

VIBRACIONES EN EDIFICIOS ORIGINADAS POR LA HINCA DE TABLESTACAS EN CENTROS URBANOS

Bertero, Raul D.; Mussat, Juan M.; Verri K., Alejandro; Lehmann, Alejandro N.

Ingenieros Civiles
Laboratorio de Dinámica de Estructuras
Facultad de Ingeniería
Universidad de Buenos Aires
rbertero@freyreyasoc.com.ar

RESUMEN

Las actividades de construcción en centros urbanos, en particular la hincada de tablestacas o pilotes, traen aparejadas quejas y alarma de los vecinos por las vibraciones que generan en sus viviendas. En este trabajo se describen los resultados del estudio realizado por el Laboratorio de Dinámica de Estructuras de la FIUBA para determinar las causas de las vibraciones, el nivel de las mismas y el posible efecto sobre personas y construcciones.

Se presentan en este trabajo, los estudios analíticos de la respuesta de los edificios a las vibraciones así como los resultados experimentales obtenidos a partir de las mediciones realizadas durante la hincada de tablestacas en la obra del paso bajo nivel de las vías del tren Mitre de la calle Crisólogo Larralde, del barrio de Belgrano. Finalmente se presentan conclusiones sobre la afectación esperada en los edificios, el confort de sus habitantes, y recomendaciones en relación con la hincada de tablestacas en un ambiente urbano.

ABSTRACT

Construction activities in urban surroundings, in particular pile and sheet pile driving, raise complaints and alarm from neighbors because of the vibrations they cause in their houses. In this paper the results of the study made by the Laboratory of Structural Dynamics of the FIUBA to determine the causes of the vibrations, their level and the possible effect over people and neighboring constructions are described.

In this work, the analytical studies of the response of buildings to vibrations are presented, as well as the experimental results obtained from the monitoring made in the Crisologo Larralde road underpass Mitre railway construction, in Belgrano neighborhood, during sheet pile driving. Finally, conclusions about the expected influence on buildings, inhabitants comfort and recommendations regarding sheet pile driving activity in an urban surrounding are presented.

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo tiene por objeto presentar el estudio analítico de la respuesta de edificios cercanos a la hinca de tablestacas. El trabajo incluye el estudio de las frecuencias propias verticales de las columnas de edificios y de sus entresijos y de las vibraciones esperadas debidas a este proceso, incluyendo la comparación con los valores admisibles según el confort de sus habitantes y el daño cosmético en las viviendas. Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones en relación con la hinca de tablestacas en un ambiente urbano.

VIBRACIONES VERTICALES DE COLUMNAS DE EDIFICIOS

Análisis teórico de la frecuencia natural vertical de un edificio

Considerando las fuerzas actuantes en un elemento diferencial de columna (Figura 1), la ecuación diferencial de equilibrio dinámico es

$$A \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Donde A es el área de la columna, $\sigma(x)$ es la tensión vertical, $u(x)$ es el desplazamiento vertical y μ es la masa por unidad de longitud de la columna.

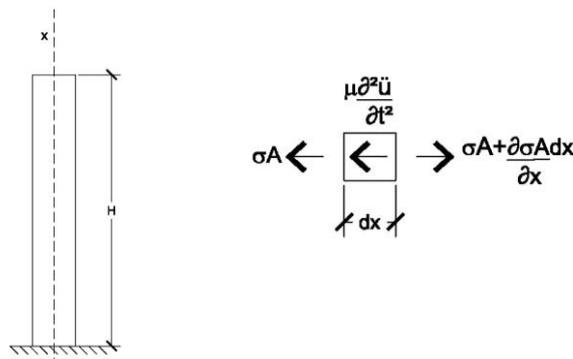


Figura 1. Ecuación de equilibrio dinámico de columnas

Considerando un material con comportamiento elástico lineal y módulo de elasticidad E , resulta

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial x} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2)$$

Reemplazando en la ecuación (1) se obtiene

$$AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

Con las siguientes condiciones de borde en $x = 0$ y $x = H$ respectivamente

$$u(0, t) = 0 \quad (4)$$

$$\sigma(H, t) = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial x}(H, t) = 0 \quad (5)$$

Planteando la solución de la ecuación (3) mediante el método de separación de variables

$$u(x,t) = \varphi(x) \text{sen}(\omega t) \quad (6)$$

Derivando la ecuación (6) dos veces respecto del tiempo y de la coordenada x se obtiene

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\varphi(x) \omega^2 \text{sen}(\omega t) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} \text{sen}(\omega t) \quad (7)$$

Reemplazando en la ecuación diferencial de equilibrio dinámico (3) resulta

$$\left(AE \frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} + \mu \varphi(x) \omega^2 \right) \text{sen}(\omega t) = 0 \quad (8)$$

Por lo tanto se obtiene la siguiente ecuación diferencial ordinaria

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} + \frac{\mu}{AE} \varphi(x) \omega^2 = 0 \quad (9)$$

Planteando como solución de la ecuación (9) la siguiente función que satisface las condiciones de borde

$$\varphi(x) = \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{2H}\right) \quad n = 1, 3, 5... \quad (10)$$

La ecuación (9) tiene solución distinta de la trivial cuando se cumple la siguiente relación

$$-\left(\frac{n\pi}{2H}\right)^2 + \frac{\mu}{AE} \omega^2 = 0 \quad n = 1, 3, 5... \quad (11)$$

Donde para las n soluciones de la ecuación (11), ω_n son las frecuencias naturales de la columna y las funciones $\varphi_n(x) = \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{2H}\right) \quad n = 1, 3, 5...$ son las correspondientes autofunciones o modos de vibración. Por lo tanto,

$$\omega_n = \left(\frac{n\pi}{2H}\right) \sqrt{\frac{AE}{\mu}} \quad n = 1, 3, 5... \quad (12)$$

Que en ciclos por segundo se pueden escribir como

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n}{4} \frac{1}{H} \sqrt{\frac{AE}{\mu}} \quad n = 1, 3, 5... \quad (13)$$

Si consideramos ahora en lugar de una columna, las vibraciones verticales de todas las columnas del edificio de la Figura 2, usando la ecuación (13) podemos calcular la frecuencia natural como

$$f_n = \frac{n}{4} \frac{1}{H} \sqrt{\frac{\frac{H}{h} \rho^1 A^1 \frac{1}{\sigma_a} g E}{\frac{\rho^1 A^1}{h}}} = \frac{n}{4} \sqrt{\frac{g E}{\sigma_a H}} \quad n=1,3,5... \quad (14)$$

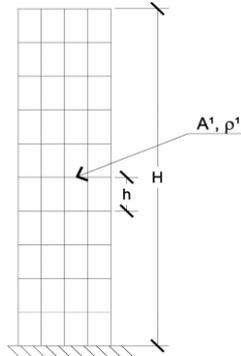


Figura 2. Edificio de rigidez y masa uniforme

Donde la masa por unidad de longitud del edificio se calcula como $\mu = \frac{\rho^1 A^1}{h}$, siendo ρ^1 la masa por unidad de área de cada entrepiso, A^1 el área del entrepiso y h la altura de cada piso. Por su lado, el área A de todas las columnas del edificio se puede estimar con la siguiente ecuación

$$A = \frac{H}{h} \rho^1 A^1 \frac{1}{\sigma_a} g \quad (15)$$

Donde $\rho^1 A^1 g H / h$ es el peso total del edificio incluidas las sobrecargas en servicio, σ_a es la tensión de servicio promedio en las columnas del primer piso del edificio y g es la aceleración de la gravedad.

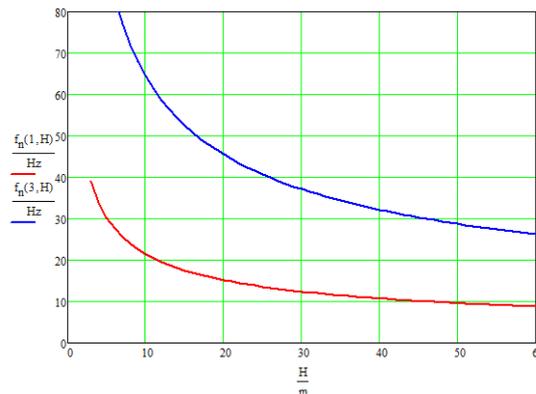


Figura 3. Frecuencia natural vertical del primer y segundo modo de edificios en función de la altura

Considerando un edificio con columnas de hormigón armado con módulo de elasticidad $E = 30000 \text{ MPa}$ y tensión de servicio promedio en las columnas $\sigma_a = 4 \text{ MPa}$, utilizando la ecuación (14) se obtiene para la frecuencia vertical de los dos primeros modos de vibración los valores de la Figura 3.

Es decir que para una frecuencia de hinca de 30Hz se podría alcanzar resonancia con el primer modo de vibración vertical en edificios del orden de los 5m de altura (edificios de 2 plantas) y con el segundo modo de vibración vertical para edificios de unos 47m de altura (edificios de alrededor de 16 pisos). Por su parte, para una frecuencia de hinca de 18Hz se podría alcanzar resonancia con el primer modo para edificios del orden de los 15m de altura (alrededor de 5 pisos) y con el segundo modo de vibración para edificios 130m de altura (alrededor de 46 pisos).

Análisis teórico de la respuesta vertical de un edificio a las vibraciones producidas por el proceso de hinca de tablestacas

Consideremos ahora el edificio de la Figura 4, sometido a una aceleración vertical del suelo $\ddot{u}_g(t)$. La ecuación diferencial de equilibrio dinámico de fuerzas de un elemento diferencial del edificio, dx , (incluyendo el amortiguamiento viscoso c) es la siguiente

$$A \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \mu(\ddot{u} + \ddot{u}_g) - c\dot{u} = 0 \quad (16)$$

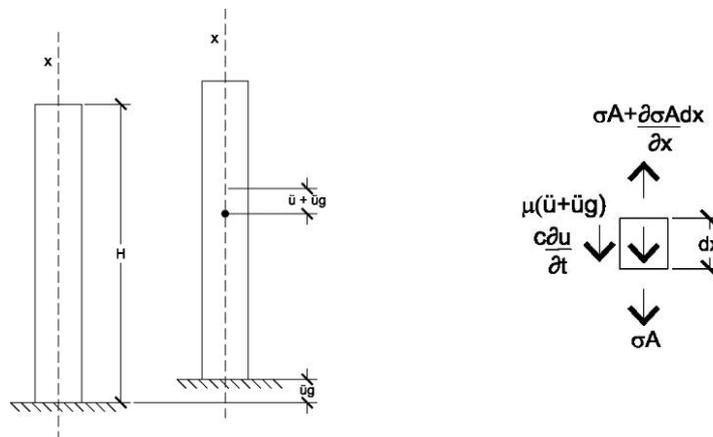


Figura 4. Respuesta de un edificio uniforme a aceleraciones verticales de la base

Considerando un comportamiento elástico lineal del material podemos escribir

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\partial u}{\partial x} = Eu' \quad \sigma' = Eu'' \quad (17)$$

Luego, reemplazando en la ecuación (16) se obtiene

$$AEu'' - \mu\ddot{u} - c\dot{u} = \mu\ddot{u}_g \quad (18)$$

Con las siguientes condiciones de borde,

$$u(0, t) = 0 \quad (19)$$

$$\sigma(H, t) = 0 \quad u'(H, t) = 0 \quad (20)$$

Consideremos ahora que la aceleración vertical del suelo responde a una excitación armónica de frecuencia ω y amplitud de aceleración A_0

$$\ddot{u}_g(t) = A_0 e^{i\omega t} \quad (21)$$

La ecuación de equilibrio dinámico (18) a resolver es

$$AEu'' - \mu \ddot{u} = c\dot{u} = \mu A_0 e^{i\omega t} \quad (22)$$

Utilizando la propiedad de ortogonalidad de los modos de vibración, es conveniente plantear la solución mediante el método de superposición modal

$$u(x,t) = \sum_{n=1,3}^{\infty} u_n(t) \varphi_n(x) \quad (23)$$

De donde las derivadas parciales de la función desplazamiento $u(x,t)$ se pueden escribir como

$$AEu'' = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) AE\varphi_n''(x) = -\sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) \mu \omega_n^2 \varphi_n(x) \quad (24)$$

$$\ddot{u} = \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{u}_n(t) \varphi_n(x) \quad \dot{u} = \sum_{n=1}^{\infty} \dot{u}_n(t) \varphi_n(x) \quad (25)$$

Reemplazando las derivadas parciales en la ecuación (22) se obtiene

$$-\sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) \mu \omega_n^2 \varphi_n(x) - \sum_{n=1}^{\infty} \mu \ddot{u}_n(t) \varphi_n(x) - \sum_{n=1}^{\infty} c \dot{u}_n(t) \varphi_n(x) = \mu A_0 e^{i\omega t} \quad (26)$$

Por otra parte, desarrollando la amplitud de la aceleración en serie de las autofunciones $\varphi_n(x)$

$$A_0 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \varphi_n(x) \quad (27)$$

Integrando ambos miembros de esta ecuación entre 0 y H y utilizando la propiedad de ortogonalidad de las autofunciones se pueden calcular los coeficientes A_n como

$$\int_0^H A_0 \varphi_n(x) dx = \int_0^H \sum_{m=1}^{\infty} A_m \varphi_m(x) \varphi_n(x) dx \quad A_n = A_0 \frac{\int_0^H \varphi_n(x) dx}{\int_0^H \varphi_n^2(x) dx} = A_0 L_n \quad (28)$$

Donde el factor de excitación modal L_n se define en este caso como

$$L_n = \frac{\int_0^H \varphi_n(x) dx}{\int_0^H \varphi_n^2(x) dx} = \frac{\int_0^H \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{2H}\right) dx}{\int_0^H \text{sen}^2\left(\frac{n\pi x}{2H}\right) dx} = \frac{\frac{2}{\pi} \frac{H}{n}}{\frac{H}{2}} = \frac{4}{\pi n} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (29)$$

Reemplazando la ecuación (27) y (28) en el segundo miembro de la ecuación (26) resulta

$$\sum_{n=1}^{\infty} (u_n(t) \mu \omega_n^2 \varphi_n(x) + \mu \ddot{u}_n(t) \varphi_n(x) + c \dot{u}_n(t) \varphi_n(x)) = -\sum_{n=1}^{\infty} \mu A_0 L_n \varphi_n(x) e^{i\omega t} \quad (30)$$

Dividiendo ambos miembros por la masa por unidad de longitud μ se obtiene

$$\sum_{n=1}^{\infty} (\ddot{u}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{u}_n(t) + \omega_n^2 u_n(t)) \varphi_n(x) = -\sum_{n=1}^{\infty} A_0 L_n \varphi_n(x) e^{i\omega t} \quad (31)$$

Donde $\xi_n = \frac{c}{2\mu\omega_n}$ es el factor de amortiguamiento del modo n .

Para que la ecuación (31) se cumpla en todo instante t se debe cumplir la siguiente igualdad para cada término de la sumatoria

$$\ddot{u}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{u}_n(t) + \omega_n^2 u_n(t) = -A_0 L_n e^{i\omega t} \quad (32)$$

Considerando la solución particular de esta ecuación diferencial (es decir, el régimen permanente), se puede plantear como solución una función armónica de la misma frecuencia ω que la excitación,

$$u_n(t) = U_n e^{i\omega t} \quad \dot{u}_n(t) = i\omega U_n e^{i\omega t} \quad \ddot{u}_n(t) = -\omega^2 U_n e^{i\omega t} \quad (33)$$

Reemplazando la función y sus derivadas en la ecuación (32) se obtiene

$$(-\omega^2 + 2\xi_n \omega_n \omega i + \omega_n^2) U_n = -A_0 L_n \quad (34)$$

De donde la amplitud del desplazamiento en cada modo n se puede calcular como

$$U_n = \frac{-A_0 L_n}{(\omega_n^2 - \omega^2 + 2\xi_n \omega_n \omega i)} \quad (35)$$

Reemplazando la ecuación (33) y (35) en la ecuación (23) resulta

$$u(x,t) = -\sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{A_0 L_n}{(\omega_n^2 - \omega^2 + 2\xi_n \omega_n \omega i)} \varphi_n(x) e^{i\omega t} \quad (36)$$

$$\ddot{u}(x,t) = \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\omega^2 A_0 L_n}{(\omega_n^2 - \omega^2 + 2\xi_n \omega_n \omega i)} \varphi_n(x) e^{i\omega t} \quad (37)$$

Por lo tanto la aceleración total es

$$\ddot{u}(x,t) + \ddot{u}_g = \left(\sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\varphi_n(x) L_n}{\left(\left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 - 1 + 2\xi_n \frac{\omega_n}{\omega} i \right)} + 1 \right) A_0 e^{i\omega t} \quad (38)$$

Multiplicando y dividiendo por el conjugado del denominador, y separando las partes reales e imaginarias se obtiene

$$\ddot{u}(x,t) + \ddot{u}_g = \left(1 + \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\varphi_n(x) L_n \left[\left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2\xi_n \frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 \right]} - i \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\varphi_n(x) L_n \left(2\xi_n \frac{\omega_n}{\omega} \right)}{\left[\left(\left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2\xi_n \frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 \right]} \right) A_0 e^{i\omega t} \quad (39)$$

Por lo tanto, el módulo de la ecuación (39) es la amplitud de la aceleración $A(x)$ correspondiente a cada nivel x que se puede calcular como

$$A(x) = A_0 \sqrt{\left\{ 1 + \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\varphi_n(x) L_n \left[\left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2\xi_n \frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 \right]} \right\}^2 + \left\{ \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\varphi_n(x) L_n \left(2\xi_n \frac{\omega_n}{\omega} \right)}{\left[\left(\left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2\xi_n \frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 \right]} \right\}^2} \quad (40)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (10), (13) y (29), la ecuación (40) en $x = H$ se puede escribir como

$$A(H) = A_0 \sqrt{\left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\frac{1}{n} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \left[\left(\frac{nf_1}{f} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\left(\frac{nf_1}{f} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2\xi_n \frac{nf_1}{f} \right)^2 \right]} \right\}^2 + \left\{ \frac{8}{\pi} \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}} \xi_n \frac{f_1}{f}}{\left[\left(\left(\frac{nf_1}{f} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2\xi_n \frac{nf_1}{f} \right)^2 \right]} \right\}^2} \quad (41)$$

Donde $f = \omega/2\pi$ es la frecuencia de la excitación en ciclos por segundo.

Utilizando la ecuación (41), considerando $\xi_n = 0.02$ y una frecuencia del primer modo $f_1 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{gE}{\sigma_a H}}$ (con el mismo módulo de elasticidad y tensión de servicio utilizados previamente), se obtienen los valores de amplificación de las aceleraciones $A(H)/A_0$ en función de la altura del edificio que se muestran en la Figura 5.

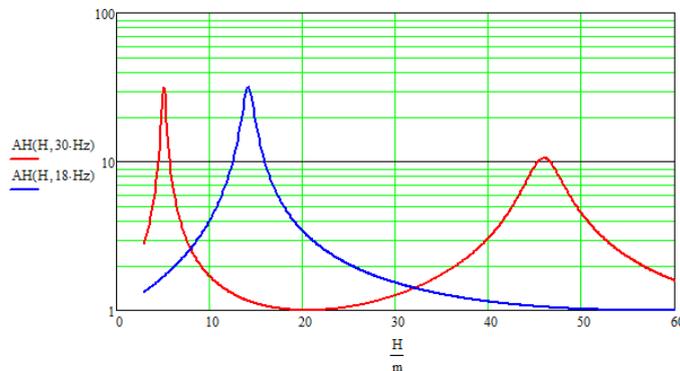


Figura 5. Amplificación de las aceleraciones verticales de edificios (en rojo corresponde a frecuencias de excitación de 30Hz y en azul a 18Hz)

Si consideramos el caso de una frecuencia de excitación en resonancia con alguna de las frecuencias naturales $\omega = \omega_n$, la ecuación (40) se puede aproximar como

$$A(x) \cong \frac{\varphi_n(x) L_n}{2\xi_n} A_0 = \frac{\varphi_n(x)}{2\xi_n} \frac{4}{n\pi} A_0 \quad n = 1, 3, 5... \quad (42)$$

Utilizando la ecuación (42) con $\xi_n = 0.02$ se obtienen amplificaciones de la aceleración en la azotea del edificio $A(H)/A_0$ de 31.8 y de 10.6 para la resonancia

con el primer y segundo modo vibración, en coincidencia con los resultados de la Figura 5.

Es decir que, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 5, para una frecuencia de hinca de 30Hz se alcanzarían amplificaciones de aceleración de 5 a 30 veces para alturas del orden de los 5m (edificios de 2 plantas) y amplificaciones de 5 a 10 veces para alturas entre los 42 y 50m (edificios entre 15 y 18 pisos).

Por su parte, para una frecuencia de hinca de 18Hz se obtienen amplificaciones de 5 a 30 veces para edificios de entre 11 y 18m de altura (de 4 a 6 pisos de alto).

VIBRACIONES VERTICALES DE LOSAS DE ENTREPISOS

Análisis teórico de la frecuencia natural vertical de losas de entrepisos

Consideremos ahora las vibraciones verticales de una losa de hormigón armado de un edificio. Supongamos que la losa tiene las siguientes propiedades: módulo de elasticidad del hormigón $E = 30000 \cdot MPa$, módulo de Poisson $\nu = 0.2$, densidad del hormigón $\rho = 2400 \cdot kg/m^3$ y densidad del contrapiso, $\rho_c = 1600 \cdot kg/m^3$. Supongamos que, como es habitual, la altura total de la losa h queda determinada por la altura mínima especificada para satisfacer la condición de limitación de flecha $h = \frac{\alpha L}{35} + 2cm$, donde L es el lado mínimo de la losa, 2cm el recubrimiento estimado y α es un coeficiente que depende de las condiciones de borde ($\alpha = 1$ para una losa simplemente apoyada en todo el contorno y $\alpha = 0.6$ para una losa empotrada). Considerando una altura total mínima de 8cm, resulta

$$h(L, \alpha) = \max\left(\frac{\alpha \cdot L}{35} + 2cm, 8cm\right) \quad (43)$$

Suponiendo un contrapiso de $h_c = 8cm$ de altura, resulta una masa por unidad de superficie debida al contrapiso $\mu_c = \rho_c \cdot h_c = 128 \cdot kg/m^2$. Por otra parte, si consideramos que en el momento de la hinca actúa sobre la losa una sobrecarga real de $p = 50 \cdot kg/m^2$, la masa total por unidad de superficie de losa resulta

$$\mu(L, \alpha) = \rho \cdot h(L, \alpha) + \mu_c + p \quad (44)$$

Por su parte la rigidez a la flexión de la placa se puede escribir como

$$D(L, \alpha) = \frac{h(L, \alpha)^3 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (45)$$

Las frecuencias propias de una placa cuadrada de lado L , simplemente apoyada en sus cuatro bordes, se puede escribir como

$$\omega_n(L) = \sqrt{\frac{D(L,1)}{\mu(L,1)}} \cdot \pi^2 \cdot \left[\left(\frac{M}{L}\right)^2 + \left(\frac{N}{L}\right)^2 \right] \quad f_n(L) = \frac{\omega_n(L)}{2 \cdot \pi} \quad (46)$$

A las cuales corresponden los siguientes modos de vibración

$$\varphi_{MN}(x, y) = \sin\left(\frac{M \pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{N \pi y}{L}\right) \quad (47)$$

La frecuencia y la forma del primer modo de vibración se obtiene haciendo

$M = 1$ y $N = 1$ en las ecuaciones (46) y (47).

Por otra parte, la frecuencia natural del primer modo de vibración de una losa empotrada en sus 4 bordes es

$$\omega_{nE}(L) = \sqrt{\frac{D(L,0.6)}{\mu(L,0.6)}} \cdot \frac{35.987}{L^2} \quad f_{nE}(L) = \frac{\omega_{nE}(L)}{2 \cdot \pi} \quad (48)$$

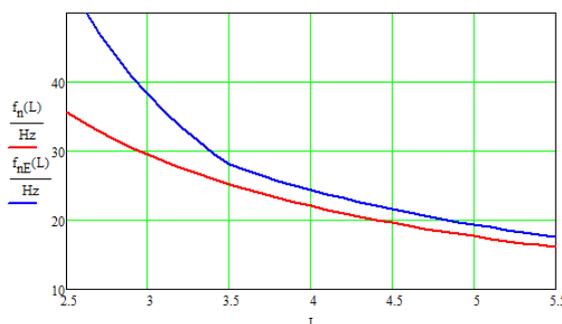


Figura 6. Frecuencias del primer modo de losas cuadradas de entresijos empotradas (en azul) y simplemente apoyadas (en rojo)

En la Figura 6, se indican los valores de las frecuencias propias del primer modo de vibración obtenidas utilizando las ecuaciones (46) y (48). Como se puede ver, el rango de frecuencias al que se produce la hincada de tablestacas (entre 18 y 30 Hz) corresponde a la frecuencia del primer modo de vibración de losas de entresijos de entre 3 y 5.5 m de lado. Es decir que ambientes pequeños entrarían en resonancia con una frecuencia de hincada de 30 Hz y ambientes grandes con una de 18 Hz.

3.2 Análisis teórico de la respuesta vertical de las losas de edificios a las vibraciones producidas por el proceso de hincada de tablestacas

Consideremos ahora que una planta de un edificio es sometida a una aceleración vertical armónica, $\ddot{w}_g(t) = A_0 e^{i\omega t}$. Si suponemos que la planta está formada por losas cuadradas simplemente apoyadas de lado L , el factor de excitación de cada modo se puede calcular como

$$L_{MN} = \frac{\int_0^L \int_0^L \varphi_{MN}(x, y) dx dy}{\int_0^L \int_0^L \varphi_{MN}(x, y)^2 dx dy} = \frac{\int_0^L \int_0^L \sin\left(\frac{M\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{N\pi y}{L}\right) dx dy}{\int_0^L \int_0^L \sin^2\left(\frac{M\pi x}{L}\right) \sin^2\left(\frac{N\pi y}{L}\right) dx dy} = \frac{16}{MN\pi^2} \quad (49)$$

Por un análisis análogo al realizado en la sección anterior, se puede obtener la aceleración total en cualquier punto (x, y) de la losa mediante una ecuación similar a la ecuación (39). Considerando solo el primer modo de vibración de la losa resulta

$$\ddot{w}(x, y, t) + \ddot{w}_g = \left[\frac{\varphi_{11}(x, y) L_{11}}{\left(\left(\left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left(2\xi_1 \frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 \right)} \left(\left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 - 1 - 2\xi_1 \frac{\omega_1}{\omega} i \right) + 1 \right] A_0 e^{i\omega t} \quad (50)$$

Por lo tanto, la amplitud de la aceleración en el centro de la losa ($x = L/2, y = L/2$) se puede obtener en forma análoga a la ecuación (41) considerando solo el primer modo de vibración como

$$A_{L/2} = A_0 \left[\sqrt{1 + \frac{16}{\pi^2} \frac{\left[\left(\frac{f_1}{f} \right)^2 - 1 \right]^2}{\left[\left(\frac{f_1}{f} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left(2\xi_1 \frac{f_1}{f} \right)^2}} + \frac{16}{\pi^2} \frac{2\xi_1 \frac{f_1}{f}}{\left[\left(\frac{f_1}{f} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left(2\xi_1 \frac{f_1}{f} \right)^2} \right] \quad (51)$$

Utilizando la ecuación (51), con $\xi_1 = 0.02$ y una frecuencia del primer modo $f_1(L)$ dada por la ecuación (46), se obtienen los valores de amplificación de las aceleraciones $A(L/2)/A_0$ en el centro de la losa que se muestran en la Figura 7.

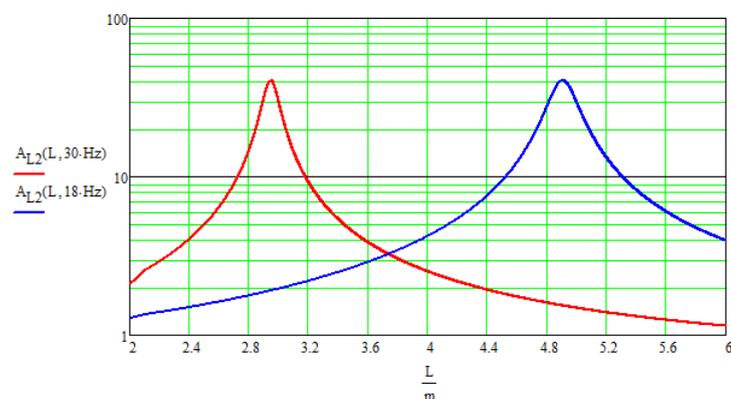


Figura 7. Amplificación de las aceleraciones verticales de losas de edificios (en color rojo corresponde a frecuencias de excitación de 30Hz y en azul a 18Hz)

De acuerdo con lo mostrado en la Figura 7, para una frecuencia de hinca de 30Hz se alcanzarían amplificaciones de la aceleración en el centro de la losa de 5 a 40 veces para losas en el rango de 2.5 a 3.5m de lado. Por su parte, para una frecuencia de hinca de 18Hz se obtienen amplificaciones de 5 a 40 veces para losas en el rango de 4.2 a 5.7m de lado.

NIVELES ADMISIBLES DE VIBRACIÓN VERTICAL DE EDIFICIOS PARA SATISFACER LOS CRITERIOS DE CONFORT Y DE DAÑO NO-ESTRUCTURAL

Criterios de confort de la Norma IRAM 4078, parte II

Para el análisis de los criterios de confort se utiliza la Norma IRAM 4078, parte II, "Guía para la evaluación de la exposición humana a vibraciones de cuerpo entero. Estimación de la exposición humana a vibraciones continuas e inducidas por choques en edificios (1Hz a 80Hz)".

La Norma IRAM 4078 define curvas básicas que representan una respuesta humana constante en relación con la molestia y/o quejas sobre interferencia de las vibraciones con las actividades. Las magnitudes satisfactorias de las vibraciones en habitaciones o edificios se indican como múltiplos de los valores de estas curvas básicas. La magnitud primaria empleada para describir la intensidad de una

excitación vibratoria es la aceleración. En la norma la aceleración se expresa según el valor cuadrático medio (llamado también valor eficaz o "RMS"). Dada una historia de aceleraciones $a(t)$, el valor RMS (σ_a) se calcula como:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left(\int_0^T a(t)^2 \cdot dt \right)} \quad (52)$$

Por lo tanto, en el caso particular de una excitación armónica, $a(t) = A \sin(2\pi t/T)$, de amplitud A, se verifica la siguiente relación:

$$\sigma_a = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (53)$$

La curva básica del valor eficaz de la aceleración en la dirección del Eje z (aceleraciones verticales para vibraciones de los pies hacia la cabeza) definida en la NORMA IRAM 4078, Parte II, en función de la frecuencia de la excitación se puede escribir como

$$a_z(f) = \begin{cases} a_{1z} 10^{\left(\frac{\log\left(\frac{a_{0z}}{a_{1z}}\right)}{\log\left(\frac{f_{0z}}{Hz}\right)} \cdot \log\left(\frac{f}{Hz}\right) \right)} & \text{si } (f \leq f_{0z}) \\ a_{0z} & \text{si } (f > f_{0z} \wedge f \leq f_{2z}) \\ v_{0z} 2\pi f & \text{si } f > f_{2z} \end{cases} \quad (54)$$

Con los siguientes valores extraídos de la Tabla I de la norma.

$$a_{0z} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{m}{s^2}, \quad v_{0z} = 9.95 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{m}{s}, \quad a_{1z} = 1 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{m}{s^2}, \quad f_{0z} = 4 \cdot Hz, \quad f_{2z} = 8 \cdot Hz$$

Utilizando la ecuación (54) se obtienen los valores de la Figura 8.

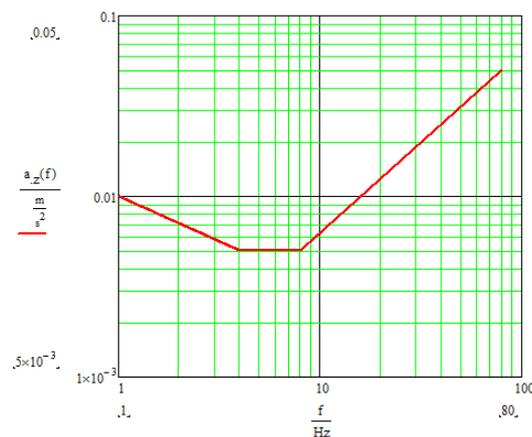


Figura 8. Curva básica del valor eficaz de las aceleraciones verticales

La NORMA IRAM 4078 recomienda para viviendas los siguientes factores de multiplicación de las curvas básicas, empleados con éxito en muchos países para determinar los niveles vibración de los edificios que garantizan que la respuesta humana (molestia, quejas) se mantendrá dentro de niveles aceptables:

- Viviendas durante el día, 2.0 a 4.0

- Viviendas durante la noche, 1.4

Considerando que parte de los trabajos se realizan durante la noche (por ejemplo, para minimizar el efecto sobre la circulación ferroviaria), el factor de multiplicación adoptado en este trabajo es $F_M = 1.4$. Por lo tanto, los valores aceptables de amplitud de las aceleraciones verticales (no los valores RMS que son menores) que garantizan una percepción humana adecuada durante la noche están dados por la siguiente ecuación (Figura 9):

$$A_z(f) = \sqrt{2} F_M a_z(f) \quad (55)$$

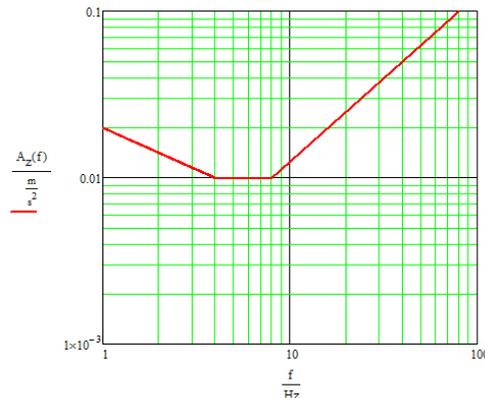


Figura 9. Amplitud aceptable de aceleraciones verticales según frecuencia

Criterios de daño no-estructural de la Norma IRAM 4077, parte II

Para analizar los niveles de vibración por encima de los cuales las estructuras de los edificios pueden resultar dañadas se utiliza la NORMA IRAM 4077, parte II, “Valores orientativos de vibraciones propagadas a través del terreno que pueden producir deterioros de revestimientos (daños cosméticos)”. Esta norma da una orientación sobre los factores que influyen en la respuesta a la vibración de los edificios, considerando vibraciones de carácter transitorio y continuo.

Dado que el esfuerzo impuesto a un edificio, a nivel de su fundación, es proporcional a la velocidad pico de la partícula, se la ha adoptado para correlacionar las fuentes históricas de datos de daño con el daño que producen las vibraciones. Los límites de vibración expuestos en la norma fueron definidos contemplando un criterio de riesgo mínimo de daño producido por vibraciones. La Tabla 1 resume los valores orientativos definidos por la norma.

Línea (ver Fig.1)	Tipo de edificio	Pico de la componente de la velocidad de partículas en un rango de frecuencia de pulso predominante	
		4 Hz a 15 Hz	15 Hz y más
1	Estructuras reforzadas o enmarcadas. Edificios industriales y comerciales pesados	50 mm/s a 4 Hz y mayores	
2	Estructuras no reforzadas o ligeramente enmarcadas. Edificios livianos de tipo residencial o comercial	15 mm/s a 4 Hz incrementándose a 20 mm/s a 15 Hz	20 mm/s a 15 Hz incrementándose a 50 mm/s a 40 Hz y más

NOTA 1: Los valores referidos corresponden a los obtenidos en la base del edificio (ver 6.3)
NOTA 2: Para la línea 2, a frecuencias por debajo de 4 Hz, no es conveniente exceder un desplazamiento máximo de 0,6 mm (cero a pico).

Tabla 1. Valores orientativos de vibración transitoria para deterioro de revestimientos (daños cosméticos) (Fuente: IRAM 4077-2)

Teniendo en cuenta que la amplitud de la velocidad y de la aceleración en un movimiento armónico se relacionan por la siguiente ecuación

$$A = 2\pi \cdot fV \quad (56)$$

La velocidad límite de 50mm/s, se transforma en una ecuación lineal con la frecuencia como se indica en la recta en color rojo de la Figura 10. Como se puede ver en la misma (en escala logarítmica), los niveles de referencia para el daño no-estructural son del orden de 100 veces mayores que los niveles correspondientes al límite de confort.

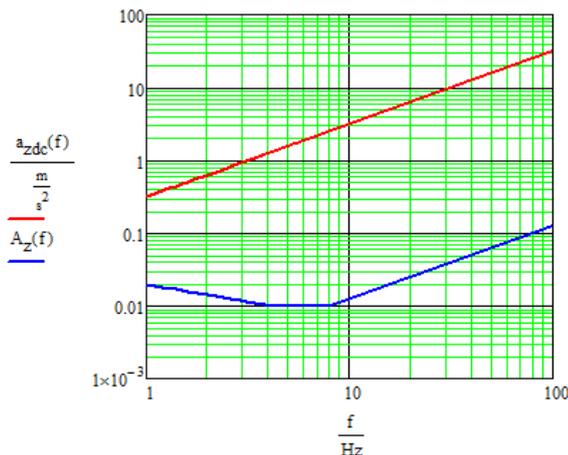


Figura 10 Comparación de las amplitudes de referencia para daño no-estructural (en rojo) y confort (en azul) para vibraciones en la base de los edificios

Es importante destacar que el criterio de daño no-estructural de la norma especifica claramente que el valor límite corresponde al registro de vibraciones obtenido en la base del edificio.

VALORES ESPERADOS DE LAS ACELERACIONES VERTICALES EN EDIFICIOS CERCANOS AL HINCADO DE TABLESTACAS

Valores esperados de las aceleraciones en la base de edificios de viviendas de varios pisos

Debido a la repercusión social y política relacionada con la percepción de los vecinos de las vibraciones originadas en el proceso de hinca, es importante considerar el caso donde las mismas pueden ser percibidas por un número significativo de personas, tal como ocurre en el caso de edificios de viviendas de un elevado número de pisos. En la Figura 11, se puede ver que en los alrededores del sitio de hinca de tablestacas, localizado en la intersección de la calle Larralde con las vías, en un radio entre 20 y 30m, existen dos edificios importantes, uno de 16 pisos (45m de altura) y otro de 23 pisos (65m de alto).



Figura 11. Hincas de tablestacas en la intersección de la calle Larralde y las vías del ferrocarril

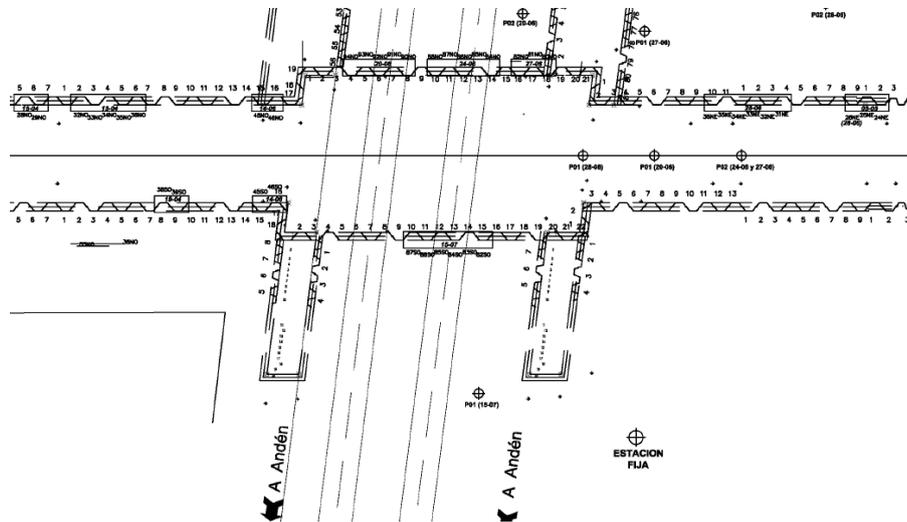


Figura 12. Ubicación de tablestacas y puntos de medición de vibraciones

De la medición de las aceleraciones realizadas sobre el nivel del terreno (ver Figura 12) se obtuvo el histograma de frecuencias de hincas predominantes mostrado en la Figura 13. La parte predominante de las vibraciones (70%) se realizó a frecuencias cercanas a los 30Hz. En el resto de los casos significativos las frecuencias predominantes se ubicaron entre 18 y 20Hz.

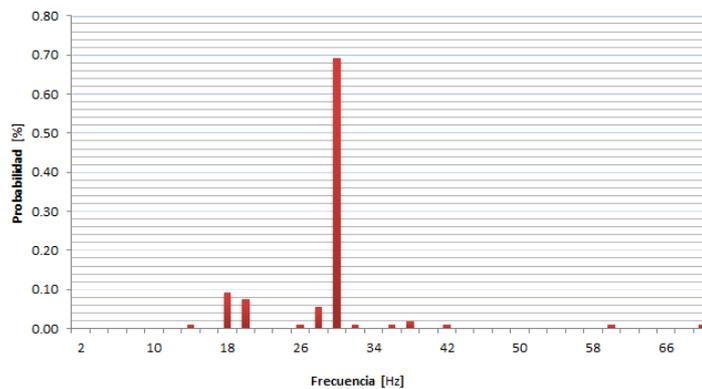


Figura 13. Distribución de frecuencias verticales de hincado de tablestacas

En la Figura 14 y en la Figura 15 se muestran, a modo de ejemplo, la intensidad de las aceleraciones registradas sobre el terreno en distintos puntos ubicados a aproximadamente la misma distancia (16.5m) durante la hincada de una tablestaca y el contenido de frecuencias correspondiente a cada registro.

Como se puede ver, el orden de magnitud de las aceleraciones en régimen estacionario a aproximadamente 15m del punto de hincada sobre el terreno es de 0.1m/s^2 , es decir en el rango de amplitudes que es percibido por las personas. En lo que respecta a la frecuencia, la predominante es de 30Hz, con armónicos superiores más pequeños en 60 y 90Hz. Ambas figuras muestran el mantenimiento casi constante de la frecuencia de hincada durante toda la operación.

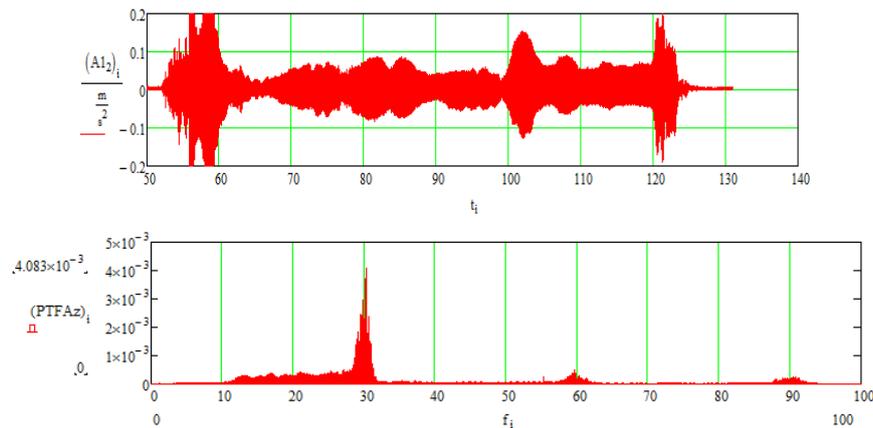


Figura 14. Amplitud de las aceleraciones verticales registradas sobre el terreno a 16.4m del hincado y contenido de frecuencias correspondiente

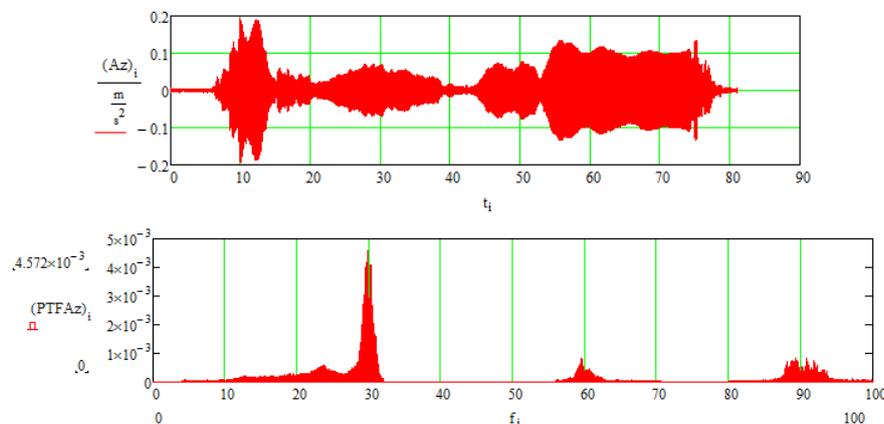


Figura 15. Amplitud de las aceleraciones verticales registradas sobre el terreno a 16.2m del hincado en la estación permanente y contenido de frecuencias correspondiente

Considerando la atenuación con la distancia, es de esperar en la base de edificios ubicados en un radio entre 20 y 30, una amplitud máxima de aceleraciones verticales del orden de los 0.04m/s^2 . Teniendo en cuenta la Figura 9, a una frecuencia de 30Hz los niveles de aceleración vertical perceptibles son también de unos 0.04m/s^2 . Por lo tanto sobre el terreno, en el exterior de edificaciones en el radio mencionado, las vibraciones resultan apenas perceptibles por algunas personas.

A una frecuencia de 18Hz los niveles de aceleración vertical perceptibles son de 0.02m/s^2 , la mitad que el límite correspondiente a 30Hz y por lo tanto, más fácilmente percibidos por las personas ubicadas sobre el terreno.

Niveles de confort esperado en edificios de viviendas de varios pisos para una frecuencia de 30Hz

Si aplicamos a la base de un edificio de varios pisos una amplitud de aceleración de 0.04m/s^2 con una frecuencia de 30Hz y utilizamos los resultados obtenidos en este trabajo, la aceleración vertical esperada es la que se muestra en la Figura 16 considerando la amplificación producida por la vibración axial las columnas y en la Figura 17 considerando la amplificación producida por las vibraciones de flexión en el centro de las losas de los entrepisos.

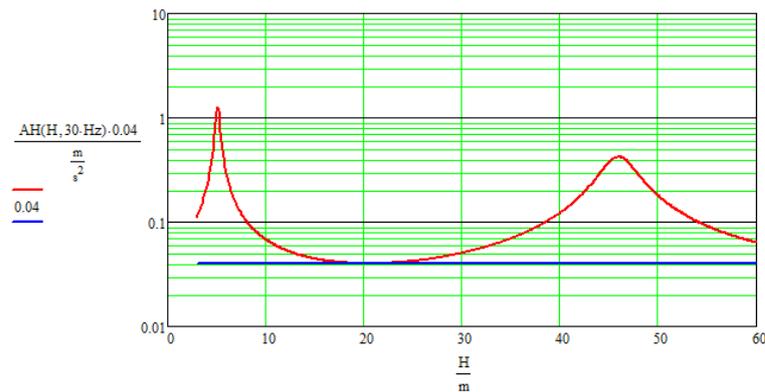


Figura 16. Aceleraciones esperadas en los pisos superiores de edificios (en rojo) y límite admisible a 30Hz (en azul)

Como se puede ver en la Figura 16, se produce una amplificación muy significativa en los pisos superiores de edificios del orden de los 16 pisos, donde las vibraciones verticales alcanzan niveles muy molestos para las personas (máximos de 0.4m/s^2). Por su parte, las aceleraciones verticales también alcanzan valores 10 veces mayores a los admisibles en las losas de 2.5 a 3.5m de lado en todos los niveles de edificios de cualquier altura.

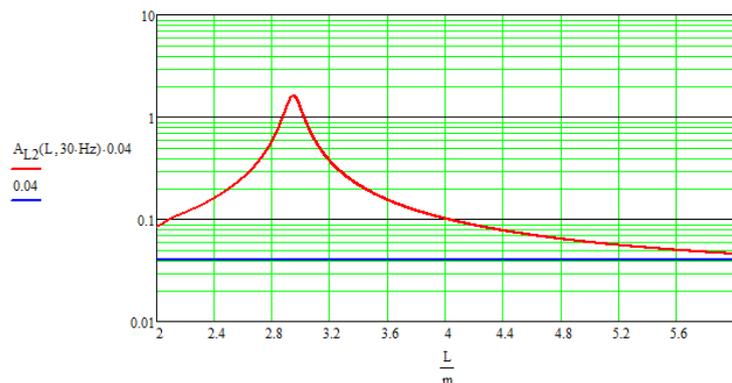


Figura 17. Aceleraciones esperadas en el centro de las losas de edificios (en rojo) y límite admisible a 30Hz (en azul)

Niveles de confort esperado en edificios de viviendas de varios pisos para una frecuencia de 18Hz

De manera similar al caso anterior, pero para 18Hz, la aceleración vertical

esperada es la que se muestra en la Figura 18 considerando la amplificación producida por la vibración axial las columnas y en la Figura 19 considerando la amplificación producida por las vibraciones de flexión en el centro de las losas de los entrepisos.

Como se puede ver en la Figura 18, a frecuencias de 18Hz la resonancia se produce para edificios de alrededor de los 5 pisos de altura aunque las vibraciones son claramente perceptibles en los pisos superiores de edificios de cualquier altura. A su vez, la Figura 19 muestra amplificaciones muy molestas para las personas (máximos de 0.4m/s^2), para losas de 4.5 a 5.2m de lado. Igualmente, las vibraciones superan ampliamente los niveles de percepción en los centros de todas las losas en todos los niveles de los edificios.

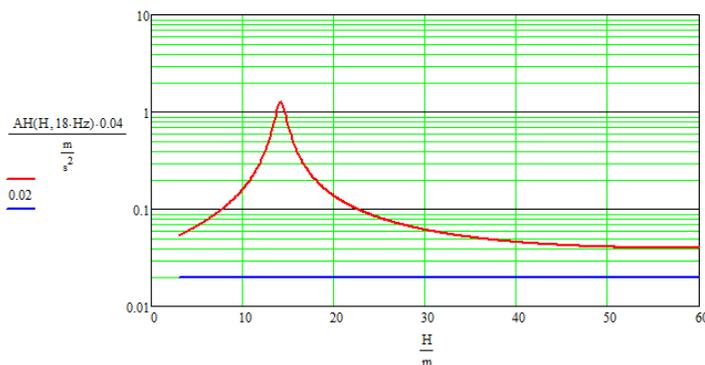


Figura 18. Aceleraciones esperadas en los pisos superiores de edificios (en rojo) y límite admisible a 18Hz (en azul)

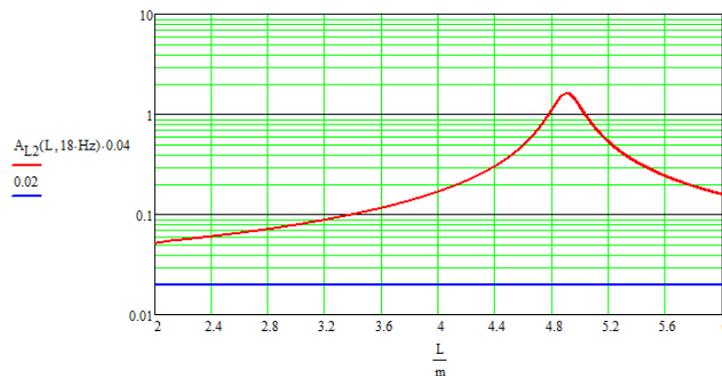


Figura 19. Aceleraciones esperadas en el centro de las losas de edificios (en rojo) y límite admisible a 18Hz (en azul)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los análisis realizados en este trabajo surgen las siguientes conclusiones en relación con la hinca de tablestacas por vibración en ambientes urbanos.

Los niveles de referencia de las normas para el daño no-estructural son del orden de 100 veces mayores que los niveles correspondientes al límite de confort. Por lo tanto, en la mayor parte de los casos (particularmente en estructuras de hormigón y edificios pesados) los problemas que se presentan están relacionados con la alarma de las personas ante las vibraciones que a la producción de daños (aún cosméticos)

en las edificaciones.

Para el problema estudiado, a distancias de unos 20 a 30 metros del punto de hincada, las vibraciones sobre el terreno ya están en el límite de la percepción humana (particularmente para el hincado con las frecuencias más altas del orden de los 30 Hz), por lo que prácticamente en todos los casos, las quejas de los vecinos son consecuencia de la resonancia de las estructuras con la frecuencia de hincado.

Esta resonancia se puede producir con la frecuencia vertical de las columnas de los edificios o bien con la frecuencia vertical de las losas. En el primer caso, la amplificación solo se produce en los pisos superiores, afectando a un mayor número de personas el segundo como consecuencia de las vibraciones de los entrepisos. Si bien las vibraciones son percibidas en todos los casos, las aceleraciones se tornan muy molestas para losas del orden de los 3m en el caso de hincada a 30Hz y losas de alrededor de los 5m en el caso de hincado a 18Hz.

De lo anterior se deduce que el control de la frecuencia de hincado en función de las características predominantes de los edificios vecinos, permitiría disminuir la alarma de los vecinos y las consecuentes acciones jurídicas y mediáticas que podrían atrasar el desenvolvimiento de las obras.

Si bien en los casos analizados las vibraciones no afectan la seguridad de las construcciones (ni siquiera los aspectos cosméticos), la alarma de los vecinos por las vibraciones es justificada, por lo que se recomiendan las siguientes acciones:

- Previamente al comienzo de la construcción, realizar una evaluación de los edificios vecinos para determinar su estado y características dinámicas a los efectos de establecer la frecuencia de hincada que podría minimizar la molestia a sus habitantes.
- Teniendo en cuenta que la mayor parte de las personas se alarma por una situación que no espera ni comprende, sería conveniente explicar a los vecinos que durante un breve lapso de tiempo pueden sentir vibraciones que, sin embargo, no afecta la seguridad de sus viviendas.
- Evitar realizar las tareas de hincado durante las horas de mayor permanencia de las personas en los edificios (evitar tareas durante la noche y feriados).
- Realizar mediciones sobre el terreno y en los edificios durante el hincado para controlar el nivel de las mismas y tranquilizar a sus habitantes que verán la realización de un control efectivo de lo que ellos sienten.
- Evitar la continuación del procedimiento de hincado una vez alcanzado el rechazo. Se pudo notar durante la construcción que una vez que se alcanzado, la continuación de la operación no incrementó la profundidad de la excavación pero provocó un fuerte incremento de las vibraciones.

Colaboradores: En la campaña de medición de vibraciones participaron los siguientes alumnos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires:

- Balbi, Mariano
- Barbieri, Pablo
- Bertero, Agustín
- Termine, Ezequiel
-

Agradecimientos: Se agradece a los integrantes del Laboratorio de Dinámica de Estructuras de la FIUBA por la participación en la discusión y ejecución de los trabajos realizados durante la campaña de medición de vibraciones y en la realización de este trabajo.

Referencias:

Chopra, A. K. (1995). "Dynamic of structures: theory and applications to earthquake engineering". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

Graff, K. F. (1991). "Wave motions in elastic solids", Dover Publications, Inc., New York

Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM 4078-2 (1990), "*Guía para la evaluación de la exposición humana a vibraciones de cuerpo entero. Estimación de la exposición humana a vibraciones continuas e inducidas por choques en edificios (1 Hz a 80 Hz)*", IRAM, Buenos Aires.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM 4077-2 (2005), "*Valores orientativos de vibraciones propagadas a través del terreno que pueden producir deterioros de revestimientos (daños cosméticos)*", IRAM, Buenos Aires.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial - Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, INTI-CIRSOC, Reglamento CIRSOC 201 (1984), "*Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*", INTI, Buenos Aires.