

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**EL TAMAÑO DE GRANO EN LA PROPAGACIÓN ACÚSTICA EN  
MEDIOS BIFÁSICOS**

**JONATHAN ANDRÉS SÁEZ GARCÉS**

Profesor guía: Luis Gaete Garretón

Trabajo de tesis para optar al título  
profesional de Ingeniero Físico.

Santiago de Chile  
2014

# Resumen

La caracterización de materiales homogéneos y no homogéneos es de particular interés en el área de la propagación de ondas mecánicas, ya sea del tipo sísmicas o para análisis de ensayos no destructivos, por ejemplo, las técnicas de propagación de ondas acústicas es ampliamente usada para determinar las constantes elásticas dinámicas de los materiales. La utilidad de la caracterización es que se puede identificar un material (aluminio, cobre, concreto, etc) solo midiendo sus propiedades elásticas con un ensayo no destructivo. Es lo que se conoce como problema inverso, es decir, extraer información del medio a partir de mediciones físicas. La motivación de esta Tesis es poder determinar la estructura interna de un medio por medio de técnicas de medición ultrasónicas. Específicamente, determinar el tamaño de grano promedio de un medio granular.

El objetivo de ésta Tesis es caracterizar este tipo de materiales compuestos midiendo propiedades acústicas de las muestras y determinando cómo dependen del tamaño de grano de las inclusiones incorporadas. Este estudio servirá además para describir el comportamiento de las ondas mecánicas en este tipo de medios, lo que ayudará a mejorar la interpretación de los datos que se obtiene en una variedad de mediciones acústicas como las señales sísmicas y microsísmicas.

Se hicieron una serie de probetas de concreto clasificadas según el tamaño promedio de grano interno. Usando un par de transductores piezoeléctricos, se hizo pasar un pulso ultrasónico a través del material. Con los datos registrados se determinó la velocidad de propagación y atenuación de energía en cada probeta. Se concluyó que estas propiedades sí dependen del tamaño del grano, disminuyendo ambas su valor a medida que éste es mayor.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Inspección no destructiva con ultrasonido	4
2.1.1. Velocidad de Propagación	4
2.1.2. Atenuación	6
2.1.3. Espectro de frecuencias	8
2.2. Análisis de señales	10
2.2.1. Sistemas lineales y función de transferencia	11
2.2.2. Función de transferencia de un medio sólido	15
2.3. Dispersión	17
<b>3. Método Experimental</b>	<b>22</b>
3.1. Materiales y preparación de muestras	22
3.2. Instrumentos de medición	25
3.3. Montaje experimental	27
<b>4. Resultados y Análisis</b>	<b>29</b>
4.1. Velocidad de propagación	29
4.2. Función de transferencia	34
4.3. Atenuación	38
<b>5. Conclusiones</b>	<b>40</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>41</b>

# 1 Introducción

Es bien conocido y estudiado el comportamiento físico de las ondas acústicas en medios homogéneos. Se ha hecho durante años tanto teórica como experimentalmente investigación en ésta área. Es así como al día de hoy son muy conocidos fenómenos y conceptos tales como velocidad de propagación, impedancia mecánica, elasticidad y varios otros más. Este trabajo en particular tiene como interés ampliar este estudio a medios compuestos de material homogéneo con componentes granulares caracterizando el comportamiento de las ondas acústicas cuando viajan a través de estos medios. El objetivo principal es establecer de manera experimental, que la propagación acústica se ve afectada por la distribución del tamaño de grano.

Los materiales compuestos con grano los encontramos en muchos lugares (Figura 1.1). La gran mayoría del **suelo** y subsuelo terrestre está compuesta de sedimento, materia orgánica, minerales disueltos y *fragmentos de roca* procedente de la parte más superficial de la litosfera. Las ondas mecánicas generadas por sismos atraviesan, en muchos lugares, suelos compuestos de material granulado antes de llegar a la superficie terrestre para ser registradas por los sismógrafos. Claramente estas ondas se ven afectadas de una forma diferente por estos suelos a diferencia de lo que ocurre cuando atraviesan un terreno estructuralmente homogéneo, es decir, sin granos.



Figura 1.1. Suelo con grano rocoso

También en el estudio de **rocas**, muchas de ellas con estructura granular, se utilizan técnicas de inspección ultrasónicas. Es de interés saber cómo influye el grano, su composición, densidad, tamaño y distribución por decir algunas variables, en las técnicas y análisis acústicos que se le realizan a estas rocas. Por otro lado, las mismas construcciones humanas se realizan con un sistema compuesto de conglomerantes (cemento, asfalto) y áridos (grava, gravilla, arena). Calles, paredes y puentes están hechos de esta forma (Figura 1.2). Las **estructuras de construcción** también se estudian por medio de inspecciones acústicas. Ya sea con transductores palpadores o registro de emisiones acústicas se busca detectar posibles rupturas y daños en este tipo de estructuras. Conocer cómo se comporta la acústica en este tipo de elementos compuestos es de sumo interés también.



Figura 1.2. Izquierda. Rocas homogéneas y granulares. Derecha. Probeta extraída de asfalto

Este trabajo se basa en los resultados de un experimento de inspección acústica sobre probetas de concreto con diferentes tamaños de grano. En el capítulo 2 se expondrá el marco teórico que explica los conceptos, métodos y análisis que se usaron en la investigación. El capítulo 3 detallará el montaje y técnicas experimentales utilizadas, mientras que el capítulo 4 mostrará los resultados y análisis. Finalmente, el capítulo 5 está destinado a las conclusiones.

## 2 Marco Teórico

Esta tesis está enfocada en el estudio de pulsos acústicos que pasan a través de una mezcla de cemento con granos de rocas. Para ello se montó un experimento (Fig.2.1) en el que dos transductores piezoeléctricos son acoplados a las caras planas de una probeta cilíndrica de concreto. Mientras un transductor sirve como emisor de pulsos acústicos, el otro funciona como receptor. Las ondas viajan a través del medio y las señales son registradas por un osciloscopio digital.

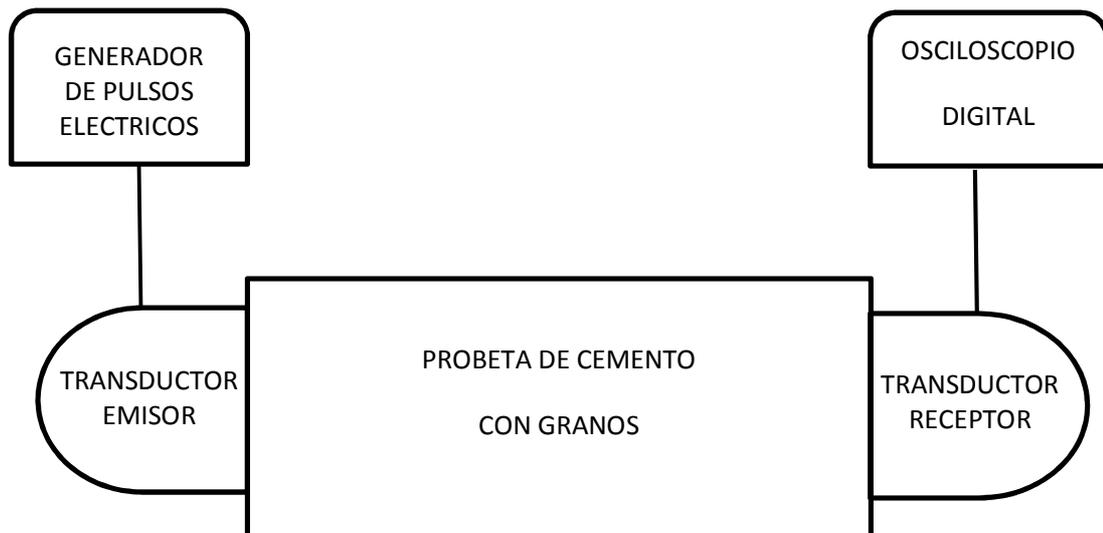


Figura 2.1. Montaje experimental

Antes de entrar en detalles acerca del experimento es importante repasar ciertos aspectos teóricos del mismo que van desde el tratamiento matemático de los datos hasta la física involucrada.

## **2.1 Inspección no destructiva con ultrasonido**

Los Ensayos No Destructivos (END), agrupan una diversidad de métodos que permiten obtener una información muy amplia sobre las propiedades, estructura, presencia de discontinuidades y dimensiones de un material o de una pieza, sin alterar sus condiciones (Valencia, 2009). Las técnicas de evaluación no destructiva, pueden ser aplicadas para:

- Analizar las dimensiones de una pieza.
- Detección, identificación y dimensionamiento de discontinuidades.
- Caracterización de materiales.
- Control de calidad de procesos industriales y de fabricación de materiales.
- Evaluación de la condición de un componente para determinar su continuidad en servicio.

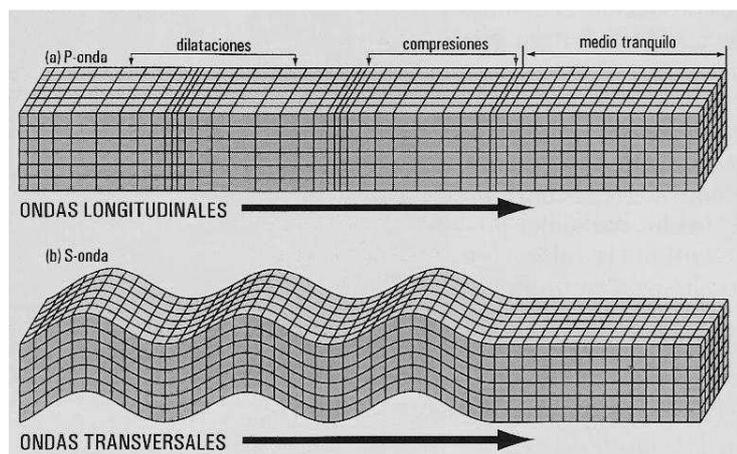
En este trabajo caracterizaremos un material compuesto. Para ello nos valdremos de tres propiedades que presentan las ondas viajeras en un medio: velocidad de propagación, atenuación y su espectro de frecuencias.

### **2.1.1 Velocidad de propagación**

La velocidad acústica es la distancia recorrida por las ondas en un medio en una unidad de tiempo; en otras palabras, es la velocidad de propagación del sonido en el medio.

Las ondas se propagan principalmente de dos formas diferentes: longitudinal y transversalmente (Fig 2.2). Una onda longitudinal es una onda, en la que el movimiento

de oscilación de las partículas del medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda. Las ondas longitudinales reciben también el nombre de ondas de presión u ondas de compresión. Algunos ejemplos de ondas longitudinales son el sonido y las ondas sísmicas de tipo P generadas en un terremoto. Por otro lado, una onda transversal es una onda que se caracteriza porque sus oscilaciones ocurren perpendiculares a la dirección de propagación. Si una onda transversal se mueve en la dirección x-positiva- sus oscilaciones van en dirección arriba y abajo y están en el plano y-z, como se muestra en la figura 2.2.



**Figura 2.2. Tipos de ondas acústicas en un medio sólido**

La velocidad acústica es una característica del material y, en general, es constante para cada material para cualquier frecuencia y cualquier longitud de onda. Sin embargo, esto no es rigurosamente exacto, pues dicha velocidad depende, especialmente en los gases y líquidos, de la presión, de la temperatura y de otros parámetros. Ahora bien, en muchos materiales sólidos, tales como los metales, esta influencia se puede despreciar. Por ello, se puede tomar esta velocidad, aproximadamente, como una constante del

material, condición muy útil en los ensayos por ultrasonido (Universidad de Venezuela, Curso de Ultrasonido Básico).

### 2.1.2 Atenuación

La atenuación es la pérdida progresiva de la energía de la señal ultrasónica. A medida que el haz ultrasónico viaja dentro del material, va perdiendo energía debido a la resistencia que opone la estructura del material. Como consecuencia, el pulso será cada vez menor en amplitud a medida que la onda viaja por el medio (Valencia, 2009).

La amplitud puede escribirse como una función del tiempo de la siguiente forma

$$A(t) = A_0 e^{-\omega_0 t / 2Q} \quad [2.1]$$

Donde  $A_0$  es la amplitud inicial,  $\omega_0$  la frecuencia angular de la onda,  $t$  el tiempo, y  $Q$  es definido en términos de la fracción de energía perdida por ciclo de oscilación. En otras palabras

$$\frac{1}{Q} = -\frac{\Delta E}{2\pi E} \quad [2.2]$$

Podemos escribir también una ecuación para la amplitud como función de la distancia recorrida

$$A(x) = A_0 e^{-(f\pi/Qv)x} \quad [2.3]$$

donde  $x$  es la distancia recorrida,  $f$  la frecuencia temporal y  $v$  la velocidad de propagación de la onda. Es obvio de esta expresión que para  $Q$  constante una onda de alta frecuencia atenuará más que una de baja frecuencia. Esto es debido a que una onda de alta frecuencia hará más oscilaciones por distancia recorrida que una de baja frecuencia (Lay, 1995).

La pérdida de energía a través de procesos no elásticos se mide generalmente por la atenuación intrínseca y es parametrizado por  $Q$ . Valores grandes de  $Q$  implican una pequeña atenuación. Por otro lado cuando  $Q$  se aproxima a cero, la atenuación es muy fuerte. A frecuencias más altas,  $Q$  depende de la frecuencia debido a que las longitudes de onda son del orden de las estructuras internas del material.

Ya que en este trabajo solo nos interesa relacionar características del material con el tamaño de grano del mismo, calcularemos el porcentaje de energía,  $E_G$ , transmitida a través del material en relación a la energía,  $E_S$ , que se transmite entre sensor – sensor cuando están acoplados sin nada entre ellos

$$\Delta E = \frac{E_G}{E_S} \cdot 100\% \quad [2.4]$$

De esta forma veremos la atenuación que produce el medio a medida que cambia el tamaño de grano interno

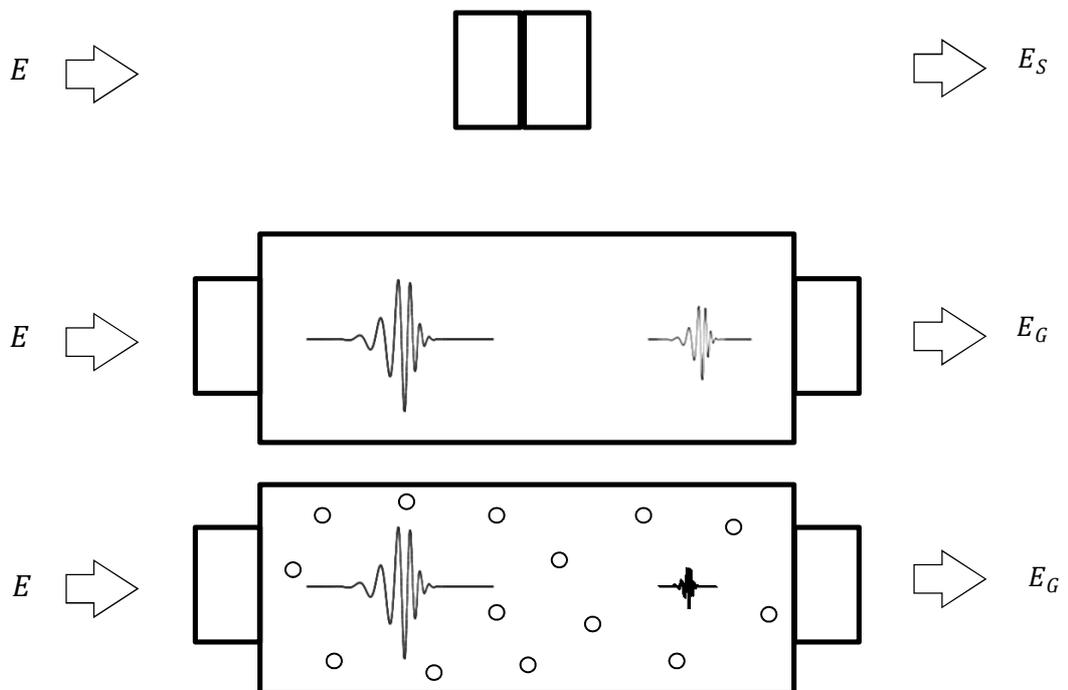


Figura 2.3. Energía transmitida entre sensores con y sin probeta

### 2.1.3 Espectro de frecuencias

Las señales que generamos, registramos y analizamos son temporales, es decir, son magnitudes físicas que cambian con el tiempo. Hay diferentes maneras de mirar una señal temporal: una en el dominio del tiempo y otra en el dominio de la frecuencia (inverso del tiempo), haciendo una transformada de Fourier temporal. De esta forma tenemos una doble representación (tiempo/frecuencia) y se puede pasar de una representación a otra. Sin embargo, estas dos representaciones conservan exactamente la misma información: no vamos a tener más información mirando una señal en el dominio de las frecuencias que en el dominio del tiempo. Son solamente dos maneras diferentes de representar la misma información (Legrand, 2005).

Un pulso de energía finita puede descomponerse en una suma infinita de señales sinusoidales. Cada una con una frecuencia, fase y amplitud específica. El espectro de frecuencia nos da información acerca de que componentes frecuenciales se encuentran en ese pulso. Esta forma de ver la señal nos puede aportar información que quizás en el espacio temporal sea difícil apreciar.

Como se mencionó, para pasar dominio de frecuencias se debe hacer una transformada de Fourier temporal la que definimos de la siguiente forma para una función  $f(t)$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad [2.5]$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia:  $\omega = 1/t$ .

Una transformada de Fourier  $F(\omega)$  es compleja con una parte real  $Re[F(\omega)]$  y una parte imaginaria  $Im[F(\omega)]$ , o sea tiene una amplitud y una fase. Gráficos que representan la amplitud y la fase respecto a las frecuencias se llaman un espectro (de Fourier) de amplitud y fase, respectivamente.

- La **amplitud** de  $F(\omega)$  es:

$$|F(\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}[F(\omega)]^2 + \operatorname{Im}[F(\omega)]^2} \quad [2.6]$$

El espectro de amplitud da la amplitud  $|F(\omega)|$  de cada frecuencia  $\omega$  que contiene globalmente toda la señal  $f(t)$ . Es decir, es una información global: no dice dónde están las bajas y altas frecuencias en la señal. Dice solamente si la señal tiene o no tiene bajas frecuencias.

- La **fase** de  $F(\omega)$  es:

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{\operatorname{Im}[F(\omega)]}{\operatorname{Re}[F(\omega)]} \right) \quad [2.7]$$

El espectro de fase da la fase  $\varphi(\omega)$  de cada frecuencia  $\omega$  que contiene globalmente toda la señal  $f(t)$ .

- La **energía** de  $F(\omega)$  es:

$$|F(\omega)|^2 = \operatorname{Re}[F(\omega)]^2 + \operatorname{Im}[F(\omega)]^2 \quad [2.8]$$

El espectro de energía da la energía  $|F(\omega)|^2$  de cada frecuencia  $\omega$  que contiene globalmente toda la señal  $f(t)$ .

- Formula de **Parseval**:

La energía total de una función real  $f(t)$  se puede calcular de dos maneras diferentes. Una integrando la función en el dominio del tiempo,  $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt$ , la otra integrando la función en el dominio de las frecuencias,  $\int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega$ . La fórmula de Parseval dice que ambas expresiones son iguales

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad [2.9]$$

Este teorema es una ilustración de que una señal no tiene más información (y en particular más energía) en un dominio u otro (dominio del tiempo o de las frecuencias). Eso significa que la energía de una señal es una constante (independiente de que la señal sea expresada en el dominio temporal o en el dominio de las frecuencias). Mirar una señal en el dominio del tiempo o de las frecuencias da fundamentalmente la misma información. Son solamente dos maneras diferentes de mirar al mismo objeto.

## 2.2 Análisis de Señales

El experimento de esta tesis consiste en generar una señal acústica, hacerla pasar por un medio y capturarla posteriormente. Desde que se genera la señal hasta que se captura, ésta pasa por una serie de transformaciones físicas complejas (Fig. 2.1, Fig. 2.3). Primero un generador de señales electrónico crea un impulso eléctrico con parámetros específicos (amplitud, frecuencia de resonancia, ancho de banda). Este impulso eléctrico es transformado por un transductor piezoeléctrico en vibraciones mecánicas (pulso acústico). Estas vibraciones viajan a través de un medio sólido siendo transformadas por el mismo. Un transductor recibe estas vibraciones y las transforma en una señal eléctrica. La señal es registrada en formato digital y a tiempo discreto por un osciloscopio.

Toda esta cadena de procesos físicos se puede abordar de una manera más simple usando teoría de análisis de señales.

### 2.2.1 Sistemas Lineales y función de transferencia

Una señal se define como una magnitud física que varía con el tiempo, el espacio o cualquier otra variable o variables independientes. Matemáticamente, describimos una señal como una función de una o más variables independientes. A su vez, un sistema se puede definir como un dispositivo físico que realiza una operación sobre una señal (Legrand, 2005).

Un sistema puede formar parte de otro sistema de mayor nivel, en cuyo caso al primero se le denomina subsistema del segundo. Los diferentes subsistemas intercambian por lo general información, materia o energía para lograr algún objetivo. Los términos señales de entrada o de salida se utilizan entonces para abstraer ese flujo de información, materia o energía en el concepto matemático de funciones.

El sistema entonces puede interpretarse como un conjunto de subsistemas que logran transformar una señal en otra. Estos dispositivos pueden ser entes físicos, como un circuito electrónico, o virtuales, como algoritmos implementados en software.

Para entender cómo se estudian los sistemas definiremos dos conceptos matemáticos.

- **Convolución**

La definición del producto de convolución de dos señales  $f(t)$  y  $g(t)$  es:

$$[f * g](t) = f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u)g(t - u)du \quad [2.10]$$

Hasta ahora esto es sólo una operación entre dos funciones reales, sin embargo, un teorema muy importante en análisis de señales, y que usaremos más adelante en esta Tesis dice que la convolución temporal de dos funciones, en el espacio de frecuencias se convierte en una multiplicación ordinaria entre las funciones que representan el espectro de cada señal:

$$x(t) * y(t) \xrightarrow{\text{Espacio tiempo} \rightarrow \text{Espacio de frecuencias}} X(f) \cdot Y(f) \quad [2.11]$$

- **Delta de Dirac o impulso unitario**

Una delta de Dirac no es una función, sino una distribución. Fue inventada por el inglés Paul Dirac (1902-1984), quien era físico así que definió la delta de Dirac por necesidad y sin el rigor matemático que desarrolló después el matemático francés Laurent Schwartz (1915-2002) con la teoría de las distribuciones. Nosotros vamos a definir la delta de Dirac sin hablar de distribuciones porque está fuera del alcance de esta tesis. La delta de Dirac puede representarse como una función que vale infinito en 0 y vale 0 en todos los otros lugares, pero de tal forma que la integral de la delta entre  $-\infty$  y  $+\infty$ , que es la integral entre  $-\epsilon$  y  $+\epsilon$ , o sea, sobre un intervalo muy pequeño, vale 1.

$$\delta(t) = \begin{cases} +\infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \quad [2.12]$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = \int_{-\epsilon}^{+\epsilon} \delta(t) dt = 1 \quad [2.13]$$

Además la delta de Dirac tiene como propiedad ser un elemento neutro del producto de convolución y su transformada de Fourier es igual a 1. Es decir,

$$\delta(t) * f(t) = f(t) * \delta(t) = f(t) \quad [2.14]$$

$$F[\delta(t)] = 1 \quad [2.15]$$

Que la transformada de Fourier de la delta de Dirac sea de valor constante, quiere decir que esa señal posee todo el espectro de frecuencias. Es decir, si introducimos una delta de Dirac en un sistema, le estamos introduciendo todas las frecuencias que existen con la misma amplitud y en un mismo instante.

Ahora que conocemos el concepto de convolución y delta o pulso de Dirac podemos definir un sistema lineal y la función de transferencia del mismo.

Un sistema lineal es un sistema (por ejemplo un instrumento) que responde linealmente a toda entrada  $e(t)$ , o sea que sus salidas  $s(t)$  verifiquen:

$$e(t) \rightarrow [\textit{sistema lineal}] \rightarrow s(t) \quad [2.16]$$

$$A \cdot e(t) \rightarrow [\textit{sistema lineal}] \rightarrow A \cdot s(t)$$

$$e_1(t) + e_2(t) \rightarrow [\textit{sistema lineal}] \rightarrow s_1(t) + s_2(t)$$

La repuesta de un sistema a un pulso de Dirac (señal impulsiva) se llama de diferentes maneras: función de Green, repuesta al impulso, función de transferencia o repuesta instrumental.

La transformada de un pulso de Dirac es una constante. Eso significa, como ya se mencionó, que el pulso contiene todas las frecuencias con las mismas amplitudes, o sea, si sumamos una infinidad de frecuencias vamos a simular una delta de Dirac. Entonces si entramos como señal un pulso de Dirac en un sistema lineal, su salida será la repuesta del sistema a todas las frecuencias posibles, por eso se llama repuesta impulsiva. Basta conocer esta repuesta impulsiva o función de transferencia  $h(t)$  de un sistema lineal para conocer la respuesta del sistema a cualquier otra señal de entrada. Por ejemplo, si  $e(t)$  es una entrada cualquiera, la salida del sistema lineal será simplemente la convolución de la entrada por la función de transferencia, o sea:

$$e(t) \rightarrow [\textit{sistema lineal}] \rightarrow s(t) = e(t) * h(t) \quad [2.17]$$

Si queremos conocer la función de transferencia de un sistema, la que es desconocida en la mayoría de los sistemas físicos reales, podemos introducirle una señal y observar su salida

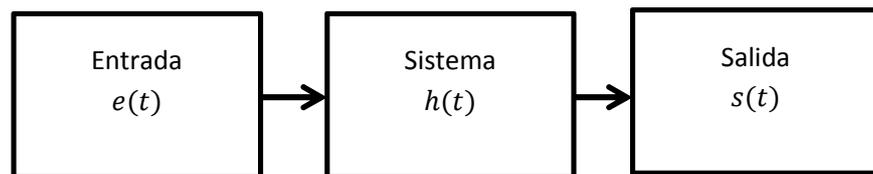


Figura 2.4. Sistema lineal en el espacio tiempo.

$$e(t) * h(t) = s(t) \quad [2.18]$$

Sin embargo, sabemos de [2.11] que en el espacio de frecuencias la convolución se transforma en una simple multiplicación. En el espacio de frecuencias el sistema (Fig. 2.4) y la igualdad [2.18] quedan

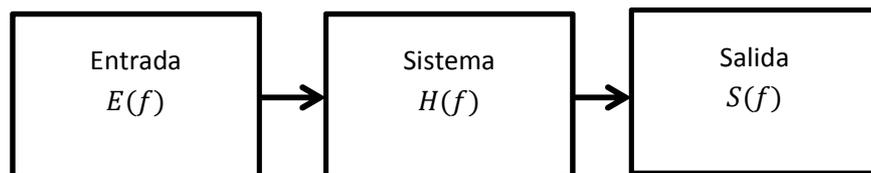


Figura 2.5. Sistema lineal en el espacio de frecuencias.

$$E(f) \cdot H(f) = S(f) \quad [2.19]$$

La función de transferencia es

$$H = \frac{S}{E} \quad [2.20]$$

### 2.2.2 Función de transferencia de un medio sólido

Nuestro experimento (Fig. 2.1) podemos representarlo por el siguiente sistema (Fig. 2.6)

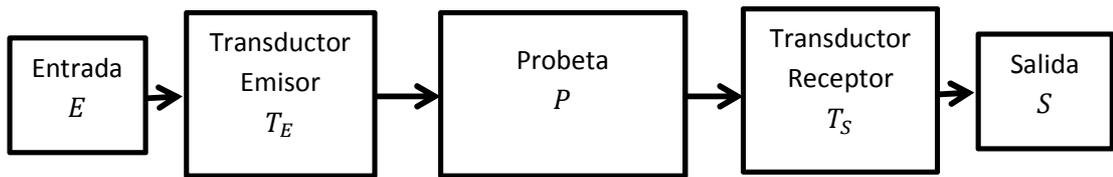


Figura 2.6. Representación en diagrama de bloques del sistema experimental.

Como podemos ver en el **diagrama de bloques** (Fig. 2.6) nuestro sistema es más complejo que el mostrado en la sección anterior. Consta de una entrada y salida eléctrica (potencial eléctrico). Un transductor (emisor) que transforma la señal eléctrica de entrada en un pulso acústico. El medio (probeta) por el que viaja la onda. Y un segundo transductor (receptor) que nos da la salida transformando la señal acústica en potencial eléctrico.

Como consecuencia del teorema de convolución en el espacio de frecuencias [2.11] tenemos la siguiente igualdad

$$E(f) \cdot T_E(f) \cdot P(f) \cdot T_S(f) = S(f) \quad [2.21]$$

Para conocer la función de transferencia del medio  $P(f)$  sólo debemos despejar

$$P = \frac{S}{E \cdot T_E \cdot T_S} \quad [2.22]$$

Encontrar la función de transferencia con esta expresión no es tan simple como pudiera parecer. No solo debemos registrar la señal de entrada y salida del sistema

simultáneamente. También debemos conocer la función de transferencia de los transductores emisor y receptor. Eso tomando en cuenta que ambos funcionan como sistema en sentidos contrarios. El emisor transforma energía eléctrica en mecánica mientras que el receptor hace lo opuesto (sí suponemos que el proceso es igual en ambos sentidos estamos introduciendo un supuesto no verificado experimentalmente que podría generar error en los resultados).

Existe una forma de calcular la función de transferencia del medio evitando los inconvenientes mencionados.

Supongamos que hacemos dos experimentos diferentes; uno con la probeta entre los transductores y otro sin probeta, es decir, sensor acoplado a sensor. En ese caso tendríamos dos diagramas de bloques con sus respectivas ecuaciones (Fig. 2.7)

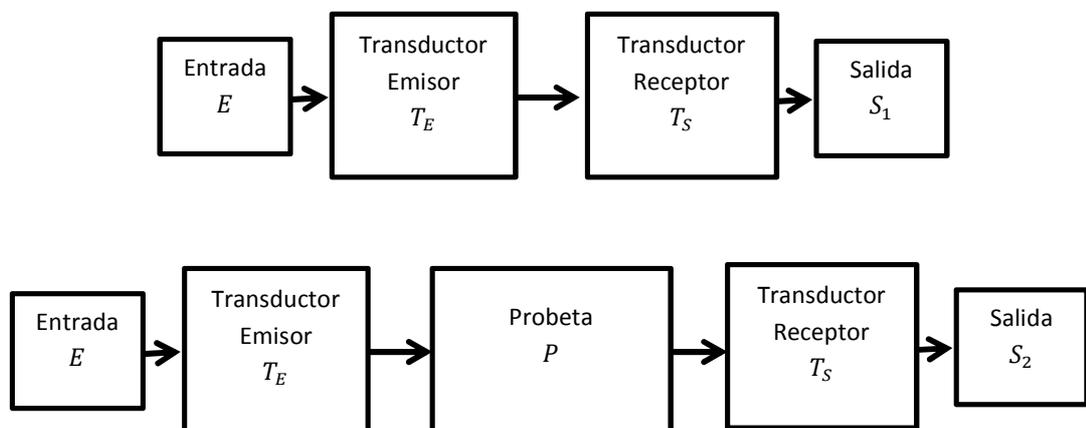


Figura 2.7. Diagrama de bloques de ambos sistemas.

$$E \cdot T_E \cdot T_S = S_1 \quad [2.23]$$

$$E \cdot T_E \cdot P \cdot T_S = S_2 \quad [2.24]$$

Podemos notar lo siguiente. En ambas ecuaciones la señal de entrada es la misma. También la función de transferencia de los transductores es la misma en los dos sistemas. Lo único que cambia son las señales de salida, pero ambas son fácilmente medibles con un osciloscopio. Dividiendo [2.24] con [2.23] tenemos

$$P = \frac{S_2}{S_1} \quad [2.25]$$

De esta forma podemos calcular la función de transferencia solo conociendo las señales de salida de ambos sistemas, sin tener que caracterizar la respuesta instrumental de ningún transductor.

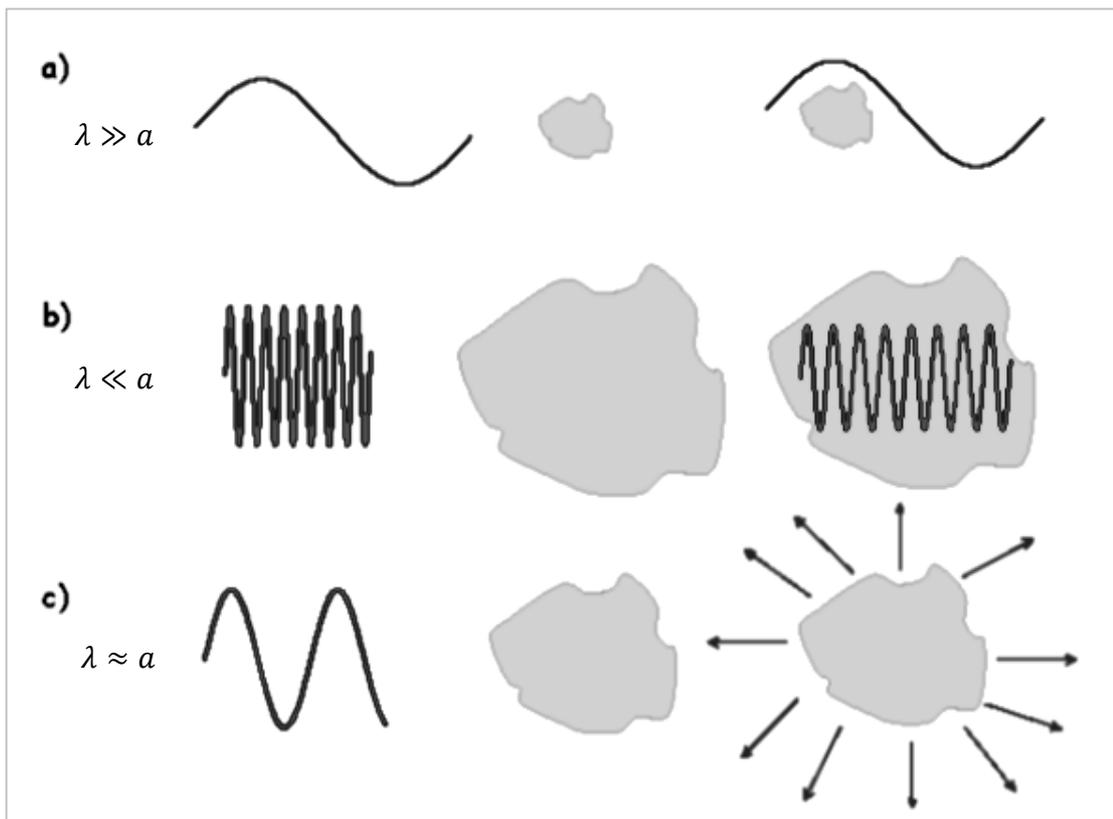
En un sistema lineal ideal todas las frecuencias pueden entrar, interactuar y salir del sistema. En la realidad los instrumentos son limitados. Los transductores tienen una frecuencia de resonancia y un ancho de banda. Fuera de este ancho de banda los transductores no resuenan (vibran). Por lo tanto, aunque para calcular la función de transferencia del medio no es necesario conocer la respuesta instrumental de los sensores, sí estamos limitados por su ancho de banda. Si queremos tener una función de transferencia que abarque un amplio rango de frecuencias debemos usar pares de transductores con distintas frecuencias de resonancia.

### 2.3 Dispersión

Cuando un medio es granular o **heterogéneo**, las ondas acústicas que interactúan con las heterogeneidades generan otras ondas, y la onda incidente transfiere energía a

las nuevas ondas, por lo que disminuye la energía en la dirección de propagación estudiada. Esta disminución de la energía acústica es consecuencia de una redistribución de la energía en el medio de propagación. Existen varios fenómenos implicados en este tipo de procesos, como son la dispersión, la refracción y la reflexión (Martínez, 2005).

La relación entre la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación y las dimensiones del obstáculo o heterogeneidad ( $a$ ) va a determinar el que se produzca dispersión, reflexión o refracción, tal y como se observa en la figura 2.8.



**Figura 2.8.** a) La onda acústica se propaga como si no existiera el obstáculo. b) las dimensiones del obstáculo son lo suficientemente grandes para que la onda lo considere como otro medio con velocidad de propagación diferente. c) las dimensiones del obstáculo son las adecuadas para que se produzca el dispersión

- a) Si  $\lambda \gg a$ , la onda acústica no detecta la presencia del obstáculo, y por tanto, la probabilidad de que se produzca dispersión es muy pequeña.
- b) Si  $\lambda \ll a$ , los obstáculos aparecen como límites de separación de diferentes capas y está priorizada la reflexión y/o refracción de las ondas acústicas.
- c) Si  $\lambda \sim a$ , la dispersión es el mecanismo principal de pérdida de energía acústica.

Esta clasificación es muy severa y la realidad es un caso intermedio, de tal manera que no se produce ninguno de estos fenómenos de forma aislada, existiendo reflexiones, refracciones y procesos de dispersión a la vez, aunque para explicar cada uno de estos fenómenos se estudien por separado.

En este trabajo nos centraremos solo en la dispersión, no en las reflexiones, refracción y/u otras formas de atenuación.

El fenómeno de dispersión por pequeñas partículas ha sido ampliamente estudiado en muchos campos de la Física, y está asociado a las heterogeneidades presentes en el medio de propagación de la energía. Cuando una onda incide en una heterogeneidad cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda, se producen otras ondas. Es como si las heterogeneidades se comportaran como otras fuentes. A las ondas generadas en las heterogeneidades se les denomina **ondas secundarias** u **ondas de dispersión**.

En la figura 2.9 se ha ilustrado este proceso, donde  $E_{in}$  es la radiación incidente,  $\Delta E_S$  es la radiación de dispersión, y  $E_{sal}$  la radiación de salida. La luz nos ofrece ejemplos muy cercanos de dispersión. Por ejemplo, el color del cielo y de las nubes es debido a la dispersión de la luz solar por las moléculas de gas y partículas suspendidas en la atmósfera. Otro ejemplo, es la imposibilidad de ver un rayo de luz en un ambiente totalmente limpio. Los rayos de luz sólo son vistos cuando la luz sufre dispersión con las partículas de polvo, gotas de agua, etc., suspendidas en la atmósfera.

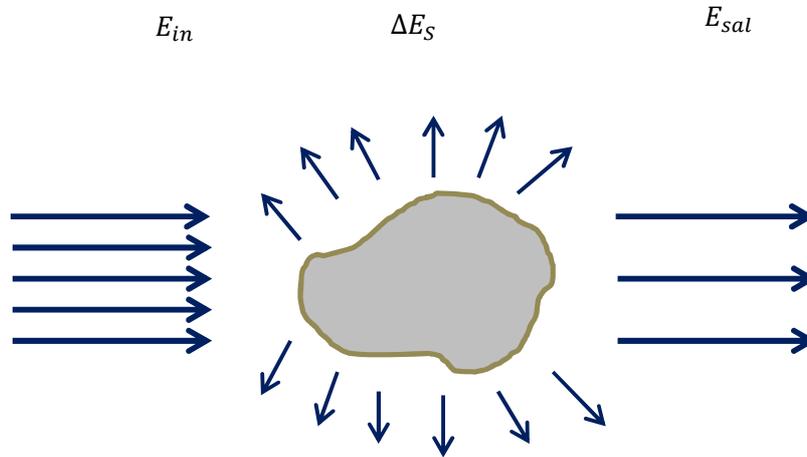


Figura 2.9. Dispersión de radiación producida por un obstáculo

Teniendo en cuenta la dirección de la energía secundaria respecto a la energía incidente en la heterogeneidad, la dispersión se puede clasificar en:

- a. Dispersión transmitida. La mayor parte de la energía secundaria tiene igual dirección que la energía incidente.
- b. Dispersión retornada. La mayor parte de la energía secundaria tiene dirección contraria a la energía incidente.

Dependiendo de la relación entre la pérdida de energía por dispersión y la energía incidente en la heterogeneidad, los procesos de dispersión se pueden dividir en:

1. Dispersión fuerte. Este caso se verifica cuando:

$$\frac{\Delta E_S}{E_{in}} \approx 1 \quad [2.26]$$

2. **Dispersión débil.** En estos casos se puede considerar:

$$\frac{\Delta E_s}{E_{in}} \ll 1 \quad [2.27]$$

En la Naturaleza, lo más común es que no se produzca dispersión débil, ni fuerte, que son los dos casos extremos, sino procesos en los que las ondas de dispersión pueden sufrir a su vez nuevos procesos de dispersión. Es decir, cada obstáculo es expuesto no sólo a la onda procedente de la fuente, sino también a las ondas de dispersión producidas por otros obstáculos. A este proceso se le denomina **dispersión múltiple**. El tratamiento matemático de la dispersión múltiple es complicado, por lo que si después de atravesar un medio heterogéneo, la energía en la dirección de observación es muy similar a la energía incidente, por simplicidad, se suele hacer la aproximación de que sólo ha tenido lugar un único proceso de dispersión.

### 3 Método experimental

En este capítulo se explicará cómo se prepararon las muestras, qué montaje se armó para realizar los experimentos y qué instrumentación se usó.

#### 3.1 Materiales y preparación de muestras

Las probetas que se analizaron están hechas de cemento con grano de roca. Se usó cemento blanco hecho por Ibérica Industrial. La roca de menor tamaño es arena de playa. Midiendo una muestra significativa de granos con un pie de metro se estimó un diámetro promedio de 1.00mm. El resto de los granos son piedras ordinarias de forma ovalada. Sus tamaños van desde 1.70mm hasta los 13.00mm. Todas tienen una densidad similar de 2.6 [gr/cm<sup>3</sup>].

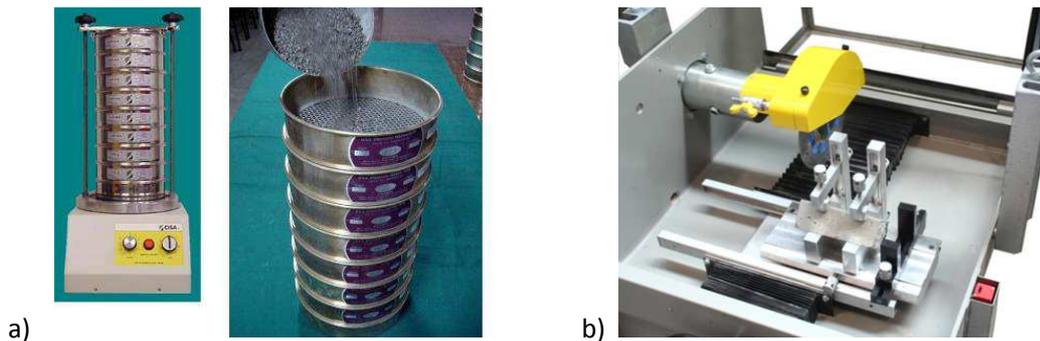
Los granos fueron separados en grupos de igual tamaño. A cada grupo se le asignó una letra para facilitar su identificación (Tabla 3-1).

GRANO	A	B	C	D	E	F	G
TAMAÑO (mm)	1.00	1.70	2.36	3.35	4.75	6.70	13.00

Tabla 3-1 Clasificación de granos según su tamaño

Los granos B – F fueron filtrados según tamaño mediante un proceso de tamizado (Figura 3.1.a). El tamaño de las oberturas de las rejillas son los que aparecen en la tabla

3-1. El tamaño del grano G fue estimado por medición directa, de igual forma que el grano A.



**Figura 3.1. a) Proceso de tamizado en el que una cantidad heterogénea de gravilla pasa por una serie de rejillas de distintos tamaños mientras son agitadas, b) Máquina cortadora de probetas.**

En la confección de las probetas se hicieron dos grupos, uno con una proporción de 90% de cemento y 10% de grano en volumen y otro con 60% de cemento y 40% de grano en volumen (Figura 3.2). La cantidad de agua utilizada en la mezcla corresponde a un 40% de la cantidad de cemento. Todas estas porciones de cemento, grano y agua eran puestas en un recipiente donde se les revolvía hasta generar la mezcla deseada. Las mezclas eran depositadas en un tubo PVC de 50mm de diámetro y 120mm de largo aproximadamente. Luego de 5 días, las probetas ya en estado sólido, eran sacadas del tubo para su secado final a temperatura ambiente.

Estando las probetas cilíndricas completamente secas y sólidas fueron cortadas con la maquina cortadora “Core trimmer and cut-off machine, CONTROLS” (Fig. 3.1.b), para que todas tuvieran el mismo tamaño (Tabla 3-2) y sus caras fueran lo más lisa posible.

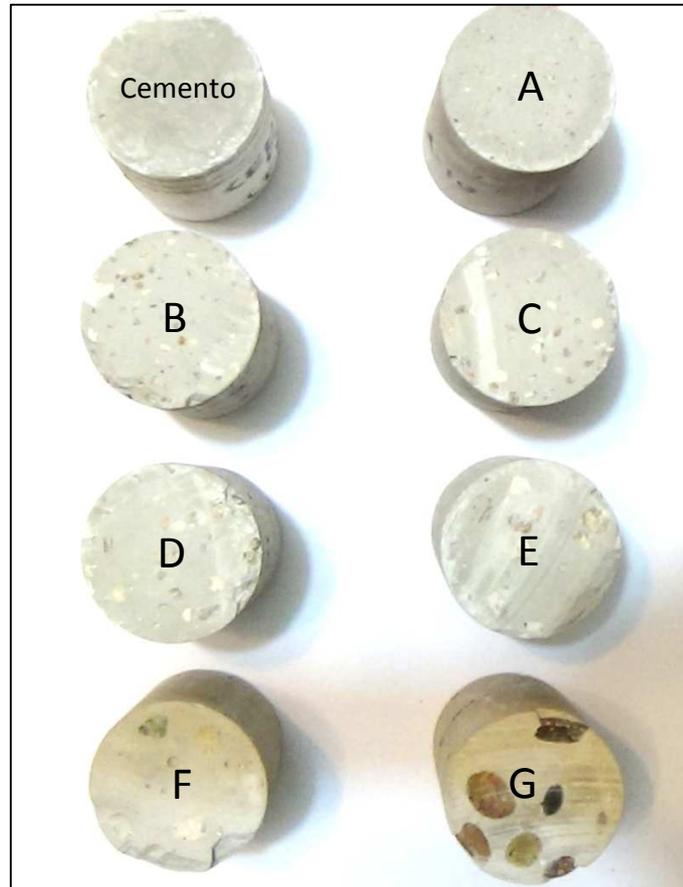


Figura 3.2. Clasificación de granos. Probetas con 10% de granos.

Largo de las probetas (mm)

	10% de Grano	40% de Grano
Cemento	70,00	45,50
A	71,90	45,90
B	70,80	45,90
C	70,75	46,35
D	70,95	47,00
E	70,80	47,00
F	70,60	46,60

Tabla 3-2. Largo de las probetas para cada tamaño y porcentaje de grano

### 3.2 Instrumentos de medición

Para cada medición se usó una pareja de transductores piezoeléctricos de la misma frecuencia. Uno para producir el pulso y el otro para recibirlo y registrarlo. A continuación se detallan sus características según el fabricante.

	
<p>Transductor Piezoeléctrico</p> <p>Panametrics</p> <p>Modelo V1011</p> <p>Frecuencia de resonancia 100kHz</p> <p>Pick de frecuencia 90kHz</p> <p>Ancho de banda. 70-130kHz</p> <p>Diámetro cara radiante 42 mm</p>	<p>Transductor Piezoeléctrico</p> <p>Panametrics</p> <p>Modelo V102</p> <p>Frecuencia de resonancia 1MHz</p> <p>Pick de frecuencia 0.9MHz</p> <p>Ancho de banda. 0.3-1.1MHz</p> <p>Diámetro cara radiante 30 mm</p>

Para generar la señal eléctrica que excita al transductor emisor se utilizó un Emisor-Receptor de pulsos ultrasónicos con control manual, el Olympus 5072PR (Fig. 3.3). Este

Emisor-Receptor también amplifica y atenúa la señal del transductor receptor según lo requiera el usuario.



Figura 3.3 Emisor-Receptor de Pulsos Ultrasónicos.

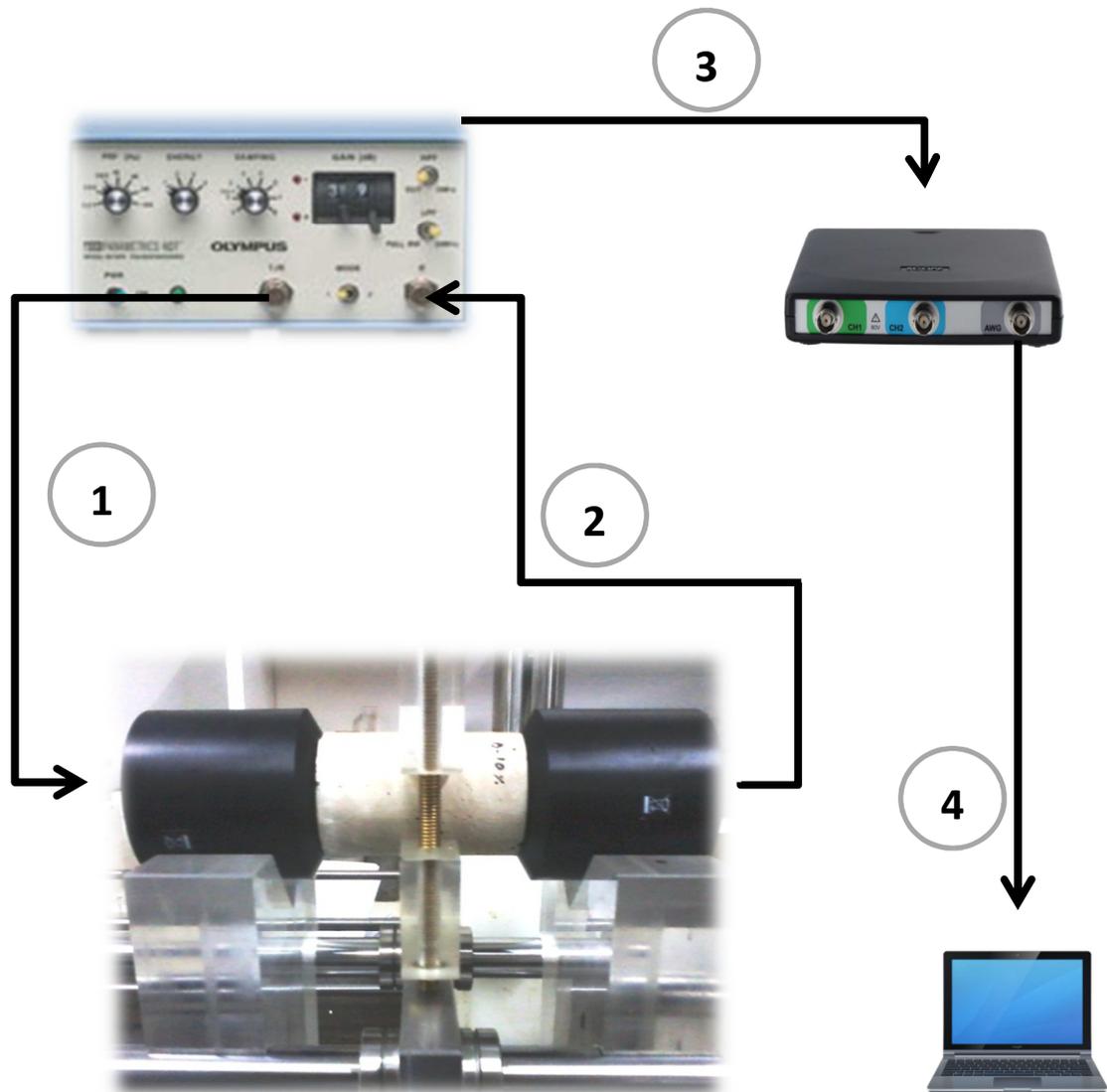
En todas las mediciones el Emisor-Receptor se configuró para emitir un pulso cuadrado negativo de 400V de amplitud. También se configuró para que el pulso tuviera la frecuencia de resonancia del transductor que se estuviera ocupando. La ganancia en el receptor solo se utilizó en los casos que la señal se saturaba al ser demasiado grande y en los casos que era demasiado débil como para distinguirse claramente.

Para registrar los valores de las señales se utilizó el osciloscopio digital TiePieSCOPE HS805 (Fig. 3.4). Para registrar los datos tomados con el transductor de 100kHz se adquirieron 100.000 muestras a una frecuencia de muestreo de 5MHz. Para el transductor de 1MHz se tomaron 100.000 muestras a una frecuencia de sampleo de 50MHz.



Figura 3.4 Osciloscopio digital TiePieSCOPE HS805.

### 3.3 Montaje experimental



El montaje consta de un par de transductores de igual frecuencia acoplados a las caras de la probeta (se usó gel como acoplante). (1) El Emisor-Receptor manda un pulso eléctrico al transductor emisor, el pulso viaja como onda acústica a través de la probeta hasta llegar al transductor receptor. (2) Este transductor transforma esa energía

mecánica en un pulso eléctrico que es enviado de vuelta al Emisor-Receptor donde es amplificado o atenuado. (3) Luego la señal es dirigida al osciloscopio el que la transforma de análoga a digital. (4) Los datos son enviados desde el osciloscopio a un computador donde son guardados.

Los datos fueron guardados en el computador con el software "TiePie Multi Channel". Luego fueron exportados a formato .mat para ser analizados con el software MATLAB.

## **4 Resultados y Análisis**

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la velocidad de propagación, función de transferencia y atenuación. Los datos fueron analizados y graficados con el software MATLAB. Las transformadas discretas de Fourier se hicieron con el comando **fft** el que ejecuta sobre una señal el algoritmo conocido como Transformada rápida de Fourier.

### **4.1 Velocidad de propagación**

#### **Velocidad de propagación de los granos**

En la confección de las muestras se usaron 3 tipos de granos con orígenes diferentes. Grano A, correspondiente a arena de mar y tamaño promedio de 1.0mm, Grano B – F, correspondiente a grava de mar con tamaños promedios entre 1.7mm - 6.7mm y Grano G, correspondiente a cantos rodados o guijarros con tamaños entre los 10.0mm y 16.0mm.

La velocidad promedio de los granos B – F fue de 4600 m/s con una desviación estándar de  $\pm 700$  m/s. La velocidad promedio del grano G fue estimada en 5400 m/s con una desviación estándar de  $\pm 200$  m/s. La velocidad del grano A no pudo ser medida de manera concluyente.

#### **Formas de los pulsos de ondas**

En las figuras 4.1 y 4.2 se graficaron todos los pulsos acústicos según la probeta y transductores utilizados. Como se puede observar los pulsos que viajan a través de las probetas mantienen la forma de la señal generada por los dos transductores acoplados.

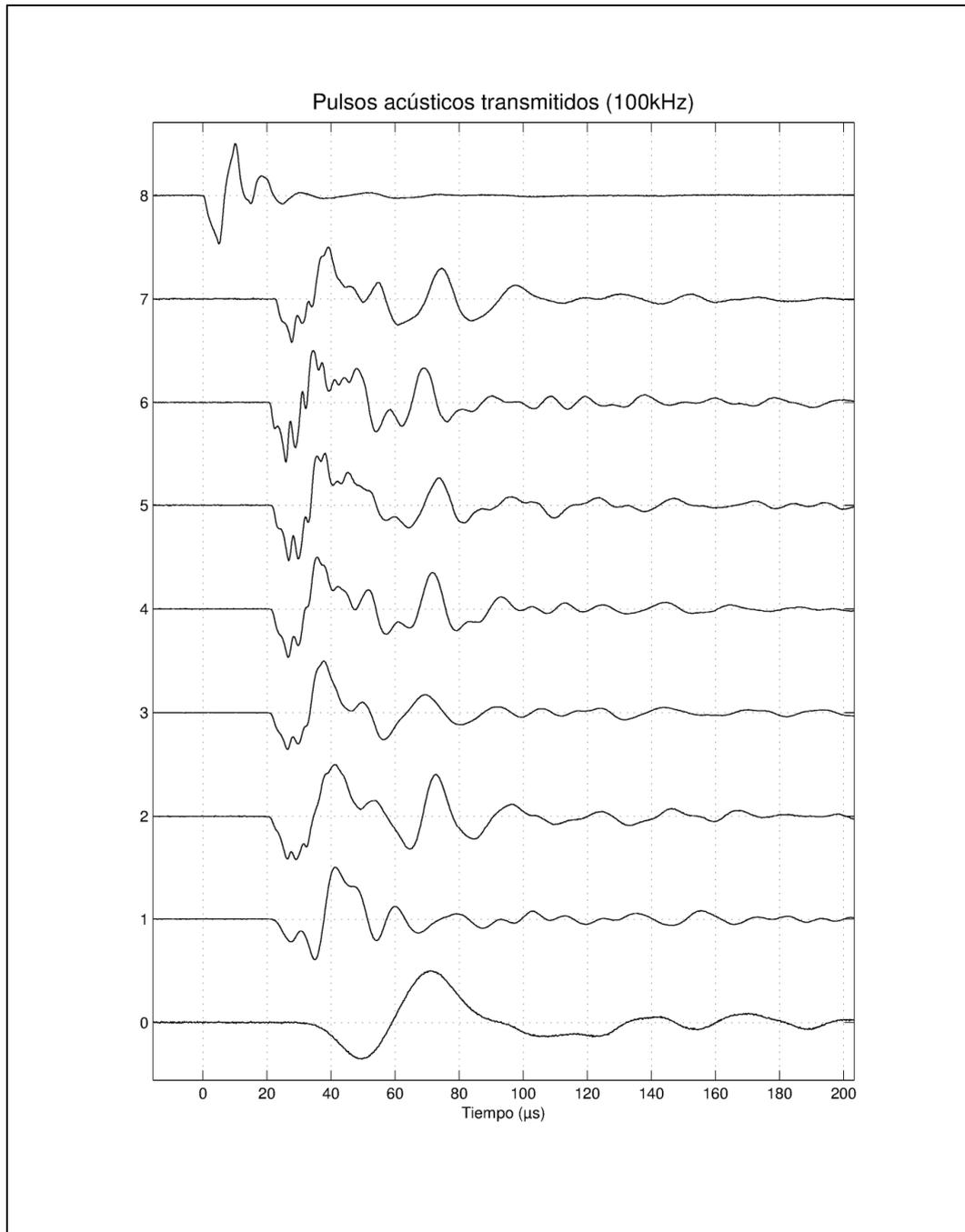
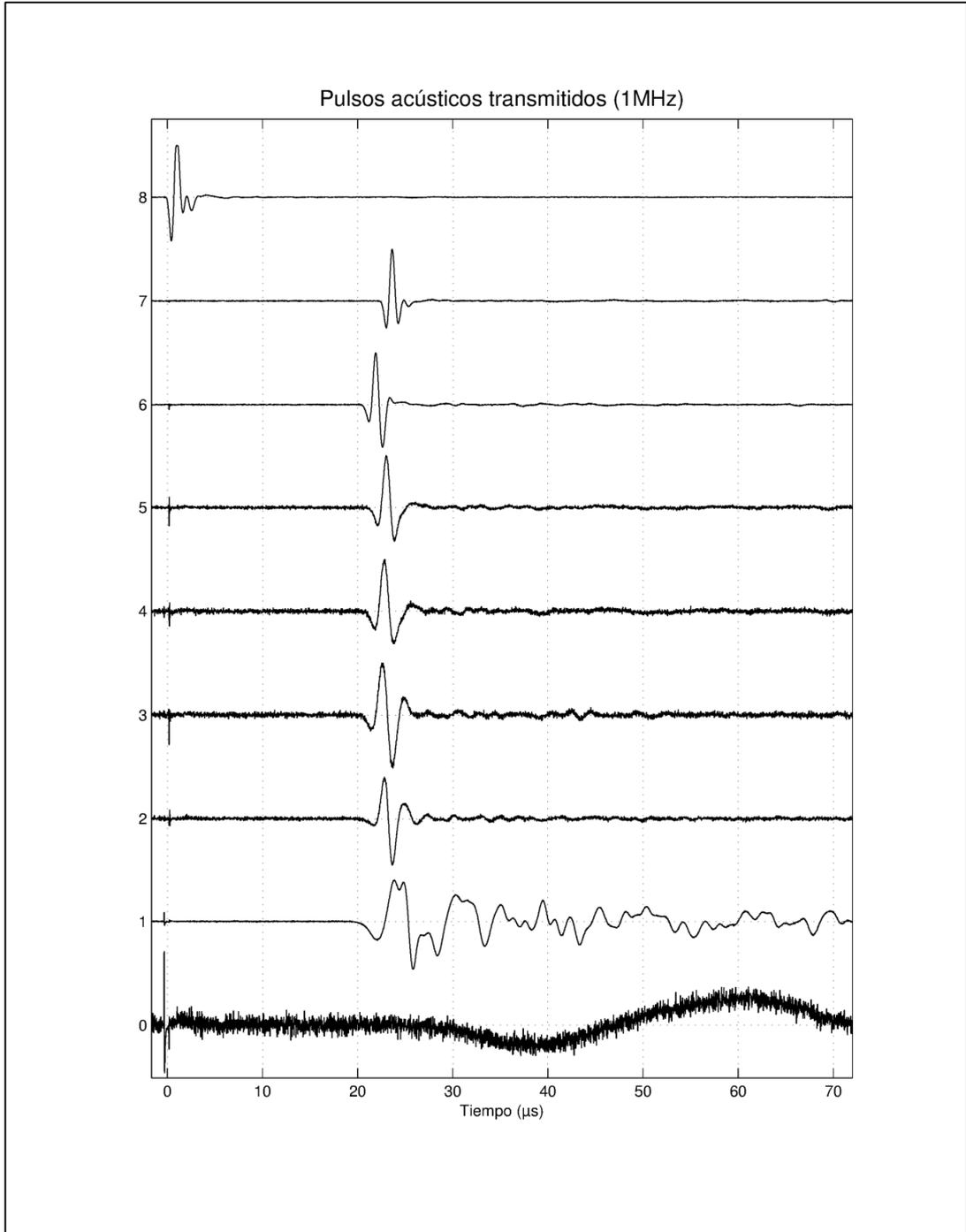


Figura 4.1 Señales de los pulsos acústicos con amplitud normalizada para las probetas con 10% de grano. En orden descendente: 8) Señal con transductores acoplados, señal atravesando probeta de 7) Cemento sin grano, 6) Grano-A, 5) Grano-B, 4) Grano-C, 3) Grano-D, 2) Grano-E, 1) Grano-F, 0) Grano-G.



**Figura 4.2** Señales de los pulsos acústicos con amplitud normalizada para las probetas con 10% de grano. En orden descendente: 8) Señal con transductores acoplados, señal atravesando probeta de 7) Cemento sin grano, 6) Grano-A, 5) Grano-B, 4) Grano-C, 3) Grano-D, 2) Grano-E, 1) Grano-F, 0) Grano-G.

Esto se observa en todas las señales excepto en la probeta de grano G, la cual tiene una forma de onda totalmente diferente a las demás. Además la llegada del pulso es considerablemente posterior a la del resto, lo que implica una velocidad de propagación mucho menor a la del cemento y los granos. Si a esto añadimos que la señal es extremadamente débil, casi al nivel del ruido electrónico de los instrumentos, es lógico suponer que esta no corresponde a la onda longitudinal del pulso emitido, por lo tanto no es posible una comparación efectiva con el fin de calcular la velocidad de la onda P. Probablemente lo que se observa sean las ondas transversales o superficiales de la probeta, las cuales es sabido son más lentas que las longitudinales.

Con todos los argumentos dados, podemos decir que el tamaño de grano, y no la cantidad de grano en este caso (todos tienen la misma proporción de volumen de grano), tiene influencia en las ondas acústicas longitudinales que atraviesan el medio. Específicamente, para cierto tamaño de grano (mayor que 6.7mm y menor que 13.0mm), las ondas P ya no son capaces de atravesar una probeta de 70mm de largo a pulsos de 100kHz y 1MHz.

#### **Velocidad de propagación para probetas con granos A – F**

La tabla 4.1 y el gráfico de la figura 4.3 muestran las velocidades de propagación obtenidas en dos grupos de muestras, las que tienen un 10% de volumen de rocas y las que tienen un 40%. Lo primero que podemos notar es que a mayor porcentaje de granos en la probeta, mayor es la velocidad de propagación de los pulsos. La velocidad del cemento arroja un valor promedio de 3100 m/s mientras que, como ya se mencionó, la velocidad estimada de los granos es del orden de los 4600 m/s. Por lo tanto, la razón más lógica de éste aumento de velocidad es que se debe a una mayor presencia de granos, los cuales propagan los pulsos a una velocidad más alta.

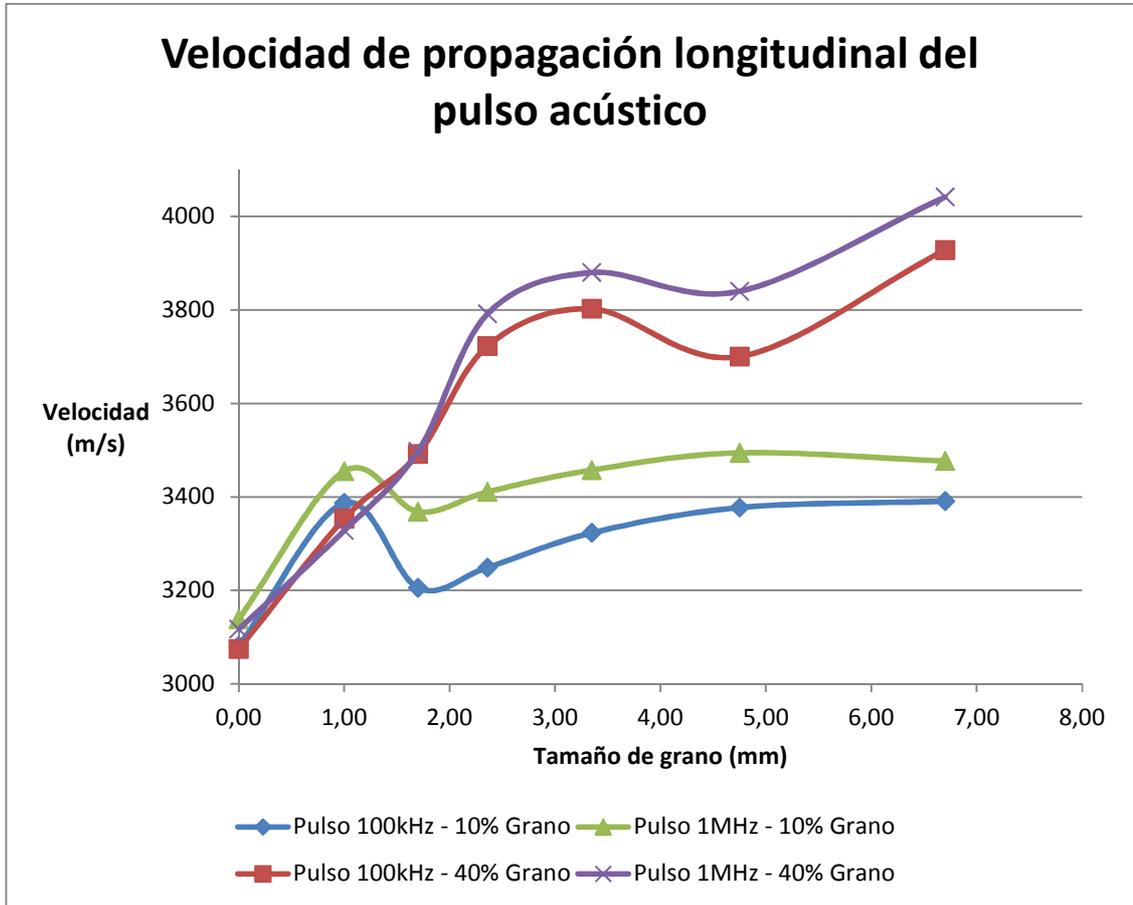


Figura 4.3 Velocidad de propagación de todas las muestras en función del tamaño de grano.

Probeta	Tamaño grano (mm)	Velocidad (m/s)			
		100kHz		1MHz	
		10%	40%	10%	40%
Cemento	0,00	3081	3074	3138	3117
A	1,00	3387	3353	3455	3328
B	1,70	3205	3492	3368	3497
C	2,36	3249	3723	3411	3791
D	3,35	3323	3802	3457	3880
E	4,75	3377	3700	3494	3840
F	6,70	3391	3928	3477	4042

Tabla 4-1 Velocidades de propagación longitudinal de todas las muestras.

En relación a las frecuencias de los pulsos podemos notar que para ambos grupos de muestras, 10% y 40% de granos, los pulsos de 1MHz se propagan más rápido que los de 100kHz. Es decir, las ondas de más alta frecuencia viajan a mayor velocidad que las de más baja frecuencia. Esta dependencia de la velocidad de propagación con la frecuencia se conoce como “relación de dispersión” (no confundir con la “dispersión” mencionada en el subtema 2.3). Podemos darnos cuenta que esta relación de dispersión ya se distingue en la probeta de cemento puro, ya que sus velocidades medidas con el pulso de 1MHz son mayores a las medidas con el de 100kHz. Lo interesante es que con la presencia de granos esta diferencia en las velocidades aumenta considerablemente. Por lo tanto, podría ser un buen parámetro para determinar la presencia de granos en un medio.

La dependencia de la velocidad de propagación con el tamaño de grano no es igual para ambos grupos de muestras. En las probetas con 10% de granos la velocidad se mantiene dentro de un rango constante para todos los tamaños de grano, mientras que en la de 40% de granos la velocidad aumenta a medida que lo hace el tamaño del grano, aunque sin seguir una línea de tendencia clara. Aun así, es interesante este último aumento de velocidad ya que en todas esas probetas el volumen de granos es el mismo, y corresponde a un 40% del total de la probeta, lo que cambia son los tamaños de los granos. Es decir, este aumento de velocidad depende, en principio, solo de la matriz interna de la probeta.

## **4.2 Función de transferencia**

Entendemos estas funciones de transferencia como una comparación entre las señales de dos sistemas físicos muy parecidos. Aquí vemos que pasa en el espacio de

frecuencias cuando introducimos un cambio al sistema original de referencia. De esa forma podemos atribuirle cualquier alteración del espectro a la variable introducida.

Si nos fijamos en los gráficos de las figuras 4.5 y 4.6 podemos ver como el espectro de frecuencias va cambiando a medida que crece el tamaño de grano en las probetas, siendo más pronunciado este cambio en las probetas con mayor porcentaje de grano. Es visiblemente notorio como el ancho de banda y la frecuencia máxima de transmisión van disminuyendo a medida que el tamaño de grano es mayor. En la figura 4.4 podemos observar esta dependencia claramente decreciente entre frecuencia y dimensión de grano.

Se deduce de estas graficas que a las frecuencias altas se les dificulta atravesar las probetas a medida que aumenta el tamaño de grano independiente del porcentaje en este caso en particular.

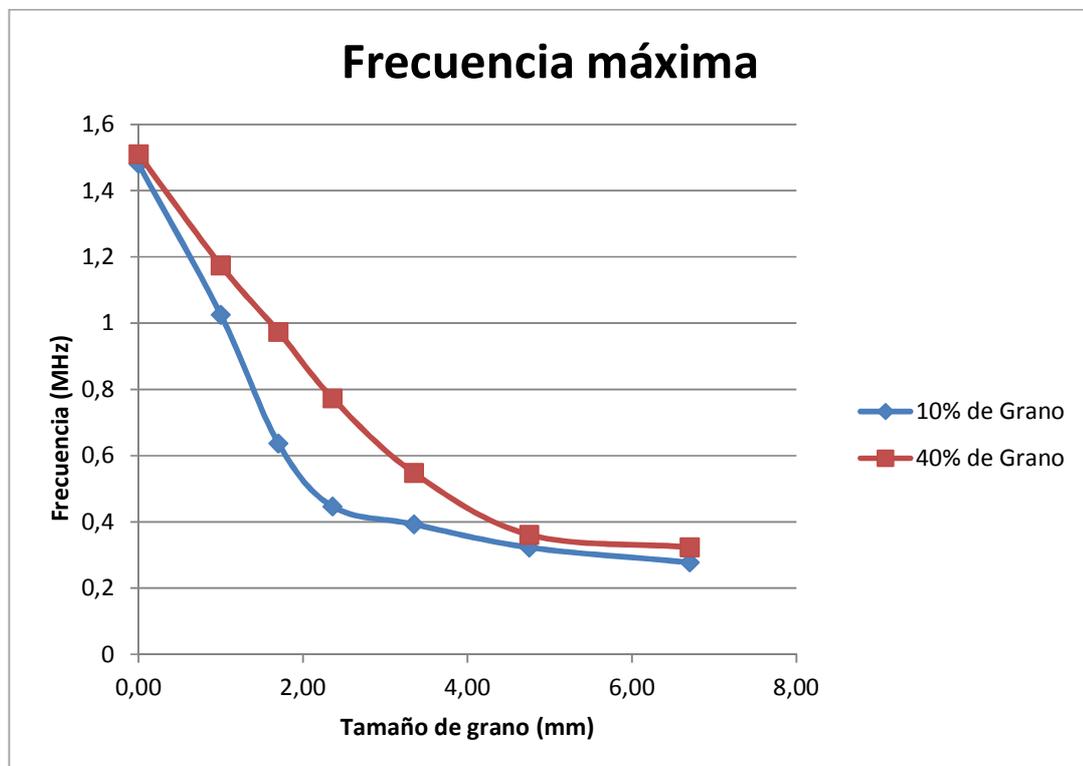


Figura 4.4 Energía transmitida de los pulsos.

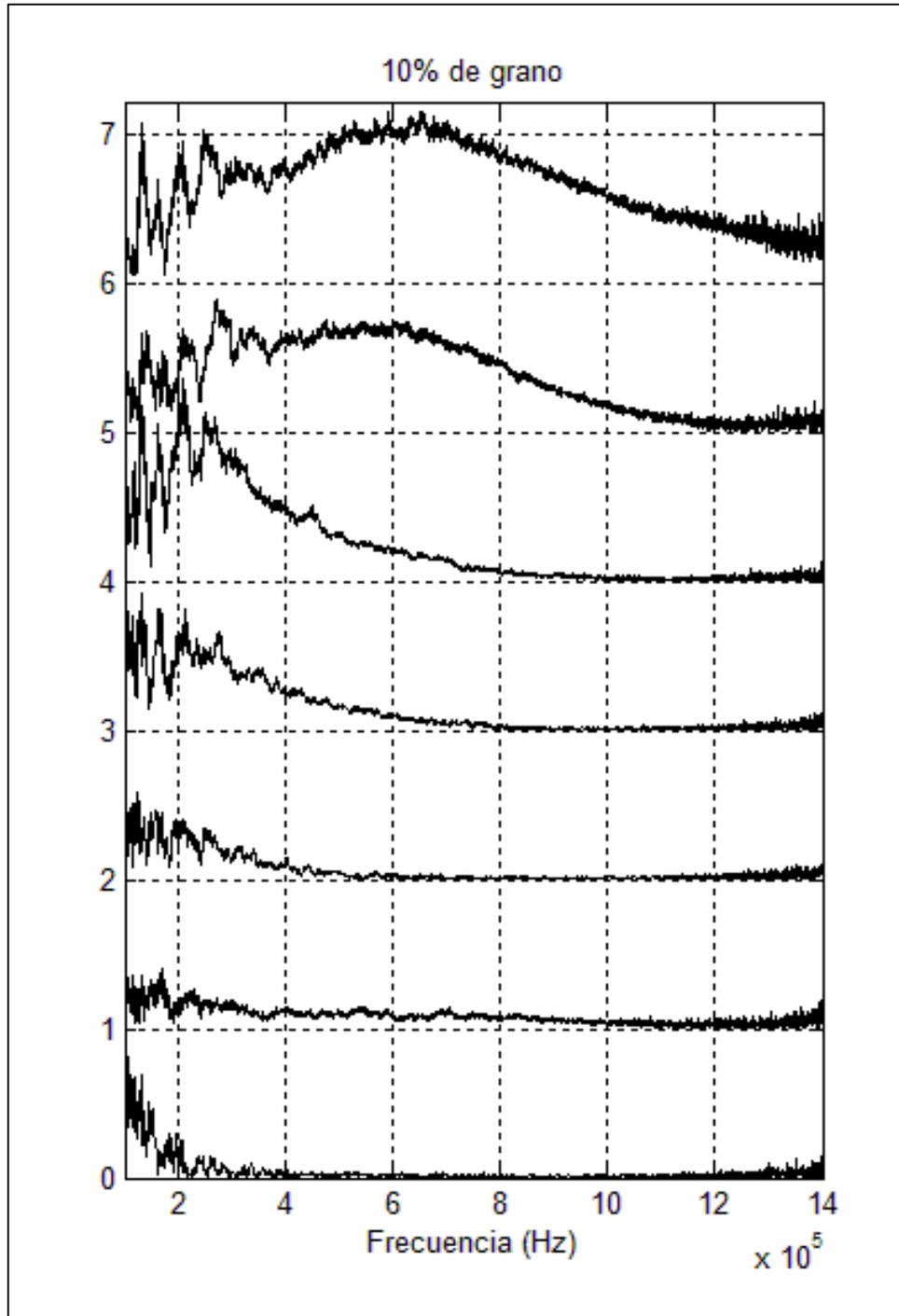


Figura 4.5 Función de transferencia en las probetas con 10% de grano. En orden descendente: 7) Cemento sin grano, 6) Grano-A, 5) Grano-B, 4) Grano-C, 3) Grano-D, 2) Grano-E, 1) Grano-F, 0) Grano-G.

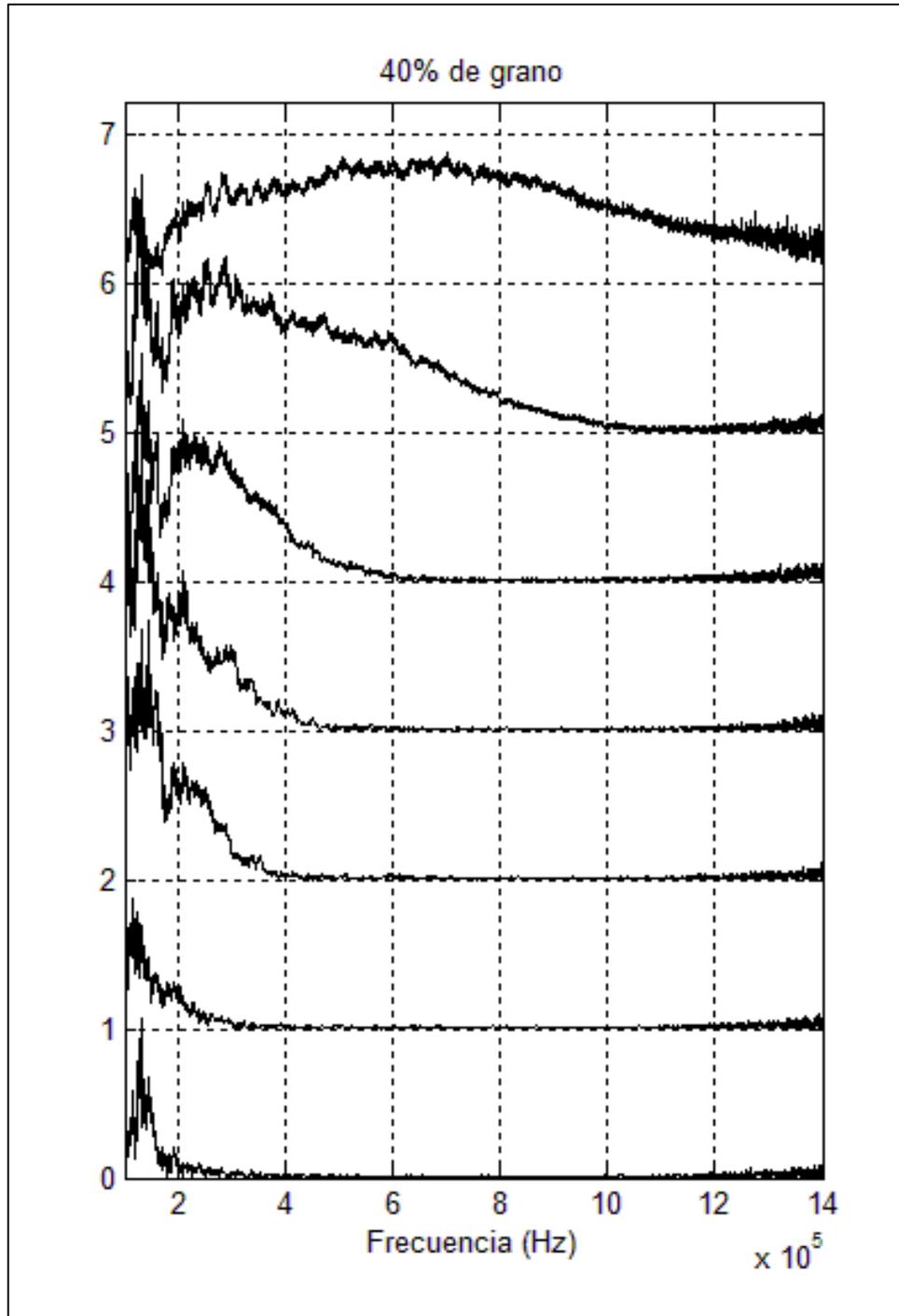


Figura 4.6 Función de transferencia en las probetas con 40% de grano. En orden descendente: 7) Cemento sin grano, 6) Grano-A, 5) Grano-B, 4) Grano-C, 3) Grano-D, 2) Grano-E, 1) Grano-F, 0) Grano-G.

### 4.3 Atenuación

Se usaron las probetas de 46mm para medir la atenuación en las muestras. En el gráfico de la figura 4.7 podemos observar las tendencias de atenuación para cada probeta. Se usó como referencia (100% de energía transmitida) la probeta de cemento de puro. La energía transmitida de las otras probetas están referidas a ella.

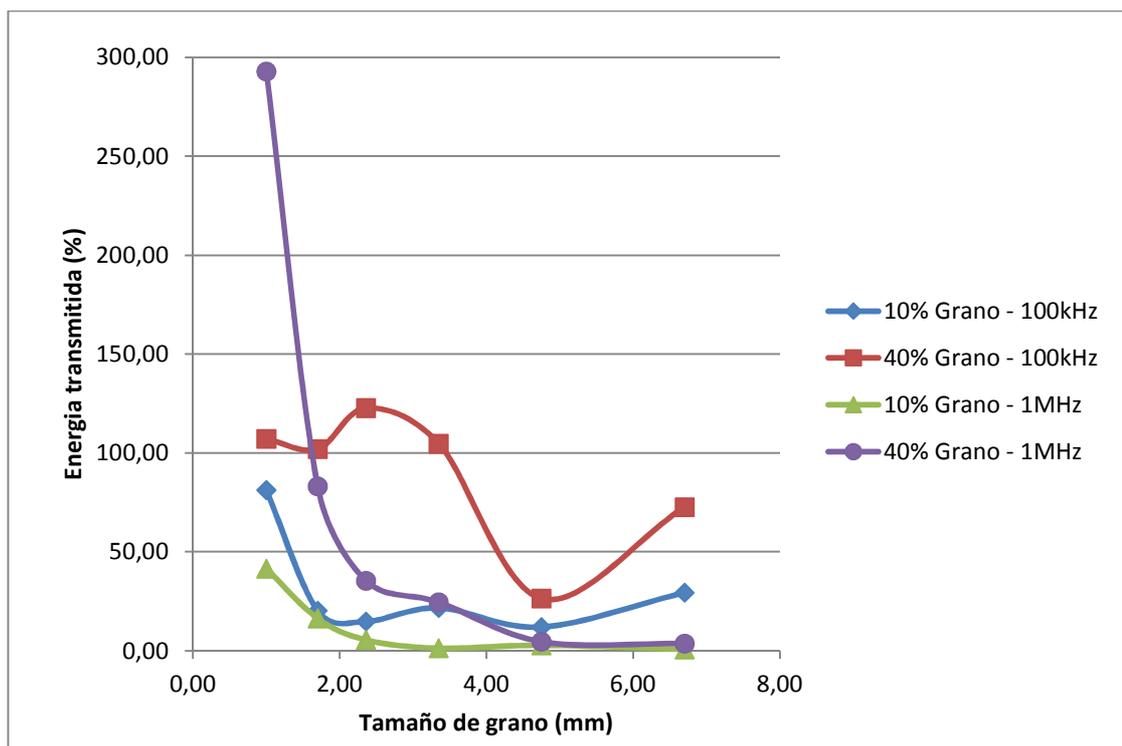


Figura 4.7 Atenuación de los pulsos ultrasónicos transmitidos en las probetas de 46mm.

Queda claro de la gráfica que a medida que aumenta el tamaño de grano de las probetas la atenuación es cada vez mayor, siendo más pronunciada esta tendencia en los pulsos de 1MHz. Es probable que esto se deba a que la onda es reflejada en mayor medida en las probetas con granos grandes, que cubren una mayor superficie de interfaz, y por lo tanto interactúan con los pulsos acústicos como si fueran cambios de fase del medio. En cambio los granos pequeños son vistos por las ondas como pequeños obstáculos que pueden ser superados más fácilmente dependiendo de la longitud de onda del pulso y las dimensiones del grano. Esto podría explicar porque en una de las probetas con arena la energía transmitida es mayor que en la de cemento puro.

## 5 Conclusiones

En relación al objetivo de este trabajo, que era caracterizar un medio no homogéneo con presencia de granos, se infirieron las siguientes conclusiones (válidas para granos con velocidad de propagación mayor al medio aglomerante):

- A partir de un tamaño crítico, las velocidades de propagación en las muestras crece con las frecuencias. Pudiera indicar que el medio es dispersivo.
- La velocidad de propagación de los pulsos está relacionada con el porcentaje de granos de la muestra. A mayor velocidad, mayor porcentaje de granos.
- La velocidad de propagación para porcentajes bajos de grano parece no tener relación con el tamaño de este. Sin embargo, para porcentajes altos esta dependencia se manifiesta.
- El ancho de banda de la función de transferencia de los pulsos decrece a medida que aumenta el tamaño de grano.
- La atenuación crece con el tamaño de grano, sin embargo, puede tratarse de un efecto reflexivo de la interfaz sobre la onda. Esto requiere más investigación.

## 6 Bibliografía

- LAY, T., and T. C. Wallace, *Modern Global Seismology*. Academic Press, San Diego, 1-517, 1995.
- LEGRAND, Denis. *Series de Tiempo y tratamiento de señales*. Apunte electrónico. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica. Disponible en web:  
[https://www.ucursos.cl/ingenieria/2006/2/GF711/1/material\\_docente/?id=105374#o105374](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2006/2/GF711/1/material_docente/?id=105374#o105374)
- Universidad Central de Venezuela. *Curso de Ultrasonido Básico*. Facultad de Ingeniería. Apunte electrónico. Disponible en web:  
<http://sistendca.com/DOCUMENTOS/Curso%20Ultrasonido%20Basico.pdf>
- VALENCIA ILARREGUI, Jorge. *Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio*. Tesis de grado. Universidad Carlos III de Madrid. Dpto. de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. Julio 2009
- MARTINEZ AREVALO, Carmen. *Estructura superficial de atenuación para ondas sísmicas directas, P y S, en ambientes volcánicos*. Tesis doctoral. Editado por la Universidad de Granada. ISBN: 84-338-3389-8.