



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional

Unidad Oaxaca

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales

(Ingeniería)

CARACTERIZACION DE PROCESOS FISICOS EN MATERIALES BASADOS EN CEMENTO MEDIANTE INTERFEROMETRIA ULTRASONICA

Tesis que para obtener el grado de Maestro en ciencias

Presenta:

Eduardo Cortes Ortiz

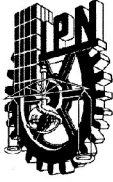
Directores de Tesis:

Dr. Andrés Pech Pérez

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Santa Cruz Xoxocotlan, Oaxaca.

Junio de 2011.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 02 del mes de JUNIO del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **“Caracterización de procesos físicos en materiales basados en cemento mediante interferometría ultrasónica”**

Cortés

Apellido paterno

Ortiz

materno

Eduardo

nombre(s)

Con registro:

A	0	9	0	2	6	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de tesis:

Dr. Andres Pech Perez

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Dr. Pedro Montes García

Dr. Francisco Castellanos León

Dr. Juan Alejandro Vazquez Feijoo

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Juan Rodríguez Ramírez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **02** del mes **junio del año 2011**, el (la) que suscribe **Eduardo Cortés Ortiz** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A090267**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dres. Andrés Pech Pérez y Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita y cede los derechos del trabajo titulado: **“Caracterización de procesos físicos en materiales basados en cemento mediante interferometría ultrasónica”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación. Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó eduardo-co@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Eduardo Cortés Ortiz



RESUMEN

Los iones cloruro juegan un papel muy importante en el deterioro de las estructuras de concreto armado. Existen diversos métodos de prueba para evaluar la resistencia de penetración de los iones cloruro en el concreto. Tradicionalmente los métodos empleados son de naturaleza destructiva y normalmente requieren de tiempo considerable para la obtención de resultados, ya sea a nivel laboratorio o en estructuras en campo.

Es por lo tanto deseable explorar otras técnicas no destructivas para evaluar el ingreso de cloruros en el concreto que sean rápidas y confiables.

El ultrasonido ha sido usado para determinar diversas propiedades del concreto tales como espesor, resistencia, defectos internos, así como monitorear el fraguado y endurecimiento; sin embargo, no ha habido ningún esfuerzo de investigación relacionado con el uso de técnicas basadas en ultrasonido para detectar el ingreso de iones de cloruro en materiales a base de cemento.

El objetivo de este trabajo es demostrar la capacidad de la técnica de interferometría ultrasónica como una técnica altamente sensitiva para detectar cambios en la respuesta de pastas de cemento cuando agua destilada o soluciones de cloruro de sodio al 16.5% y 33% penetran el material poroso por flujo capilar o por una saturación al vacío. Los resultados demuestran la capacidad de esta técnica para detectar cambios en la señal de respuesta resultantes de la diferencia en los líquidos que penetran la muestra.

Palabras clave: iones cloruro, ultrasonido, pasta de cemento.

ABSTRACT

Chloride ions play an important role in the deterioration of concrete structures. There are several test methods for evaluating the resistance of penetration of chloride ions in concrete. Traditionally the methods used are of a destructive nature and usually require considerable time to obtain results either at laboratory or field structures.

It is therefore desirable to explore other non-destructive techniques to evaluate the chloride penetration in concrete that are quick and reliable.

Ultrasound has been used to determine various properties of concrete such as thickness, strength, internal defects and monitor the setting and hardening, but there has been no research efforts related to the use of ultrasound-based techniques to detect entry of chloride ions in cement-based materials.

The aim of this paper is to demonstrate the ability of the ultrasonic interferometry technique as a highly sensitive technique to detect changes in the response of cement paste when distilled water or sodium chloride solution to 16.5% and 33% penetrate the porous material by capillary flow or vacuum saturation. The results demonstrate the ability of this technique to detect changes in the response signal corresponding to the difference in the fluids that penetrate the sample.

Keywords: chloride ions, ultrasound, cement paste.

AGRADECIMIENTOS

Al **Instituto Politécnico Nacional** y **CIIDIR-Unidad Oaxaca** por haberme brindado las facilidades para la realización de este trabajo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por la beca de maestría otorgada en el periodo del año 2008-2010.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por el financiamiento otorgado a los proyectos de investigación “Integración tecnológica para el mejoramiento de los modelos de velocidad y su empleo en la migración PSDM para la visualización de plays subsalinos en el golfo de México”, Clave Conacyt 128376 y “Resonancia magnética nuclear como técnica no destructiva y no invasiva para estudiar microestructura y fenómenos del transporte en medios porosos”, Clave Conacyt 103763.

A la **SIP** del **IPN** por el apoyo otorgado a los proyectos: “Caracterización de tiempos de tránsito no hiperbólicos registrados en medios que presentan simetría hexagonal inclinada” clave 20110264 y “ Resonancia magnética nuclear para la evaluación no destructiva del desarrollo de propiedades mecánicas y refinamiento de porosidad en materiales basados en cemento”, claves 20100391, 20110616.

Al **Instituto Politécnico Nacional** por la beca tesis otorgada a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado.

A la **COFAA** (Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del Instituto Politécnico Nacional) por otorgarme la beca PIFI (Programa Institucional de Formación de Investigadores) de enero de 2009 a junio de 2011.

Un agradecimiento especial para el Dr. Andrés Pech Pérez y al Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita por sus enseñanzas, su paciencia, consejos y su gran apoyo brindado durante los estudios de posgrado.

CONTENIDO

CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION.....	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Planteamiento del problema</i>	3
1.3 <i>Justificación</i>	3
1.5 <i>Objetivos</i>	5
1.6 <i>Hipótesis</i>	6
CAPITULO 2. MARCO TEORICO	7
2.1 <i>Principios básicos del ultrasonido</i>	7
2.1.1 <i>Definición de ultrasonido</i>	7
2.1.2 <i>Frecuencia, periodo y longitud de onda</i>	8
2.2 <i>Caracterización de materiales por la técnica de pulso ultrasonico</i>	9
2.3 <i>Fundamentos de propagación de ondas</i>	11
2.3.1 <i>Interferometría</i>	13
2.4 <i>Análisis de Fourier</i>	13
2.4.1 <i>Series de Fourier</i>	14
2.4.2 <i>Serie de Fourier compleja</i>	16
2.4.3 <i>Transformada de Fourier</i>	22
2.5 <i>Espectrograma</i>	25
CAPITULO 3. MATERIALES Y METODO	26
3.1 <i>Materiales</i>	26
3.2 <i>Equipo</i>	27
3.3 <i>Método</i>	28
3.3.1 <i>Elaboración de los especímenes</i>	31

3.3.2 Método de prueba	32
3.3.2.1 Método utilizado en la Parte 1.....	32
3.3.2.2 Método utilizado en la Parte 2.....	33
3.3.2.3 Método utilizado en la Parte 3.....	34
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	36
4.1 Resultados Parte 1.....	36
4.2 Resultados Parte 2.....	38
4.3 Resultados Parte 3.....	48
4.2.1. Espectrogramas de los registros ultrasónicos de la Parte 2	49
CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES.....	56
REFERENCIAS	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Espectro acústico.....	8
Figura 2.2 Parámetros básicos de una onda.....	8
Figura 2.3. Señal compuesta y su espectro de frecuencias de la señal.....	26
Figura 3.1 Emisor-Receptor de alta tensión.....	27
Figura 3.2 Osciloscopio de fosforo digital.....	28
Figura 3.3 Transductores ultrasónicos.....	28
Figura 3.4 Procedimiento del experimento.....	30
Figura 3.5 Elaboración de los especímenes de pasta de cemento y perforación de los orificios.....	31
Figura 3.6 Obtención de datos ultrasónicos de la parte 1.....	33
Figura 3.7 Obtención de datos ultrasónicos de la parte 2.....	34
Figura 3.8 Saturación de las muestras al vacío y mediciones ultrasónicas.....	35
Figura 4.1. Cocientes espectrales de la muestra seca a la que después se le agrego a) gasolina b) alcohol octilico c) agua destilada d) solución NaCl 15% e) solución NaCl 33% f) glicerina; en el eje “x” tenemos el Tiempo en segundos y en el eje “y” tenemos la frecuencia en Hertz.....	37
Figura 4.2 Señales de las distintas pruebas usando agua destilada.....	38
Figura 4.3 Primeros arribos de la señal usando agua destilada.....	39
Figura 4.4 Últimos arribos de la señal usando agua destilada.....	39
Figura 4.5 Señales de las distintas pruebas usando una solución de NaCl al 16.5%.	40
Figura 4.6 Primeros arribos de la señal usando una solución de NaCl al 16.5%.	41
Figura 4.7 Últimos arribos de la señal usando una solución de NaCl al 16.5%.	41
Figura 4.8 Espectros de frecuencia de a) una muestra seca y después de haber absorbido b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13, ñ)14, o)15 gotas de agua destilada; en el eje “x” tenemos el Tiempo en segundos y en el eje “y” tenemos la frecuencia en Hertz.....	45

Figura 4.9 Espectros de frecuencia de a) una muestra seca y después de haber absorbido b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13, ñ)14, o)15 gotas de una solución de NaCl 16.5%; en el eje “x” tenemos el Tiempo en segundos y en el eje “y” tenemos la frecuencia en Hertz.	47
Figura 4.10 Comparación de los grupos de señales de los diversos líquidos con la muestra en estado seco.	48
Figura 4.11. Espectros de frecuencia de a), c) ye) muestras secas,muestras minutos después de ser saturadas con b) agua destilada, d) solución NaCl 16.5% f)solución NaCl 33% ; en el eje “x” tenemos el Tiempo en segundos y en el eje “y” tenemos la frecuencia en Hertz.	50
Figura 4.12. Espectros de frecuencia de muestras minutos después de ser saturadas con a) agua destilada, c) solución NaCl 16.5% e)solución NaCl 33%, y siete días después de ser saturadas b)saturadas con agua, d) Solución NaCl 16.5% f)Solución NaCl 33%; en el eje “x” tenemos el Tiempo en segundos y en el eje “y” tenemos la frecuencia en Hertz.	52
Figura 4.13 Isoterma Freundlich típica	53
Figura 4.14 Relación entre contenido de cloruros ligados y el contenido total de cloruros de diferentes concretos.....	54

CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1 Introducción

La corrosión del acero de refuerzo es una de las principales causas del deterioro de estructuras de concreto en todo el mundo (Neville, 1995). Los iones cloruro penetran en el concreto por difusión, absorción capilar o como una combinación de ambos mecanismos, siendo un factor importante a considerar en la corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

Existen diversos métodos de prueba para evaluar la resistencia de penetración de los iones cloruro en el concreto. Tradicionalmente los métodos empleados son de naturaleza destructiva y normalmente requieren de tiempo considerable para la obtención de resultados, ya sea a nivel laboratorio o en estructuras en campo.

Es por lo tanto deseable explorar otras técnicas no destructivas para evaluar el ingreso de cloruros en el concreto que sean rápidas y confiables. La velocidad del pulso ultrasónico ha sido usado para determinar la resistencia del concreto (Popovics,1990) y defectos internos como grietas y vacios (Malhotra, 1991). Otras técnicas ultrasónicas han sido utilizadas para monitorear el fraguado y endurecimiento de morteros (Reinhardt, 2000), fraguado de pastas de cemento (Trtnik, 2009) y correlaciones entre porosidad y permeabilidad (Lafhaj,2006). Sin embargo, no ha habido ningún esfuerzo de investigación relacionado con el uso de

técnicas basadas en ultrasonido para detectar el ingreso de iones de cloruro en materiales a base de cemento.

Con este trabajo se pretende demostrar la capacidad de la técnica de interferometría ultrasónica como una técnica altamente sensitiva para detectar cambios en la respuesta de pastas de cemento cuando agua destilada o soluciones de cloruro de sodio al 16.5% y 33% penetran el material poroso por flujo capilar o por una saturación al vacío. Estos mecanismos de penetración de líquidos fueron escogidos porque son más rápidos comparados con la difusión.

El trabajo de investigación está conformado de cuatro capítulos. El Capítulo 1 es la introducción al tema desarrollado, donde se plantea el problema en estudio, la justificación de la investigación, los objetivos y finalmente la hipótesis que se planteó al inicio de la investigación. En el Capítulo 2, se abordan los principios básicos del ultrasonido, definición de interferometría ultrasónica; el análisis de Fourier y la definición de espectrograma. En el capítulo 3 se describen los materiales utilizados y los métodos usados durante la parte experimental de la investigación. El capítulo 4 contiene los resultados obtenidos y su discusión correspondiente de cada uno de los ensayos realizados. Por último se presentan las conclusiones de la investigación y recomendaciones

1.2 Planteamiento del problema

Los iones cloruro juegan un papel muy importante en el deterioro de las estructuras de concreto armado (Del Valle et al., 2001). En la evaluación de penetración de iones cloruro se utilizan habitualmente métodos destructivos que requiere un tiempo considerable para proporcionar resultados.

El ultrasonido se utiliza actualmente para caracterizar materiales basados en cemento, enfocándose principalmente en monitorear cambios en sus propiedades mecánicas (Stokoe, 1985), espesor (Krause, 1995), detección de defectos internos tales como grietas y vacíos (Schickert, 1995).

Siendo que actualmente no existen técnicas ultrasónicas para detectar el ingreso de iones cloruro en materiales basados en cemento, el problema se limitará a demostrar la capacidad de la interferometría ultrasónica como una técnica altamente sensitiva para detectar cambios en la respuesta de pastas de cemento al ingreso de cloruros.

1.3 Justificación

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los principales fenómenos que afectan la durabilidad de las estructuras. Actualmente los iones cloruro son reconocidos como uno de los principales causantes de una corrosión prematura del refuerzo. La corrosión en las estructuras de concreto causará una pérdida de servicialidad o una temprana falla estructural (Vickridge y Ranjbar, 1998).

Tradicionalmente métodos destructivos como la prueba AASHTO T259 “Resistance of Concrete to Chloride Penetration” (AASHTO, 1980) es usada para investigar la penetración de iones cloruro; esta prueba requiere muestras en polvo obtenidas por perforación o corte a determinadas profundidades y luego el contenido de iones cloruro es determinado. Debido a las condiciones de prueba, donde los mecanismos de penetración de cloruros son por absorción capilar y difusión, así como también incluyendo secado en una de las caras, la interpretación del perfil de concentración de cloruros no es simple. Además esta prueba consume demasiado tiempo y para concretos de alta calidad la prueba continua por mucho más tiempo.

La prueba NordTest (NordTest, NTBuild 443-94) conocida como prueba de acumulación o prueba de inmersión, es un avance con respecto a la prueba ASHTO T-259 ya que el único mecanismo de penetración de cloruros es la difusión. Determina la concentración de iones cloruro dentro del concreto a diferentes profundidades desde la superficie de exposición y empleando la solución a la segunda ley de Fick, dependiendo de las condiciones iniciales y de frontera, se determina el coeficiente de difusión de iones cloruro y la concentración superficial. En general esta prueba es más apropiada para investigaciones de laboratorio debido a su larga duración.

Otra prueba usada frecuentemente para medir la Resistencia de penetración del ion cloruro en el concreto es la prueba ASTM C 1202-94 test “Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” (ASTM C1202-94). Esta prueba determina la carga eléctrica total que pasa a través de la muestra durante un tiempo específico. Aunque no simula el transporte de iones cloruro en concreto expuesto a condiciones reales.

Por lo tanto se justifica explorar técnicas no destructivas que evalúen el ingreso de iones cloruro en el concreto a nivel laboratorio y en un futuro *in situ*.

1.5 Objetivos

Objetivo general

- Aplicar la técnica de interferometría ultrasónica para detectar la penetración y/o presencia de fluidos con distintas densidades y viscosidades dentro de materiales sólidos.

Objetivos específicos

- Detectar la presencia de fluidos con distintas propiedades físicas en un espécimen de resina de poliéster, a través de mediciones de tiempo de arribo y amplitudes de ondas ultrasónicas.
- Detectar la penetración o presencia de agua destilada y soluciones de cloruro de sodio en cubos elaborados con pasta de cemento, a

través de mediciones de tiempo de arribo y amplitudes de ondas ultrasónicas.

1.6 Hipótesis

La interferometría ultrasónica es una técnica capaz de detectar la penetración y/o presencia de fluidos con distintas densidades y viscosidades dentro de materiales sólidos.

CAPITULO 2. MARCO TEORICO

2.1 Principios básicos del ultrasonido.

2.1.1 Definición de ultrasonido.

El sonido generado arriba del rango audible humano (20 kHz) es llamado ultrasonido. Aunque el rango de frecuencia normalmente empleado en pruebas ultrasónicas no destructivas es 100 kHz a 50 MHz. El ultrasonido se comporta de una manera similar al sonido tiene una longitud de onda mucho más corta; esto significa que puede ser reflejado por muy pequeñas superficies tales como defectos dentro de los materiales. Es esta propiedad que hace al ultrasonido muy útil para pruebas no destructivas de materiales.

El espectro acústico divide al sonido en tres rangos de frecuencias. El rango ultrasónico es luego dividido en tres sub-secciones (Figura 2.1).

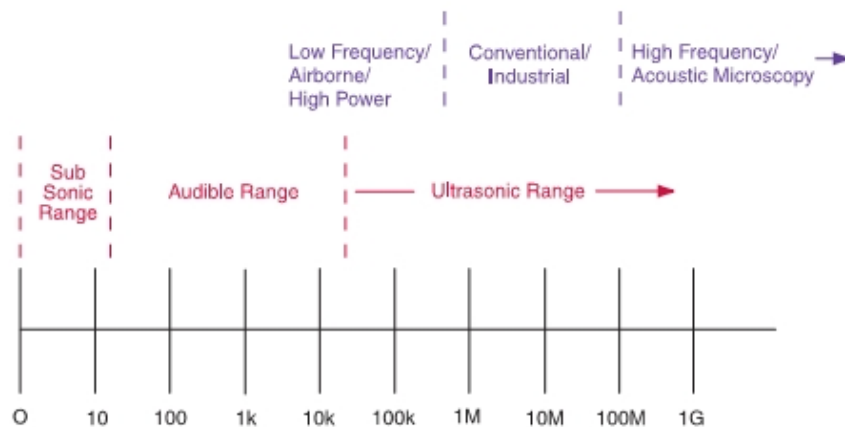


Figura 2.1 Espectro acústico.

2.1.2 Frecuencia, periodo y longitud de onda.

Las vibraciones ultrasónicas viajan en forma de onda, similar a la forma en que la luz viaja. Aunque no como las ondas luminosas que pueden viajar en un vacío, el ultrasonido requiere un medio elástico tal como un líquido o un sólido.

En la figura 2.2 se muestran los parámetros básicos de una onda continua (cw). Estos parámetros incluyen la longitud de onda (λ) y el periodo (T) de un ciclo completo.

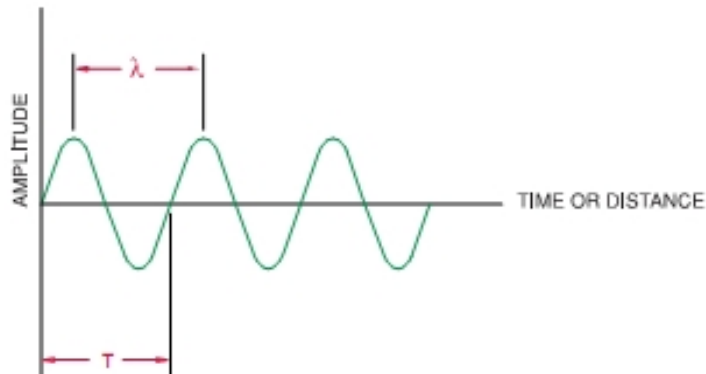


Figura 2.2 Parámetros básicos de una onda

El número de ciclos completos en un segundo es llamado frecuencia (f) y es medido en Hertz (Hz), con múltiplos como los siguientes:

- 1 ciclo/segundo = 1 Hz
- 1000 ciclos/segundo = 1 kHz
- 1,000,000 ciclos/segundo = 1 MHz

El tiempo requerido para completar un ciclo completo es el periodo (T), medido en segundos. La relación entre frecuencia y periodo en una onda continua está dada por la ecuación (2.1).

(2.1)

$$f = \frac{1}{T}$$

2.2 Caracterización de materiales por la técnica de pulso ultrasónico.

El ultrasonido como una prueba no destructiva es una técnica versátil que puede ser aplicada a una amplia variedad de análisis de materiales (ASNT, 1991), mientras el ultrasonido es quizá más conocido en aplicaciones como medir el espesor, detectar defectos y creación de imágenes, las ondas ultrasónicas pueden también ser usadas para discriminar y cuantificar algunas propiedades mecánicas, estructurales y de composición de sólidos y líquidos.

El análisis ultrasónico de materiales está basado en un simple principio de física: el movimiento de cualquier onda será afectado por el medio a través del cual viaja. Por lo tanto, cambios en uno o más de cuatro parámetros fácilmente medibles asociados con el paso de una onda de alta frecuencia a través de un material (duración de la señal, atenuación, dispersión y contenido de frecuencia) puede frecuentemente ser relacionado con cambios en propiedades físicas tales como dureza, módulo de elasticidad, densidad y homogeneidad (ASNT, 1991).

Los pulsos sónicos son normalmente generados y recibidos por transductores piezoeléctricos que han sido acústicamente acoplados a el material

de prueba. En la mayoría de los casos un único transductor es acoplado a un lado de la pieza de prueba y sirve como transmisor y receptor (modo pulso-eco), aunque en algunas situaciones de materiales que presentan una alta atenuación y reflexión se utilizan por separado un transductor emisor y un transductor receptor en lados opuestos del material por analizar (modo transmisión directa). Una onda sónica es lanzada por excitación del transductor con cualquier pico de voltaje o un impulso de onda continua. La onda sónica viaja a través del material de prueba, cualquier reflejo de lados lejanos regresa al punto de origen (modo pulso-eco), o llega a ser recibido por otro transductor en ese punto (modo transmisión directa). La señal recibida es luego amplificada y analizada.

Los parámetros de medida relevantes serán uno o más de los siguientes:

- Velocidad del sonido/tiempo de transito del pulso: la velocidad del sonido es usualmente el parámetro más fácil de medir. La velocidad del sonido en un medio homogéneo está directamente relacionada a el módulo de elasticidad y a su densidad; por lo tanto cambios en estas propiedades afectarán el tiempo de transito del pulso a través de una muestra de espesor dado. Adicionalmente variando el grado de heterogeneidad podría tener un efecto en la velocidad del sonido.
- Atenuación: la energía sónica es absorbida o atenuada en diferentes cantidades en diferentes materiales, gobernada en una forma compleja por efectos interactivos de densidad, dureza, viscosidad y estructura molecular.

La atenuación normalmente se incrementa con la frecuencia en un material dado.

- **Dispersión:** las ondas sónicas son reflejadas en los límites entre materiales distintos. Cambios en la micro estructura, orientación de fibras, porosidad, concentración de partículas y otras variaciones micro estructurales pueden afectar la amplitud, dirección y el contenido de frecuencia de las señales dispersadas
- **Frecuencia:** todos los materiales tienden a actuar en algún grado, atenuando o dispersando los componentes de alta frecuencia más que los componentes de baja frecuencia. Por lo tanto análisis de cambios en el contenido de frecuencia de un pulso que ha pasado a través del material de prueba puede seguir los efectos combinados de atenuación y dispersión descritos anteriormente.

2.3 Fundamentos de propagación de ondas

La propiedad de un sólido a resistir cambios de tamaño o forma y regresar a la condición original, antes de la deformación, se llama *elasticidad*. Un cuerpo perfectamente elástico es aquel que recupera perfectamente su forma y tamaño original después de ser deformado. Muchas sustancias, incluyendo las rocas, se pueden considerar perfectamente elásticas sin error apreciable, en el caso de deformaciones pequeñas. En la naturaleza existen diversos fenómenos de

propagación de las perturbaciones mecánicas. Un caso conocido es la propagación de las ondas en la superficie del agua. Las ondas mecánicas se originan por el movimiento forzado de una porción de un medio deformable. Así, las perturbaciones, en una parte del medio se transmiten a las partículas vecinas propagando el movimiento, a esto se le conoce como propagación de ondas.

La propagación de los movimientos ondulatorios se rige por dos principios fundamentales, que son: el principio de Huygens y el principio de Fermat.

En un medio homogéneo, los frentes de onda consecutivos, a partir de un centro generador, son esféricos (para casos tridimensionales) y concéntricos; así mismo, los nuevos frentes de onda generados serán paralelos entre sí, y los desplazamientos de una onda serán proporcionales al incremento de tiempo y a la velocidad del medio.

En medios heterogéneos, los desplazamientos dependerán de la distribución de velocidades; al variar las velocidades del medio, los desplazamientos serán diferentes en un intervalo de tiempo igual, esto cambia los frentes de las ondas subsecuentes.

Según el principio de Fermat, la trayectoria de una onda entre dos puntos es la de menor tiempo de recorrido, y ésta no es siempre una línea recta como sucede sólo en el caso de un medio homogéneo e isótropo; en cualquier otro medio, la energía seguirá el camino de más alta velocidad. Este principio es importante; ya que, en un registro se pueden tener diversas ondas elásticas que

podrían interpretarse como varios movimientos, pero sólo son diferentes trayectorias de un mismo movimiento.

2.3.1 Interferometría

Según el principio de Huygens, una onda que se propaga en el espacio está formada por un frente de onda que avanza en el cual cualquier punto es, en sí misma, origen de una nueva perturbación, generando un nuevo frente de ondas. En una condición ideal la perturbación generada en un punto será idéntica a la generadora, pero en la realidad múltiples puntos (u ondas) pueden estimular a uno, generando una única onda resultante de la suma de todas ellos, pudiendo ser un resultado constructivo (mayor amplitud de la onda) o destructivo (menor amplitud). A esta superposición de ondas se le denomina interferencia.

2.4 Análisis de Fourier

El análisis de Fourier permite descomponer una señal, que se encuentra en el dominio del tiempo, en una serie de ondas armónicas con frecuencias características.

El análisis de Fourier permite pasar de un dominio a otro facilitando algunas operaciones importantes; tales como el filtrado, la convolución y la deconvolución

de señales, entre otras (Snieder, 2004). El análisis de Fourier se fundamenta en las series de Fourier, las cuales se describen a continuación.

2.4.1 Series de Fourier

Una función $f(t)$ con periodo T , es una función que se repite una cantidad infinita de veces. Fourier demostró que una función de este tipo es equivalente a una colección de funciones senos y cosenos, cuyas frecuencias son múltiplos del recíproco del periodo. A esta serie se le conoce como serie de Fourier, o bien serie trigonométrica de Fourier. Se denota de la siguiente manera

(2.2)

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \operatorname{cos}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right),$$

donde T es el periodo de la función; b_0 , a_n y b_n son los coeficientes de la serie de Fourier, y t es el tiempo. En la ecuación (2.2) n representa un valor entero; el número $2\pi/T$ representa la frecuencia radial mínima que contiene la función $f(t)$. A esta frecuencia se le denomina ω_1 ,

(2.3)

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T},$$

sustituyendo la frecuencia radial (2.3) en la serie de Fourier (2.2) se tiene

(2.4)

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{sen}(n\omega_1 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\omega_1 t),$$

Definiendo $\omega_n = n\omega_1$ o $\omega_n = 2\pi/T_n$ y $T_n = T/n$; podemos decir que ω_n y T_n son respectivamente, la frecuencia y el periodo del término “ n ”.

La resta de dos frecuencias subsecuentes w_n y w_{n-1} , resulta en el valor ω_1 .

A ω_1 puede llamársele $\Delta\omega$.

La serie mostrada en la ecuación (2.2) es infinita, es decir, tiene un número infinito de términos.

(2.5)

$$f(t) = b_0 + a_1 \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + a_2 \text{sen}\left(\frac{4\pi t}{T}\right) + b_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + b_2 \cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right) + \dots,$$

La ecuación (2.2) representa la forma explícita de la serie de Fourier. En esta ecuación se han escrito únicamente los primeros 5 términos.

Con respecto a los coeficientes b_0 , a_n y b_n , estos se determinan mediante la evaluación de las siguientes integrales

(2.6)

$$b_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt,$$

(2.7)

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \text{sen}(n\omega_1 t) dt$$

(2.8)

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega_1 t) dt$$

Una vez obtenidos estos coeficientes, es posible transformar una señal que se encuentra en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La serie de Fourier ilustra que una función en tiempo $f(t)$, se puede reconstruir a partir de los coeficientes b_0 , a_n y b_n . En otras palabras, es posible transformar una función al dominio de la frecuencia y regresar al dominio del tiempo, sin perder información.

2.4.2 Serie de Fourier compleja

La forma compleja de la serie de Fourier sirve para diversas aplicaciones; en particular, en el procesamiento de señales. Para expresar la serie de Fourier en forma compleja se utilizan las identidades de Euler.

$$\text{sen}(n\omega_1 t) = \frac{e^{i(n\omega_1 t)} - e^{-i(n\omega_1 t)}}{2i}$$

(2.9)

$$\text{sen}(n\omega_1 t) = \frac{e^{i(n\omega_1 t)} - e^{-i(n\omega_1 t)}}{2i}$$

(2.10)

$$\cos(n\omega_1 t) = \frac{e^{i(n\omega_1 t)} + e^{-i(n\omega_1 t)}}{2i}, \quad (2.11)$$

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi, \quad (2.12)$$

$$e^{-i\varphi} = \cos\varphi - i\sin\varphi,$$

Donde $i = \sqrt{-1}$.

Para construir la forma compleja de la serie de Fourier, se sustituyen en la serie trigonométrica (2.2) las expresiones (2.9) y (2.10).

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{e^{i(n\omega_1 t)} - e^{-i(n\omega_1 t)}}{2i} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{e^{i(n\omega_1 t)} + e^{-i(n\omega_1 t)}}{2}, \quad (2.13)$$

agrupando términos semejantes, se obtiene

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b_n}{2} + \frac{a_n}{2i} \right) e^{i(n\omega_1 t)} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b_n}{2} - \frac{a_n}{2i} \right) e^{-i(n\omega_1 t)}, \quad (2.14)$$

Simplificando

$$(2.15)$$

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b_n}{2} - i \frac{a_n}{2} \right) e^{i(n\omega t)} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b_n}{2} + \frac{a_n}{2} \right) e^{-i(n\omega t)},$$

De la expresión (2.15), se pueden establecer las siguientes igualdades

(2.16)

$$c_n = \frac{b_n}{2} + i \frac{a_n}{2},$$

(2.17)

$$c_n^* = \frac{b_n}{2} - i \frac{a_n}{2},$$

Sustituyendo las desigualdades anteriores en la ecuación (2.15)

(2.18)

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n^* e^{i(n\omega t)} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{-i(n\omega t)},$$

Como se conocen los valores de los coeficientes a_n y b_n y (ecuaciones(2.7) y (2.8), respectivamente), se puede establecer que

(2.19)

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) [\cos(n\omega t) + i \operatorname{sen}(n\omega t)] dt,$$

De la expresión (2.19), podemos observar que las funciones trigonométricas dentro de los corchetes se pueden reemplazar por exponenciales usando las

identidades de Euler (ecuaciones (2.9)-(2.11)). Por lo tanto, la expresión (2.19) toma la siguiente forma

(2.20)

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{i(n\omega t)} dt$$

Por otra parte, sustituyendo los valores de los coeficientes a_n y b_n (ecuaciones(2.7) y (2.8), respectivamente) en la ecuación (2.17), resulta

(2.21)

$$C_n^* = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) [\cos(n\omega t) - i \operatorname{sen}(n\omega t)] dt$$

Sustituyendo la ecuación (2.12) en la ecuación anterior, tenemos

(2.22)

$$C_n^* = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-i(n\omega t)} dt$$

Sustituyendo $-n$ en lugar de “ n ” en la ecuación (2.22), se observa que

(2.23)

$$C_{-n} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-i(n\omega t)} dt$$

comparando la ecuación (2.22) con (2.23) se concluye que $c_n^* = c_{-n}$. Como consecuencia, la ecuación (2.18) se puede expresar como

(2.24)

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_{-n} e^{i(n\omega t)} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{-i(n\omega t)}$$

invirtiendo la primera suma de la ecuación (2.24), se puede decir que

(2.25)

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=-\infty}^{-1} c_n e^{-i(n\omega t)} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{-i(n\omega t)}$$

Por lo tanto, simplificando la ecuación (2.25) queda

(2.26)

$$f(t) = b_0 + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq 0}}^{\infty} c_n e^{-i(n\omega t)}$$

La suma en la ecuación (2.26) no incluye el caso $n = 0$. Para poder incluir este caso se sustituye $n = 0$ en la ecuación (2.20), así

(2.27)

$$C_o = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-i(n\omega t)} dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt ,$$

Por lo que $c_0 = b_0 = c_0^*$

Integrando el término b_0 en la ecuación (2.26)

(2.28)

$$f(t) = c_0 e^{-i(0)\omega t} + \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq 0}}^{\infty} c_n e^{-i(n\omega t)} ,$$

Como consecuencia

(2.29)

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{-i(n\omega t)} ,$$

donde el único coeficiente es c_n , y se denota como

(2.30)

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{i(n\omega t)} dt ,$$

La ecuación (2.29) representa la forma compleja de la serie de Fourier, y el coeficiente c_n se obtiene aplicando la ecuación (2.30).

2.4.3 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier se deriva a partir de la serie compleja de Fourier. A continuación se describe el procedimiento para obtener esta transformada; primero, se inicia sustituyendo el coeficiente en la ecuación (2.29)

(2.31)

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{i(n\omega_1 t)} dt \right) e^{-i(n\omega_1 t)},$$

Donde $n\omega_1$ puede ser reemplazado por ω_n de este modo

(2.32)

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{i(n\omega_n t)} dt \right) e^{-i(n\omega_n t)},$$

Donde ω_n representa a una variable discreta, ya que n puede valer , -2, -1, 0, 1

2,.. . Además, considerando que $\omega_1 = \Delta\omega$ y $\omega_1 = 2\pi/T$ entonces $\Delta\omega = 2$

π/T o $T = 2\pi/\Delta\omega$. Por lo tanto, se puede sustituir el valor de T en la ecuación

(2.32)

(2.33)

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{i(n\omega_n t)} dt \right) e^{-i(n\omega_n t)} \Delta\omega,$$

Ahora, se considera que el periodo de la función $f(t)$ tiende a infinito ($T \rightarrow \infty$). Cuando ($T \rightarrow \infty$), $\Delta\omega \rightarrow 0$. Como consecuencia, ω_n se transforma en una variable continua a la cual se puede llamar ω . Entonces, $\Delta\omega$ se transforma en una diferencial “ $d\omega$ ”, y la suma de la ecuación (2.33) se puede reemplazar por una integral.

(2.34)

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{i\omega t} dt \right] e^{-i\omega t} d\omega ,$$

ordenando las integrales de la expresión (2.34) da por resultado

(2.35)

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

(2.36)

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

La expresión (2.35) define la transformada de Fourier, donde $f(t)$ representa la función en el dominio del tiempo, ésta será el registro sísmico. Por otro lado, la expresión (2.36) corresponde a la transformada inversa de Fourier, que permite regresar al dominio del tiempo. Otra forma equivalente de representar a la transformada de Fourier, corresponde al caso en el que el signo de la transformada directa es negativo, como se ilustra a continuación:

(2.37)

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

y, por lo tanto, la transformada inversa tiene signo positivo, como a continuación se muestra

(2.38)

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

También, es posible factorizar en la ecuación (2.34) el factor $1/2\pi$, y expresar el par de transformadas (directa e inversa) de la siguiente forma

(2.39)

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt ,$$

(2.40)

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

Por lo tanto, para cualquier señal $f(t)$ existe una correspondencia única entre dicha señal y su transformada $F(\omega)$.

2.5 Espectrograma

El espectrograma es una representación visual de las variaciones de la frecuencia en el eje vertical, y de la intensidad mediante los niveles de colores que se está representando a lo largo del tiempo que se representa en el eje horizontal.

Para la obtención del espectrograma se aplica una transformada de Fourier inicialmente a la señal. Dependiendo del tamaño de la ventana que utilizamos para el análisis de Fourier tendremos diferentes niveles de resolución del espectrograma. Si se aplica una ventana muy grande obtendremos un espectrograma muy detallado pero a costa de incrementar el tiempo de cálculo necesario para esta operación. Para el caso de una ventana demasiado pequeña el efecto es el inverso y no seremos capaces de distinguir los diferentes armónicos si están muy juntos en el espectrograma.

Debido a que las ondas ultrasónicas son ondas no estacionarias porque su frecuencia varía con el tiempo; una descomposición espectral puede revelar características que no son fácilmente observadas en la representación del tiempo o en la representación de la frecuencia por sí mismos (Cohen, 1989).

En la figura 2.3 se muestra una señal compuesta por la suma de tres funciones, una función seno cuya frecuencia aumenta con el tiempo, una función seno de menor amplitud y con una frecuencia constante y un pulso de ricker de baja frecuencia, en el espectrograma se observan los patrones generados por

cada uno de los componentes de la señal; un patrón diagonal que representa una un crecimiento de la frecuencia conforme avanza el tiempo, un patrón horizontal que nos indica una frecuencia constante en todo el tiempo y un contorno de baja frecuencia generado por el pulso de ricker.

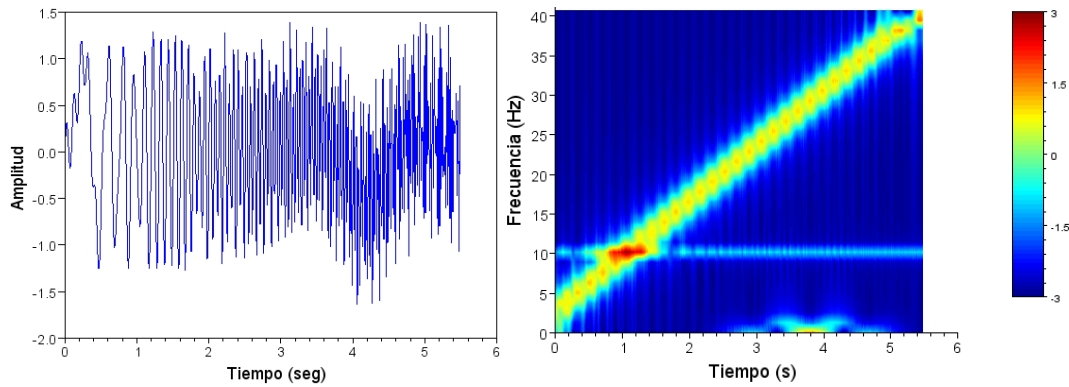


Figura 2.3. Señal compuesta y su espectro de frecuencias de la señal.

CAPITULO 3. MATERIALES Y METODO

3.1 Materiales

Para la parte 1 se utilizó resina poliéster para la elaboración de un molde cubico con una perforación que sirvió como un material inerte que no interactuó ni tuvo efecto con las sustancias que se le agregaron, se utilizaron sustancias de densidades distintas (gasolina, alcohol octílico, glicerina, agua destilada, soluciones de cloruro al 16.5% y 33%).

Para la parte 2 y 3 se utilizó cemento Portland compuesto (CPC 30) APASCO y agua destilada para la elaboración de los especímenes y cloruro de sodio industrial para elaborar soluciones de cloruro de sodio al 16.5% y 33%.

3.2 Equipo

Para las mediciones de ultrasonido se utilizó un emisor-receptor de alta tensión marca Olympus modelo 5058 PR (Figura 3.1), que posee un emisor de alto voltaje con ajustes conmutados o ajustables en forma continua hasta 900 V, receptor de alta ganancia con banda ancha (10MHz) de bajo ruido y modos pulso-eco y transmisión directa.



Figura 3.1 Emisor-Receptor de alta tensión.

Para visualizar y guardar los señales, se utilizó un osciloscopio de fosforo digital marca Tektronix serie TDS3000C, con un ancho de banda 100 MHz, cuatro canales de entrada y pantalla LCD VGA a color (Figura 3.2)



Figura 3.2 Osciloscopio de fosforo digital.

Los transductores ultrasónicos empleados fueron del modelo X1021 Olympus a una frecuencia de 50 kHz (Figura 3.3)



Figura 3.3 Transductores ultrasónicos.

3.3 Método

El experimento se dividió en tres partes:

En la parte 1 se obtuvieron registros de un cubo de resina poliéster al cual se le colocaron fluidos con densidades diferentes (ver tabla 3.1) obteniéndose 3 registros de la muestra seca y 3 para cada fluido.

En la parte 2 se obtuvieron los datos ultrasónicos de muestras a las cuales se le adicionaron por medio de gotas soluciones de agua destilada y cloruro de sodio al 16.5%, obteniéndose registros de la muestra seca y para cada gota. Se realizaron 2 réplicas.

En la parte 3 se saturaron tres muestras al vacío en soluciones distintas, la primera en agua destilada, la segunda en una solución de cloruro de sodio al 16.5% y la tercera en una solución de cloruro de sodio al 33%.

Todos los especímenes se saturaron al vacío durante una hora, al término de la cual se obtuvieron 3 registros correspondientes de cada muestra. Transcurridos siete días se obtuvieron 3 registros nuevamente de cada muestra para detectar posibles cambios en la respuesta. Se realizaron 2 réplicas

En la figura 3.4 se muestra un diagrama de flujo donde se resume el experimento.

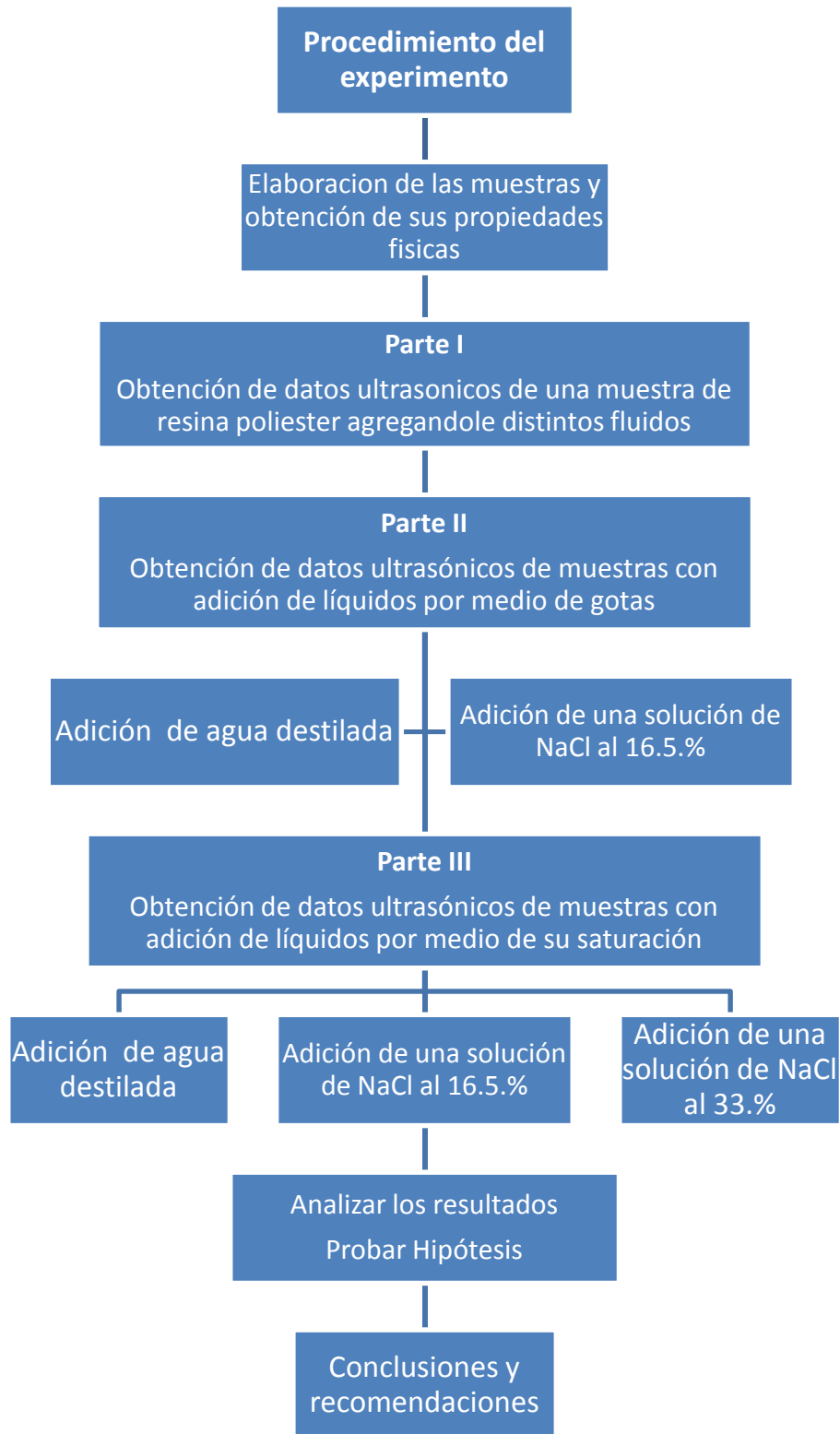


Figura 3.4 Procedimiento del experimento.

3.3.1 Elaboración de los especímenes

Se prepararon especímenes cúbicos de pasta de cemento de 50 mm por lado con una relación agua/cemento en peso de 0.60 (Figura 3.5), curados en húmedo durante 14 días a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Posteriormente los especímenes se secaron en un horno a 100°C hasta obtener masa constante. Se taladraron dos orificios de 10 mm de diámetro, con el propósito de adicionar gotas de agua destilada y de una solución de cloruro de sodio a las muestras que se utilizaron en la Parte 2 del experimento.



Figura 3.5 Elaboración de los especímenes de pasta de cemento y perforación de los orificios

La densidad de los especímenes utilizados fue de 1.46, la porosidad de 41% y la absorción de agua del 28%.

La tabla 3.1 muestra las propiedades físicas de los fluidos empleados en todas las partes del experimento.

Tabla 3.1 Propiedades de densidad de los fluidos empleados

<i>Líquido</i>	<i>Densidad (g/mL)</i>
Gasolina	0.68
Alcohol Octílico	0.83
Agua destilada	1
Solución Cloruro de sodio 16.5%	1.11
Solución Cloruro de sodio 33%	1.21
Glicerina	1.26

3.3.2 Método de prueba

3.3.2.1 Método utilizado en la Parte 1

Para caracterizar la penetración de fluidos en los especímenes por medio de interferometría ultrasónica se utilizó un emisor-receptor de alta tensión marca Olympus modelo 5058 PR. El voltaje empleado para generar los pulsos cuadrados fue de 200 V. Con los transductores ultrasónicos, se generaron pulsos a una frecuencia de 50 kHz acoplado la fuente y el receptor en lados opuestos de la muestra por medio de un torquímetro con una presión de 7.5 libra.pulgada procurando estuvieran alineados y no se produjera un movimiento que pueda afectar las lecturas, obteniendo los datos ultrasónicos en una gráfica tiempo amplitud.

El procedimiento de prueba en la parte 1 del experimento se utilizó únicamente un cubo de resina poliéster con una perforación a la cual se le adicionaron diversos líquidos con distintas densidades; el espécimen permaneció durante toda la prueba acoplado a los transductores con una presión constante generada por un torque de 7.5 libra.pulgada (Figura 3.6) descartando con esto variaciones en las lecturas debidas a la colocación o presión de los transductores sobre la muestra. Inicialmente se guardaron 3 lecturas con la muestra en estado seco y posteriormente al agregarle distintos líquidos.

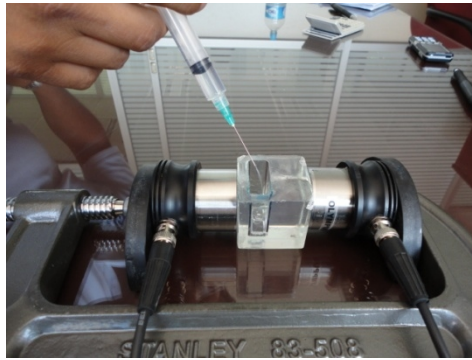


Figura 3.6 Obtención de datos ultrasónicos de la parte 1.

3.3.2.2 Método utilizado en la Parte 2

El procedimiento de prueba en la parte 2 consistió en acoplar los transductores por medio de un torquímetro a un espécimen de pasta de cemento con una intensidad de 7.5 libra.pulgada y después adicionar agua destilada por medio de un gotero en el agujero formado previamente (Figura 3.7).

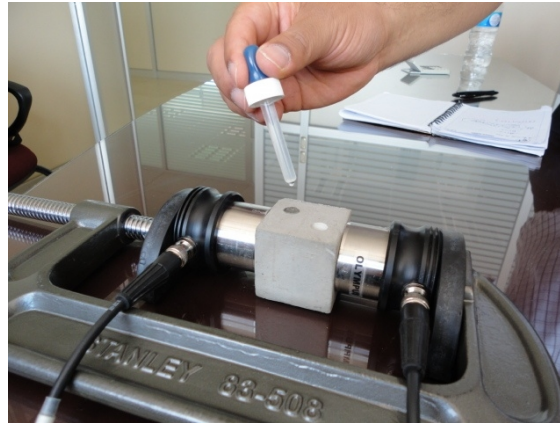


Figura 3.7 Obtención de datos ultrasónicos de la parte 2.

Se obtuvieron los registros en estado seco y después de que cada gota fue absorbida por el material poroso. Después de 15 gotas de agua destilada, en otra muestra se utilizó una solución de cloruro de sodio al 16.5% siguiendo el mismo procedimiento descrito.

3.3.2.3 Método utilizado en la Parte 3

En la tercera parte de la investigación se procedió de la siguiente manera: Se obtuvieron 3 lecturas de cada una de las tres muestras secas, identificando cada una de ellas, acoplado los transductores por medio de un torquímetro con una intensidad de 7.5 libra.pulgada para todas las lecturas. Posteriormente se saturaron al vacío durante una hora con diferentes líquidos; la primera con una

solución de agua destilada, la segunda con una solución de cloruro de sodio al 16.5% y la tercera con una solución de cloruro de sodio al 33% (Figura 3.8); minutos después de ser saturadas se obtuvo 3 registros de cada una de las muestras ya saturadas, posteriormente se cubrieron los especímenes con cera para evitar pérdida de humedad. Después de siete días se obtuvieron 3 nuevas lecturas ultrasónicas de cada muestra, con el objeto de detectar cambios en la muestra.



Figura 3.8 Saturación de las muestras al vacío y mediciones ultrasónicas.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSION.

4.1 Resultados Parte 1.

Un análisis de las señales obtenidas mediante espectrogramas basados en la transformada de Fourier proporciona una forma de comparar las señales y para claramente distinguir el tipo de fluido que ingresó a la muestra. La figura 4.1 muestra los cocientes espectrales del promedio de las señales obtenida de la muestra en estado seco y que después se le agrego distintos líquidos.

En los cocientes espectrales se observa la aparición de nuevas regiones de la señal conforme va aumentando la densidad de los líquidos, particularmente la región comprendida entre las frecuencias de 50 kHz y 60 kHz que se va intensificando mas conforme la densidad aumenta, caso contrario de la región inicial comprendida en la frecuencia de 30 kHz y 40 kHz que va desapareciendo conforme aumenta la densidad del liquido en cuestión.

De estos resultados se concluye que variaciones en la densidad de los líquidos puede ser detectada con este método.

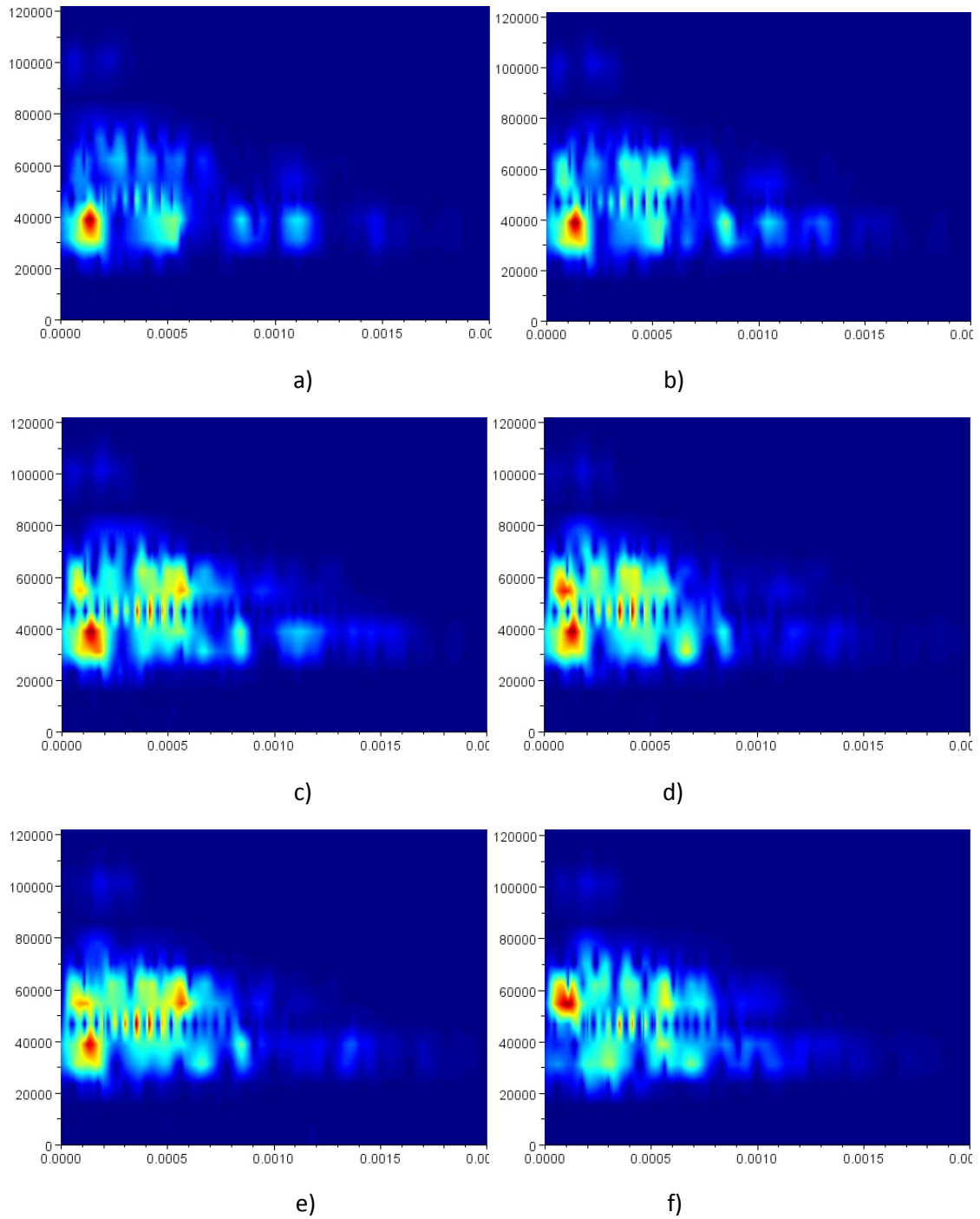


Figura 4.1. Cocientes espectrales de la muestra seca a la que después se le agrega a) gasolina b) alcohol octílico c) agua destilada d) solución NaCl 15% e) solución NaCl 33% f) glicerina; en el eje “x” tenemos el Tiempo en segundos y en el eje “y” tenemos la frecuencia en Hertz

4.2 Resultados Parte 2.

Las figura 4.2 muestran las señales de las distintas pruebas al agregar por medio de gotas agua destilada a los especímenes de pasta de cemento; los primeros arribos de las señales son mostrados en la figura 4.3 y se observa que es imposible hacer cualquier deducción en esta parte de la señal porque en esta no se observa ningún cambio, en la figura 4.4 vemos parte de los últimos arribos. Estos últimos arribos muestran cambios en la propagación de la señal sin ningún patrón definido debido a la presencia de agua destilada.

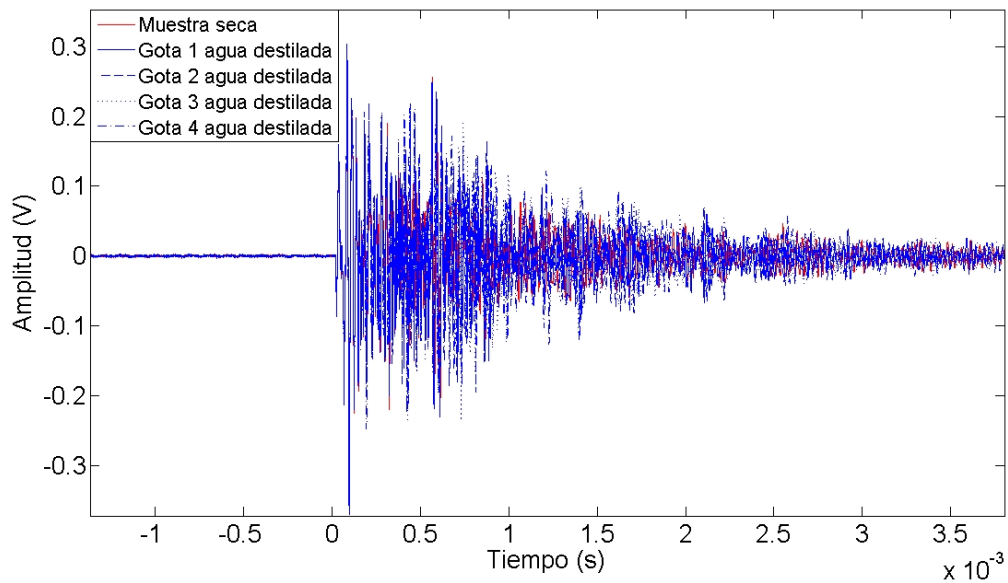


Figura 4.2 Señales de las distintas pruebas usando agua destilada.

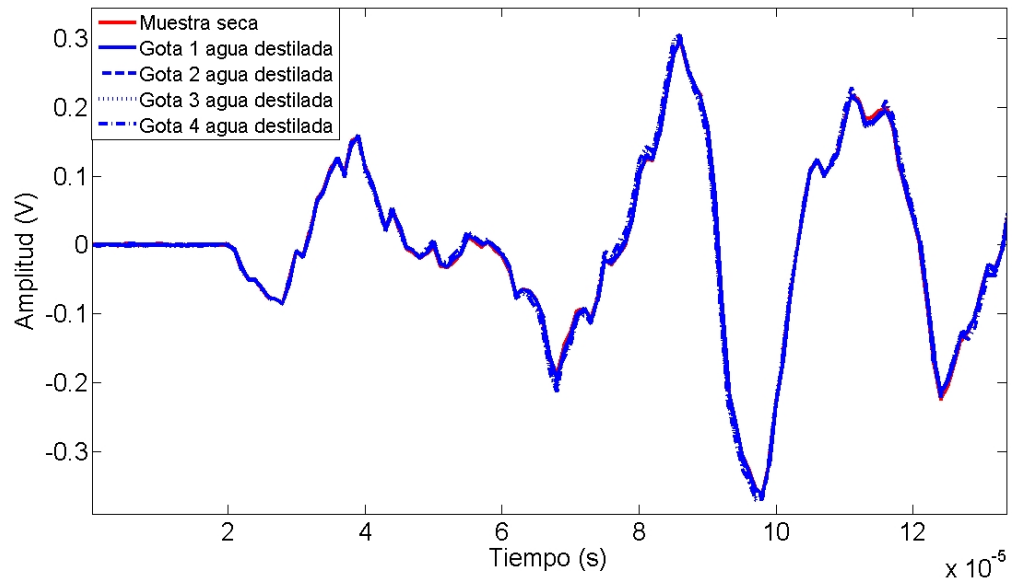


Figura 4.3 Primeros arribos de la señal usando agua destilada.

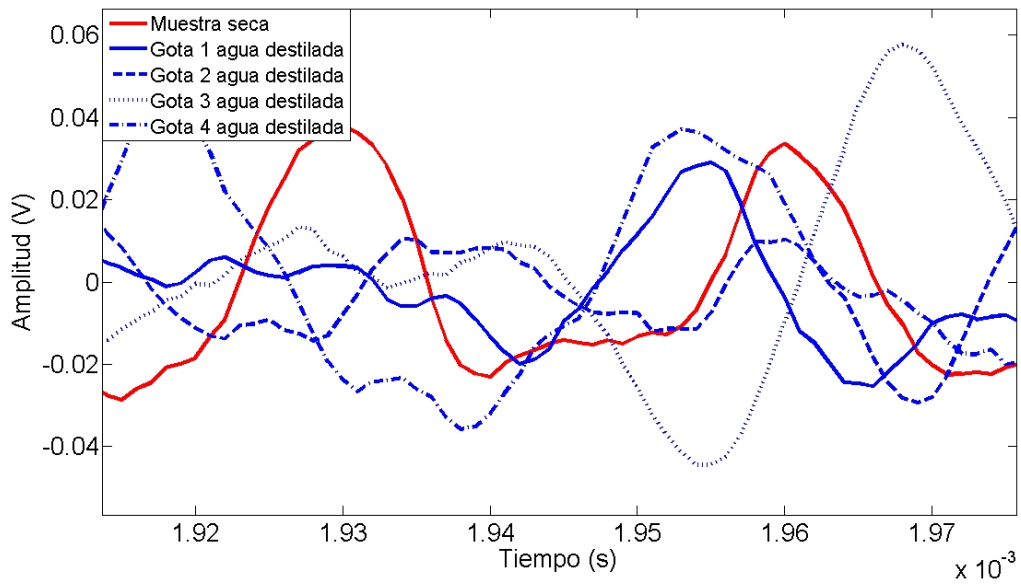


Figura 4.4 Últimos arribos de la señal usando agua destilada.

La figura 4.5 muestran las señales de las distintas pruebas al agregar por medio de gotas una solución con cloruro al 16.5% a un espécimen de pasta de cemento; los primeros arribos de las señales son mostrados en la figura 4.6 y se observa que es imposible hacer cualquier deducción en esta parte de la señal porque en esta no se observa ningún cambio, en la figura 4.7 vemos parte de los últimos arribos. Estos últimos arribos muestran que la señal no se descompone ni cambia demasiado en general existe más orden desplazándose en el tiempo propagando la señal de forma más ordenada, comparada con las señales conteniendo agua destilada.

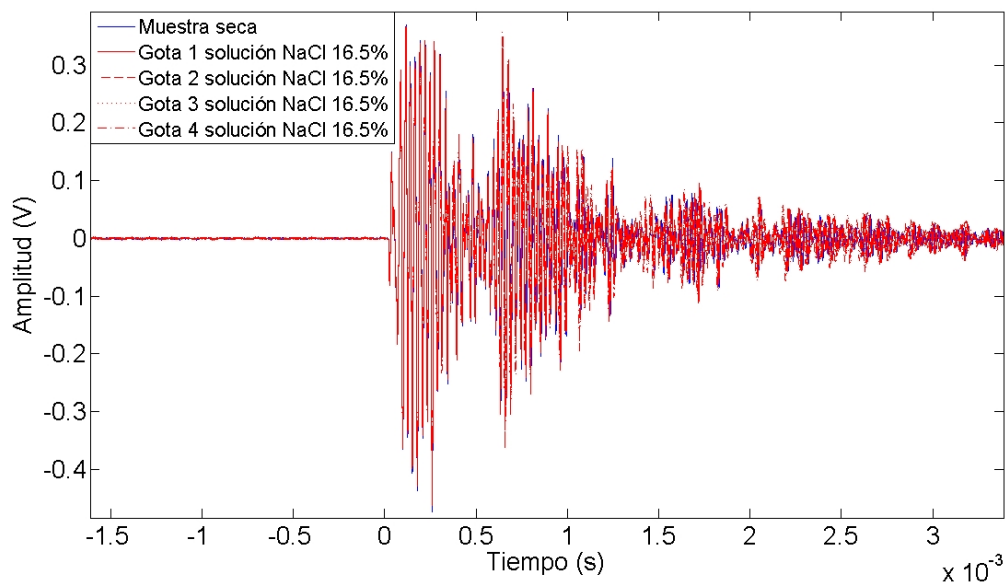


Figura 4.5 Señales de las distintas pruebas usando una solución de NaCl al 16.5%.

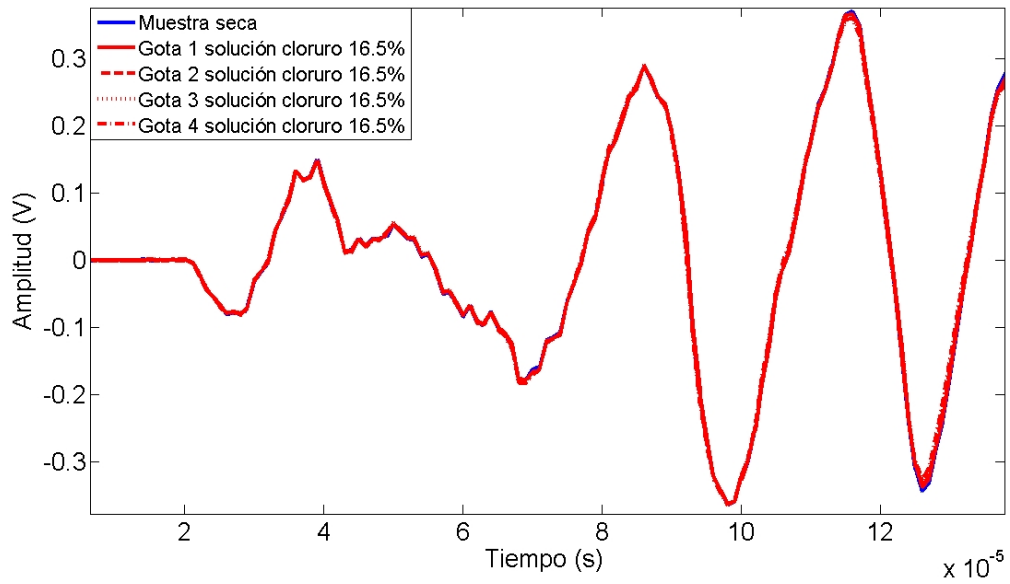


Figura 4.6 Primeros arribos de la señal usando una solución de NaCl al 16.5%.

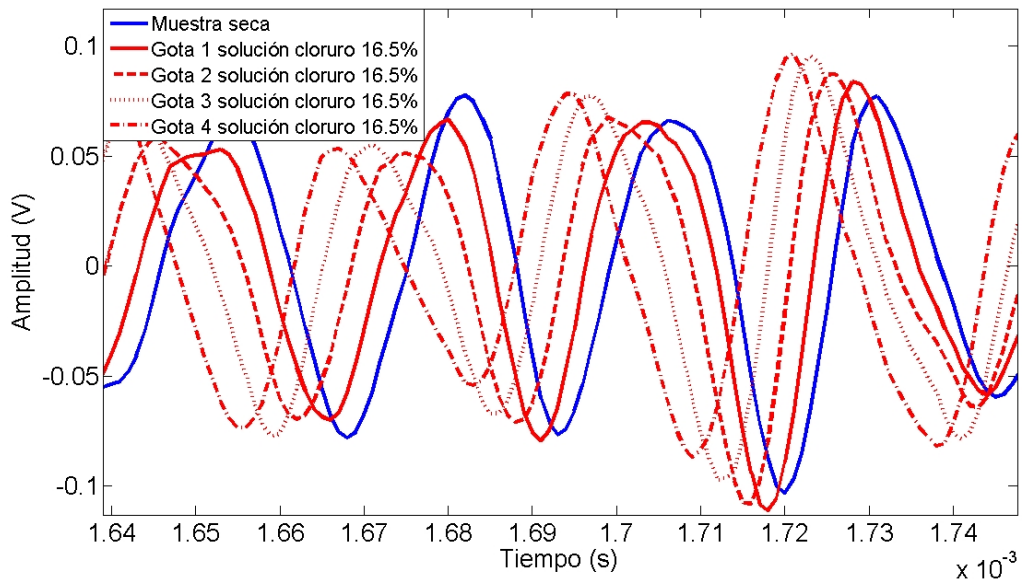
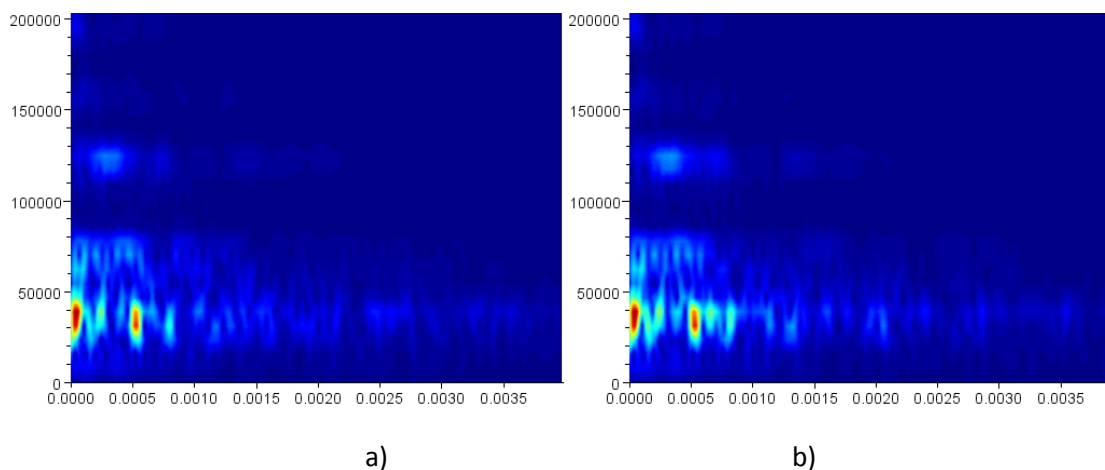
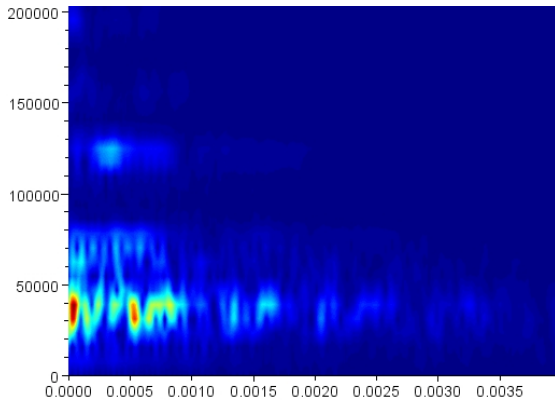


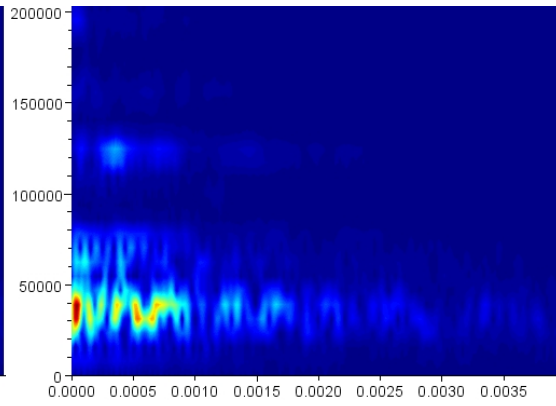
Figura 4.7 Últimos arribos de la señal usando una solución de NaCl al 16.5%.

La figura 4.8 y 4.9 muestran los espectros de frecuencia de las muestras a las que se les agrego gotas de agua destilada y gotas de una solución de cloruro de sodio al 16.5%; pudiéndose observar que los espectros de la muestra que contiene agua destilada son distintos generando patrones que se van intensificando conforme se va agregando mas gotas de agua destilada; caso contrario a los espectros con solución de cloruro de sodio al 16.% que intensifica los patrones generados pero que al final se observa una atenuación de estos patrones y de la señal en general; debido probablemente a que los iones cloruro ingresan de manera relativamente rápida y debido al movimiento del agua por capilaridad, los cloruros son "arrastrados", hacia el interior del concreto. Obviamente en este movimiento hacia el interior ocasionará que algunos serán adsorbidos en el silicato hidratado de calcio (donde encuentren sitios con cargas positivas, ya que los iones cloruro tienen cargas negativas) y otros reaccionarán posteriormente con los productos de la hidratación. Los primeros cloruros ocuparán los sitios disponibles y los que ingresen posteriormente tienen que viajar una mayor distancia hasta donde se encuentren sitios que no han sido utilizados.

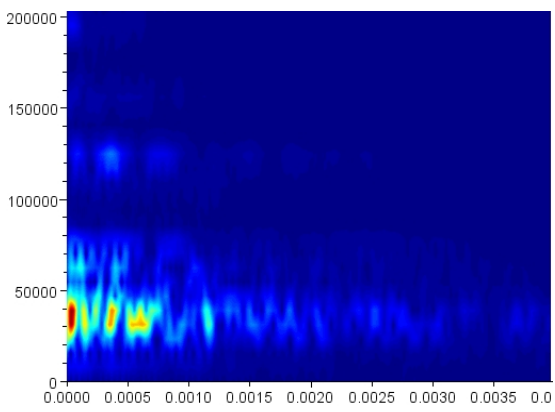




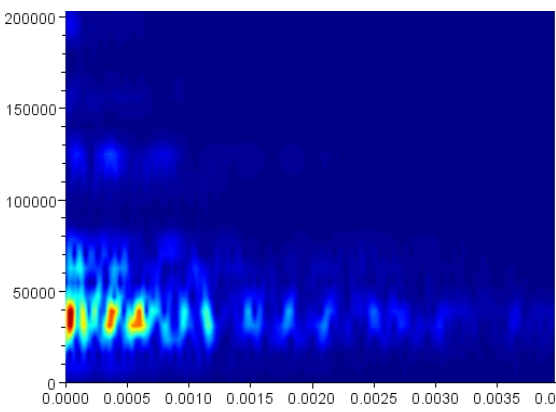
c)



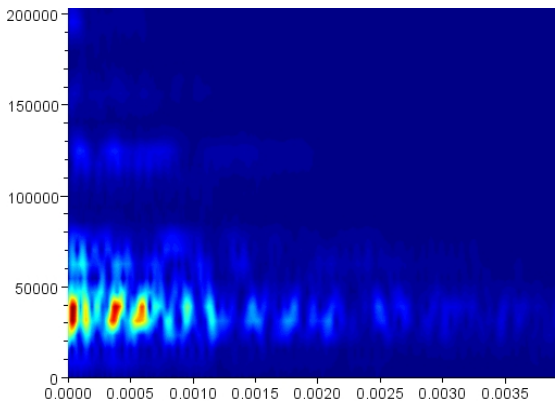
d)



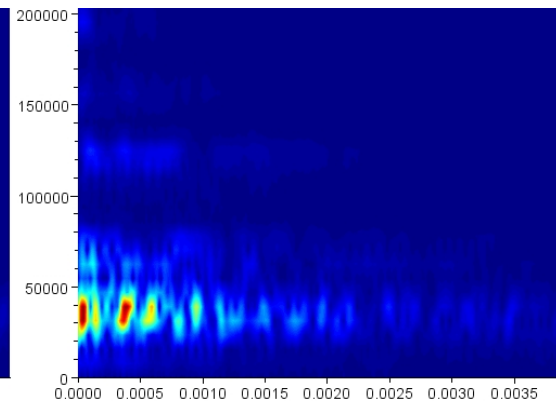
e)



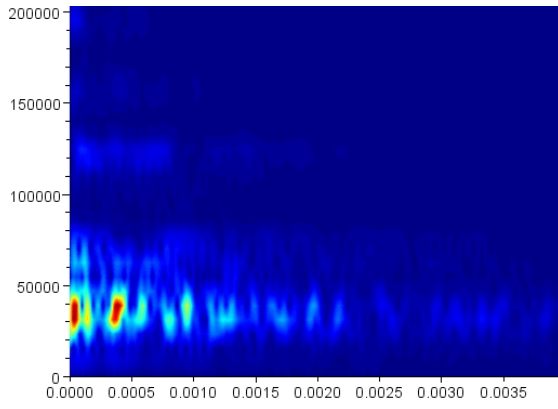
f)



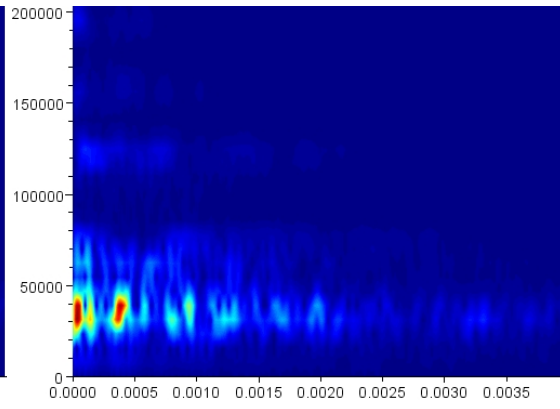
g)



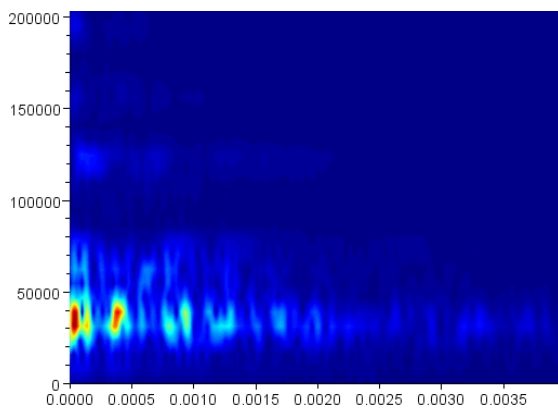
h)



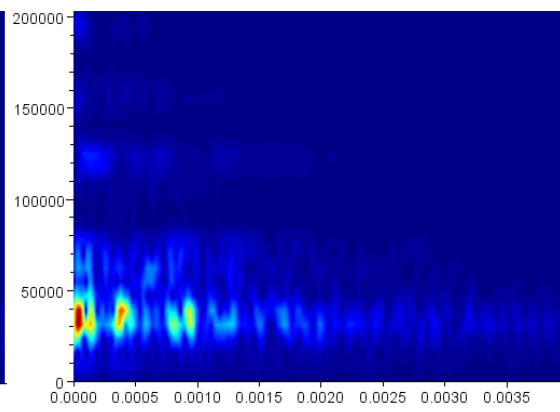
i)



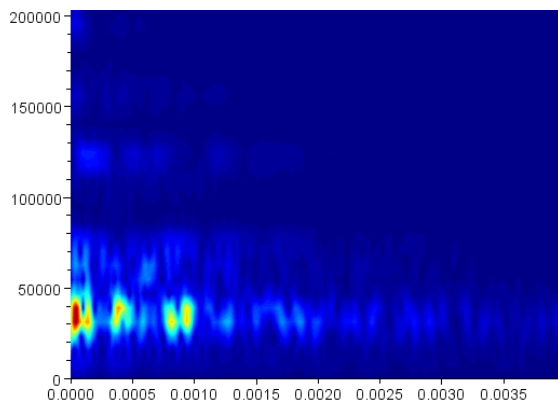
j)



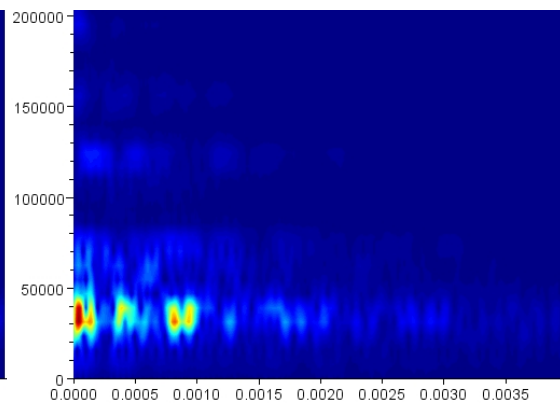
k)



l)



m)



n)

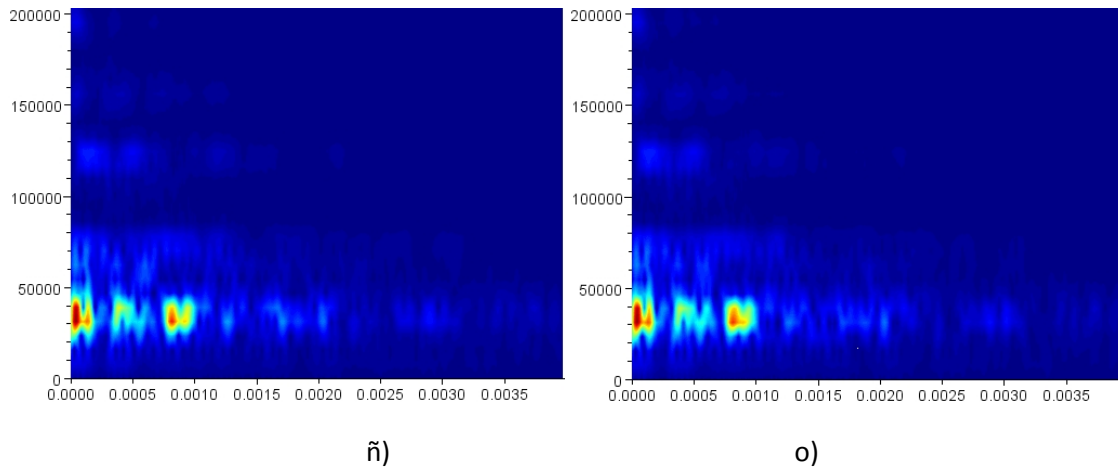
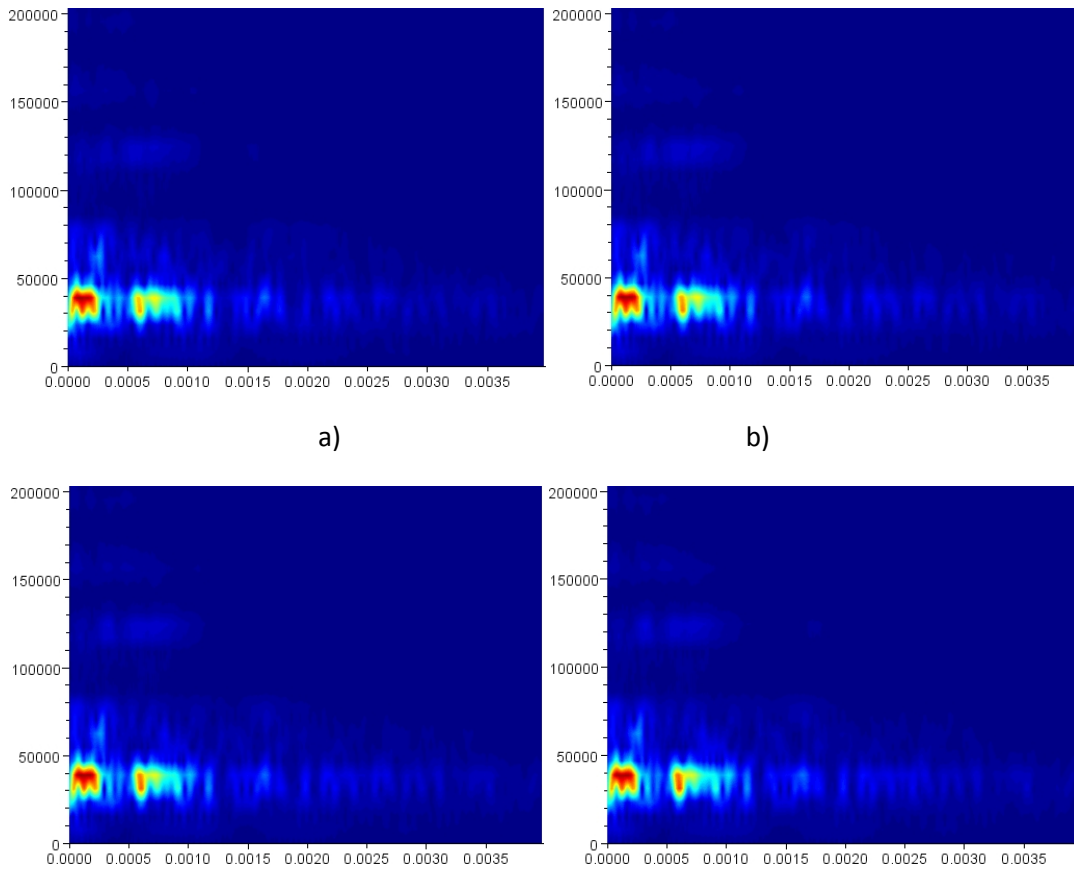
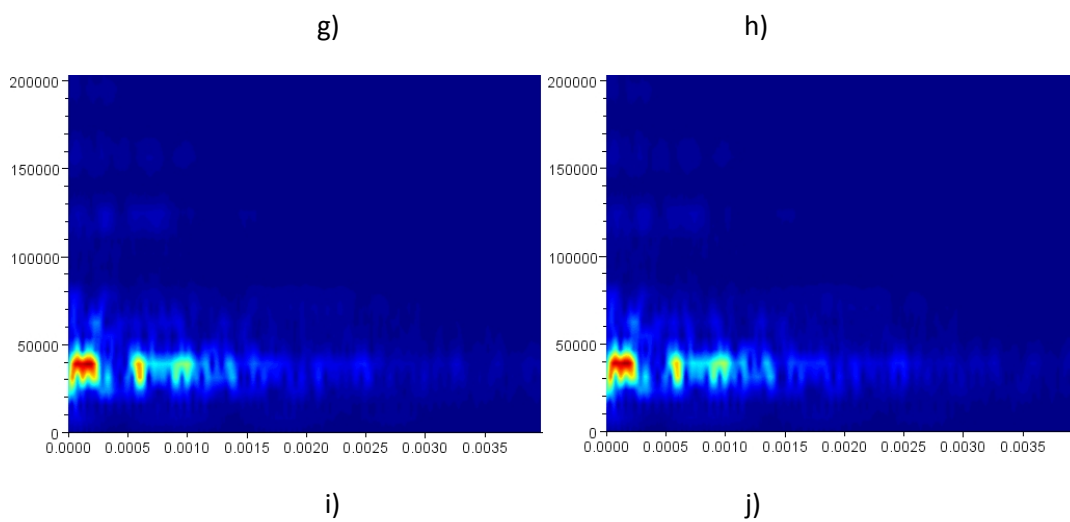
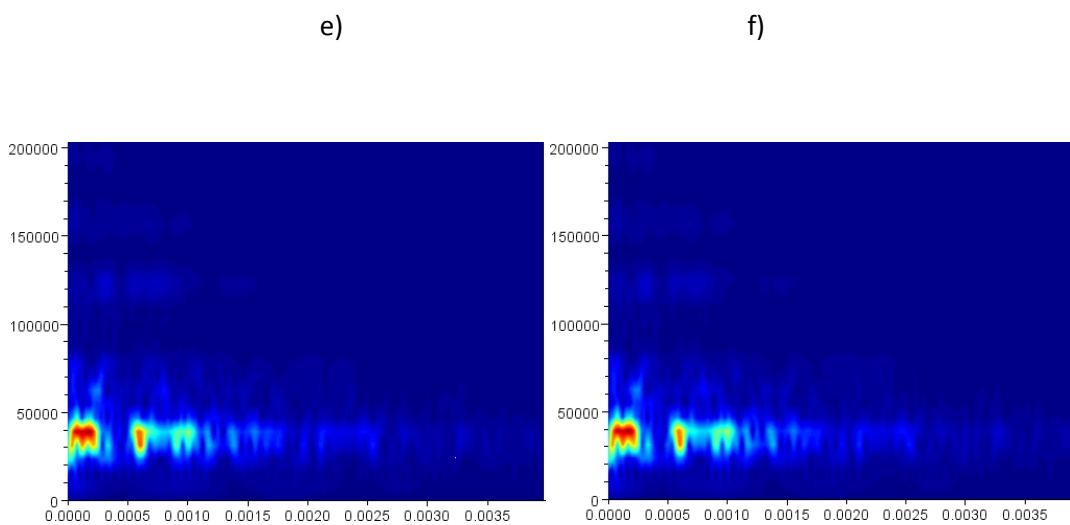
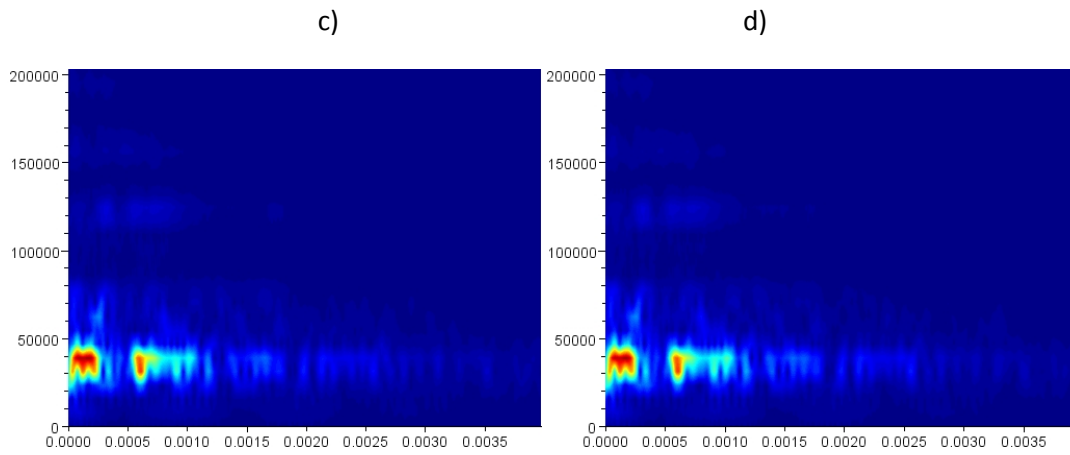


Figura 4.8 .Espectros de frecuencia de a) una muestra seca y después de haber absorbido b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13, ñ)14, o)15 gotas de agua destilada; en el eje “x” tenemos el Tiempo en segundos y en el eje “y” tenemos la frecuencia en Hertz.





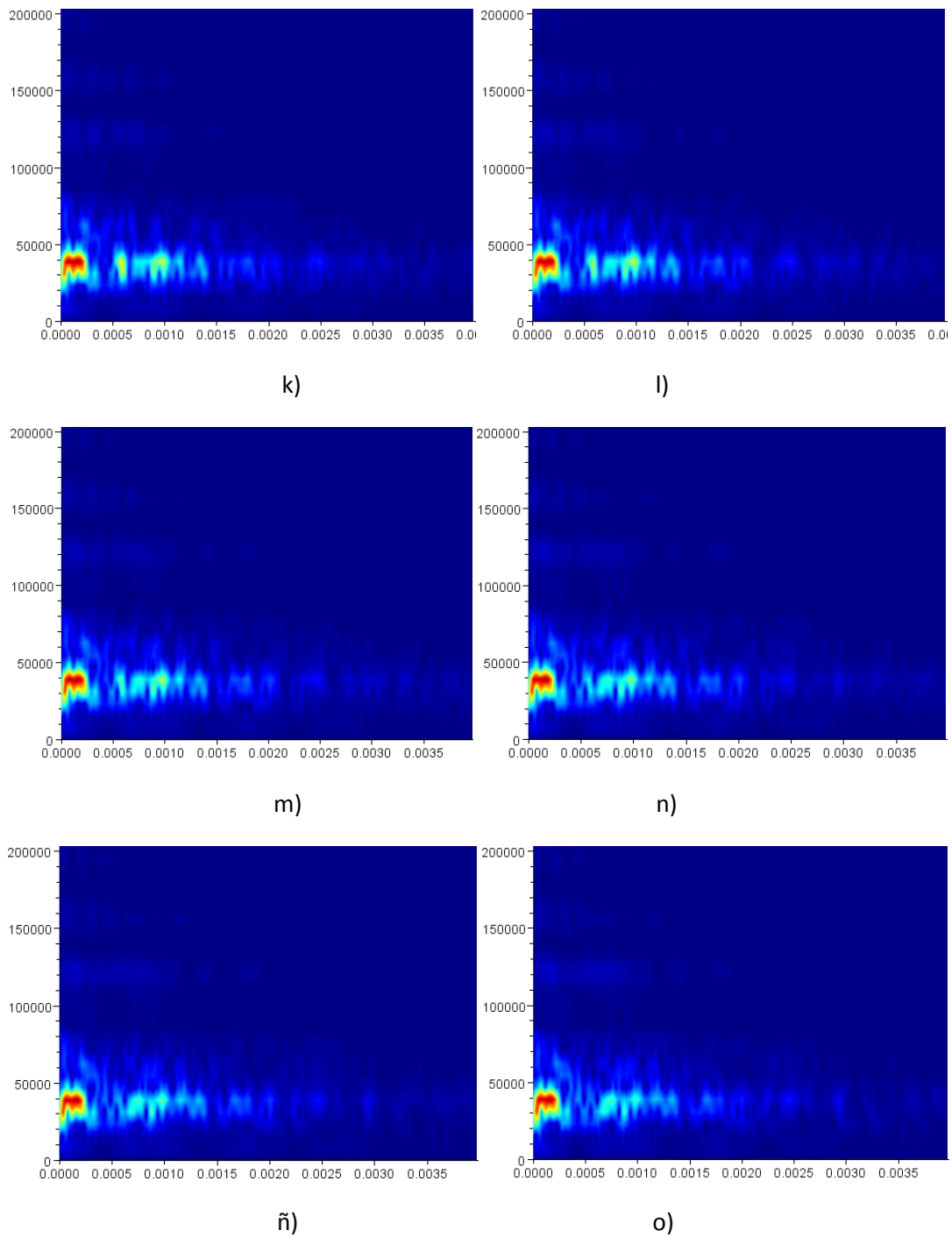


Figure 4.9 Espectros de frecuencia de a) una muestra seca y después de haber absorbido b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, j)9, k)10, l)11, m)12, n)13, ñ)14, o)15 gotas de una solución de NaCl 16.5%; en el eje “x” tenemos el Tiempo en segundos y en el eje “y” tenemos la frecuencia en Hertz.

4.3 Resultados Parte 3

La figura 4.10 muestra el promedio de los registros de las señales obtenidas en los especímenes de pasta de cemento en estado seco y minutos después de ser saturados al vacío durante una hora con agua destilada y con soluciones de cloruro al 16.5% y 33%; se observa en general que la presencia de líquidos atenúa de forma importante la presencia de la señal en la muestra.

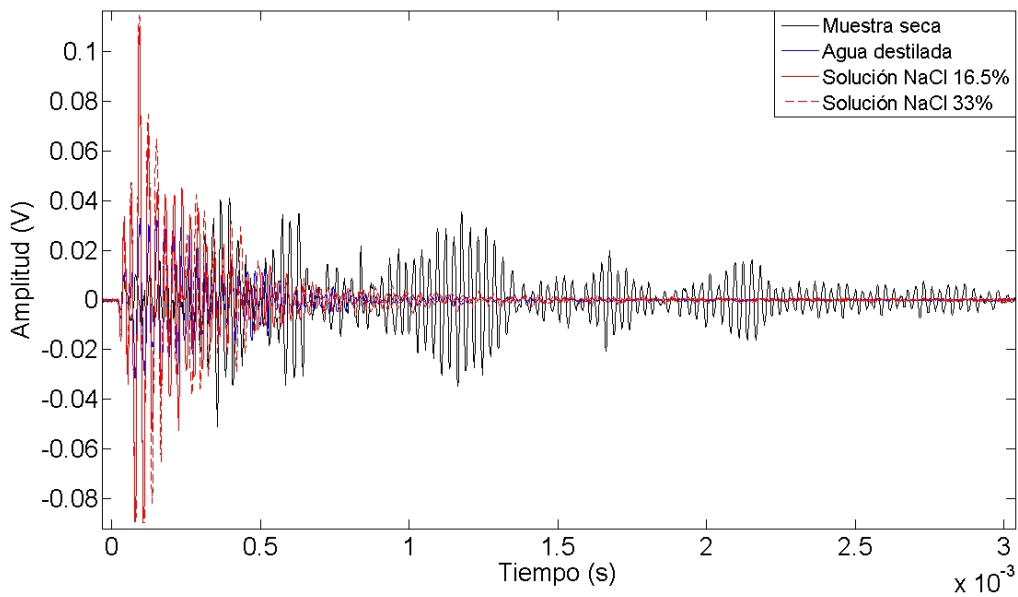


Figura 4.10 Comparación de los grupos de señales de los diversos líquidos con la muestra en estado seco.

4.2.1. Espectrogramas de los registros ultrasónicos de la Parte 2

La figura 4.11 muestra los espectrogramas del promedio de los registros de las señales obtenidas de los especímenes en estado seco y que después fueron saturados con agua destilada y con soluciones de cloruro de sodio.

Las figuras 4.11a, 4.11c, 4.11e muestran los espectros de frecuencia de las muestras en estado seco las diferencias entre ellas son debido a las heterogeneidades del material, así como a las diferencias de geometría principalmente.

La saturación del espécimen con agua destilada (Figura 4.11b) produce una atenuación de la señal significativa en tiempos mayores a 0.0005 segundos

Una situación similar se observa cuando las muestras secas se saturan con una solución de NaCl al 16.5% y 33%, debido principalmente al llenado de los poros con un fluido distinto al aire con mayor densidad y viscosidad. Sin embargo existen algunas diferencias cuando las muestras saturadas se comparan con la muestra saturada con agua destilada en cuanto a la atenuación de la energía que es mayor en las muestras saturadas con cloruro.

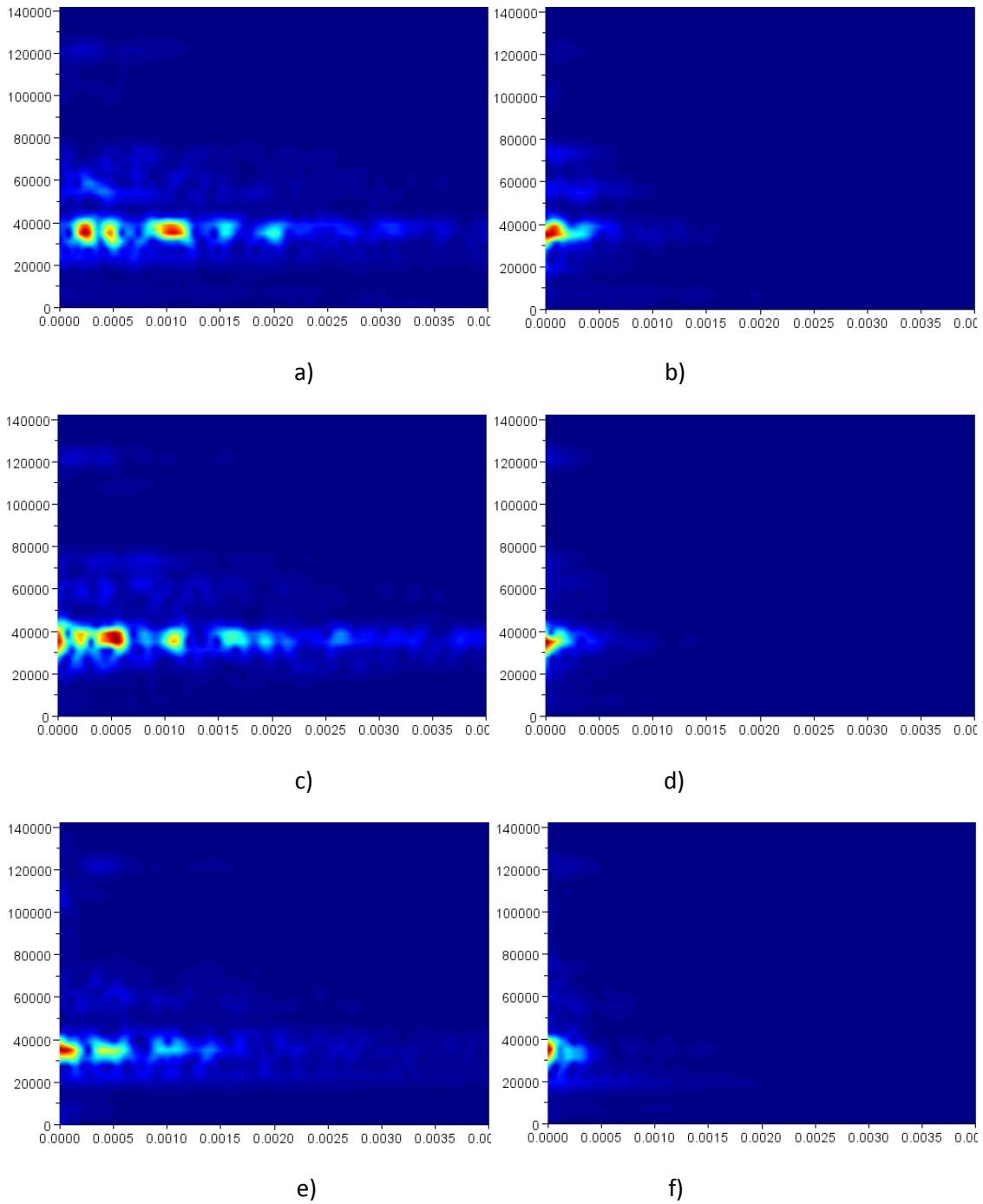
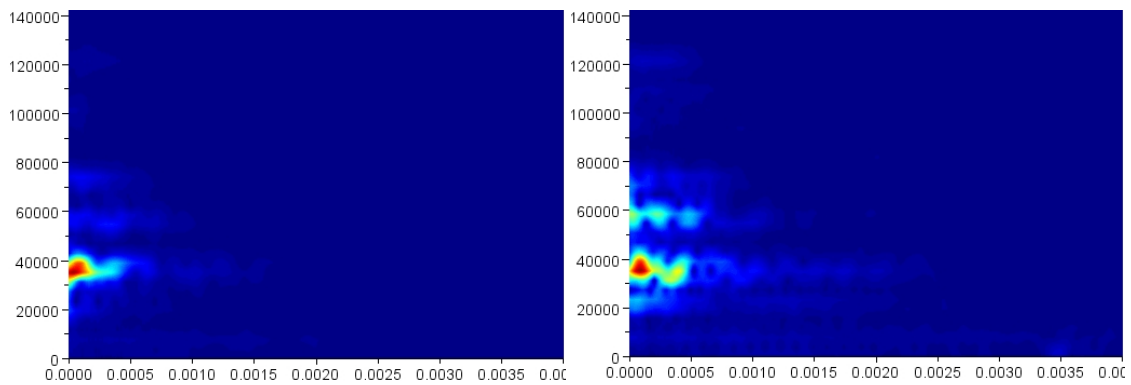


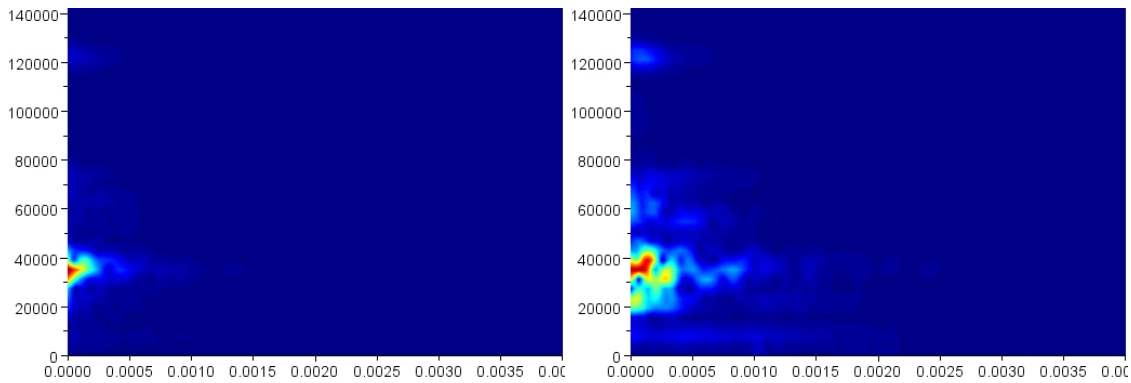
Figura 4.11. Espectros de frecuencia de a), c) y e) muestras secas, muestras minutos después de ser saturadas con b) agua destilada, d) solución NaCl 16.5% f) solución NaCl 33% ; en el eje "x" tenemos el Tiempo en segundos y en el eje "y" tenemos la frecuencia en Hertz.

Es interesante observar los cambios que se producen en la muestra siete días después de ser saturada y sin pérdida alguna de humedad (Figura 4.13). Estos cambios implican en todos los casos una mayor presencia y duración de la energía. Además de la aparición de una nueva región de energía alrededor de 60 kHz en la muestra saturada con agua destilada y a la concentración de frecuencias en la muestras saturadas con una solución de cloruros.



a)

b)



c)

d)

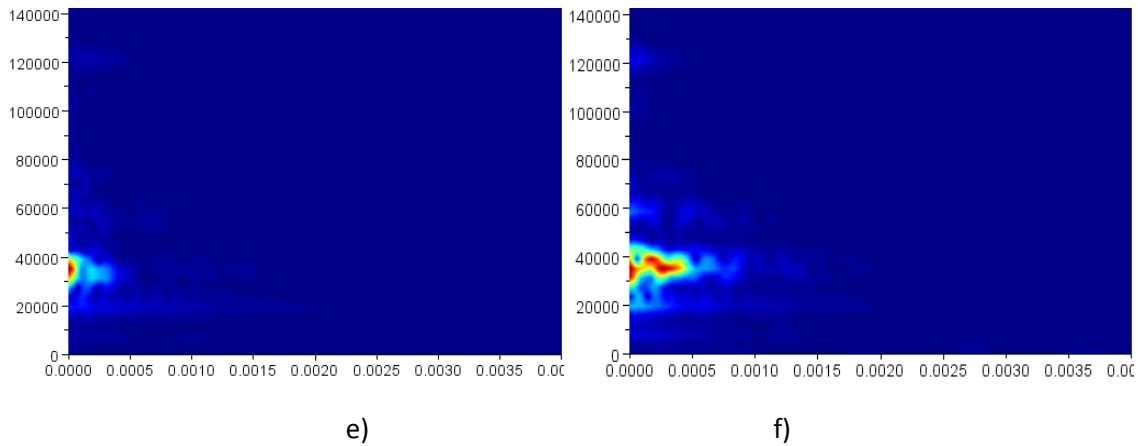


Figura 4.12. Espectros de frecuencia de muestras minutos después de ser saturadas con a) agua destilada, c) solución NaCl 16.5% e) solución NaCl 33%, y siete días después de ser saturadas b) saturadas con agua, d) Solución NaCl 16.5% f) Solución NaCl 33%; en el eje "x" tenemos el Tiempo en segundos y en el eje "y" tenemos la frecuencia en Hertz.

Este comportamiento puede indicar el ligadofísico y químico de los iones cloruro con los productos de hidratación del cemento (Castellote et al., 1999), lo cual se conoce ocurre durante los primeros siete días después de que la solución de cloruro de sodio está en contacto con la pasta de cemento hidratada (Luping and Nilsson, 1992).

El ligado de cloruros en pasta de cemento se lleva a cabo por dos principales productos de hidratación del cemento: el silicato hidratado de calcio, C-S-H ($\text{CaO-SiO}_2\text{-nH}_2\text{O}$) y el hidrato de monosulfato (AFm: $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$).

El hidrato de monosulfato liga cloruros de acuerdo a lo siguiente:



El producto de la reacción anterior es la formación de la sal de Friedel a través del intercambio de iones sulfato por iones cloruro.

El mecanismo de ligado de cloruros por el silicato hidratado de calcio (C-S-H) se ha reportado ser absorción física y tiene una fuerte dependencia de la cantidad de C-S-H y es independiente de la relación agua/cemento (Luping and Nilsson, 1993).

Las isothermas de ligado puede representarse por isothermas tipo Freundlich para altas concentraciones (>0.01 mol/L de iones cloruro):

$$\log C_b = a \log C_f + b$$

donde a y b son constantes de adsorción.

La figura 4.13 presenta una isoterma Freundlich típica.

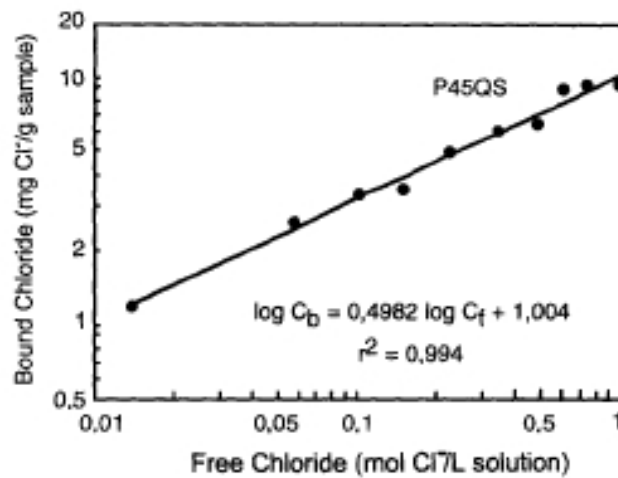


Figura 4.13 Isotherma Freundlich típica

La figura 4.14 muestra otra isoterma de ligado tipo Langmuir. Se observa que los diferentes tipos de cemento tienen capacidades distintas de ligado de cloruros.

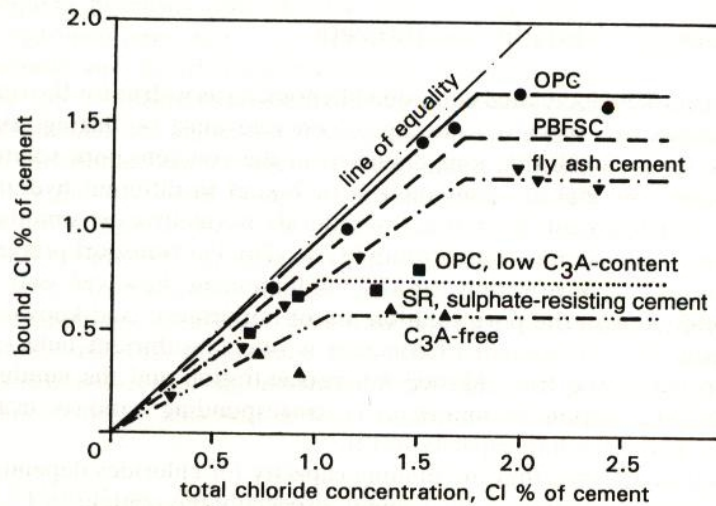


Figura 4.14 Relación entre contenido de cloruros ligados y el contenido total de cloruros de diferentes concretos.

CONCLUSIONES

Con base en el análisis de los registros ultrasónicos obtenidos en el presente trabajo se concluye lo siguiente:

- Se observan diferencias entre las señales de las muestras a las que se les agregó gotas agua destilada y de una solución de NaCl al 16.5%, particularmente en la forma en que se propagan; observando en el caso de la solución de NaCl un desfase de la coda a medida que se incrementa el número de gotas de la solución. En la coda obtenida del espécimen que se le agregó agua, no se observó dicho comportamiento.

- Cuando se agrega algún fluido a las muestras de pasta de cemento secas, se produce consistentemente una atenuación de la señal, lo que permite diferenciar la presencia o penetración de algún líquido.
- La atenuación de la señal es mayor cuando la muestra contiene soluciones de cloruro de sodio, que cuando se agrega agua destilada. Esta diferencia se observa cuando se agregaron los líquidos en cantidades muy pequeñas como gotas y también cuando se saturaron al vacío las muestras durante una hora.
- No se observaron diferencias importantes en la atenuación de la señal con respecto a la concentración de cloruros en la solución presente en la muestra de pasta de cemento.
- Los cambios observados en las frecuencias obtenidas en los especímenes de pasta de cemento a los siete días después de saturarlos, indican el ligado de cloruros.

RECOMENDACIONES

Las observaciones generadas en el desarrollo del presente trabajo permiten proponer las siguientes recomendaciones:

- Realizar mediciones ultrasónicas utilizando soluciones de NaCl con concentraciones menores a las utilizadas en este estudio y utilizar transductores con frecuencia mayor a 50 KHz.
- Caracterizar con mayor profundidad el ligado de cloruros mediante interferometría ultrasónica y determinar isothermas de ligado de cloruros que auxilien en la interpretación de los resultados.
- Explorar la obtención de imágenes de la penetración de cloruros en función del tiempo.

REFERENCIAS

- .Neville, A., 1995, Properties of Concrete, Longman Group Limited.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, 1980, Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration (T259-80), Washington.
- American Society for Nondestructive Testing, Nondestructive Testing Handbook, Volume 7, Ultrasonic Testing (ASNT, 1991)
- Nordtest Method: Accelerated Chloride Penetration into Hardened Concrete, Nordtest, Espoon, Finland, Proj. 1154-94, 1995.
- American Society of Testing and Materials, 1994, Standard Test Method for Electrical Indication of Chloride's Ability to Resist Chloride (ASTM C1202-94), Annual Book of ASTM Standards V 04.02, ASTM, Philadelphia, pp. 620-225.
- Cohen, L., 1989, Time-Frequency Distributions-A Review: Proceedings of the IEEE, 77, no. 7, 941-981.
- Del valle M. A., Pérez López T., Martínez Madrid M. (2001).El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Sanfandila, Qro. México:Instituto Mexicano del Transporte (IMT).
- Krause M, Maierhofer C, Wiggenhauser H. (1995), Thickness measurement of concrete elements using radar and ultrasonic impulse echo techniques,

6th International conference on structural faults and repair, Edited by Forde MC, 1997, London, UK, vol. 1, pp. 17–24.”

- Malhotra V.M. and Carino N.J., Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, Boca Raton, 1991.
- Popovics S., Joseph L., John S., The behavior of ultrasonic pulses in concrete, Cement and Concrete Research 20 (2) (1990) 259–270.
- Reinhardt H. W., Groje C. U. and Herb A. T., Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar- A new device, Materials and Structures, Vol. 33, 2000, pp 580-583
- Schickert M (1995), Towards SAFT-imaging in Ultrasonic Inspection of Concrete, Proc. Int. Symp. Non-destructive Testing in civil Engineering (NDT-CE), Vol. 1: 411-418.
- Snieder, R. (2004). A Guided Tour of Mathematical Methods for the Physical Science (2a edición). Cambridge, United Kingdom, Cambridge Univ. Press.
- Snieder R. 2006. The theory of coda wave interferometry. Pure Appl. Geophys. 163:455–73
- Stokoe K.H. (1985), In situ determination of elastic moduli of pavement by spectral analysis of surface wave method, Research Report of center for transportation Research, University of Texas, 368-1F,114.

- Trtnik G., Valič M. I., Franci Kavčič, Goran Turk, 2009, Comparison between two ultrasonic methods in their ability to monitor the setting process of cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 39, No. 10, pp. 876-882
- Vickridge, I. y Ranjbar, M., “The Combined Effect of Crack, Load and Aggressive Environment on the Corrosion Rate of Ferrocement Reinforcement”, (1998), Proceedings of the Sixth International Symposium of Ferrocement, pp. 313–327.
- Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, AssiaDjerbi, and MariuszKaczmarek, 2006, Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content, Cement and Concrete Research 36 pp. 625 – 633.

ANEXO

En este anexo se presenta una descripción del programa desarrollado durante la investigación aquí presentada. El programa fue desarrollado en el ambiente SCILAB y utiliza archivos de extensión .csv, para la lectura de datos de entrada, los ficheros son por registro de la señal y contienen tres componentes, la primera columna el tiempo de la señal, la segunda columna la señal de entrada y la tercera columna la señal de salida. Este programa permite generar espectrogramas de la señal de salida a partir de la división de la señal en ventanas de distinto tamaño.

Para el procesamiento de datos en el dominio de la frecuencia, es necesario trabajar con ventanas o tramos de la señal que contengan números múltiplos de 2^n muestras. Por lo tanto, para delimitar la ventana se escribe el tiempo donde iniciará la ventana, y se selecciona el número de muestras que debe de contener la ventana.

```
clear all
clc
```

```
archi = read_csv('C:\Documents and
settings\Administrador\Escritorio\experimentos\TEK000001.csv');
```

```
funa = evstr(archi);
se1=funa(:,3);
```

```
fun=se1-mean(se1);
```

```
//señal
nt = 1024;
ntw = 32;
idiez = 1;
```

```

init = 5000;
dt=0.000001;
df1=1/(ntw*dt);

//ventaneo
for i = 1:ndiez:nt-ntw
    itiem(i) =(i-1)*dt;
end

for k = 1:ntw/2+1
    ifrec(k) = (k-1)*df1;
end

for i = 1:ndiez:nt-ntw
    for k = 1:ntw
        fnew1 = fun(k+(i-1)*ndiez+init);
        fnew(i*ndiez,k) = fnew1;
    end
end

//transformada de Fourier
for i = 1:ndiez:nt-ntw
    for k = 1:ntw
        fnew2 = fnew(i*ndiez,k);
        fnewbt(k) = fnew2;
    end
    fnewfrec = abs(fftw(fnewbt));
    for k = 1:ntw/2+1
        fnew3 = fnewfrec(k);
        fespc(i*ndiez,k) = fnew3;
    end
end

clf()
xset("colormap",jetcolormap(64))
Sgrayplot(itiem,ifrec,fespc)

```