a través del análisis de la amplitud de la onda y sus variaciones.

De igual forma, la segregación también se detecta con algunas complicaciones, si la zona segregada contiene agua, aunque por otra parte, las áreas de huecos con agua pueden ser cuantitativamente localizadas con un análisis de las ondas, o midiendo las propiedades dieléctricas del material.

# Referencias

- B D Olin, y W G Meeker, *Application of Statistical Methods to Nondestructive Evaluatio*, Technometrics, Vol **38**, No 2, pp 95-130, (1996).
- ASNT, *Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification*, **American Society for Nondestructive Testing**, Recommended Practice **SNT-TC-1A**, (2001).
- D E Bray y D. McBride Eds., *Nondestructive Techniques*, **John Wiley and Sons**, New York, (1992).
- D R Huston, J Q Hu, K R Maser, W H Weedon, y C Adam, *Ground Penetrating Radar for Concrete Bridge Health Monitoring Applications*, *Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III*, **SPIE 3587**, Newport Beach, pp 170-179, (1999).
- R M Morey, *Innovative GPR for Pavement Inspection*, *Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III*, **SPIE 3587**, Newport Beach, pp 200-209,(1999).