

# VIBRACIONES INDUCIDAS EN PROCESOS CONSTRUCTIVOS

El objetivo de este trabajo es presentar las características y resultados de algunos nuevos procedimientos, utilizando las señales registradas en una secuencia de hinca de pilotes recientemente monitoreados.

**GONZALO SAN MARTIN T.  
RUBEN BOROSCHEK K.**

Departamento de Ingeniería Civil  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Universidad de Chile

Toda actividad constructiva provoca vibraciones. En muchos casos, éstas generan fallas en el suelo, en estructuras vecinas o producen incomodidades o malestar a las personas. Dentro de las actividades constructivas que producen los mayores inconvenientes, están las que hacen uso de explosivos, las demoliciones y los procesos de hinca de pilotes.

La manera tradicional de caracterizar el potencial de daño en sistemas o el malestar en las personas, durante procesos constructivos, ha sido la velocidad máxima de partículas. El desarrollo de nuevas tecnologías de sensores y la capacidad de almacenamiento en forma digital de los registros de movimiento, está permitiendo el uso de metodologías que permiten un análisis más confiable y detallado de los efectos de las vibraciones en estructuras, procesos y personas. Dentro de las alternativas que se han abierto, está la caracterización del movimiento no sólo en términos de sus máximos, sino que también considerando su evolución en el tiempo y en la frecuencia, y el uso directo de espectros de respuesta.

## FORMAS DE EVALUAR LOS NIVELES DE VIBRACION

El parámetro comúnmente utilizado para describir el movimiento del suelo en procesos constructivos es la velocidad de partículas, que es la velocidad de desplazamiento de una partícula individual a medida que la onda

de propagación pasa a través de su ubicación. Este valor sirve como indicador de la energía entregada al suelo o al sistema.

Generalmente, se tiende a confundir la velocidad de partículas con la velocidad de propagación, pero esta última es simplemente el valor con el que se desplaza el frente de ondas desde el origen. De esta forma, la velocidad de propagación depende de las características del medio de transmisión; mientras que la velocidad de partícula depende de la cantidad de energía impartida en el origen, de la distancia entre la partícula y el origen, y de la energía que pierde durante la transmisión.

Los valores límites para estimar el potencial de daño a través del parámetro de velocidad máxima de partícula, se han desarrollado a partir de experiencias prácticas, especialmente basadas en explosiones. Estos mismos valores límites son usualmente utilizados en otro tipo de procesos constructivos (ref. 5 y 6). A continuación se describen los límites más comunes:

- **Máximo valor de la velocidad de partícula:** para la utilización de este método, se requiere de un arreglo ortogonal de sensores de velocidad, el cual se ubica de manera arbitraria a distintas distancias de la construcción. La condición que debe cumplir la velocidad máxima de partícula en las tres direcciones, es que su valor no sea mayor a 25 mm/seg (1 in/seg). (ref. 2)
- **Máximo valor de la velocidad de partícula en función de la frecuencia:** para la utilización de este método de control se necesita un arreglo de sensores de velocidad y el análisis de la amplitud en bandas definidas de frecuencia. El límite para controlar el daño de acuerdo a la

Frecuencia Dominante	Máx. Vel. de partículas [ Hz ] [ mm/s ]
5	25
10	25
20	25
40	31
60	45
80	61
100	76

Tabla Nº 1: Criterios de la velocidad de partícula asociada a la frecuencia.

frecuencia dominante se especifica en la Tabla Nº 1. Estos valores son válidos para distancias menores a 25 m. Para distancias mayores, el criterio utilizado es que la velocidad máxima de partícula sea menor a 25 mm/seg. (ref. 2)

La elección de uno de los dos métodos es responsabilidad del ingeniero. En el primer caso, sólo se necesita un sensor de velocidad para registrar el máximo; mientras que en el segundo, se requiere almacenar los registros y tener técnicas de análisis para obtener la información en el espacio de las frecuencias, o bien, equipos con filtros incorporados en las bandas de análisis.

El parámetro de velocidad máxima es un indicador parcial del potencial de daño de un sistema. Desde un punto de vista teórico y práctico, es obvio que el potencial de daño no sólo depende de la amplitud del movimiento, sino además, de la secuencia de pulsos (o historia de tiempo), de su duración, de la evolución de la frecuencia de la excitación, y por supuesto, de las características físicas (y en especial las dinámicas) del sistema expuesto a la excitación. Si se dispone del registro de la excitación, es posible desarrollar un modelo del sistema que se está analizando y establecer la respuesta del mismo a la excitación. Luego, ésta puede ser contrastada con curvas de fragilidad u otros parámetros directos del daño que se desea controlar.

Este procedimiento está bastante desarrollado y se utiliza ampliamente en distintos tipos de estudios, como la resistencia de estructuras a eventos sísmicos. Sin embargo, estos tienen el inconveniente de requerir el conocimiento de las características dinámicas de la estructura a proteger, y por tanto, es de difícil implementación en estudios masivos de control de daño a un grupo de estructuras producto de un proceso constructivo.

**VIBRACIONES PRODUCTO DE LA HINCA DE PILOTES**

La hinca de pilotes mediante martinetes de impacto o vibratorios, produce esencialmente ondas de cuerpo (compresivas y corte) y de superficie (especialmente del tipo Rayleigh). Dentro de distancias iguales a la penetración del pilote, la vibración está dominada por las ondas de cuerpo. Estas ondas se propagan de manera cilíndrica, a lo largo del pilote, y esféricamente, en la punta de éste, hasta que se intersecan con otra capa de suelo o con la superficie. Las ondas de superficie comienzan a tomar importancia en la transmisión a distancias relativamente grandes del punto de hinca (ref. 3).

Tradicionalmente se ha reportado que los procesos de hinca de pilotes producen vibraciones con frecuencias que se ubican en una banda entre 4 y 50 Hz, siendo las más típicas entre 20 y 30 Hz (esta banda es un indicador de las frecuencias que presentan mayor amplitud de movimiento o que presentan mayor energía en la señal) (ref. 2). Sin embargo, estas frecuencias dependen de las condiciones de hinca (características del suelo), de las características del pilote y de las propiedades del martinete.

**DAÑOS PRODUCIDOS POR LAS VIBRACIONES SOBRE ESTRUCTURAS Y PERCEPCION HUMANA A LA VIBRACION**

El movimiento creado por la hinca de pilotes provoca desplazamientos, compactación, densificación, cambios volumétricos del suelo, vibración y daño de estructuras vecinas entre otros. Algunos ejemplos de estos efectos se pueden encontrar en la literatura:

1. Flinkwick, Inglaterra: Durante la hinca de pilotes con un martinete del tipo vibratorio, se produjeron agrietamientos en los muros de casas vecinas a la zona en construcción (ref. 2).
2. Western Brooklyn, New York, EE.UU: Se utilizaron pilotes para soportar una excavación al lado de un almacén existente, durante la hinca, el almacén sufrió un asentamiento diferencial de 9.1 cm, lo que obligó a demolerlo y a construir uno nuevo luego de que la hinca terminara (ref. 4).

Como se puede apreciar en los casos anteriores, la mayor parte de los problemas se producen por la consolidación del suelo producto de la hinca de pilotes. Muchas veces no es necesario que se produzca daño para que las vibraciones afecten la funcionalidad de la estructura o a las personas. Por ejemplo, el ambiente de vibraciones en una estructura puede impedir que se desarrollen labores de precisión o impedir que los ocupantes desarrollen sus labores en forma normal. Dependiendo de la frecuencia de la excitación, del tiempo de exposición y del medio donde la persona se encuentre, las vibraciones provocan: incomodidad, disminución de las habilidades motoras, fatiga y disminución de la capacidad visual.

**ESTUDIO EXPERIMENTAL**

El monitoreo de vibraciones se realizó durante el proceso constructivo de un muelle portuario (ref. 1 y 7), en el cual

se realizaban faenas de hinca de pilotes de acero de 30 m de largo, 90 cm de diámetro y 19 mm de espesor. Para el proceso de monitoreo se localizaron sensores en el relleno artificial a distintas distancias del muro de contención (4 y 8 metros), Fig. N° 1. En cada uno de los puntos de medición, se utilizó un arreglo triaxial de sensores cuyas direcciones quedaron referidas al muro de contención de la siguiente manera:

- Un registro horizontal en la dirección normal al muro.
- Un registro paralelo a la dirección del muro.
- Un registro vertical.

**CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS**

Se establecieron dos sistemas de monitoreo para cubrir una banda de análisis de frecuencia entre los 0 y 300 Hz. Ambos sistemas, registran la historia de aceleración o velocidad según corresponda, con tiempo común y las almacenan en forma digital para su posterior procesamiento.

La elección de una banda mayor a la utilizada normalmente en este tipo de estudios (entre 1 y 100 Hz), se debió principalmente a que las condiciones de hinca se encontraban fuera de lo tradicional, especialmente en lo que se refiere al tipo de suelo (muy compacto), lo que hacía esperar frecuencias mucho mayores de lo normal.

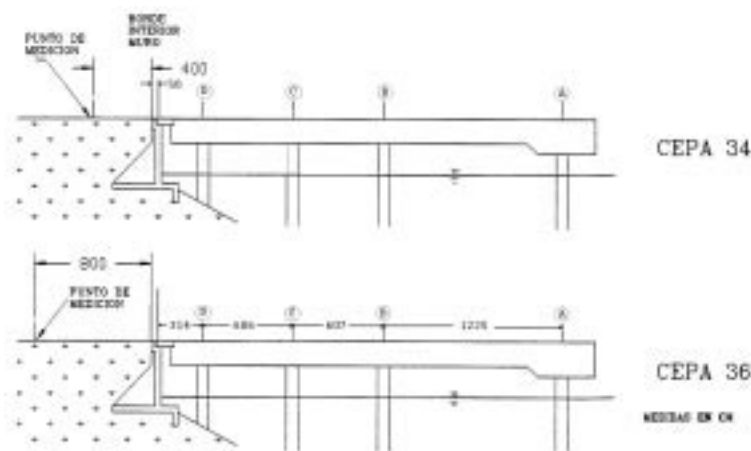


Fig. N° 1: Ubicación de los puntos de medición.

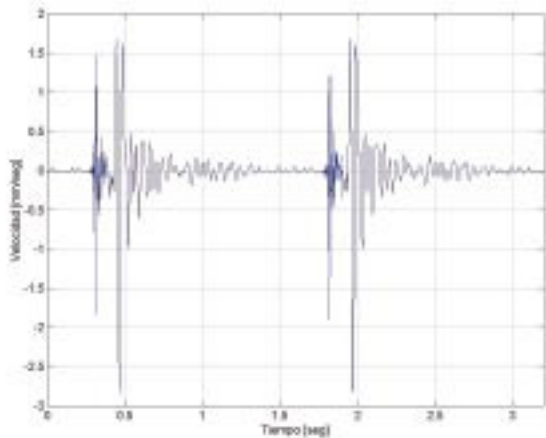


Fig. N° 2: Secuencia de dos golpes.

**METODOS DE ANALISIS Y RESULTADOS**

A continuación se presentan los métodos de análisis utilizados para la caracterización de las señales obtenidas, a partir del ensayo experimental y los principales resultados (ref. 1 y 7).

- **Análisis de envolvente:** se obtuvieron las envolventes de los registros y se determinó con precisión la duración del impacto, el número de golpes, el tiempo entre impactos consecutivos y se individualizó cada impacto para realizar un análisis más detallado en cuanto a sus máximos y el contenido de frecuencia. La Fig. N° 2 muestra dos impactos consecutivos.
- **Espectrogramas:** mediante este análisis se determinó la variación de la frecuencia en función del tiempo para cada registro. En la Fig. N° 3 puede verse la señal en la parte superior y abajo su espectrograma. Los colores representan la amplitud o energía para la frecuencia en cada instante y van desde azul, que representa amplitud 0, hasta el rojo más oscuro, que es la amplitud mayor. Este proceso se aplicó a los golpes separados para poder observar la evolución de las frecuencias presentes en el proceso, lográndose identificar dos fases más o menos claras, una con movimientos sobre 50 Hz y otra bajo 50 Hz. A partir de este análisis se generó la hipótesis de que la fase de vibración de alta frecuencia, sobre 50 Hz, estaría asociada a la vibración del pilote y la

baja frecuencia al suelo (ref. 7). Una posibilidad para validar la hipótesis asociada a la vibración del pilote consistía en colocar sensores en él. Esto no fue posible y finalmente se optó por realizar modelos teóricos (ref.1).

- **Amplitudes máximas:** se obtuvieron las amplitudes máximas de los registros con lo cual se aseguró que no existiera la posibilidad de daño. Además, se determinó en cuál de las

dos fases de vibración o bandas de frecuencia (obtenidas de los espectrogramas) se produce el máximo, para lo cual se utilizó un filtro digital en el espacio del tiempo, Fig. N° 4.

- **Espectro de Respuesta:** se obtuvo el espectro de respuesta de aceleración para cada golpe, determinándose que no se debiera producir daño para estructuras vecinas a la zona de hinca.
- **Espectro de frecuencia de cada golpe:** consistió en separar los golpes y calcular su espectro de frecuencia. Mediante este proceso, se determinó la banda de frecuencia en la cual se encuentra el 95 % de la energía. Estos parámetros fueron contrastados con curvas de fragilidad contenidas en normas internacionales.

- **Análisis cualitativo de las frecuencias del pilote:** el objetivo de este análisis fue establecer la relación entre la fase de vibración de alta frecuencia y la vibración del pilote. Para ello se realizó un análisis teórico de vibraciones libres, sin amortiguamiento, de una barra empotrada en uno de sus extremos. Utilizando los datos de los pilotes hincados en terreno, se obtuvieron frecuencias axiales sobre 41 Hz. Con estos resultados y la identificación de las dos fases de la señal, se plantearon las siguientes hipótesis:

- Las frecuencias bajo los 50 Hz, se deben a la vibración del suelo y pilote, siendo el suelo el que alcanza la mayor amplitud.
- La alta frecuencia, sobre los 50 Hz, se debe a la vibración del pilote.

Con estas hipótesis se desarrolló un modelo más detallado del pilote, con el fin de estudiar la variación de las frecuencias con la dureza del suelo y con el tipo de impacto (ref. 1).

- **Análisis de frecuencias características:** este procedimiento tuvo como objetivo monitorear la variación de las frecuencias observadas en los registros durante el proceso de hinca, con el fin de validar la hipótesis de que las frecuencias naturales de vibración del pilote debieran modificarse a medida que éste se hinca. Del análisis se pudo

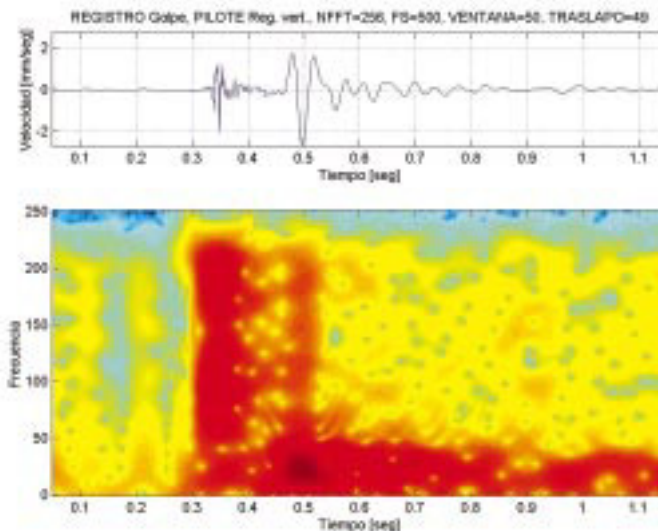


Fig. N° 3: Espectrograma de un golpe correspondiente a los registros de velocidad, componente vertical.

observar que no se presentaron variaciones importantes de la frecuencia en las tres direcciones de medición, lo que indicaría que las frecuencias naturales no varían sustancialmente a medida que se hinca el pilote para el caso estudiado.

Para todos los análisis anteriores se desarrollaron programas computacionales, lo que permitió implementar una secuencia rápida y eficaz en el análisis de la señal.

**BIT**

**Agradecimientos**

Los autores desean agradecer el apoyo en el desarrollo de este trabajo al Ingeniero Pedro Soto, Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile, y a Promina Ingeniería y Construcción S.A.

**Referencias**

1. San Martín, G. "Vibraciones Inducidas en Procesos de Hincas de Pilotes", Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, U. de Chile, 1999.
2. Dowding, H. "Construction Vibrations", Prentice Hall, Estados Unidos, 1996.
3. Heckman, W. y Hagerty, D. "Vibrations Associated with Pile Driving", Journal of the Construction Division, ASCE, Vol. 104, No. CO4, 1978, pp. 386-394.
4. Lacy, H. y Gould, J. "Settlement from Pile Driving in Sands", ASCE National Convention and Exposition, ASCE, 1985, pp. 153-173.
5. Nicholls, H. R., Johnson, C. F., y Duvall, W. I. "Blasting Vibrations and Their Effects on Structures", Bulletin 656, U. S. Bureau of Mines, Washington D.C, 1971.
6. DIN, Norma Alemana. "Structural Vibration in Buildings", DIN 4150, 1983.
7. Boroschek, R y Soto, P. "Informe del Estudio de Vibraciones en el Sitio 3 de P.V.", Promina, Enero 1997.

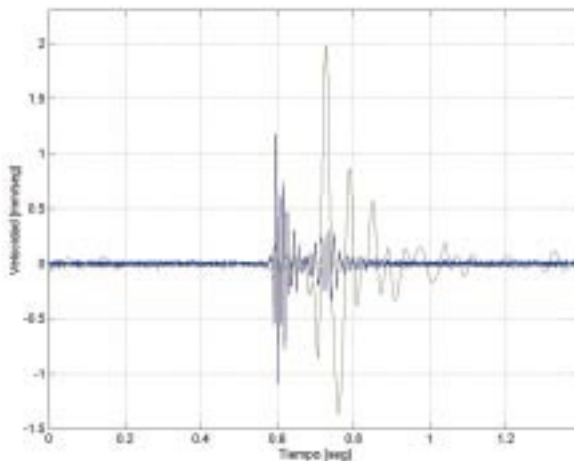
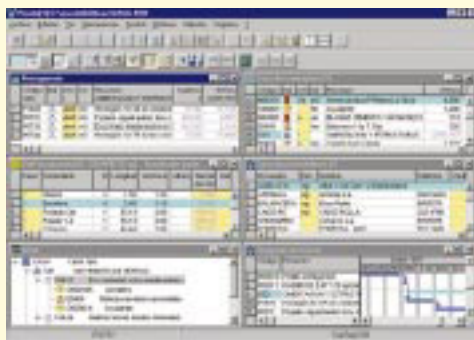
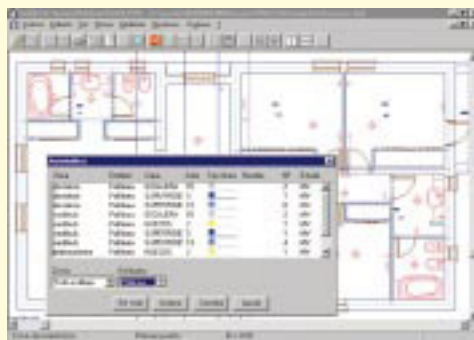


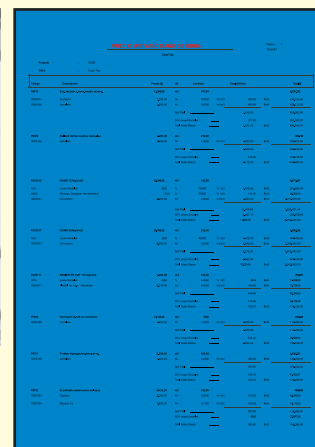
Fig. N° 4: Señal separada sobre y bajo 50 Hz.



Software standard Windows 95/98/NT 4.0



Conectado con AutoCAD y ArchiCAD



Más de cien documentos impresos predefinidos

- Cubicación sobre archivos CAD
- Planificación integrada de costos y tiempos
- Gestiona compras, bodega y control financiero
- Poderoso generador de informes personalizable
- Control por naturaleza de insumos
- Seguimiento por días y por meses
- Desviaciones presupuestarias por centros de costo
- Traspaso de datos a MS-Project, CA-SuperProject y Primavera

**Cubique, presupueste y controle costos con**



Bandera 566 Of 72 www.aminfo.cl  
(56-2) 697 2683 · 697 2785 Fax 696 1617 comercial@aminfo.cl



Marque el 21 en su tarjeta de consulta