

**PROYECTO VIBRO-IMPACT: MODELO PREDICTIVO DEL IMPACTO POR  
VIBRACIONES OCASIONADAS POR TRABAJOS DE OBRA PÚBLICA  
SOBRE EDIFICACIONES CIRCUNDANTES**

REF. PACS: 43.40.Tm

**Autores:** J. Cardona<sup>1</sup>; A. Clot<sup>2</sup>; R. Arcos<sup>2</sup>, R. Torres<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AV Ingenieros, c/ Abat Marcet, 41 bajos. 08173 St. Cugat del Vallés (Barcelona).  
Telf: +34 936743191. e-mail: [jcg@avingenieros.com](mailto:jcg@avingenieros.com)

<sup>2</sup> Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, Universidad Politécnica de Catalunya, LEAM-UPC. c/ Colom, 11. 08222 Terrassa (Barcelona). Telf: +34 937398146.

**ABSTRACT**

VIBRO-IMPACT is an investigation project co-funded by the Spanish Centre for Industrial Technological Development, CDTI, which aim is to develop a model for the prediction of the vibration induced in near buildings due to urban public works.

To do so, constructive processes and public work machines that generate greater vibration levels are identified and experimentally characterized. Then, three analytical vibration prediction models are developed: a vibration generation model for each kind of source, a general analytical soil vibration propagation model and a building dynamic model coupled to the previous one.

Finally, a specific experimental methodology to model unique buildings is developed. A self-developed vibration excitation device is used to synthesise the vibration emission of the previously identified urban public work sources.

**RESUMEN**

VIBRO-IMPACT es un proyecto de investigación co-financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, CDTI, cuyo objetivo es el desarrollo de un modelo para la predicción, en fase de proyecto, de las vibraciones inducidas en las viviendas debido a las máquinas y procesos constructivos de las obras públicas urbanas.

Para ello, se identifican las máquinas y procesos constructivos que generan mayores niveles de vibración y se desarrollan tres modelos predictivos: un modelo analítico de la generación de vibraciones de dichas fuentes, un modelo analítico de propagación de las vibraciones a través del terreno y un modelo analítico del comportamiento dinámico de los edificios acoplado al de propagación por el terreno.

Finalmente, se propone también una metodología experimental particular para el estudio de edificios singulares, en la que las vibraciones se generan mediante un excitador de desarrollo propio que sintetiza la emisión vibratoria de las fuentes identificadas presentes en la obra pública.

## 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETO

En el campo de la acústica existen diferentes modelos y herramientas de cálculo, implementadas en programas comerciales, que permiten llevar a cabo una modelización para el cálculo predictivo de la futura afectación sonora de un entorno debido a una o varias fuentes sonoras [1].

Por el contrario, en el campo de las vibraciones no existe tanta tradición en el modelado, por lo que a día de hoy aún no existe ningún modelo estandarizado o recomendado, ya sea a nivel nacional o bien a nivel internacional, que defina la generación de la vibración (en función de la naturaleza de la fuente considerada), la propagación de ésta a través del terreno y el comportamiento de las edificaciones frente a esta perturbación. El motivo que ha conducido a esta situación es la mayor complejidad que conlleva el modelado de las vibraciones frente al modelado acústico, puesto que, entre otros factores, el medio de propagación de las vibraciones (terreno) no es homogéneo como sí lo es el medio de propagación sonora (aire). Además, en el campo de las vibraciones éstas se deben evaluar en el interior de las edificaciones, por lo que se debe modelizar el comportamiento dinámico de estas estructuras.

Partiendo de esta situación, la necesidad del proyecto surge por la ausencia de una metodología que sea capaz de desarrollar un cálculo predictivo del ambiente vibratorio que tendrá lugar en el entorno de los recintos de obra debido a las tareas propias de la construcción de nuevas infraestructuras.

Por tanto, el objetivo del proyecto es desarrollar una metodología basada en un modelo predictivo que permita determinar de antemano, en fase de proyecto, las posibles afectaciones ocasionadas por las vibraciones generadas durante las obras públicas sobre las edificaciones próximas a los recintos de obra. De esta forma, en fase de proyecto se podrán plantear las medidas correctoras a aplicar para minimizar la afectación de las edificaciones por vibraciones.

Este artículo presenta los desarrollos llevados a cabo hasta el momento en el proyecto, cuya fecha de finalización prevista es a finales de 2014, y que consisten en la identificación de las máquinas y procesos constructivos utilizados habitualmente en obras públicas urbanas y que generan mayores niveles de vibración, la caracterización experimental de las fuentes de vibración, y el desarrollo de modelos predictivos de generación de vibraciones, propagación de las vibraciones a través del terreno y comportamiento dinámico de los edificios potencialmente afectados.

## 2.- FUENTES DE VIBRACIÓN OBJETO DE ESTUDIO

El proyecto considera las siguientes tareas constructivas como principales fuentes generadoras de vibraciones en obras públicas:

### 1. Muros pantalla

Es la tipología de cimentaciones más extendida en áreas urbanas para edificios con sótano en parcela entre medianeras. El proceso constructivo que genera vibraciones es el correspondiente a la excavación, que se puede hacer mediante cuchara bivalva, trépanos o hidrofresa, en función de la dureza del terreno y del nivel freático [2]. La cuchara bivalva y el trépano generan impactos, ya que para excavar se dejan caer desde cierta altura, mientras que la hidrofresa genera una vibración continua debido a la fricción entre las ruedas dentadas de la máquina y el terreno.

### 2. Hincado de tablestacas y de pilotes

Las tablestacas son planchas de sección alabeada prefabricadas de acero y los pilotes son estructuras prefabricadas de hormigón armado de sección circular o cuadrada. El

hincado consiste en la introducción de estas estructuras en el terreno. Para ello se emplean máquinas que incorporan un martillo de golpeo que sujeta la tablestaca o el pilote por su parte superior y le transmite los impactos generados por una maza alojada en su interior.



Figura 2.1. a) Vista de una cuchara bivalva para la ejecución de un muro pantalla y b) vista del proceso de hincado de una tablestaca.

### 3. Pilotes in situ

Los pilotes in situ son aquellos que se ejecutan perforando el terreno mediante una barrena y rellenando la excavación con hormigón fresco además de las correspondientes armaduras. Por tanto, la vibración que se genera es continua y debido a la perforación del terreno mediante barrena, siendo mayor la vibración cuanto más duro sea el terreno.

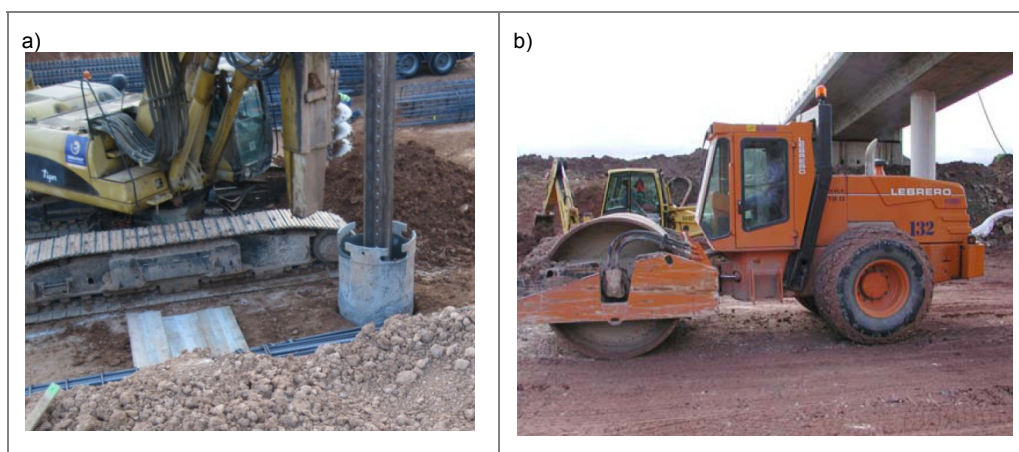


Figura 2.2. a) Vista de la ejecución de un pilote in situ y b) vista de una compactadora.

### 4. Compactación de vías

La compactación es un proceso por el que se produce una densificación del suelo, disminuyendo su relación de vacíos con el objetivo de mejorar sus propiedades

geotécnicas. Para ello se utilizan compactadoras formadas por un cilindro metálico liso de masa elevada (fuerza estática) que en su interior alberga un sistema de masas excéntricas giratorias que generan una vibración controlada (fuerza dinámica). Por tanto, las vibraciones de este tipo de fuente vienen dadas por la rotación de las masas excéntricas en el interior del rodillo que las aplica al terreno.

Las voladuras, que representan una fuente de vibraciones importantes y que en los últimos años han visto como aumentaba su utilización en entornos urbanos, no se han considerado porque existe una literatura extensa de modelos predictivos.

### 3.- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS FUENTES DE VIBRACIÓN

Con el objetivo de caracterizar las fuentes de vibración identificadas anteriormente, se ha procedido a la medida experimental de los niveles de vibración inducidos en la superficie del terreno próximo a dichas fuentes. El objetivo de estas medidas es determinar las características que definen las fuentes, como magnitud (que dependerá del tipo de terreno) y la directividad de la radiación vibratoria. A su vez, estas medidas experimentales fueron útiles para la validación de los modelos de predicción que se definen en el apartado siguiente.

Para ello se utilizaron diferentes configuraciones en la disposición de los acelerómetros, en función de la fuente de vibración y del entorno en el que se encontraba. En todos los casos se utilizaron acelerómetros sísmicos de sensibilidad 10 V/g dispuestos en forma triaxial en cada punto de medida, de manera que se registrara la vibración en las tres direcciones (x,y,z) de forma simultánea. Asimismo, en todos los casos se registra el nivel de vibración en diferentes puntos de forma simultánea. En el ejemplo de la Figura 3.1, se dispusieron un total de seis puntos de medida triaxiales, con lo que se utilizaron un total de 18 sensores de forma simultánea.

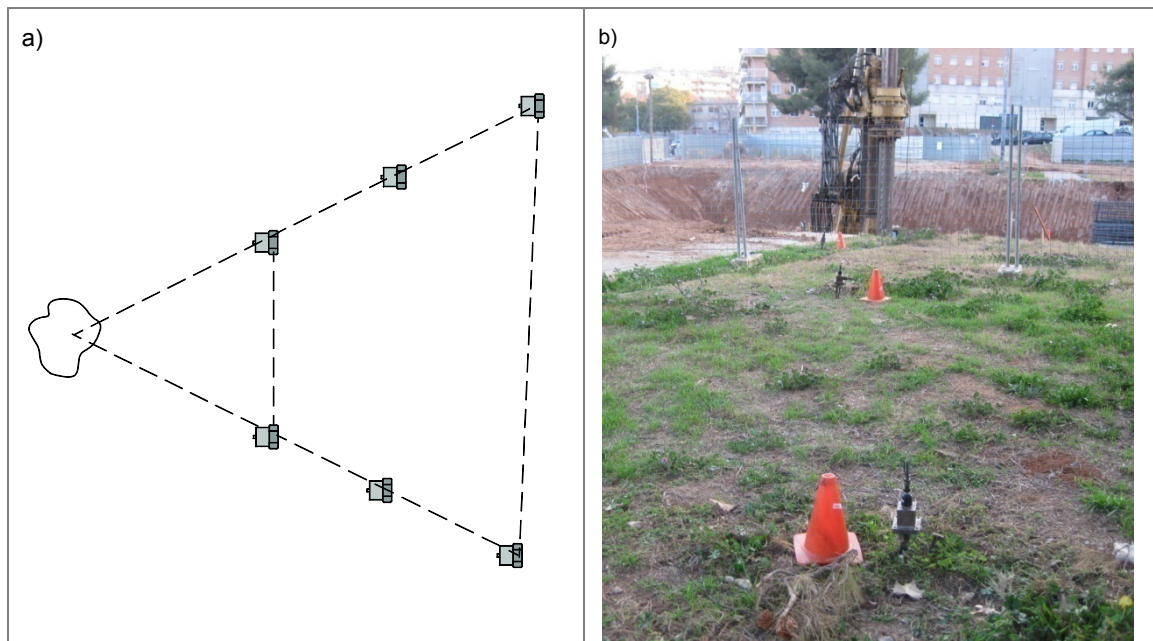


Figura 3.1. a) Detalle de la configuración de acelerómetros y b) vista de las medidas experimentales para la caracterización de una máquina de pilotes.

#### 4.- MODELOS DE PREDICCIÓN VIBRATORIA

##### 4.1.- Modelo de generación y propagación

En el desarrollo del modelo de generación y propagación de las vibraciones a través del terreno se consideran 3 tipologías básicas de fuentes de vibración: fuente puntual superficial, fuente circular superficial y fuente en el interior del terreno, soterrada cierta distancia. La respuesta de la superficie de un semi-espacio en el dominio espacial a una carga genérica se puede describir según la expresión (1):

$$u(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U(r, \omega, z) e^{i\omega t} d\omega \quad (1)$$

Donde

$$U(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} T_n \int_0^{\infty} k C_n \tilde{u}(k, n, z, \omega) dk \quad (2)$$

$$T_n = \begin{pmatrix} \sin(n\theta) & 0 & 0 \\ 0 & \cos(n\theta) & 0 \\ 0 & 0 & \sin(n\theta) \end{pmatrix} ; \quad C_n = \begin{pmatrix} J'_n & \frac{n}{kr} J_n & 0 \\ \frac{n}{kr} J_n & J'_n & 0 \\ 0 & 0 & J_n \end{pmatrix} ; \quad J'_n = \frac{dJ_n(kr)}{d(kr)}$$

Para el caso de una carga circular aplicada en la superficie de un semi-espacio, la respuesta radial y vertical del terreno se puede describir según la expresión (3):

$$\begin{pmatrix} U_r(r, 0) \\ U_z(r, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \int_0^{\infty} \begin{pmatrix} J'_0 & 0 \\ 0 & J_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_r \\ \tilde{u}_z \end{pmatrix} k dk = \int_0^{\infty} \begin{pmatrix} -J_1(kr) \tilde{u}_r \\ J_0(kr) \tilde{u}_z \end{pmatrix} k dk \quad (3)$$

Dando valores al parámetro distancia,  $r$ , se obtiene la respuesta del terreno en cualquier punto del mismo. A la distancia a la cual se encuentre el receptor objeto de estudio, se deberá acoplar el resultado obtenido mediante este modelo con el modelo de edificio que se expone a continuación.

##### 4.2.- Modelo de edificio

Los edificios se caracterizan mediante un modelo analítico en el que los forjados, considerados infinitos en la dirección longitudinal, están soportados sobre columnas dispuestas a ambos lados del mismo y de forma periódica a lo largo de la dirección infinita. El acoplamiento de las columnas con el forjado se establece en el dominio espacial, imponiendo que el desplazamiento vertical del forjado y de las columnas en el punto de contacto de estos dos elementos sea igual.

Las columnas del edificio se modelan como barras que vibran en la dirección axial. Su respuesta en el dominio frecuencial viene dado por la expresión (4):

$$U(z) = C \sin(\beta z) + D \cos(\beta z) \quad (4)$$

Donde  $\beta^2 = \omega^2 / c_0^2$  y  $c_0 = \sqrt{E/\rho}$ . El desplazamiento en el punto de contacto de la columna con

el forjado viene dado por la expresión (5):

$$U(z) = C_d(z) F_d + C_u(z) F_u \quad (5)$$

Donde

$$C_d(z) = \frac{1}{EA\beta} \left[ \sin(\beta z) + \frac{\cos(\beta z)}{\tan(\beta H)} \right] ; \quad C_u(z) = \frac{\cos(\beta z)}{EA\beta \sin(\beta H)}$$

En estas dos expresiones,  $C_d$  y  $C_u$  son las receptancias en el punto  $z$  de la columna debido a una carga aplicada en la parte superior (o inferior) de la columna.

Por otro lado, el forjado se modela como una placa en forma de tira infinita en su dirección longitudinal que queda soportado sobre una distribución de columnas que actúan como soportes puntuales separados una distancia  $d_c$ . El ancho del forjado es  $L_f$ , tal como puede verse en la Figura 4.1. Las cargas  $k$  y  $k+1$  aplicadas al forjado  $f$  (siendo  $k = 2f$ ) se pueden definir según la expresión (6):

$$P(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [(F_{k,m}^l - F_{k+1,m}^l)\delta(y)\delta(x - md_c) + (F_{k,m}^r - F_{k+1,m}^r)\delta(y - L_f)\delta(x - md_c)] \quad (6)$$

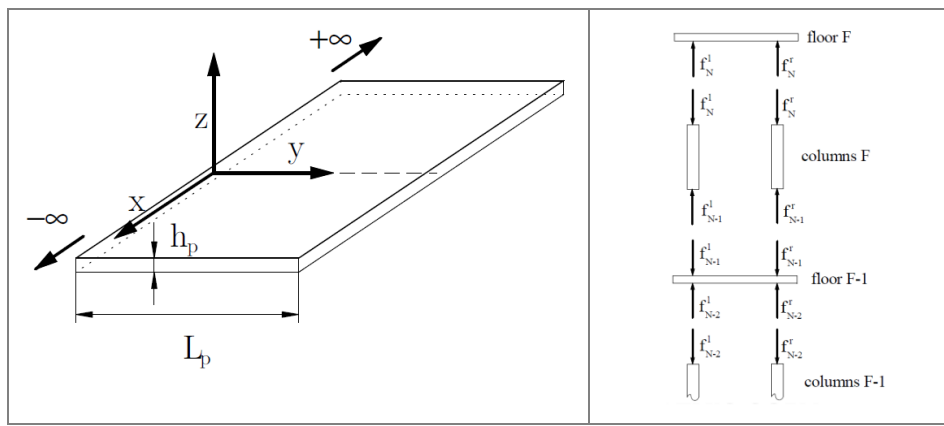


Figura 4.1. Características que definen el modelo de forjado y columnas considerado.

Mientras que el desplazamiento del forjado se puede describir según la expresión (7):

$$W(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [(F_{k,m}^l - F_{k+1,m}^l)A_m^0(x, y) + (F_{k,m}^r - F_{k+1,m}^r)A_m^L(x, y)] \quad (7)$$

Donde

$$A_m^0(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\sum_{n=1}^{\infty} \overline{W}_n(y) \overline{W}_n(0) B_n) e^{ik_x(md_c - x)} dk_x \quad (8)$$

$$A_m^L(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (\sum_{n=1}^{\infty} \overline{W}_n(y) \overline{W}_n(L) B_n) e^{ik_x(md_c - x)} dk_x \quad (9)$$

Donde

$$B_n = \frac{e^{i\phi_n}}{C_n \rho h \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \omega_n^4 \eta^2}} \quad ; \quad \phi_n = \arctan\left(\frac{\eta_p}{1 - (\omega/\omega_n)^2}\right) \quad ; \quad C_n = \int_0^{L_p} \overline{W}_n(y_p)^2 dy_p$$

## 5.- RESULTADOS

A falta aún de la finalización del proyecto y, por tanto, del acople de todos los modelos en un solo modelo predictivo, los trabajos realizados hasta el momento permiten obtener la respuesta vibratoria en diferentes localizaciones debido a la acción de una fuerza en el terreno. En las siguientes figuras se presentan diferentes resultados que se pueden obtener con los modelos analíticos desarrollados.

Así, la Figura 5.1.a se puede observar la respuesta frecuencial en la cabeza de un pilote (profundidad  $z = 0$  m) hincado en un semi-espacio homogéneo, en el caso de aplicar una fuerza vertical a diferentes profundidades:  $z = 0$  m,  $z = 5$  m y  $z = 10$  m. Por otro lado, la Figura 5.1.b muestra la respuesta vertical en un punto situado en la superficie del semi-espacio ( $z = 0$

m) y a 10 m de distancia de un pilote, cuando el pilote es hincado mediante una fuerza vertical unitaria aplicada en la cabeza de éste ( $z = 0$  m).

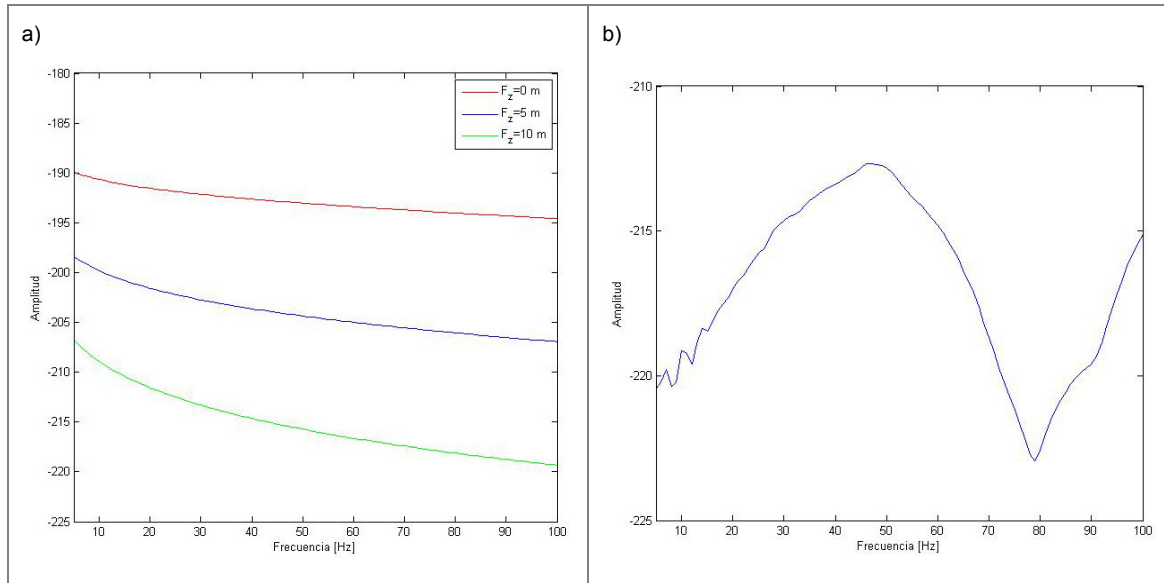


Figura 5.1. a) Respuesta vertical en la cabeza de un pilote para fuerzas verticales a 0 m, 5 m y 10 m de profundidad, y b) respuesta vertical de un punto situado en la superficie del terreno y a 10 m de distancia de un pilote cuando se produce el hincado de éste.

Por otro lado, la Figura 5.2 muestra la respuesta del forjado de un piso, soportado por 3 columnas (caso a) y soportado por 5 columnas (caso b). El forjado tiene una luz de 10 m y la respuesta corresponde a un punto situado en el centro del forjado ( $y = 5$  m) y en varias posiciones a lo largo del eje longitudinal del mismo:  $x = 0,2$  m,  $x = 5$  m y  $x = 10$  m.

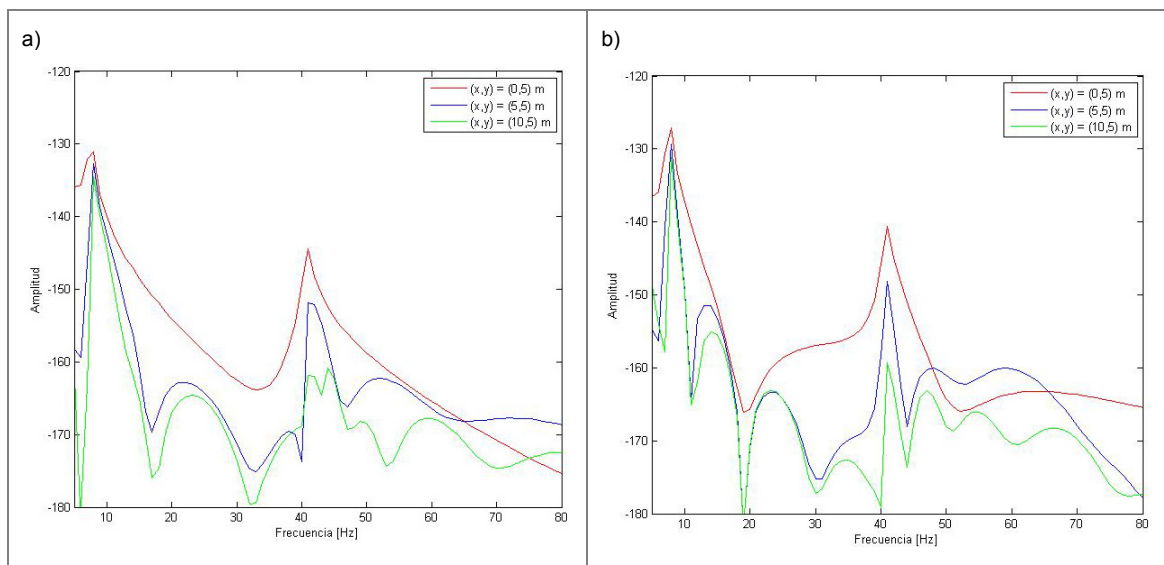


Figura 5.2. Respuesta de varios puntos situados en diferentes posiciones a lo largo de la longitud de un forjado de 10 m de luz y centrados con ésta, para los casos a) forjado soportado por 3 columnas y b) forjado soportado por 5 columnas.

Las figuras anteriores arrojan dos resultados interesantes: por un lado, la respuesta del forjado varía con la longitud de éste, de forma que a mayor longitud menor nivel; por otro lado, el número de columnas sobre las que esté soportado el forjado (3 ó 5 en este caso) no es un parámetro de tenga una gran influencia en la respuesta del forjado.

## 6.- CONCLUSIONES

El Proyecto VIBRA-IMPACT supone el primer intento serio de caracterizar las vibraciones provocadas por las máquinas y procesos constructivos utilizados en obras públicas urbanas y evaluar su afectación sobre las edificaciones próximas al recinto de obra.

Para ello, se han desarrollado unos modelos analíticos que caracterizan la generación de la vibración en función del tipo de máquina o proceso de construcción (fuente), la propagación de los niveles a través del terreno y, finalmente, la transmisión de dichos niveles a la estructura de las edificaciones, modelizando también el comportamiento dinámico de las mismas.

Previamente, se ha llevado a cabo una identificación y una definición de las máquinas y procesos constructivos que generan mayores niveles de vibración, caracterizando la emisión vibratoria para ser modelizada a través de los modelos definidos anteriormente.

Con este trabajo se pone a disposición de la ingeniería civil un modelo de predicción completo que permite, en fase de proyecto, decidir qué máquinas o qué procesos constructivos se pueden utilizar para minimizar la afectación del entorno por vibraciones mecánicas.

## 7.- AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto VIBRO-IMPACT, con referencia IDI-20130116, consorcio formado por Ayesa Ingeniería y Arquitectura y AV Ingenieros, con la colaboración del LEAM de la Universidad Politécnica de Cataluña y con soporte financiero del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, CDTI.

## 8.- REFERENCIAS

- [1] *Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.* Official Journal of the European Communities, 2002.
- [2] Sola Casado, P. R. (2006). *Pantallas en Medio Urbano para Estructuras Subterráneas.* Jornada Técnica SEMSIGAETESS.