

Utilización reciente de los Métodos No Destructivos –MND– en la práctica de la Ingeniería Civil (Suelos & Estructuras).

M. C. Torres Suárez

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
Miembro de la Sociedad Colombiana de Geotecnia y de la Society of Hispanic Professional Engineers
camilogeotecnia@yahoo.es

RESUMEN: Recientemente se ha impulsado la utilización intensiva de las técnicas y procedimientos denominados Métodos No Destructivos –MND– o No Invasivos tanto en problemas de suelos como de estructuras, con resultados halagadores en cuanto a la determinación rápida y confiable de parámetros asociados a las propiedades físico–mecánicas que controlan el comportamiento de los materiales, aspecto básico para adelantar los estudios y diseños de obras de Ingeniería Civil. Este artículo revisa los conceptos claves de estos métodos, con énfasis en las técnicas acústicas y da a conocer nuevas impresiones y propuestas respecto de su utilización, además de promover el conocimiento de los fundamentos en los cuales éstos se basan.

ABSTRACT: Ultimately had occurred a impulse to the use of procedures and techniques called Non Destructive Methods –NDM– or Non Invasive for both soils and structures problems, with good results about the quick and reliability determination of associated parameters with physical–mechanical properties that control the materials’ behavior, one basic aspect in order to progress studies and design of civil engineering constructions. This paper reviews key concepts about these methods, with emphasis in the acoustic techniques and offers news proposes respect it’s useful, so to promote the knowledge of foundations in which them rest.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando nos enfrentamos a la solución de un problema de Ingeniería Civil, parece lógico pensar que esta debe asumir unos parámetros de entrada a un determinado modelo (normalmente un criterio de desempeño o norma) y mediante un conocimiento previo de las propiedades físicas y mecánicas del sistema evaluado, determinar cual sería la respuesta de éste ante las solicitaciones impuestas. Si la respuesta es satisfactoria el modelo se ajusta al comportamiento del sistema y por ende cumple el criterio; en caso contrario, y mediante un procedimiento iterativo, se busca el ajuste entre el sistema y el modelo.

Lo anterior implica la determinación de las propiedades que controlan el comportamiento de los materiales constitutivos, mediante ensayos de laboratorio o de campo, que requieren llevar a la falla muestras representativas, lo que en la práctica es complejo y costoso; este tratamiento es conocido como Solución Directa (Santamarina, 1997). De otro lado, se puede adoptar una **Solución Inversa**, que consiste en inducir algún tipo de señal conocida que atraviese el medio en estudio y registrar la señal de salida, y, mediante un

proceso conocido como Identificación de Sistemas, determinar las propiedades físicas y mecánicas que gobiernan los materiales constitutivos del medio evaluado además de otras de sus características.

Lo anterior se aprecia en mejor forma en la Figura No. 1, que se presenta a continuación. Allí se ve como la solución tradicional implica determinación de propiedades del medio mientras que la propuesta que trata éste artículo implica señales que lo atraviesan.

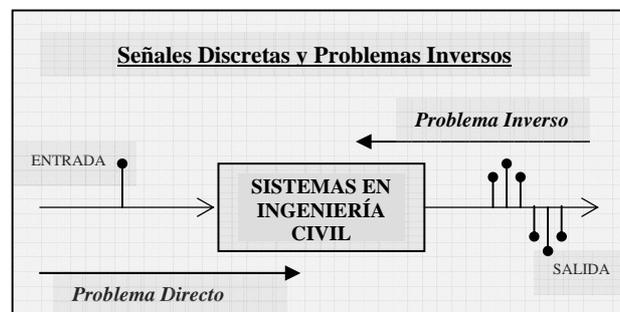


Figura No. 1 – Tratamiento de problemas en Ingeniería Civil (tomado de Santamarina, 1998)

2. FUNDAMENTOS DE LOS MND, DE NATURALEZA ACÚSTICA

Se ha comprobado que, diversas técnicas de generación de ondas acústicas (elásticas) ofrecen muy buenos resultados a menores costos que los de la investigación tradicional, y la gran desventaja que se tenía hace algunos años, en cuanto a la interpretación de los registros, ha venido siendo menguada mediante técnicas computacionales avanzadas y análisis espectral desarrolladas recientemente. Para nuestro país es muy importante contar con este conocimiento y su aplicabilidad en la práctica de los proyectos es una necesidad sentida, toda vez que los recursos para exploración del subsuelo y la investigación de estructuras son bastante restringidos y la representatividad de estos muy cuestionada para un factor de escala dado entre la muestra y el medio en estudio. El fundamento de los métodos sónicos está entonces en el **Procesamiento de las Señales Digitales –PSD–** que se pueda lograr a partir de los registros que se obtienen de las ondas que atraviesan el medio.

De otra parte las ondas se representan mediante señales, entendiendo como tal información codificada que muestra la variación de un parámetro con respecto a una o más variables independientes. La teoría de ondas se encuentra suficientemente explícita en textos locales; los diferentes tipos de ondas que se pueden generar a través de un determinado material están asociados a la escala espacial interna del medio (ver Figura No. 2).

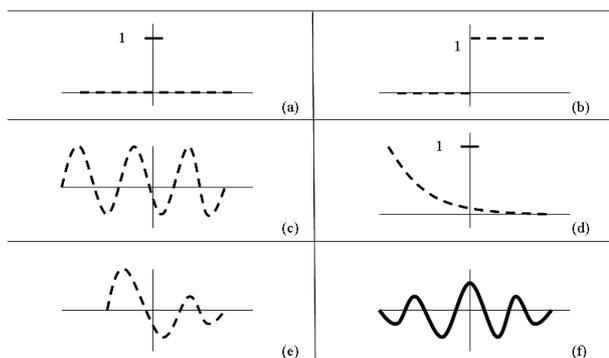


Figura No. 2 – Señales elementales. (a) Impulso. (b) Paso. (c) Sinusoide. (d y e) Exponencial. (f) Ondulada

Al registrar estas señales y mediante la aplicación de tratamientos como la descomposición o el cambio de dominio (p.e. del tiempo al de la frecuencia) se pueden realizar operaciones entre señales que permiten ejecutar la convolución de éstas y obtener la señal representativa del medio.

De esta manera se puede obtener, p.e., la respuesta impulso de un sistema, la identificación de sistemas, la correlación cruzada y la autocorrelación, entre otros usos directos en el dominio del tiempo, ó, las funciones ortogonales y series de Fourier en el dominio de la frecuencia; se trata entonces de aprender a mirar un mismo medio desde dos ópticas diferentes.

2.1 Problemas Típicos en Ingeniería Civil

La importancia de revisar algunos de los problemas típicos en ingeniería civil que se pueden solucionar mediante la técnica *Inversa* radica en llamar la atención de los profesionales hacia el uso intensivo de las *señales discretas* en la determinación de propiedades físicas y mecánicas de materiales y obras. Los problemas se pueden analizar de acuerdo con el número de dimensiones en que se presentan, así:

- Variaciones espaciales uni – dimensionales (1D) y en el tiempo
 - Aceleración durante un sismo (edificación, superficie del suelo, lecho rocoso)
 - Vibración de un puente debido al viento o al tráfico
 - Variación de parámetros de flujo (tráfico, flujo en ductos y canales, inyección en mejoramiento de terrenos)
 - Prospección superficial (ensayos geofísicos, ensayos de penetración)
 - Medición de presión de poros mediante piezómetros
 - Emisiones acústicas en materiales bajo cargas (concretos, polímeros, rocas, suelos)
 - Respuesta de la distancia de hincado versus el tiempo de hincado (estudios de fatiga)
 - Resistencia a la penetración con cono versus profundidad
 - Velocidad del viento versus elevación
 - Señal de un acelerómetro durante el hincado de un pilote
 - Temperatura de cuarto
- Variaciones espaciales bi – dimensionales (2D)
 - Elevación (topografía, superficie del pavimento, rugosidad de un pilote o una junta en roca)
 - Presión de contacto entre la zapata y el suelo de fundación
 - Rata de accidentalidad en una intersección a través de la ciudad
 - Nivel de grises en una imagen digital de cualquier material o componente ingenieril
 - Mapas de densidad de población, ingreso per-capita, consumo de energía

- Distribución espacial de fuentes naturales
- Variaciones volumétricas tri – dimensionales (3D)
 - Presión de poros bajo una presa
 - Presión del sonido en un teatro
 - Calor de hidratación en un gran volumen de concreto
 - Concentración en un frente de difusión; polución del aire en áreas urbanas

La Tabla No. 1 presenta una síntesis de los tipos de problemas en ingeniería civil que permite tener un concepto más claro acerca de la importancia del procesamiento de señales discretas para su solución

Problemas en Ingeniería Civil



Problemas Directos		Problemas Inversos	
<i>Diseño de Sistemas</i>	<i>Convolución</i>	<i>Identificación de Sistemas</i>	<i>Deconvolución</i>
El sistema se diseña para satisfacer un criterio de desempeño (norma o especificación)	Entrada: Conocida Sistema: Conocido Salida: <u>Desconocida</u>	Entrada: Conocida Sistema: <u>Desconocido</u> Salida: Conocida	Entrada: <u>Desconocida</u> Sistema: Conocido Salida: Conocida

Tabla No. 1 – Tipología general y enfoque para solucionar problemas en ingeniería

2.2 Principios del Procesamiento de Señales Digitales – PSD

El procesamiento de señales digitales es una parte integral de un amplio rango de dispositivos usados en todas las áreas de la ciencia y la tecnología. En ingeniería el desarrollo de estas técnicas ha estado un poco rezagado con respecto a otras áreas como la medicina, la física y las ciencias de la tierra además de la tecnología en comunicaciones de audio y video siendo quizás ésta el área en donde más se han desarrollado los conceptos y su aplicabilidad.

El aprendizaje del PSD implica de un lado un aprendizaje de los conceptos generales que aplican a todos los campos y, de otro lado, un aprendizaje de

técnicas especializadas para un área de interés particular. A continuación se presenta un ejemplo de señal discreta en el dominio del tiempo y su correspondiente transformada al dominio de la frecuencia (registro correspondiente a los transductores del PUNDIT de la Universidad Nacional, Bogotá).

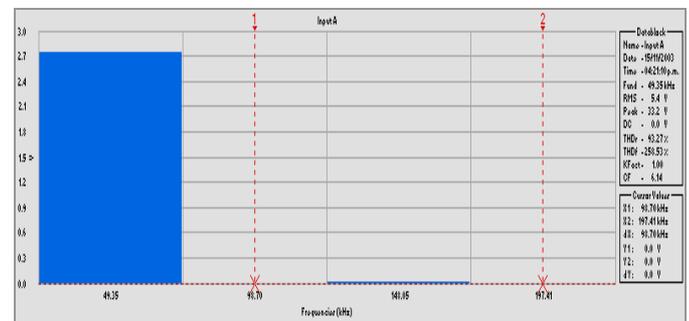
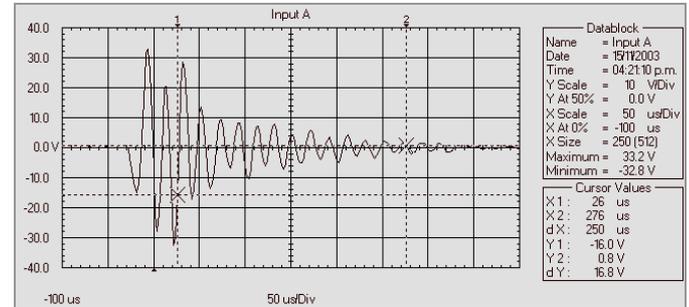


Figura No. 3 – Señal de onda de los transductores. (a) en el dominio del tiempo. (b) en el dominio de la frecuencia – espectro de frecuencias

3. APLICACIÓN DE LOS MND A PROBLEMAS DE SUELOS Y CONCRETOS

Debido a las dimensiones internas de los materiales constitutivos de los suelos y los concretos, es decir el tamaño de los agregados o granos e incluso de las mismas fisuras presentes en ellos, una de las técnicas acústicas más utilizadas para su caracterización es el Ultrasonido. El término ultrasónico es usado para describir ondas mecánicas que se propagan en gases, líquidos y sólidos a frecuencias por encima del límite superior para el oído humano, cerca de 16 kHz. Debido a que las características de estas ondas están relacionadas con las propiedades mecánicas de cualquier medio a través del cual ellas pasan, el ultrasonido se puede usar para investigar esas propiedades. Los primeros estudios y publicaciones sobre el ultrasonido como MND para ensayo de materiales se presentaron a finales de los 60's y comienzos de los 70's por el Profesor I. Malecki en el Instituto de Problemas Técnicos Básicos en Polonia.

El ultrasonido se utiliza esencialmente para volúmenes pequeños de material; en el caso de masas de suelo o roca lo común es trabajar con técnicas como la refracción y la reflexión sísmica, dado que estas trabajan con longitudes de onda grandes, asociadas a su vez a bajas frecuencias.

Los diferentes rangos de frecuencias se pueden observar en la Figura No. 4.

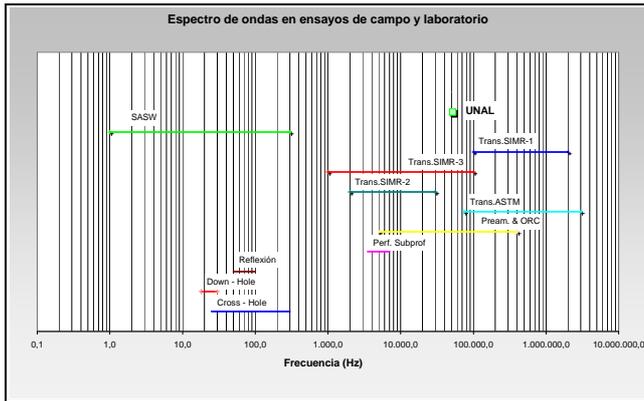


Figura No. 4 – Espectro de frecuencias de onda en ensayos de campo y laboratorio (Torres, 2004)

Para realizar las mediciones que permitan obtener propiedades de los materiales, en laboratorio y para pequeños volúmenes de elementos estructurales se puede utilizar el ultrasonido, mediante un montaje como el que se muestra en la Figura No. 5.

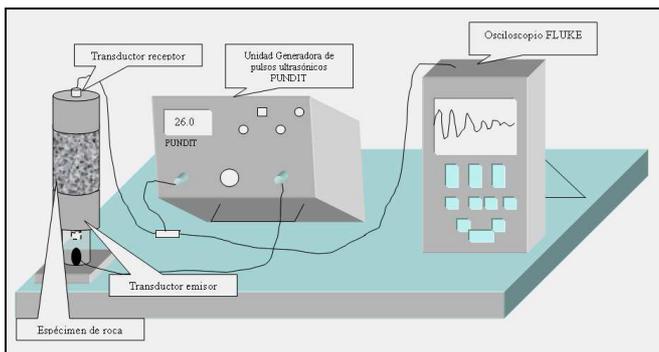


Figura No. 5 – Componentes de un sistema de medición mediante Ultrasonido

Dentro de estos componentes se destacan la Unidad Generadora de Pulsos, debido a que el rango de frecuencias y otras de sus características dimensionales están asociadas al tipo de material que se esté evaluando, además de la posibilidad de medir velocidades de ondas tanto longitudinal (P) como

transversal (S); también el Osciloscopio ya que este permite caracterizar las ondas que atraviesan el medio. Igualmente los especímenes o testigos deberían cumplir ciertas características dimensionales que estén acorde con el equipo con el cual se cuente. Por ejemplo para rocas, se recomienda que se cumplan las características que se muestran en la Figura No. 6.

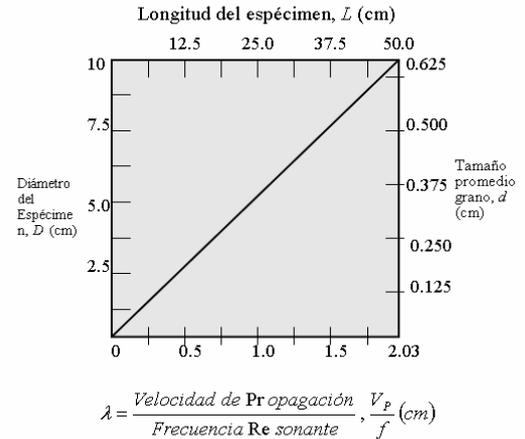


Figura No. 6 – Gráfico de valores permisibles para especímenes de roca (tomado de la norma ASTM D 2845 – 95^{e1}) – (Traducida por Torres, 2004 – Revisado por Correa)

En la literatura¹ se viene solicitando insistentemente se inicie investigación al respecto, específicamente en el área de los concretos, mediante la técnica denominada Impacto – Eco; con este método el tiempo de viaje del pulso ultrasónico es muy corto, usualmente una fracción de milisegundo, por lo cual se requiere el uso obligatorio del osciloscopio de rayos catódicos. En general el método permite la detección de fisuras y defectos dentro de los materiales, con lo que se podría medir el efecto de estos en la resistencia del material, a la luz de la mecánica de la Fractura.

De esta forma al obtener los tiempos de viaje de las ondas P y S, y conociendo las distancias de viaje se calculan las respectivas velocidades de onda. Con las velocidades de onda y previa determinación de la relación entre la longitud de onda característica del tren de pulsos, λ , y la escala espacial interna del medio, a , se puede estimar la continuidad o no del medio, como lo sugiere el gráfico en la Figura No. 7.

La longitud de onda λ se determina procesando la señal registrada mediante la relación entre la Velocidad de propagación y la Frecuencia resonante del generador de pulsos; la dimensión a se determina realizando una

¹ “Investigación no destructiva y cargas extremas en estructuras”. Sarria M., Alberto. Universidad de Los Andes. Julio de 2004.

granulometría para hallar el tamaño de partícula que predomina en el medio o estimándola lo mejor posible.

Adicionalmente se pueden determinar los módulos dinámicos (obtenidos a bajos niveles de deformación) y otros parámetros asociados, por lo menos para tener un orden de magnitud de estos. Dentro de estos parámetros se destacan:

$$\lambda' = \rho(V_P^2 - 2V_S^2) = \frac{\rho V_S^2 (V_L^2 - 2V_S^2)}{3V_S^2 - V_L^2} \quad (1)$$

$$\mu = G = \rho V_S^2 \quad (2)$$

$$E = \frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{V_P^2 - V_S^2} = \rho V_L^2 \quad (3)$$

$$\nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} = \frac{V_L^2 - 2V_S^2}{2V_S^2} \quad (4)$$

$$K = \rho \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) = \frac{\rho V_S^2 V_L^2}{3(3V_S^2 - V_L^2)} \quad (5)$$

Aquí E es el módulo de elasticidad o módulo de Young, ν es la relación de Poisson, K es el módulo bulk, G es el módulo de rigidez al corte, λ' y μ son las constantes de Lamé, ρ es la densidad del medio. V_P y V_S son las velocidades de onda longitudinal y transversal, respectivamente, para ondas de cuerpo, mientras que V_L y V_S son las velocidades correspondientes para un testigo en forma de cilindro, es decir la denominada onda barra.

V_P y V_S cuando se trata de elastometría ultrasónica y V_L y V_S para elastometría acústica:

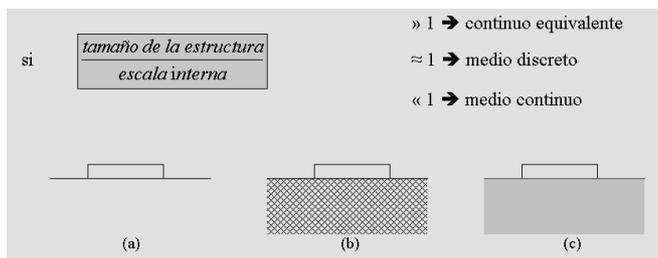


Figura No. 7 – Escalas relativas espaciales: a) Material competente; b) Material fracturado; c) Material particulado

3.1 Aplicación de los MND a Masas de Suelo y Roca

Dentro de estos métodos se destacan los registros acústicos, superficiales y en perforaciones, toda vez que su aplicación es sencilla, versátil y económica, además de arrojar buenos resultados en otras latitudes donde se han adelantado investigaciones asociadas; las técnicas más sobresalientes son: el perfilado sísmico superficial (refracción y reflexión sísmica) y el perfilado sísmico vertical (down-hole y cross-hole).

Las principales características de estos métodos se consideran a continuación:

- La resolución, entendida como la capacidad de que las mediciones logren diferenciar entre dos situaciones geológicas similares, varía ampliamente entre los MND. La ambigüedad en los resultados sería un límite práctico antes de hablar de la resolución.
- La mayoría de MND no miden directamente el parámetro deseado, por esto se utilizan en el tratamiento Inverso de problemas de ingeniería civil. La resistividad y las explosiones acústicas serían las excepciones.
- La interpretación de los contrastes geofísicos se basa en presunciones geológicas. La ambigüedad es inherente a los procesos de interpretación geofísica, aunque esta es una de las limitantes que más se ha venido soslayando en los últimos tiempos.
- Es importante diferenciar entre aproximación y precisión en resultados geofísicos. Los MND son muy precisos, es decir las mediciones pueden ser repetidas a un grado destacable en otro día, aún por un equipo de trabajo diferente. Si la aproximación es evaluada como la convergencia entre el dato interpretado y el dato medido, los resultados no son particularmente aproximados por sí mismos.
- Cuando la exploración directa se integra a estos resultados, se pueden explorar grandes volúmenes de material tanto en forma aproximada como económica.
- Los MND no son un sustituto para las observaciones directas (como perforaciones, apiques, trincheras, registros en pozos y ensayos entre pozos) sino que permiten establecer correlaciones empíricas entre los resultados y las propiedades del material. Las perforaciones se usarían para calibrar los resultados de los MND.
- La interpretación debe ser un proceso continuo a través de toda la investigación mediante MND. El procesamiento de las señales, la preparación de la información en campo y la experiencia del

procesador vienen a ser las herramientas fundamentales al momento de obtener los resultados.

- h) Todos los MND requieren una información preliminar del sistema en estudio la cual orientará adecuadamente la selección de la técnica a utilizar, la interpretación de resultados y la correlación con propiedades físicas y mecánicas de los materiales.

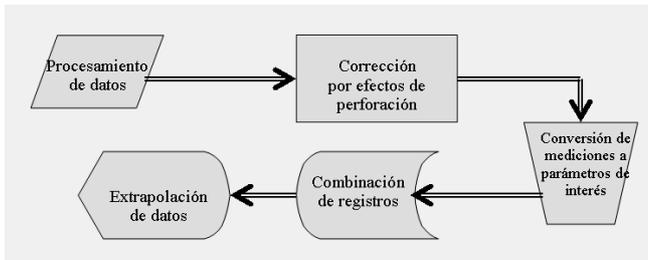


Figura No. 8 – Flujograma simplificado de análisis de registros

A continuación se observan esquemas que representan en forma simplificada las técnicas más utilizadas en el terreno, a la hora de evaluar las características físico-mecánicas de los suelos y las rocas.

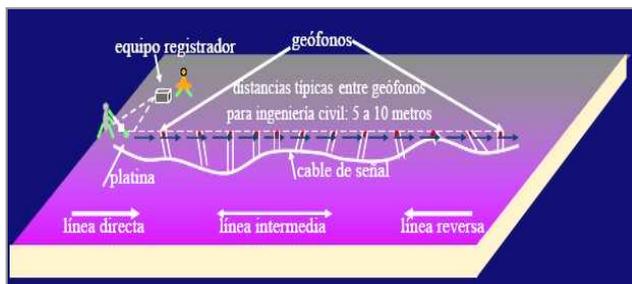


Figura No. 9 – Elementos y vocabulario empleado en el método de refracción sísmica (tomado de Sarria, 2004)

Definitivamente gran parte del éxito en la utilización de estas técnicas radica en la interpretación de los resultados, por lo que el autor insiste en que se dedique tiempo en la cátedra normal para enseñar los principios básicos de los mismos y su modo de aplicación.

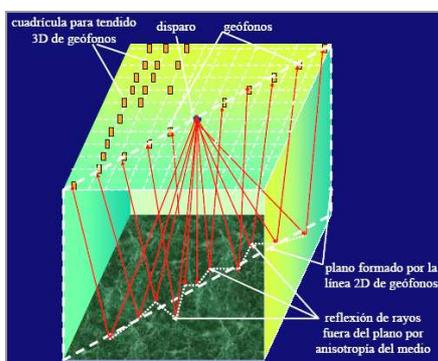


Figura No. 10 – Desviaciones laterales de los rayos por anisotropía lateral y posición de geofonos (tomado de Sarria, 2004)

3.2 Determinación de Parámetros Ondulatorios

Para el caso se presentan los resultados parciales que al respecto se obtuvieron en una tesis en donde se investigaron estas características para especímenes de roca sedimentaria, pero que igual aplican a otros materiales.

Al contar con el registro correspondiente a cada uno de los testigos, se realizó la transformada de Fourier con la ayuda del programa FLUKE que acompaña al osciloscopio con el cual se caracterizaron las señales. Los parámetros ondulatorios así determinados se presentan en la Tabla No. 2.

	λ (cm)	T (μ s)	f_i (kHz)	V_p prom	A_R (mV)
N =	21	21	21	21	21
Máx. =	69.02	199.60	59.01	5389.25	180.00
Mín. =	4.55	16.95	5.01	2415.02	1.00
Rango (Máx - Mín) =	64.47	182.65	54.00	2974.24	179.00
Media (μ) =	18.53	46.73	33.48	3875.37	45.65
Desv. Estan. (σ) =	16.61	43.03	16.66	691.29	47.23
Coefi. Variación (V) =	89.6%	92.1%	49.8%	17.8%	103.5%
Sesgo =	1.7	2.5	-0.4	0.2	1.6
Curtosis =	2.9	7.5	-1.3	0.5	2.3
Error típico =	3.62	9.39	3.63	150.85	10.31
Error típico (%) =	20%	20%	11%	4%	23%

Tabla No. 2 – Estadísticas de los parámetros ondulatorios de señales de onda en especímenes de roca sedimentaria

Algunos de estos parámetros tienen correlación con las velocidades de onda, lo cual permitiría eventualmente encontrar formas nuevas de hallar propiedades del material. Una de las mejores correlaciones en este caso es para con la longitud de onda, λ , lo que induce a pensar que podría existir un factor de escala entre este valor y la dimensión característica del medio, a , como se planteó anteriormente. A continuación se presentan algunas de las curvas obtenidas en la investigación, sin incluir la nube de puntos que permitieron su determinación.

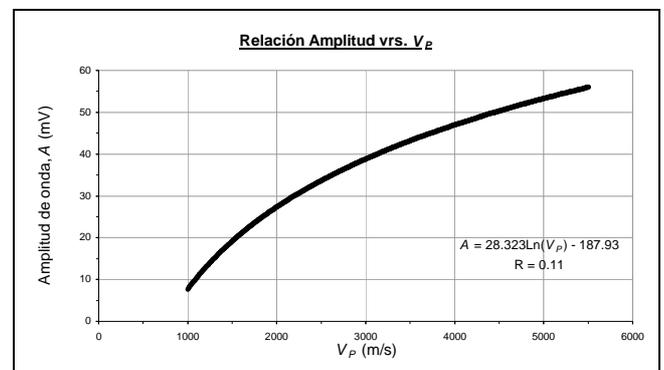


Figura No. 11 – Relación Amplitud de onda, A, vs. V_p

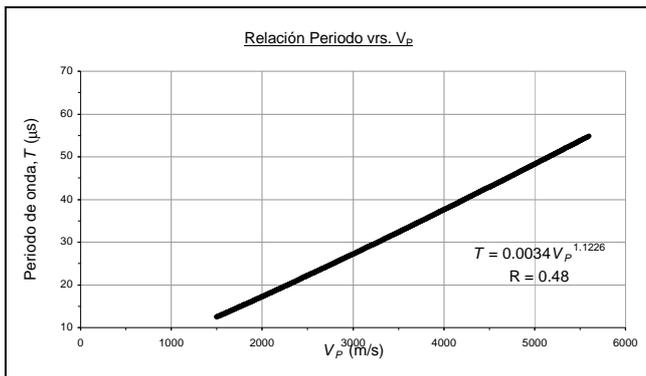


Figura No. 12 – Relación Periodo de onda, T, vs. V_p

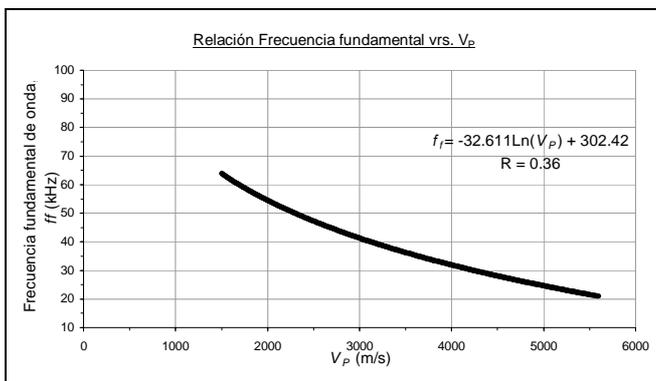


Figura No. 13 – Relación Frecuencia de onda, F_f , vs. V_p

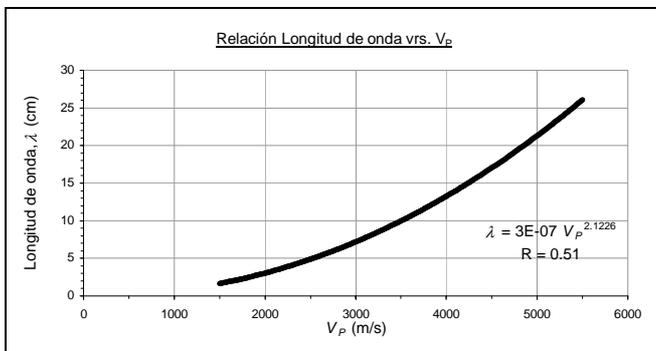


Figura No. 14 – Relación Longitud de onda, λ , vs. V_p

3.3 Otras aplicaciones de los MND en Ingeniería Civil

Recientemente se han propuesto una serie de técnicas que permiten igualmente caracterizar materiales y hacer control de calidad a procesos constructivos. Es el caso del Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW), que se ha utilizado en varios sitios para determinar espesores y módulos en la investigación patológica de pavimentos, entre otros usos. El autor ha propuesto una investigación mediante la cual se pueda evaluar el grado de compactación de rellenos y terraplenes de

ingeniería, que esta pendiente de recibir apoyo efectivo de algún Instituto de Investigación que patrocine su desarrollo.

Otras aplicaciones las constituyen los estudios hidrogeológicos para pozos de agua, las centrales hidroeléctricas, los proyectos viales y algo novedoso que ha sido propuesto por primera vez en nuestro medio por el autor de la referencia 1, las denominadas cargas extremas sobre las construcciones, incluyendo explosiones, ondas de choque en general, impacto de asteroides y por supuesto el estudio de la respuesta dinámica de depósitos para efectos de microzonificación de ciudades.

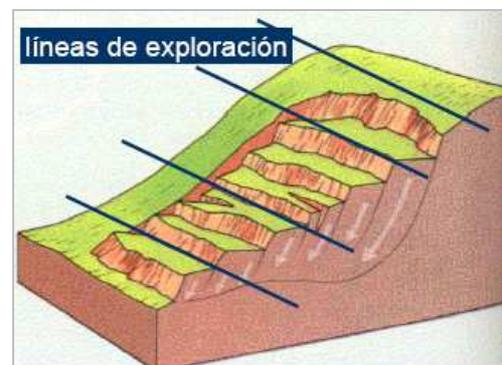


Figura No. 15 – Esquemas de zonas de deslizamientos que se pueden estudiar con refracción sísmica

4. CONCLUSIONES PARCIALES DE LA APLICACIÓN DE LOS MND

Cuando se ha logrado adelantar un programa sistemático de medición de velocidades de onda que atraviesan los materiales y se cuenta con la información aportada mediante el PSD, luego de realizar los respectivos análisis, se tienen correlaciones valiosas entre parámetros físico-mecánicos y dichas velocidades. A manera de ejemplo se presentan las obtenidas en una investigación preliminar.

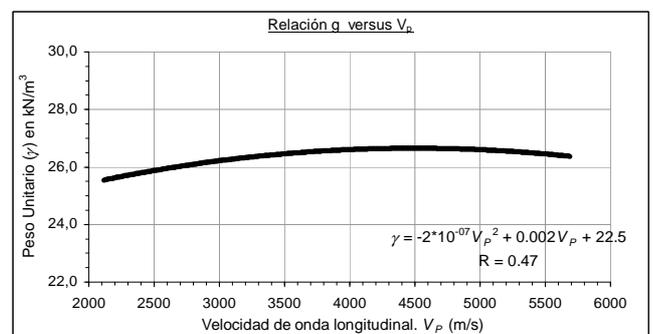


Figura No. 16 – Relación Peso Unitario, γ , vs. V_p

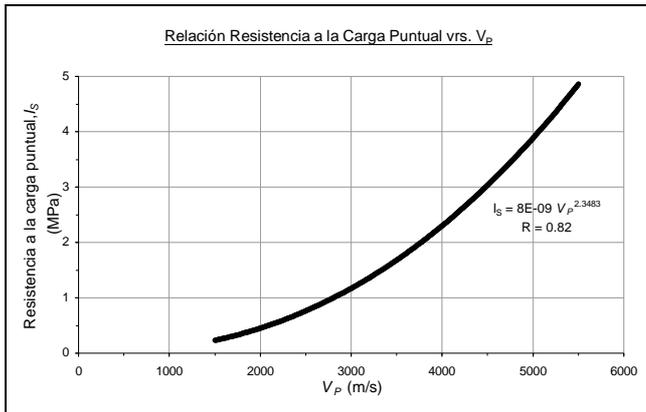


Figura No. 17 – Relación Carga Puntual, I_s , vs. V_p

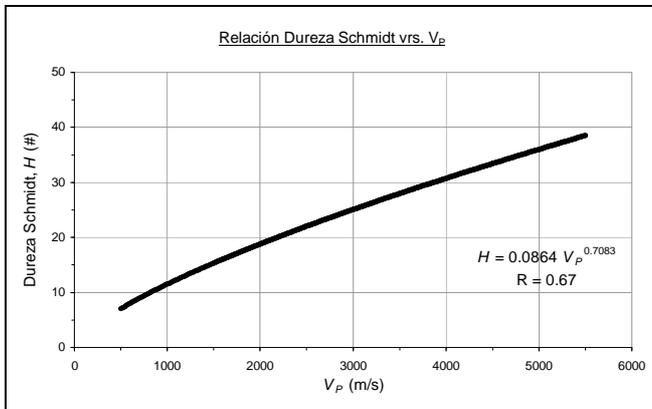


Figura No. 18 – Relación Dureza Schmidt, H , vs. V_p

Para la resistencia a la compresión confinada y el módulo de deformación se obtuvieron los siguientes resultados.

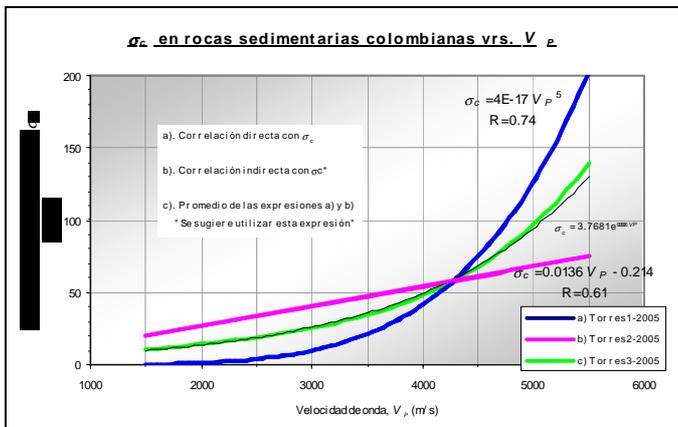


Figura No. 19 – Relación Resistencia a la Compresión Inconfinada, σ_c , vs. V_p

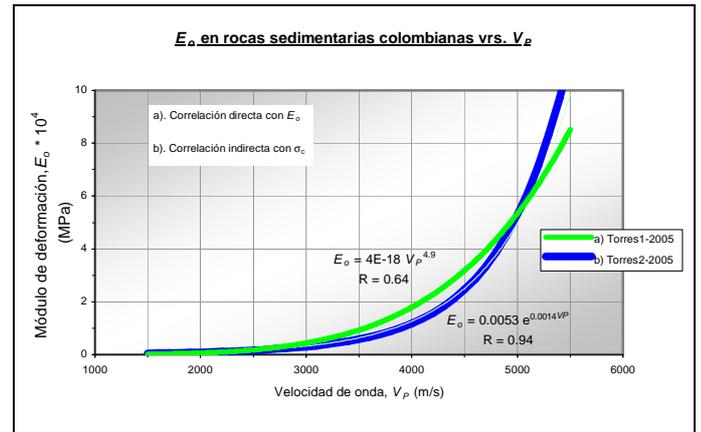


Figura No. 20 – Relación entre el Módulo de deformación Estático, E_o , vs. V_p

Finalmente se pueden plantear formas de relacionar las velocidades de onda medidas en una escala del medio, p.e. especímenes o testigos de laboratorio, y las medidas en otra escala, p.e. el macizo rocoso o la estructura en mayor extensión, y obtener así relaciones más amplias que permitirían con solo medir las velocidades en el medio a mayor escala devolverse y encontrar valores aproximados de las propiedades físico-mecánicas del material sin necesidad de extraerlo y menos destruirlo.

Cabe recordar que las gráficas que se presentan a continuación serían válidas para macizos rocosos sedimentarios con características similares a los estudiados en la investigación².

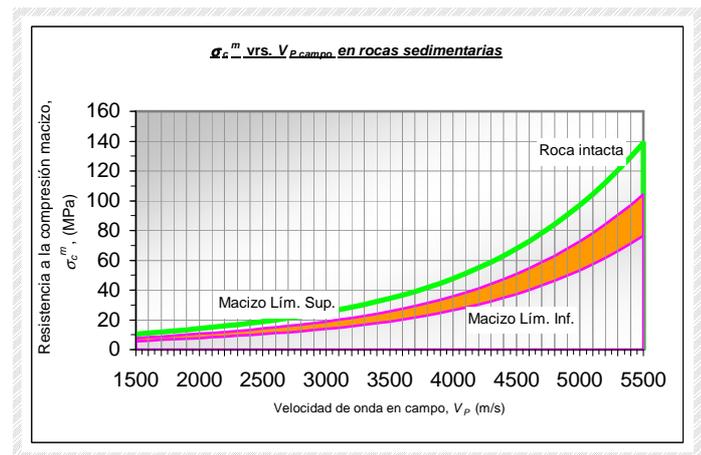


Figura No. 21 – Relación σ_c en el macizo (franja naranja) vs. V_p en campo (Torres, 2005)

² “Utilización de los Métodos No Destructivos –MND– para determinar propiedades físico-mecánicas en Rocas Sedimentarias”. M. C. Torres Suárez. Tesis de Maestría en Ingeniería – Geotecnia. Director Jorge Enrique Puerto Garzón. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Enero de 2005.

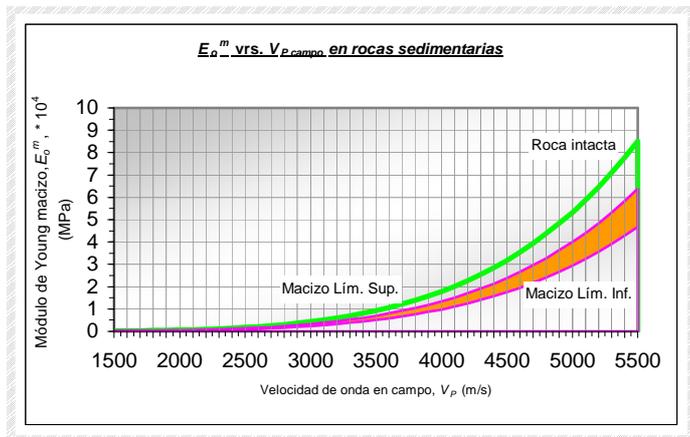


Figura No. 22 – Relación E_0 en macizo (franja naranja) vs. V_p en campo (Torres, 2005)

En consecuencia se llegó a proponer, por primera vez en la literatura que se conoce hasta la fecha, una expresión que permitiría encontrar un factor de escala entre las dos presentaciones (escalas) de un mismo medio.

Esta expresión se basa en la determinación de las características dimensionales del medio y la longitud de onda que lo atraviesa.

$$fr_{(m/l)} = \left[1 - \frac{1}{100 fe_{(l/m)}} \right] \quad (\text{Torres}^1, 2005) \quad (9)$$

En la expresión (9) $fr_{(m/l)}$ es el factor de reducción de propiedades entre el macizo y el laboratorio, bajo la premisa o supuesto que en el primero las velocidades serían menores o máximo iguales a las de los testigos; $fe_{(l/m)}$ es el factor de escala entre el laboratorio y el macizo, el cual se obtendría mediante la expresión (10).

$$fe_{(l/m)} = \frac{fe_l}{fe_m} = \frac{\left[\frac{\lambda_l}{a_l} \right]}{\left[\frac{\lambda_m}{a_m} \right]} \quad (\text{Torres}^2, 2005) \quad (10)$$

En donde λ y a son la longitud de onda característica del tren de pulsos y la dimensión característica del medio, para el laboratorio (ó testigo) y para el macizo (ó elemento estructural) respectivamente.

Esta propuesta debe ser validada para diferentes materiales y condiciones, pero constituye una primera aproximación a la relación entre estos factores, que se presenta en la Figura No. 23.

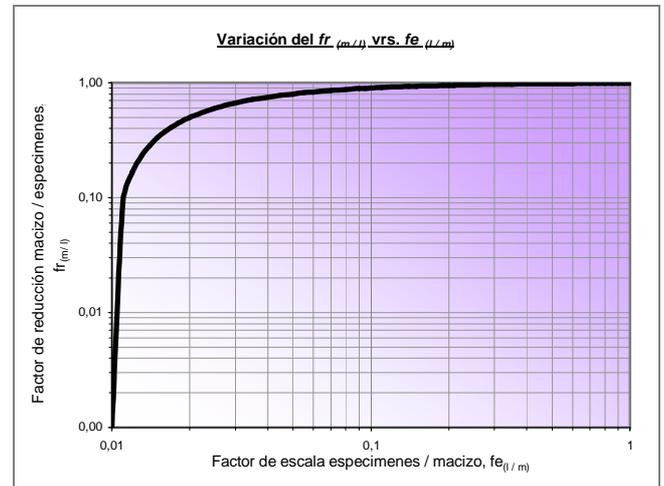


Figura No. 23 – Factor de reducción macizo vs. especímenes de laboratorio, en rocas sedimentarias (Torres, 2005)

Así las cosas, el artículo propende por el conocimiento de los principios fundamentales de los MND pero además trata algunas aplicaciones prácticas a situaciones y problemas comunes en Ingeniería Civil. De todas formas se exhorta a los lectores a consultar las fuentes referidas en los respectivos pies de página y otras que se encuentran en la Tesis de Investigación anotada anteriormente.

Se cree que las aplicaciones aquí presentadas son válidas para los materiales que se estudiaron pero igualmente se intenta mostrar una metodología que permita, haciendo los respectivos ajustes en cuanto a equipos y técnicas de medición, registro y procesamientos de las señales digitales, extraer mayor y mejor calidad de información a los medios investigados. El software necesario para realizar dicho procesamiento de señales se puede obtener fácilmente, incluso a través de la Internet; la premisa que motivó al autor a adelantar estos trabajos es: “si mediante el registro y procesamiento de señales un médico puede determinar los males que afectan diversas partes del cuerpo humano, cuánto más podríamos hacer los ingenieros con nuestros materiales de construcción, bien sea que se trate de materiales naturales ó elaborados!”.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. “Soils and Waves”. Santamarina, J. C. & Klein & Fam. John Willey & Sons. New York, USA. 2001.
2. “Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations”. US Army Corps of Engineers. Engineering and Design. EM 1110-1-1802. Agosto 31 de 1995.
3. “Introduction to geophysical prospecting”. Dobrin, Milton. Tercera Ed. McGraw Hill. 1976.
4. “Caracterización de rocas–Ensayos de laboratorio”. Correa A., Álvaro. Universidad Nacional de Colombia – Sociedad Colombiana de Geotecnia.
5. “Determinación en laboratorio de velocidades de pulso y constantes elásticas ultrasónicas de rocas”. Norma ASTM D 2845-95.
6. “Wave propagation in periodic structures”. Brillouin, L. 1946. McGraw Hill. New York, USA.
7. “Métodos No Destructivos en Mecánica de Rocas”. Puerto G., Jorge E. Artículo en la Revista Ingeniería de Minas. UPTC. 1997.
8. “Ultrasonic Methods of Testing Materials”. Prof. Dr. Inz. LESZEK FILIPCZYNSKI et al. Instituto de Problemas Técnicos Básicos. Academia Polaca de Ciencias, Varsovia. 1966.
9. “Impacto de los Métodos No Destructivos en la Mecánica de Rocas Moderna – Aplicaciones en la Ingeniería Civil y de Minas”. Torres S., Mario C. Artículo en la Revista Ingeniería GranColombiana # 9. Bogotá D.C. Junio de 2004. ISSN 0122-3739.
10. “Mecánica de Rocas Básica con aplicación de Métodos No Destructivos”. Torres S., Mario C. Propuesta de curso en la Facultad de Ingeniería de la Universidad La Gran Colombia. 2003.