

VIBRACIONES EN EDIFICIOS CERCANOS ORIGINADAS POR ESPECTACULOS MUSICALES EN ESTADIOS

Raul D. Bertero, Alejandro Lehmann, Alejandro Verri, Sebastián Vaquero y
Juan Mussat

Laboratorio de Dinámica de Estructuras
Facultad de Ingeniería
Universidad de Buenos Aires

RESUMEN: La realización de eventos musicales en el Estadio de River Plate (y otros estadios) ha originado quejas de algunos vecinos relacionadas con la existencia de vibraciones molestas en edificios ubicados a distancias de hasta 3 km del estadio. En este trabajo se describen los resultados del estudio realizado por el Laboratorio de Dinámica de Estructuras de la FIUBA para determinar las causas y los efectos de las vibraciones sobre los edificios vecinos generadas por la realización de conciertos de rock en el estadio de River Plate.

Se presentan en este trabajo los estudios analíticos y las mediciones realizadas, así como las conclusiones y recomendaciones en relación con los efectos del salto coordinado de los espectadores sobre el campo, el tipo de edificios afectado, su distancia al estadio y el grado de afectación de los edificios y sus ocupantes.

ABSTRACT: *Rock concerts events in the River Plate Stadium in Buenos Aires (and other stadiums) has raised neighborhood complains due to molest vibrations felt by the inhabitants of some buildings at distances up to 3 km. In this paper are described the results of the studies conducted to determine the origin and the effects on buildings of vibrations generated during rock concerts in River Plate Stadium.*

The analytical studies, the planned and obtained measurements during the concerts, as well as the conclusions and recommendations in relation with the effects of the coordinate jump of the public on the field, the properties of the affected buildings, their distance to the stadium and the effects on the structures, contents and inhabitants are also presented.

VIBRACIONES EN EDIFICIOS CERCANOS ORIGINADAS POR ESPECTACULOS MUSICALES EN ESTADIOS

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo resume los estudios realizados en la Facultad de Ingeniería de la UBA para determinar las causas y los efectos de las vibraciones sobre los edificios vecinos generadas por la realización de espectáculos musicales en el estadio de River Plate.

Las actividades de investigación fueron realizadas en el marco del Convenio de Colaboración Científico Técnica entre la Facultad de Ingeniería de la UBA y la Agencia de Protección Ambiental (APRA) de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires como consecuencia de las denuncias realizadas por varios propietarios relacionadas con la presencia de vibraciones en ocasión de la realización de espectáculos musicales en el Estadio de River Plate. Las viviendas (en general de entre 10 y 11 pisos) se encuentran entre 600 y 2000m de distancia del Estadio (Fig. 1)

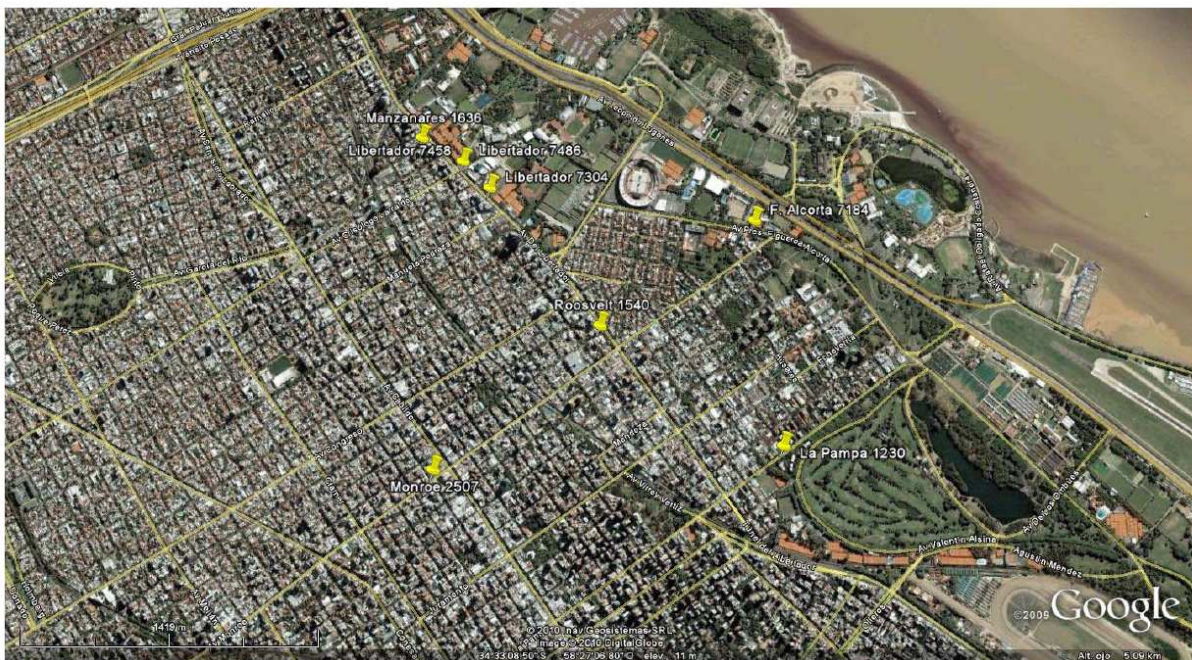


Fig. 1. Edificios que realizaron denuncias por vibraciones durante eventos musicales en River Plate

Debido a la falta de un modelo analítico predictivo generalmente aceptado y de un programa de mediciones realizadas en forma planificada y sistemática existe una amplia controversia en relación a las causas, la magnitud y los efectos de las vibraciones inducidas por un recital de música, no solo en nuestro medio sino también en la experiencia internacional.

Tener un adecuado diagnóstico sobre el nivel de las molestias y las posibles soluciones a este problema requiere necesariamente el desarrollo de un modelo

físico que pueda predecir correctamente los movimientos de los edificios a partir de las acciones generadas en el espectáculo. Para ello fue necesario desarrollar un proceso que involucró la preparación de un modelo analítico capaz de predecir el comportamiento observado, la elaboración y ejecución de un conjunto planificado de mediciones que alimenten los datos requeridos por el modelo analítico y confirmen o desestimen la validez del mismo, y finalmente el ajuste y selección del modelo físico que demuestre predecir adecuadamente el fenómeno.

En este trabajo se resumen en primer lugar las características de la sensibilidad humana a las vibraciones. Luego se describen las cargas dinámicas originadas por el público en un concierto de rock y, en particular, la acción de los espectadores saltando coordinadamente sobre el campo del Estadio de River Plate.

Posteriormente, se desarrolla un modelo físico de propagación de ondas de aceleración en el terreno como consecuencia de la aplicación de cargas periódicas del tipo de las que se generan como consecuencia del salto coordinado de los espectadores en el campo de juego. En un semiespacio elástico representativo del terreno las ondas se propagan en la forma de ondas volumétricas (ondas de compresión P y ondas de corte S) y en la forma de ondas superficiales llamadas ondas de Rayleigh R, como se muestra en la Fig. 2.

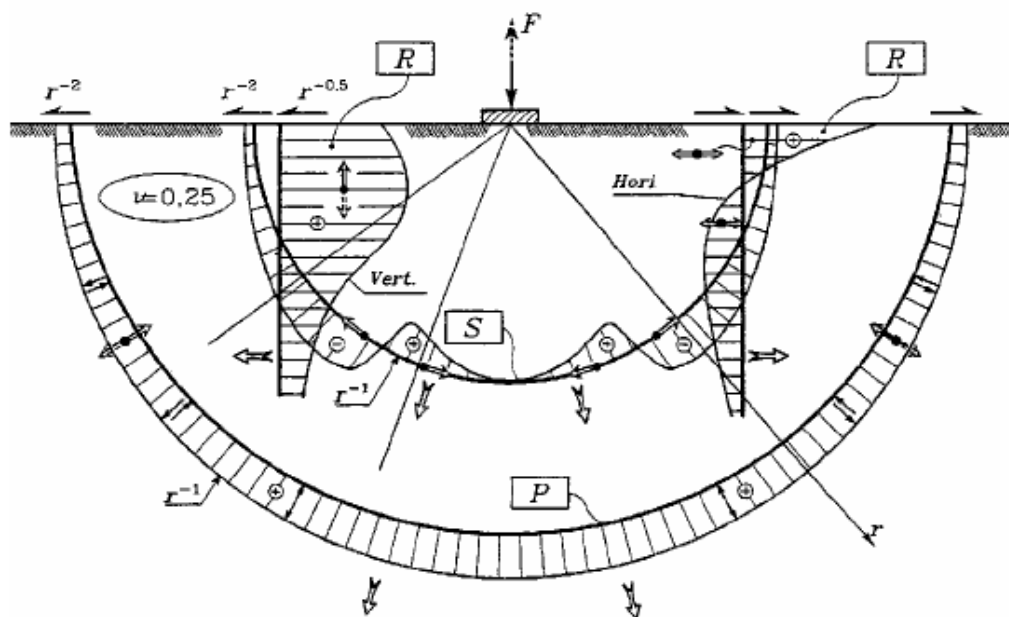


Fig. 2. Propagación de ondas en un semiespacio elástico

A su vez, estas aceleraciones horizontales al alcanzar las fundaciones de los edificios provocan vibraciones que pueden amplificarse o reducirse en los distintos niveles dependiendo de las propiedades dinámicas de la edificación. En particular, si la frecuencia natural del edificio coincide con la frecuencia de la excitación se produce una gran amplificación del movimiento en los pisos superiores, fenómeno conocido como resonancia.

Finalmente, en función de los desarrollos anteriores y las mediciones realizadas se determinan los efectos sobre los edificios y las personas y se presentan las conclusiones

2. EFECTO DE LAS VIBRACIONES SOBRE LAS PERSONAS

En la Argentina, la Norma IRAM 4078 Parte II - "Guía para la Evaluación de la Exposición Humana a Vibraciones de Cuerpo Entero" de Diciembre de 1990 que está basada en la Norma Internacional ISO Standard 2631/1985 "Evaluation of Human Exposure to whole-body Vibration" establece los criterios para la exposición humana a vibraciones en edificios (frecuencia entre 1 Hz a 80 Hz). La Norma diferencia la sensibilidad humana a las vibraciones en las direcciones horizontales (x, y) de la sensibilidad a las vibraciones en la dirección vertical z.

De acuerdo con la Norma IRAM 4078 parte II, en muchos países la experiencia ha demostrado que es muy probable que las quejas sobre las vibraciones en los edificios destinados a vivienda comiencen a producirse cuando los niveles de las vibraciones apenas superan los niveles de percepción.

Las magnitudes satisfactorias de la Norma están básicamente relacionadas con un mínimo de quejas de los ocupantes y no por otros factores como podrían ser riesgos a la salud o la eficacia en el trabajo.

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. Estas curvas son función de la frecuencia de la excitación dado que la sensibilidad humana a las vibraciones depende de la frecuencia a la que dichas aceleraciones se producen.

En la Norma, las magnitudes satisfactorias de las vibraciones para habitaciones o edificios se indican como múltiplos de los valores de estas curvas básicas. Para niveles de la aceleración y/o la velocidad que se hallan por debajo de las curvas básicas no se ha informado en general sobre comentarios o sensaciones desfavorables o quejas.

La magnitud primaria empleada para describir la intensidad de una excitación vibratoria es la aceleración. En la Norma IRAM 4078 la aceleración se expresa por el valor cuadrático medio (llamado también valor eficaz o "RMS").

Dada una historia de aceleraciones $a(t)$, el valor RMS (σ_a) de la aceleración correspondiente a un lapso de tiempo T se calcula como:

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

Por lo tanto, en el caso particular de una excitación armónica,

$a(t) = A \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$ de amplitud A , se verifica la siguiente relación:

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

Las curvas básicas en la dirección de los Ejes x (aceleraciones horizontales) y z (aceleraciones verticales) definidas en la NORMA IRAM 4078, Parte II en función de la frecuencia de la excitación en m/s^2 , se muestran en la figura siguiente:

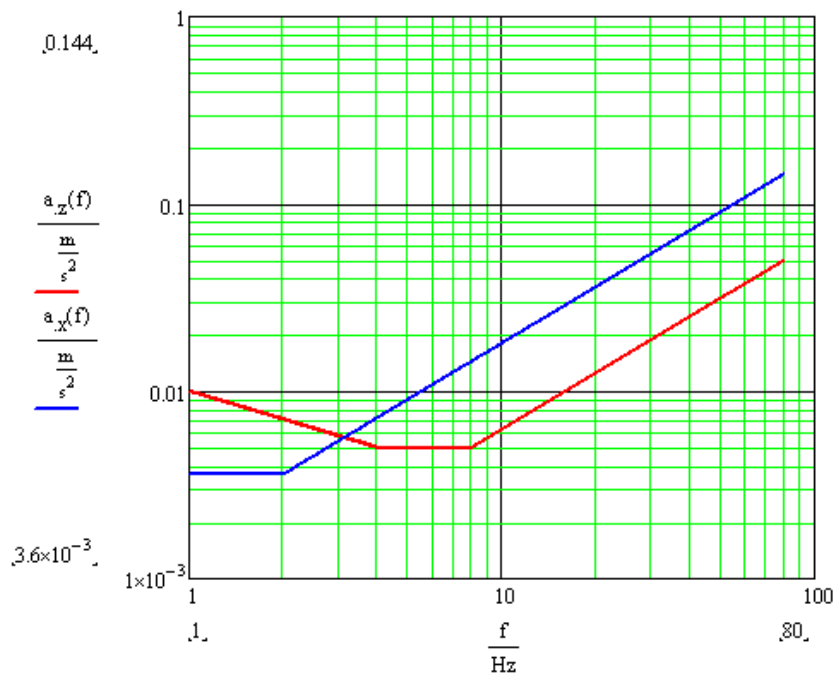


Fig. 3. Curvas básicas de respuesta humana constante a las vibraciones en las direcciones X y Z

La NORMA IRAM 4078 recomienda los siguientes factores de multiplicación de las curvas básicas que se emplean 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: a) Viviendas durante el día (2.0 a 4.0), Viviendas durante la noche (1.4). Por lo tanto para este estudio se utilizará como valor aceptable de las vibraciones el resultado de multiplicar las curvas básicas de la Fig. 3 por el factor 1.40.

Es decir que para una frecuencia de la excitación correspondiente al ritmo de la música en un concierto de rock con $f_b = 130 \cdot \frac{1}{\text{min}} = 2.167 \frac{1}{s}$, los valores RMS de las aceleraciones admisibles aplicadas en forma continua en las direcciones vertical y horizontal son respectivamente, $A_z(f_b) = 0.097 \% \cdot g$ y $A_x(f_b) = 0.056 \% \cdot g$, donde g corresponde a la aceleración de la gravedad.

Por lo tanto para la frecuencia de las vibraciones en un concierto de rock el cuerpo humano es más sensible a las vibraciones horizontales que a las verticales.

Debe tenerse en cuenta también que en las áreas residenciales existen grandes variaciones en el nivel de las vibraciones tolerables. Los valores específicos dependen de factores culturales y sociales, así como de actitudes psicológicas.

En función de las recomendaciones internacionales y las mediciones realizadas, se considera en este trabajo como el límite a partir del cual las vibraciones intermitentes correspondientes a la frecuencia del salto coordinado de los espectadores en un concierto de rock son claramente percibidas por la mayor parte de las personas un valor RMS de las aceleraciones de $A_l = 0.1 \% g$ ($0.01 m/s^2$).

Por otra parte, a partir de valores diez veces más altos, del orden del $1 \% g$ ($0.10 m/s^2$), las aceleraciones son muy molestas para las personas. Los objetos

colgantes (lámparas, macetas) pueden oscilar algunos milímetros y las personas pueden sentirse alarmadas por el movimiento.

3. CARGAS DINÁMICAS ORIGINADAS POR EL PÚBLICO EN UN RECITAL DE ROCK

3.1 Estudios experimentales y modelo matemático de las acciones

Durante un recital de rock los estadios experimentan cargas dinámicas como consecuencia de los movimientos de los espectadores. La música rítmica tiene el efecto de sincronizar los movimientos de los espectadores causando que la carga de la multitud fluctúe en el tiempo al ritmo de la música .

En este trabajo se representa la acción del público mediante un modelo derivado de extensos estudios experimentales realizados recientemente en la Universidad de Surrey en Inglaterra (Parkhouse and Ewins, 2006). En dichos estudios se examinó la naturaleza estadística de la acción de la multitud midiendo el comportamiento de personas saltando al ritmo de cuatro tempos diferentes (frecuencias de 1.5, 2.0, 2.67 y 3.5 Hz). Al comienzo de cada ensayo los participantes fueron instruidos para moverse de la forma en que lo hacían habitualmente en un recital de rock en vivo (Fig. 4).

Los estudios de la Universidad de Surrey concluyeron que una carga sincronizada representativa de la acción de la multitud se puede expresar en el dominio de la frecuencia por la ec.(3), donde W es el peso total de los espectadores, f es la frecuencia del “beat” que coordina el movimiento de los espectadores, DLF_n es el factor de carga dinámico para cada armónico n y φ_n es el ángulo de fase de cada armónico.

$$P(t)=W.\left[1+\sum_{n=1}^{\infty}(DLF_n.\cos(2.\pi.n.f.t-\varphi_n))\right] \quad (3)$$



Fig. 4. Estudios del movimiento de espectadores realizados en la Universidad de Surrey (Parkhouse and Ewins, 2006)

En la Fig. 5 se representa la fuerza normalizada del salto de los espectadores en el dominio del tiempo para $f = 2\text{Hz}$.

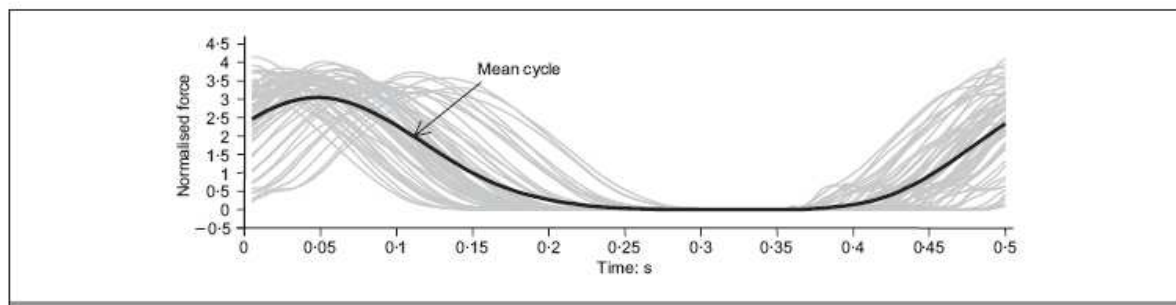


Fig. 5. Acción del salto conjunto de los espectadores en un concierto de rock (Parkhouse and Ewins, 2006)

En la figura siguiente se puede ver la evolución del factor de carga dinámico para los primeros tres armónicos obtenido experimentalmente a medida que aumenta el número de espectadores saltando.

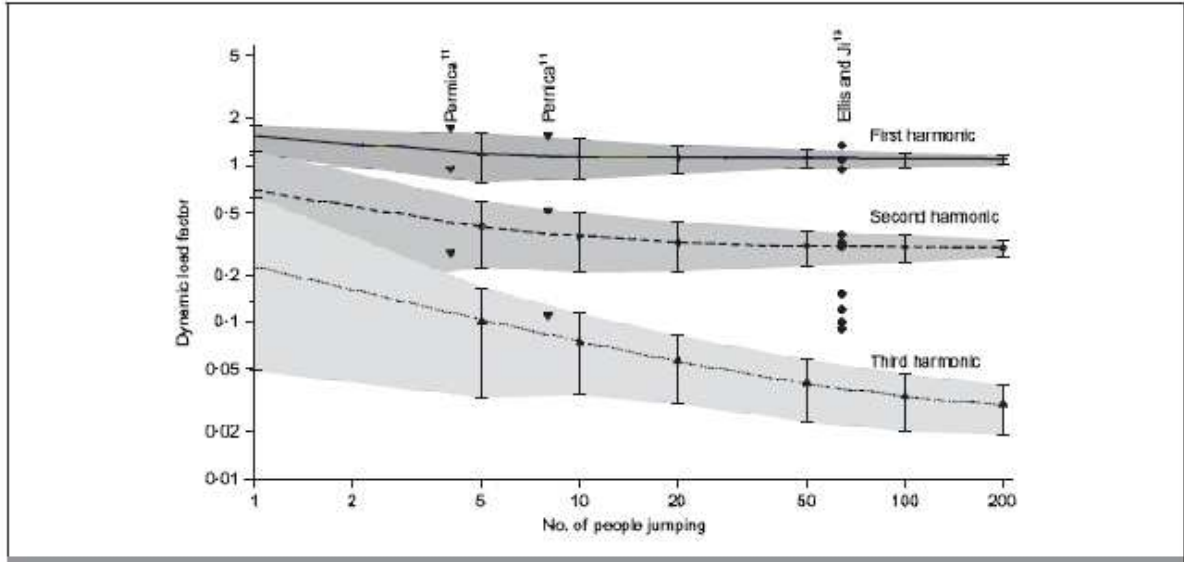


Fig. 6. Evolución del Factor de Carga Dinámica en función del número de gente saltando para los primeros tres armónicos (Parkhouse and Ewins, 2006)

Esta carga ha sido medida sobre una base rígida. La misma se ve reducida cuando la multitud se mueve rítmicamente sobre una base flexible o sobre el pasto. Para tener en cuenta este efecto en este trabajo se consideró la acción de la multitud correspondiente a la oscilación vertical con los pies en contacto permanente con el suelo ("bobbing").

A partir de los resultados obtenidos en la Universidad de Surrey y considerando el caso correspondiente a una frecuencia de 120 bpm (2.0 Hz), coincidente con mediciones experimentales en los alrededores de la Cancha de River, en este trabajo se utilizaron los siguientes factores de carga dinámicos para

los primeros tres armónicos $DLF = \begin{pmatrix} 0.321 \\ 0.080 \\ 0.010 \end{pmatrix}$, con una frecuencia del beat,

$$f_b = 120 \cdot \frac{1}{\text{min}} = 2 \cdot \frac{1}{s} \quad .$$

3.2 Acción de los espectadores sobre el campo del estadio de River

Considerando el salto sincronizado de un total de 35,000 espectadores en el campo y un promedio en el peso de los asistentes a un concierto de rock de 62.4 Kgf, se obtiene un peso total $W_t = W_0 \cdot N_{esp} = 2.204 \cdot 10^4 \cdot kN$. Considerando la ec. (3) se puede calcular la densidad de potencia espectral correspondiente a los tres primeros armónicos de la acción de los espectadores como,

$$S_{esp_i} = \frac{1}{2} \cdot [(DLF_i \cdot W_t)^2] = \begin{pmatrix} 2.502 \cdot 10^7 \\ 1.554 \cdot 10^6 \\ 2.428 \cdot 10^4 \end{pmatrix} \cdot kN^2 \quad (4)$$

con las siguientes frecuencias para cada armónico:

$$F_{b_i} = f_b \cdot i = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \end{pmatrix} \cdot Hz \quad (5)$$

$$\omega_b = 2 \cdot \pi \cdot F_b = \begin{pmatrix} 12.566 \\ 25.133 \\ 37.699 \end{pmatrix} \frac{1}{s} \quad (6)$$

4. TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES HORIZONTALES AL ENTORNO DEL ESTADIO

4.1. Propiedades dinámicas del terreno en los alrededores del estadio

Considerando las propiedades del terreno promedio en una longitud correspondiente a la profundidad de las ondas de Rayleigh para la frecuencia de 2 Hz del salto de los espectadores, se consideran en este estudio los siguientes valores: módulo de elasticidad transversal $G = 60.3 MPa$, densidad, $\rho = 1900 \cdot \frac{kg}{m^3}$, módulo de poisson $\nu = 0.35$, factor de amortiguamiento $\zeta = 0.005$, módulo de elasticidad, $E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G = 162.795 \cdot MPa$, constante de Lamé $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} = 140.687 \cdot MPa$, velocidad de propagación de las ondas P, $C_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2 \cdot G}{\rho}} = 370.828 \frac{m}{s}$, velocidad de propagación de las ondas de corte $C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 178.14 \frac{m}{s}$, velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh para el módulo de poisson considerado, $C_R = \sqrt{c_{R_1}} \cdot C_s = 166.563 \frac{m}{s}$, es decir una relación con la velocidad de las ondas de corte, $\frac{C_R}{C_s} = 0.935$.

4.2. Función de transferencia de vibraciones en un semi-espacio elástico

Considerando solamente las ondas de Rayleigh, Lamb resolvió en 1904 en forma analítica los desplazamientos $u(t)$ en cualquier punto de un semiespacio elástico a una distancia r de una carga armónica $P e^{i\omega t}$ de frecuencia ω .

La ecuación puede escribirse de la siguiente forma (Hunt 1991):

$$u(t) = U(\omega, \zeta, r) e^{i\omega t} = -\frac{\omega H}{2\rho C_R^3} e^{-\frac{\zeta \omega r}{2C_R}} H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{C_R}\right) P e^{i\omega t} = H_u(\omega, \zeta, r) P e^{i\omega t} \quad (7)$$

donde $H_1^{(2)}$ es la función de Hankel de segunda clase de orden uno. H es una constante que depende solamente del módulo de poisson ($H = 0.095$ para $\nu = 0.35$). $H_u(\omega, \zeta, r)$ es la función de transferencia representando la respuesta del terreno.

Derivando dos veces la ec. (7), la respuesta de las aceleraciones $\ddot{u}(t)$ se puede calcular como:

$$\ddot{u}(t) = \ddot{U}(\omega, \zeta, r)e^{i\omega t} = -\omega^2 H_u(\omega, \zeta, r) P e^{i\omega t} = H_{\ddot{u}}(\omega, \zeta, r) P e^{i\omega t} \quad (8)$$

4.3. Vibraciones en el terreno en los alrededores del Estadio originadas por el movimiento de los espectadores en el campo

Mediante la aplicación de la teoría de las vibraciones aleatorias y utilizando la función de transferencia de la ec.(8) y la densidad de potencia espectral de la fuerza producida por el salto de los espectadores [ec.(4)], es posible obtener la densidad de potencia espectral de la aceleración horizontal a diferentes distancias r del Estadio para cada armónico i , mediante la siguiente ecuación:

$$S_{\ddot{u}}(i, \zeta, r) = S_{esp_i} \cdot \left(|H_{\ddot{u}}(2\pi f_b i, \zeta, r)| \right)^2 \quad (9)$$

El valor medio cuadrático de las aceleraciones se puede calcular por lo tanto mediante

$$\sigma_{\ddot{u}}(\zeta, r) = \left(\sum_{i=1}^3 S_{\ddot{u}}(i, \zeta, r) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

En el mapa de la Fig. 7 se muestran el valor medio cuadrático (RMS) de las aceleraciones correspondientes a distancias de 500, 1000 y 1500 m del estadio de River (0.081 %g, 0.042 %g y 0.026 %g respectivamente).

Recordando que en la Sección 2 habíamos concluido que el límite a partir del cual las vibraciones correspondientes a la frecuencia del salto coordinado de los espectadores en un concierto de rock son claramente percibidas por las personas es del orden del 0.1 %g, estos valores explican porqué las vibraciones son apenas perceptibles en las viviendas de una o dos plantas, aún las que se encuentran en la zona más próxima al Estadio de River Plate.



Fig. 7. Valor medio cuadrático de las aceleraciones horizontales en el suelo a 500, 1000 y 1500 m del estadio de River Plate

4.4. Vibraciones en edificios en los alrededores del Estadio originadas por el movimiento de los espectadores en el campo

Como se puede ver en el mapa de la Fig. 7, las aceleraciones que se registran en el terreno y en los edificios de una o dos plantas son apenas perceptibles, aún para las viviendas ubicadas en las zona más próxima al estadio de River Plate.

Sin embargo, las aceleraciones horizontales de baja frecuencia en las fundaciones de los edificios de varios pisos provocan vibraciones que pueden amplificarse o reducirse en los distintos niveles dependiendo de las propiedades dinámicas de la edificación. En particular, si la frecuencia natural del edificio coincide con la frecuencia de la excitación se produce una gran amplificación del movimiento en los pisos superiores, fenómeno conocido como resonancia.

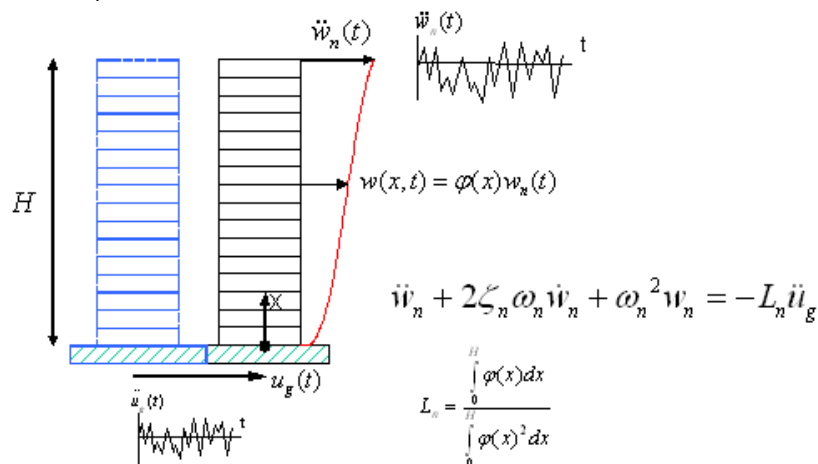


Fig. 8. Vibraciones de un edificio sometido a aceleraciones de la base modelado como un sistema de un grado de libertad generalizado

En la Fig. 8 se muestra la respuesta de un edificio sometido a aceleraciones en su base, modelado como un sistema de un grado de libertad generalizado. La ecuación diferencial de equilibrio dinámico es la siguiente:

$$\ddot{w}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{w}_n(t) + \omega_n^2 w_n(t) = -L_n \ddot{u}(t) \quad (11)$$

Donde w_n es el desplazamiento de la parte superior del edificio, ξ_n es el factor de amortiguamiento del edificio, ω_n es la frecuencia propia del edificio,

$$L_n = \frac{\int_0^H \varphi(x) dx}{\int_0^H \varphi(x)^2 dx} = 1.50 \quad \text{para} \quad \varphi(x) = \frac{x}{H} \quad \text{es el factor de participación del primer modo}$$

de vibración, H es la altura del edificio, $\varphi(x)$ es la forma del primer modo de vibración (asumida lineal en este trabajo) y $\ddot{u}(t)$ es la aceleración del suelo transmitida por el terreno tal como se describió en el punto anterior.

Aplicando la transformada de Fourier a la ec.(11), se obtiene la respuesta en el dominio de la frecuencia mediante la siguiente ecuación

$$W_n(\omega, \omega_n, \xi) = -\frac{L_n}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2\xi \omega_n \omega i} \ddot{U}(\omega) = H_n(\omega, \omega_n, \xi) \ddot{U}(\omega) \quad (12)$$

Donde $H_n(\omega, \omega_n, \xi)$ es la función de transferencia para las vibraciones horizontales en la azotea de un edificio de frecuencia ω_n y factor de amortiguamiento ξ , $\ddot{U}(\omega)$ es la transformada de Fourier de $\ddot{u}(t)$ y $W_n(\omega, \omega_n, \xi)$ la transformada de Fourier de $w(t)$.

Por lo tanto, la densidad de potencia espectral de las aceleraciones en la azotea del edificio para cada frecuencia de excitación ω_i resulta

$$S_{\ddot{w}_n}(\omega_n, \xi_n, \omega_i, \zeta, r) = \omega_i^2 \left(|H_n(\omega_i, \omega_n, \xi_n)| \right)^2 S_{\ddot{u}}(\omega_i, \zeta, r) \quad (13)$$

Considerando los tres armónicos de la excitación se obtiene el valor medio cuadrático (o Valor Eficaz o RMS) de las aceleraciones en el piso superior de los edificios como

$$\sigma_{\ddot{w}_n}(\omega_n, \xi_n, \zeta, r) = \left(\sum_{i=1}^3 S_{\ddot{w}_n}(\omega_n, \xi_n, \omega_i, \zeta, r) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

La figura siguiente muestra el valor medio cuadrático de la aceleración en la azotea de edificios con factor de amortiguamiento $\xi_n = 0.02$ en función del período de vibración del primer modo $T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$ a 1000, 1500 y 2000 metros de distancia del Estadio de River Plate.

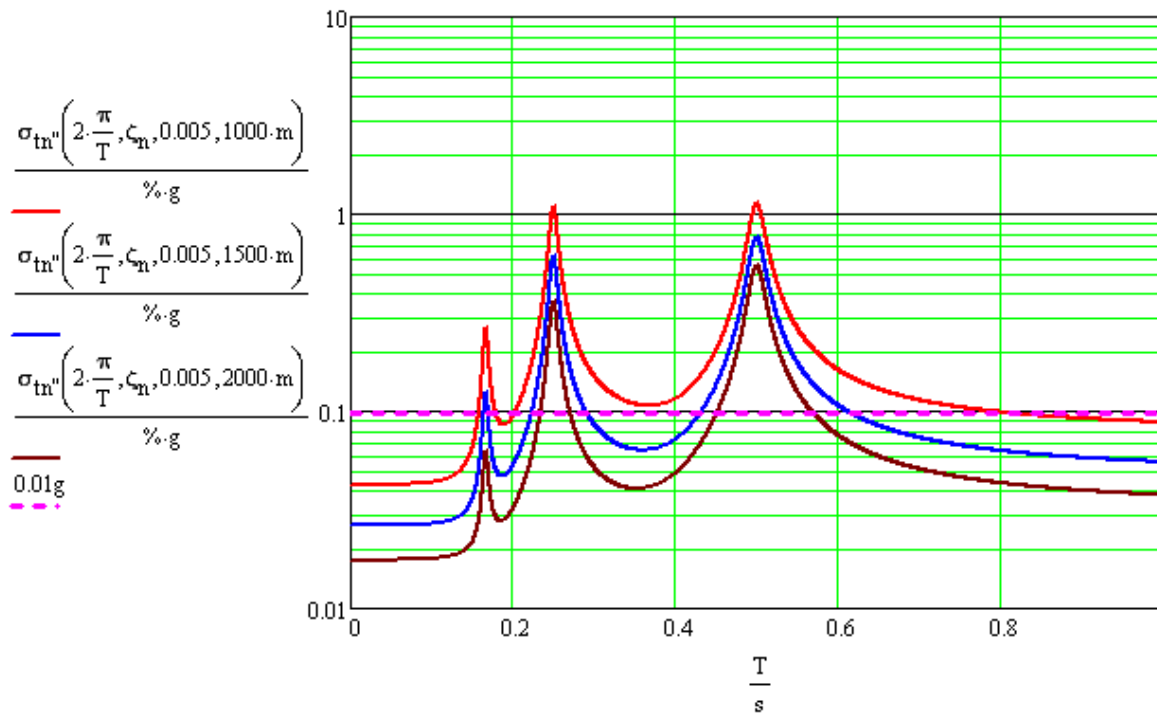


Fig. 9 Valor medio cuadrático de la aceleración en la azotea para edificios con períodos de 0 a 1 segundo

En la Fig. 9 se observa claramente la resonancia con el primer y segundo armónico del salto de los espectadores a las frecuencias de 2 y 4 Hz (Períodos de 0.5 y 0.25s respectivamente).

Mientras que en la mayor parte de los casos, las aceleraciones en la azotea se encuentran por debajo del umbral de percepción clara de 0.1 %g, para los edificios cuyas frecuencias naturales coinciden con las frecuencias del salto de los espectadores las aceleraciones alcanzan valores cercanos al 1% g aún a distancias mayores a 1500 m del Estadio.

La Fig. 10 muestra cual sería el valor medio cuadrático de las aceleraciones horizontales en la azotea de edificios con frecuencia natural coincidente con el salto de los espectadores (2Hz) a 500, 1000, 1500 y 2000 m del estadio de River Plate (1.93 %g, 1.13 %g, 0.76 %g y 0.55 %g respectivamente).

El período del primer modo de vibración de edificios esta fuertemente correlacionado con la altura del edificio. A partir de estudios experimentales, Naoki Satake y otros en el 2003 propusieron la siguiente relación,

$$T_n = 0.015 \frac{H}{m} \quad (15)$$

Considerando una altura promedio de 3 m para los entresijos y utilizando la ec. (15), las frecuencias de resonancia de 2 y 4 Hz corresponden a edificios de entre 11 y 12 pisos y de 6 pisos respectivamente, dependiendo de sus características específicas de rigidez, masa y amortiguamiento.

Los resultados analíticos obtenidos explican claramente porqué el efecto es sentido mayoritariamente en edificios de la altura mencionada, aún a grandes distancias del estadio, mientras que los habitantes de edificios más bajos o más altos, aún a corta distancia del estadio no perciben vibraciones de alta intensidad.



Fig. 10. Valor medio cuadrático de las aceleraciones horizontales en la azotea de edificios con frecuencia natural coincidente con el salto de los espectadores (2Hz) a 500, 1000, 1500 y 2000 m del estadio de River Plate

5. RIESGO DE DAÑO ESTRUCTURAL Y NO ESTRUCTURAL

El daño a los elementos estructurales o no estructurales de un edificio está relacionados con el nivel de los desplazamientos. Considerando que la máxima aceleración horizontal de los edificios, A , ocurre en resonancia con el primer armónico del salto de los espectadores ($f_b = 2\text{Hz}$), se puede determinar el máximo desplazamiento de la azotea del edificio, X , mediante la siguiente ecuación,

$$X(A) = \frac{A}{(2\pi f_b)^2} \quad (16)$$

Los edificios más próximos al estadio con una altura tal como para entrar en resonancia con el primer armónico del salto de los espectadores están ubicados a unos 800 metros de distancia. Considerando el valor medio cuadrático de las aceleraciones [ec. (14)] y la ec. (2), la amplitud de la aceleración se puede calcular como

$$A = \sqrt{2} \cdot \sigma_{\ddot{w}_n}(2\pi f_b, \zeta_n, 0.005, 800\text{m}) = 1.927 \% g \quad (17)$$

A este nivel de aceleración, que resulta muy molesto para las personas corresponde, un desplazamiento máximo

$$X(A) = 1.2 \text{ mm} \quad (18)$$

Teniendo en cuenta que la altura de un edificio en resonancia con el salto de los espectadores es según la ec. (15), $H = \frac{T_b}{0.015} m = \frac{0.5}{0.015} m = 33.33 m$

La relación entre los desplazamientos y la altura del edificio es por lo tanto

$$\frac{X(A)}{H} = \frac{1.2 \cdot 10^{-3} m}{33.33 m} = \frac{1}{1000} \frac{1}{28} \quad (19)$$

Es decir que el desplazamiento máximo en los edificios más cercanos al Estado de River Plate debido al salto de los espectadores es 30 veces menor que el desplazamiento admisible ante la acción del viento adoptado por la mayoría de los reglamentos ($H/1000$).

Este nivel de desplazamientos, es por lo tanto, muy inferior al requerido para producir daños a los elementos estructurales o no estructurales de los edificios.

6. MEDICIONES REALIZADAS

A partir del modelo analítico desarrollado se determinaron las variables que debían ser medidas para validar la capacidad predictiva del mismo y se diseñó un plan de mediciones de aceleraciones en suelo y en edificios que abarcó los recitales de ACDC (4 y 6 de Diciembre de 2009), Metallica (21 y 22 de Enero de 2010) y Cold Play (26 de Febrero de 2010) realizados en el Club River Plate, así como el recital de Gustavo Cerati realizado el 20 de Diciembre de 2009 en el Club Ciudad. La Fig. 11 muestra los lugares donde fueron realizadas las mediciones de aceleraciones durante la realización de los eventos musicales. También se realizaron filmaciones del movimiento del público en el estadio durante los recitales de Metallica y Cold Play.

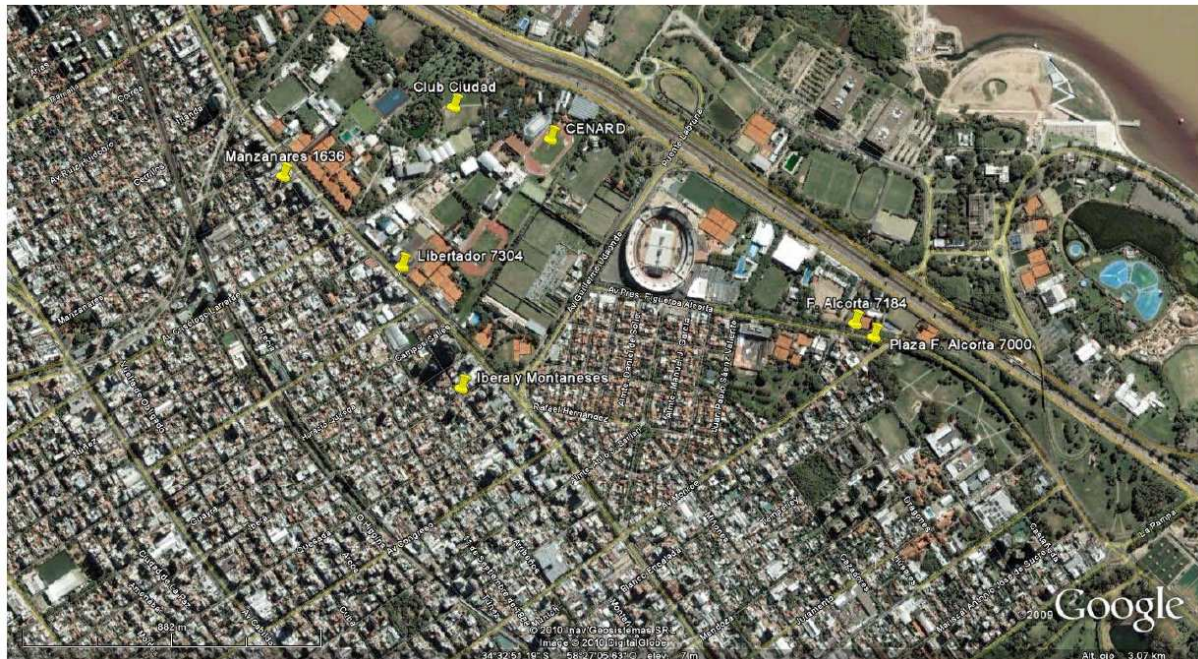


Fig. 11. Ubicación del terreno y los edificios donde se realizaron las mediciones de aceleraciones

Las aceleraciones registradas en el terreno, a 450 m del Club River Plate, mostraron ondas de aceleración con un contenido de frecuencias típico del que produce el movimiento de los espectadores en conciertos de rock (Fig. 12). Los niveles de aceleración registrados por los acelerómetros en el terreno se encuentran por debajo del umbral de percepción del cuerpo humano ($0.06\% g$).

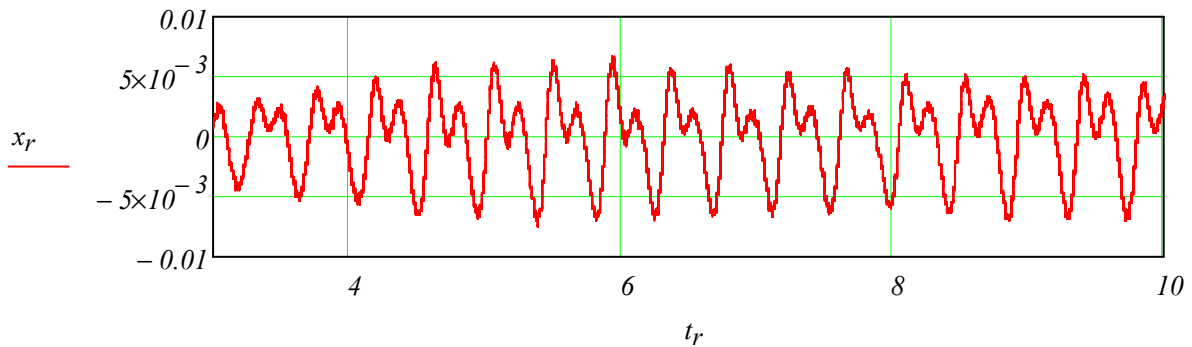


Fig. 12. Aceleraciones registradas sobre el terreno a 450 m del estadio de River Plate en coincidencia con el salto coordinado de los espectadores sobre el campo (duración de la muestra 7 seg)

Por otra parte, durante la realización de los recitales en el Club River Plate, fueron registradas aceleraciones intermitentes muy por encima del confort de los habitantes en algunos edificios dentro de un rango de al menos 1000m de distancia. Los edificios que presentan mayores aceleraciones corresponden a edificios con frecuencias naturales en el orden de los 2 a 2.5 Hz, como consecuencia de la resonancia con las ondas de Rayleigh transmitidas por el terreno a las fundaciones. Las máximas aceleraciones registradas alcanzaron valores de $1.5\% g$ (RMS $1.1\% g$) en la azotea de un edificio de 11 pisos ubicado sobre la Av Libertador a 850 m del Estadio (Fig. 13).

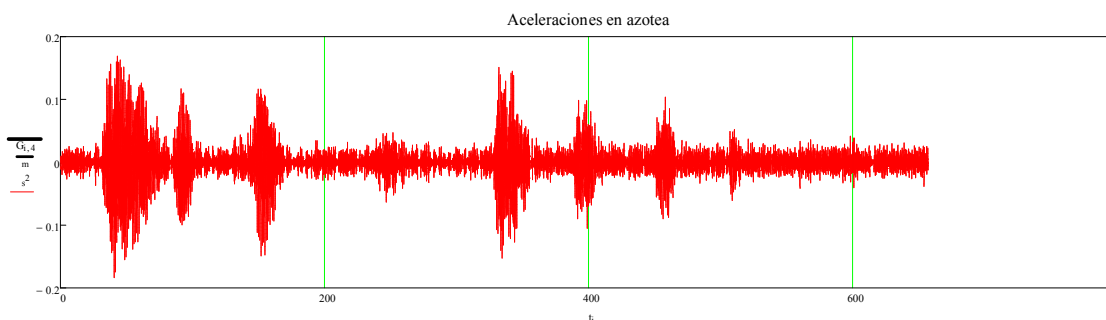


Fig. 13. Aceleraciones en la azotea de un edificio de 11 pisos a 850 m del estadio registradas durante 20 minutos del recital de ACDC

7. CONCLUSIONES

7.1. Conclusiones de las mediciones realizadas

Como resultado de las mediciones realizadas se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- De las mediciones y filmaciones realizadas del movimiento de los espectadores en el estadio, se pudo determinar que las ondas de Rayleigh tienen su origen en el movimiento coordinado de los espectadores durante algunos segmentos de los eventos musicales. El nivel de las aceleraciones registradas y la distancia a la que pueden sentirse está relacionado con el número de espectadores saltando en forma coordinada al ritmo de la música.
- Tanto las aceleraciones medidas en el terreno como las medidas en los edificios coinciden razonablemente con los valores obtenidos con el modelo analítico de propagación de ondas y respuesta de los edificios.
- El nivel de aceleraciones y desplazamientos medido está por debajo de los niveles requeridos para provocar daños estructurales y no estructurales en los edificios.

7.2. Conclusiones obtenidas del modelo analítico

El estudio trata los efectos de las vibraciones transmitidas por el suelo sobre las edificaciones y las personas que los habitan producidas por el movimiento coordinado y simultáneo de 35,000 espectadores saltando al ritmo de la música en el campo del estadio de River Plate en Buenos Aires. Las principales conclusiones son las siguientes:

- El nivel de los desplazamientos calculados en cualquier punto de los alrededores del estadio es muy inferior al requerido para ocasionar daños a los elementos estructurales o no estructurales de las edificaciones.
- El movimiento coordinado de los espectadores saltando al ritmo de la música genera ondas de aceleración con frecuencias de 2 y 4 Hz. Estas ondas (fundamentalmente ondas de Rayleigh) se propagan por el terreno alcanzando las fundaciones de los edificios en los alrededores del estadio.
- A nivel de la Planta Baja de las viviendas las vibraciones podrían ser percibidas por algunas personas dentro una distancia de unos 380 m del centro del Estadio (Fig. 14).



Fig. 14. Zona donde algunas personas podrían percibir las vibraciones en edificios de Planta Baja.

- Las vibraciones horizontales del terreno son amplificadas en un edificio de varios pisos si la frecuencia del movimiento de los espectadores coincide con la frecuencia propia del edificio.
- Las aceleraciones pueden alcanzar valores RMS de entre 0.6 %g y 1.1 % g en los niveles superiores de edificios de entre 10 y 12 pisos (para la resonancia con el primer armónico del salto de los espectadores) y para edificios de 6 pisos (para la resonancia con el segundo armónico del salto de los espectadores) en un radio de más de 3000 m alrededor del estadio (Fig. 15). El número de pisos a los que se produce resonancia puede variar ligeramente en función de las características propias del sistema estructural, el suelo de fundación, la cantidad y características de las paredes no estructurales y del tipo de movimiento de los espectadores.
- Aceleraciones RMS de más de 0.6%g son muy molestas para las personas. Los objetos colgantes (lámparas, macetas) pueden oscilar algunos milímetros y las personas pueden sentirse alarmadas por el movimiento.
- Los análisis fueron realizados considerando el salto simultáneo de 35000 espectadores en el campo del Estadio. Los niveles de aceleración en el terreno y en los edificios son directamente proporcionales a la cantidad de espectadores saltando en forma coordinada al ritmo de la música.
- Debido a la baja frecuencia de las ondas de vibración no es posible utilizar los métodos tradicionales de control de vibraciones que consisten en la ejecución de zanjas de unos pocos metros de profundidad alrededor de la fuente vibrante.

- Una posible solución sería la colocación de una carpeta que: a) limite el salto de los espectadores y b) evite la transmisión al terreno del salto coordinado de los espectadores.



Fig. 15. Zona donde las personas ubicadas en los últimos pisos de edificios en resonancia pueden sentir vibraciones por encima de los niveles de confort

- El nivel de aceleraciones y desplazamientos medido está por debajo de los niveles requeridos para provocar daños estructurales y no estructurales en los edificios.

8. REFERENCIAS

- Parkhouse, J.G. and Ewins, D.J.. (2006). "Crowd-induced rhythmic loading". *Structures & Buildings* 159, October 2006, pag. 247-259,
- Hunt, H.E.M. (1991) "Stochastic Modelling Of Traffic-Induced Ground Vibration" *Journal of Sound and Vibration* 144(l), pag. 53-70
- Lamb, H. (1904). "On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid". *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)* A203, I-42.
- Naoki Satake et al, (2003), "Damping Evaluation Using Full-Scale Data of Buildings in Japan", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 4, April 1, 2003.