

# Estudio de Factibilidad de Técnicas Vibroacústicas en la Detección de Discontinuidades en Metales. (Parte I).

**F. de la Torre. Silva\* , E. Palomino Marín\*\***

\*Dpto. de Mecánica Aplicada. Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. La Habana 19390. Cuba.

\*\*CEIM. Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría. La Habana 19390. Cuba. E-mail [palosr@cujae.ispjae.edu.cu](mailto:palosr@cujae.ispjae.edu.cu)

(Recibido el 20 de octubre de 1998, aceptado el 25 de mayo de 1999)

## Resumen.

En este trabajo se presenta un estudio de factibilidad para la detección de discontinuidades en metales a partir de la aplicación de técnicas de ensayo vibroacústicas mediante la excitación sinusoidal e impulsiva. El análisis simultáneo que puede ser realizado a la señal de entrada y de salida de un elemento metálico, reportaría una descripción del sistema en cuanto a sus propiedades dinámicas fundamentales, como lo son el caso de la Función Respuesta de Frecuencias y la Respuesta Impulsiva. Además, el uso de la Función de Correlación Cruzada, permitiría cuantificar el tiempo de propagación de la señal entre la entrada y la salida, para variaciones de discontinuidades. El empleo de un Instrumento Virtual, sería la herramienta para la realización del análisis de señales. Se plantea un modelo físico matemático teórico a partir del empleo del Método de los Elementos Finitos, implementado por el software MSC/PAL, el cual permitirá corroborar los resultados brindados por el diseño experimental, así como, estudiar dinámicamente el sistema objeto de análisis.

**Palabras claves: factibilidad, fractura, vibroacústica, diagnóstico.**

## 1. Introducción

El diagnóstico de grietas en elementos de máquinas y estructura es esencial para el conocimiento del estado técnico de dichos elementos. Los avances reportados en esta materia en los últimos años son notables. Existen tecnologías y equipamientos definidos que abarcan muchos aspectos de esta materia [11], pero otros aún están en estudio [5, 7, 12]. En Cuba, se aplican estas tecnologías, por algunas empresas especializadas que han comprado en el exterior dicha tecnología y equipamiento. Por lo que, con el equipamiento que posee el GICV (Grupo de Investigaciones y Consultoría en Vibraciones) adscrito al Dpto. de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería Mecánica del ISPJAE, se pretende desarrollar una tecnología que permita, en su primera etapa, la factibilidad de detección de discontinuidades en metales, por lo tanto se presenta en este trabajo el estudio de técnicas de ensayo vibroacústicas para la detección de discontinuidades en metales, a partir de la Función de Correlación Cruzada, para la obtención del tiempo de propagación de la vibración. Además se conforma un

diseño de experimentos que permita relacionar la influencia de la variación de discontinuidades en el metal, respecto a su comportamiento dinámico. Se expone también, la concepción de un modelo físico – matemático para el análisis teórico de la dinámica del sistema mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos.

El objeto de estudio lo constituye el ensayo dinámico de barras de sección circular maciza constantes en toda su longitud, de diferentes materiales metálicos a los cuales se les simula discontinuidades transversales, mediante ranurado a diferentes profundidades, cuyo espesor de corte no es mayor de 1.5 mm. Es de señalar que no se registra en la literatura nacional, trabajos con estas características, reportándose internacionalmente, algunos trabajos con similares objetivos. [5, 7, 12].

## 2. Diseño del experimento

Se plantean las siguientes consideraciones, reflejadas en la tabla 1.

**Tabla 1.** Consideraciones para la realización de los ensayos.

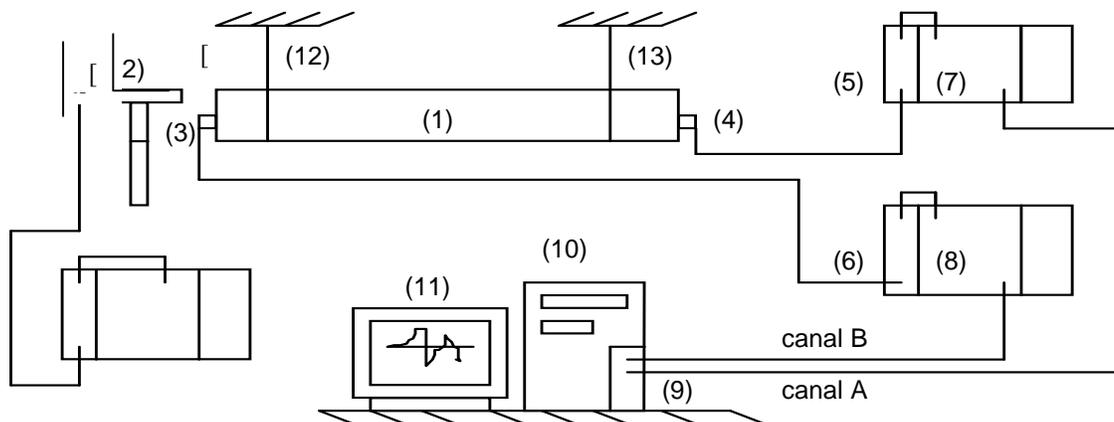
VARIABLES	CONSTANTES	CASOS DE EXCITACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> <li>Profundidad de la discontinuidad.</li> <li>Material.</li> <li>Longitud del medio de estudio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ancho y posición de la discontinuidad.</li> <li>Voltaje y frecuencia de excitación.</li> <li>Simetría en la discontinuidad.</li> <li>Sección transversal circular constante en toda la longitud.</li> <li>Acabado superficial de laminado.</li> <li>Igual diámetro para las barras de los diferentes materiales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Por impacto (Martillo).</li> <li>Por transductor (Acelerómetro piezoeléctrico).</li> </ul>

La literatura encontrada respecto al tema es se encontró similitud en ellas.[5], [7], [12]. Los materiales seleccionados corresponden a: Acero de calidad; Bronce al estaño y Dura aluminio. Ésta se hizo teniendo en cuenta la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en estos materiales. Serán tomadas diez profundidades diferentes como forma de discontinuidad a detectar, cuyos valores varían en un milímetro por cada escalón. Las longitudes de las barras de acero y bronce serán las mismas, mientras que la longitud de la barra de aluminio será mucho mayor, esto se debe a que la velocidad de propagación de las ondas en los dos primeros materiales difieren significativamente [1], sin embargo, la del acero y aluminio son semejantes. Si se aumenta la longitud de la

barra de aluminio se logrará que aumente el tiempo que demora la señal en recorrer un espacio mayor, obteniéndose por consiguiente, diferenciar estos materiales.

### 3.Instalación experimental empleada

**Excitación impulsiva:** Partiendo de la instalación para el ensayo mostrado en la figura # 1, se aplica en el extremo izquierdo del medio (1) objeto de estudio, una fuerza de impacto (2) (golpe de martillo) el cual excitará el medio. Esta excitación será captada por el transductor (3). Pero como el medio es elástico y continuo, la onda provocada por la excitación se propaga a través de este,

**Fig. 1.** Esquema de instalación. (Excitación mediante impacto).

pudiendo ser captada dicha señal mediante el transductor (4). Ambas señales son recogidas por los preamplificadores integradores (5) y (6) los cuales dan ganancia a la señal. Esta señal es filtrada (7) y (8) los cuales evitan el indeseado efecto del aliasing de la señal. Estas señales analógicas son convertidas a valores

digitales mediante la tarjeta convertidora (9) de forma tal que pueda ser entendida por la micro computadora (10), donde se encuentra el software (11) que analizará ambas señales. Mediante el empleo de la función de correlación cruzada podrá ser analizado el retardo en el tiempo de la señal captada en (4) respecto a la emitida en (3), de forma

tal que podrá ser detectada la existencia de discontinuidades, teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la onda en el medio analizado.

**Excitación senoidal:** De forma análoga al caso de impacto, un excitador sustituirá al martillo de impacto y excitará al medio de forma constante, siendo idéntica la descripción del procedimiento de ensayo según se muestra en la figura # 1. Este excitador (que no es más que un transductor utilizado como excitador), el cual recibe un voltaje, de un oscilador (generador de senos), provoca un desplazamiento proporcional al voltaje recibido. Este desplazamiento es transmitido al medio, produciendo un tren de ondas de igual intensidad.

Características del equipamiento a emplear. [9].

1. Transductor. (Captador): Acelerómetro modelo: KD35.
2. Transductor. (Excitador): Acelerómetro modelo: KD35.
3. Preamplificador integrador tipo 00028 (Marca ROBOTRON).
4. Filtro tipo 01013 (Marca ROBOTRON).
5. Generador de senos tipo 1022 (*Beat frequency oscillator*). (Marca B & K).
6. Fuente de corriente tipo 04024 (Marca ROBOTRON).
7. Micro computadora compatible IBM PC 486 del tipo DX-4.
8. Tarjeta conversora analógica - digital (A/D). Modelo PCLAB - 718.
9. Excitador impulsivo. (Martillo de impacto, con cabeza y cabo de acero [3]).
10. Software WinSAAS para el análisis de señales. [8], [10].

#### 4. Técnica empleada para el procesamiento de la señal

El procesamiento de señales se realiza mediante equipamientos especializados, muy costosos, que en este caso son sustituidos por un instrumento virtual (software + computadora). Como se pretende medir el tiempo que demora la señal en llegar a un extremo tomando como referencia el otro extremo, a partir del uso de la función de correlación cruzada, se implementa esta función por el instrumento virtual SIPROS<sup>++</sup> (Sistema Interactivo para el Procesamiento de Señales) o el sistema WinSAAS

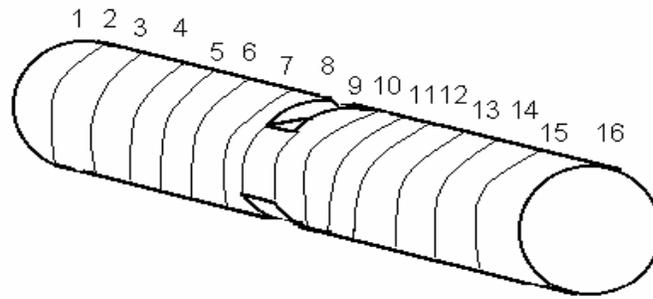
(Sistema de Adquisición y Análisis de Señales). [2, 8, 10]. La función de correlación cruzada de dos "juegos de datos al azar" describe la dependencia general de los valores de un juego de datos sobre otro. Una de las aplicaciones fundamentales de la Función de Correlación Cruzada es la medición del tiempo de retardo.

Para esta aplicación, si se necesita determinar el tiempo requerido por la señal para pasar a través de un sistema dado y asumiendo que el sistema es lineal, la medición de la correlación cruzada entre la entrada y la salida puede pasar directamente como información del tiempo de retardo. Como la salida del sistema es desplazamiento en un tiempo relativo a la entrada, la función de correlación cruzada será un pico a ese tiempo de desplazamiento igual al tiempo requerido por la señal para pasar a través del sistema. Esto es cierto porque el producto del promedio de dos señales lineales relativas tendría siempre un máximo cuando el desplazamiento en el tiempo entre señales es cero. [2]. Se pretende medir el tiempo que demora la señal en llegar a un extremo, en un medio metálico, tomando como referencia el otro extremo, a partir del uso de la función de correlación cruzada que puede ser implementada por el instrumento virtual mencionado.

#### 5. Modelación físico - matemática

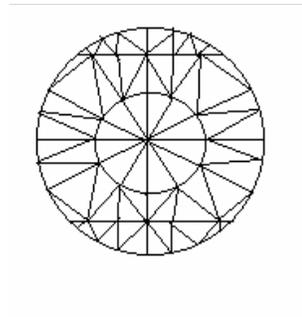
Un aspecto fundamental que se persigue con la modelación, es poder simular el comportamiento del sistema o predecir la respuesta, cuando el sistema se encuentra sometido a acción externa. Debido a la extensión del problema, se requiere de métodos numéricos que en este caso serán aplicados con el auxilio del Método de los Elementos Finitos [4], a partir del programa MSC/pal2 [6]. Se pretende modelar una barra recta de sección circular maciza y diámetro constante en toda su longitud, la cual presenta dos discontinuidades opuestas en forma de ranura practicada sobre la barra transversalmente, la cual varía en su profundidad pero no en su espesor, según se muestra en la figura 2.

Se obtuvieron dos modelos que permitieran representar los casos de, sin y con discontinuidad desde 1 hasta 5 y desde 6 hasta 10 mm de profundidad, es decir estos modelos tienen la flexibilidad de variar la profundidad de la ranura sin modificar la cantidad de nodos y elementos, sólo varían las coordenadas de los nodos que están contenidos en el plano que representa el fondo de la discontinuidad (ranura), según se muestra en la figura 3.



**Fig. 2.** Representación esquemática del modelo de la Barra maciza de sección circular con una ranura transversal, la cual contiene 16 secciones de referencia como la mostrada en la fig. 3

Se dividió el modelo en 16 secciones, según se muestra en la figura 2. Se logró ubicar estas secciones de forma tal que el discretizado de los elementos cercanos a la discontinuidad tuvieran un carácter de malla fina, comparado con los elementos de los extremos de la barra, donde la malla es mas gruesa. Es conocido que este programa impone como restricción una cantidad de 1000 nodos como máximo, para un modelo estático. En la tabla 2. se relacionan la cantidad de nodos y de elementos obtenidos para cada modelo.



**Fig. 3.** Representación de la discretización de la sección de la barra para el caso de: sin y con discontinuidad de 6 hasta 10 mm de profundidad.

**Tabla 2.** Características de cada modelo concebido.

Modelo Tipo	Profundidad (discontinuidad) [mm]	Total de nodos	Total de elementos	Nodos por sección
A	0 y 6 – 10	816	1056	51
B	2 – 5	742	944	47
C	1	688	832	43

Para el análisis dinámico, se discretizó el modelo en 24 nodos con masa. Estos nodos con masa fueron ubicados en el centro de cada una de las 16 secciones en las que se dividió la barra y en los vértices del rectángulo que forma el fondo de la discontinuidad. (figura 2 y 3). Se permitió sólo en la dirección longitudinal, la posibilidad de desplazamiento, lo cual coincide con la trayectoria de propagación de las ondas, a lo largo de la barra.

## 6. Aplicaciones

1. Diagnóstico de elementos de máquinas y estructuras.
2. Detección de fallas constructivas o por el tiempo de servicio de elementos de máquinas y estructuras.
3. Control de calidad de productos reparados o nuevos.

## 7. Conclusiones

1. Se realizó la modelación físico – matemática del sistema, llegando a obtenerse la discretización del modelo con forma versátil.
2. Se propone un sistema de excitación que permita evaluar la influencia de las variaciones de discontinuidad respecto a la velocidad de propagación de la vibración.
3. Se propone la aplicación de la Función de Correlación Cruzada en la determinación del tiempo de retardo de la señal, como vía para la detección de discontinuidades en metales.

## Bibliografía

1. ACHENBACH, J. D. *Wave propagation in elastic solids*. Amsterdam. 1973.
2. BENDAT, J. S. and PIERSOL, A.G. *Random Data: Analysis and measurement procedures*. Wiley Interscience a division of John Wiley & Sons, Inc. New York. London. Sydney. Toronto. 1971.
3. BENÍTEZ, B. D. Estudio del comportamiento dinámico de un martillo de impacto con cabeza y cabo intercambiables. Tesis M. C. ISPJAE. 1996.
4. HILTON, P.D. *Finite Element Modeling in Fracture Mechanics*. Fracture Control Group. Arthur D. Little inc. Cambridge. May.1984.
5. IWATSUBO, T et al. *Detection of a transverse crack in a rotor shaft by adding external force*. C432/093 IMechE. 1992. Separate 42873.
6. MAC NEAL – SCHWENDLER. MSC/PAL2. Elementos Finitos. Guía del usuario. Versión 3.0. 1987.
7. NAITOH, M. et al. *The impact end stress of a bar subjected to longitudinal compression impact*. Bulletin of JSME. Vol. 28. # 245. Nov. 1995.
8. PALOMINO, M. E. SIPROS<sup>++</sup>. Manual de instrucciones. ISPJAE. 1992.
9. PALOMINO, M. E. Instrumentos para la medición de vibraciones. (Folleto para Posgrado). Noviembre 1994. ISPJAE.
10. PALOMINO, M. E. Concepción, desarrollo y aplicación de un instrumento virtual para el análisis de vibraciones en maquinarias y estructuras. Tesis Dr. C. T. Cuba. 1995.
11. RAMÍREZ, G.F. Introducción a los Métodos de ensayos no destructivos de control de la calidad de los materiales INTA. 3<sup>da</sup> Edición. Editorial. Madrid .1978.
12. SPRINGER, W.T. et al. *The effect of a symmetric discontinuity of adjacent material in a longitudinally vibrating uniform beam*. Experimental mechanics. 27(2). Pp. (168-171). 1987.

---

## Vibroacoustical techniques in metals discontinuity detection (part I).

### Abstract

In this work is presented a feasibility study for the discontinuities detection in metals as of the application of trial techniques vibra acoustic through the excitement sinusoidal and impulsive. The simultaneous analysis that it can be accomplished to the entry sign and of exit of a metallic element, would report a description of the system concerning their/its fundamental dynamic properties, as are the case of the function frequencies response and impulsive response. Furthermore, the use of the correlation function crusade, would permit quantify the spread time of the sign between the entry and the exit, for discontinuity variations. The employment of a virtual instrument, would be the tool for the accomplishment of the signs analysis. It is outlined a physical model theoretical mathematician from employment of the method of the finite elements, implemented by the software MSC / PAL, the one which will permit to corroborate the results offered by the experimental design, as well as, to study dynamically the system object of analysis.

**Key words:** feasibility, fractures, vibroacoustic, diagnosis