

DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA NATURAL Y EL FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO DE EDIFICIOS DE GRAN ALTURA A PARTIR DE LA VIBRACIÓN AMBIENTE

Mustar, Jorge Ignacio; (jorgeimustar@hotmail.com)
Mussat, Juan Martín; Ing. (jmussat@gmail.com)
Bertero, Raúl D.; Dr. Ing. (rbertero@freyreyasoc.com.ar)
UBA – LABDIN – INTECIN

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la caracterización a través de la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de los edificios de gran altura ubicados en C.A.B.A. a partir de la medición de vibraciones. Estos edificios tienden a oscilar en su frecuencia natural ante la acción de fuentes de vibración de banda ancha como es el caso del viento (excluyendo la formación de vórtices o fenómenos aeroelásticos) o del movimiento del terreno debido al tránsito. Del análisis de las mediciones en el dominio de la frecuencia, se obtiene la frecuencia natural como el máximo del espectro de respuesta y el factor de amortiguamiento aplicando una metodología que ajusta la respuesta medida a la respuesta teórica de un sistema de un grado de libertad generalizado con igual frecuencia natural. La correlación de los resultados obtenidos con la altura de los edificios permitirá una mejor caracterización de dichos parámetros dinámicos frente a las fórmulas empíricas de otros países con otras tipologías constructivas y condiciones de suelo. La utilización de valores realistas es necesaria para una adecuada consideración de la respuesta dinámica de los edificios altos de Buenos Aires a vientos severos y a sismos lejanos de gran intensidad.

ABSTRACT

The aim of this paper is to characterize tall buildings located in the City of Buenos Aires through their dynamic parameters: natural frequency and damping ratio. These buildings tend to oscillate with their natural frequency in response to broadband vibration sources actions such as wind (excluding vortex formation and aeroelastic phenomena) or ground movement due to traffic. From the analyses of acceleration measurements in the frequency domain, natural frequency will be obtained as the maximum of the response spectra. Damping ratio will be obtained by applying a numerical methodology that matches measured building response to the theoretical response of the same natural frequency generalized-single-degree-of-freedom system. The correlation of the results with buildings height will allow a better characterization of these dynamic parameters than that obtained using other countries' empirical formulas with different construction typology and soil condition. The use of realistic values is necessary to an adequate consideration of the dynamic response of tall Buenos Aires buildings to strong winds and distant earthquakes of high intensity.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objetivo la caracterización a través de la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de edificios de gran altura de la Ciudad de Buenos Aires a partir de la medición de la vibración ambiente. Los edificios estudiados se encuentran ubicados en la zona de Puerto Madero y aledaños (Ciudad de Buenos Aires, Argentina) [Fig. 1 y Fig. 2], caracterizada por su cercanía al Río de la Plata, alta exposición a los vientos y constituir el denominado “terreno ganado al río” en alusión al suelo de relleno.

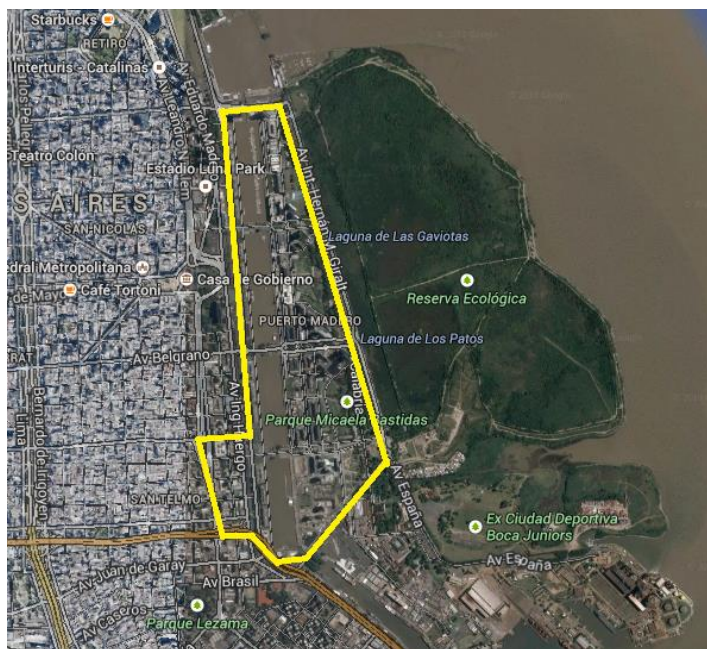


Fig. 1: Zona de medición.

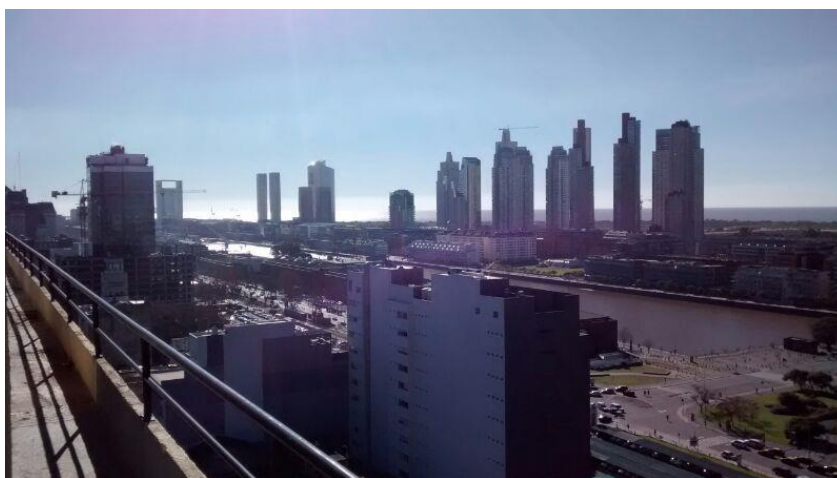


Fig. 2: Vista de zona de medición.

En este trabajo se considera que la excitación dinámica ambiente (correspondiente a las aceleraciones del terreno y a la acción del viento [1]) puede caracterizarse como un proceso aleatorio del tipo Ruido Blanco (es decir, un proceso

aleatorio en el cual no existe un contenido de frecuencias predominante dentro del rango de frecuencias de interés). En respuesta a estas excitaciones de banda ancha, los edificios tienden a oscilar a la frecuencia correspondiente a su primer modo de vibración.

La respuesta de un edificio a esta vibración ambiente se mide mediante acelerómetros ubicados en la azotea o en los pisos superiores del edificio. Los registros temporales obtenidos son transformados al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier. Dado que el edificio tiende a vibrar en su frecuencia fundamental, la frecuencia correspondiente al pico de la respuesta obtenida en el dominio de la frecuencia es justamente la frecuencia fundamental del edificio.

Para la determinación del factor de amortiguamiento, se utiliza una metodología cuyo desarrollo se basa en ajustar el registro de la vibración del edificio medida en el dominio de la frecuencia a la respuesta teórica de un sistema de un grado de libertad generalizado (sistema 1GLG) a una excitación de ruido blanco.

Se presentan en este trabajo los resultados obtenidos en una campaña de mediciones en la que se registró la respuesta de 6 edificios en un rango de alturas de 52m a 161m. Finalmente, se determina la curva de período natural de los edificios en función de la altura que mejor ajusta a los valores medidos.

En un edificio se realizan mediciones de vibraciones para una variedad de propósitos [1]: reconocimiento, verificación, documentación y diagnóstico. También la frecuencia natural de los edificios es de interés en relación con las quejas por vibraciones en edificios cercanos a estadios en los que se realizan espectáculos musicales [2] y con los movimientos significativos observados por personas que habitan edificios de gran altura de la ciudad de Buenos Aires durante la ocurrencia de sismos de gran intensidad en la costa chilena [3].

2. EXCITACIÓN AMBIENTE Y RESPUESTA DE LOS EDIFICIOS

Como se mencionó anteriormente, se adopta como hipótesis que la excitación dinámica ambiente puede caracterizarse como un proceso aleatorio del tipo Ruido Blanco. Dicho proceso aleatorio posee una Densidad de Potencia Espectral (DPE) constante para todo el dominio de frecuencias. Esta excitación puede tener origen o en las vibraciones del terreno o en la acción dinámica del viento.

Las vibraciones del suelo tienen un valor de DPE aproximadamente constante para frecuencias bajas, con valores mucho más altos entre los 10Hz y 25Hz debido al tránsito vehicular. En la Fig. 3 puede apreciarse el contenido de frecuencias de una medición de aceleraciones en dirección perpendicular a la Av. Las Heras registrada aproximadamente a las 17:00 horas (horario de alto tránsito de vehículos) en uno de los patios externos de la Facultad de Ingeniería de la UBA adyacente a dicha avenida.

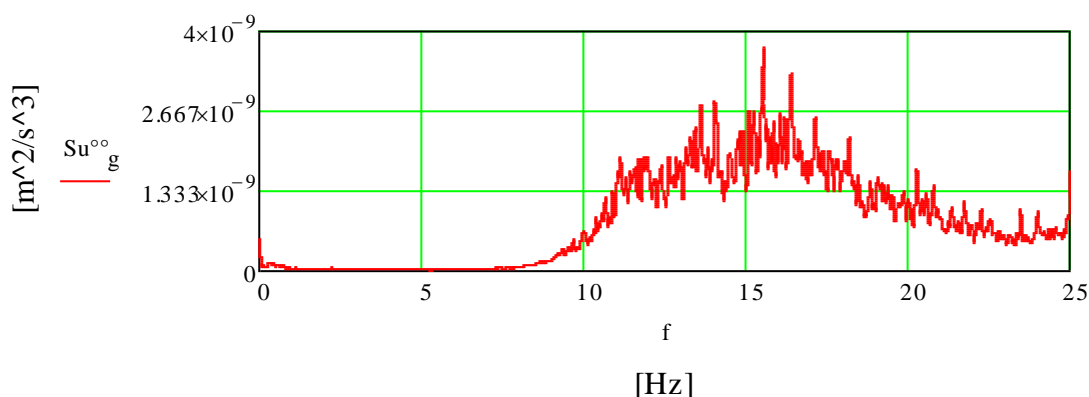


Fig. 3: DPE de aceleraciones en el suelo debidas al tránsito vehicular

Por su parte, la velocidad del viento tiene una densidad de potencia espectral con valores más altos para frecuencias muy bajas, menores de 0.01 Hz. En las Fig. 4 puede apreciarse la DPE de una medición de velocidades de viento realizada el 25 de junio de 2014 a 12 m de altura en una zona relativamente abierta del pulmón de manzana en el barrio de Almagro de la Ciudad de Buenos Aires con una velocidad del viento promedio de 3 s de alrededor de 2 m/s. La Fig. 5 muestra, a su vez, la DPE adimensional perteneciente al Eurocódigo 1, mostrando una notable similitud entre ambas funciones.

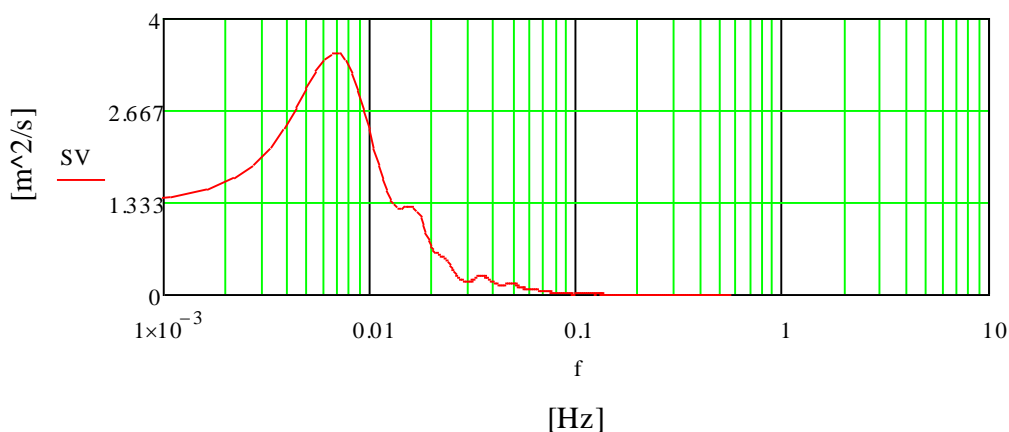


Fig. 4: DPE de velocidad de viento a partir de medición.

L^* factor de excitación sísmico generalizado

m^* masa generalizada

$F^*(t)$ fuerza del viento generalizada

Aplicando la Transformada de Fourier a la $\ddot{w}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{w}(t) + \omega_n^2w(t) = f(t)$ (Ec. 1) y operando, se obtiene la expresión de la aceleración en el dominio de la frecuencia:

$$\tilde{w}(\omega) = -\omega^2\alpha(\omega; \omega_n; \zeta)\tilde{f}(\omega) \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

$\omega = 2\pi f$ frecuencia

$\alpha(\omega; \omega_n; \zeta) = \frac{1}{[\omega_n^2 - \omega^2 + 2\zeta\omega_n i\omega]}$ función de transferencia

$\tilde{f}(\omega) = \begin{cases} \frac{L^*}{m^*}\tilde{u}_g(\omega) & \text{vibración en suelo} \\ \frac{1}{m^*}\tilde{F}^*(\omega) & \text{viento} \end{cases}$ transformada de Fourier de la excitación

Como puede apreciarse en las Fig. 6, Fig. 7 y Fig. 8, la respuesta (\tilde{w}) en el dominio de la frecuencia de un sistema de 1GLG solicitado por una vibración ambiente de tipo Ruido Blanco sigue la forma de la función de transferencia $\alpha(f; f_n; \zeta)$, multiplicada por los valores de la excitación transformada $\tilde{f}(\omega)$.

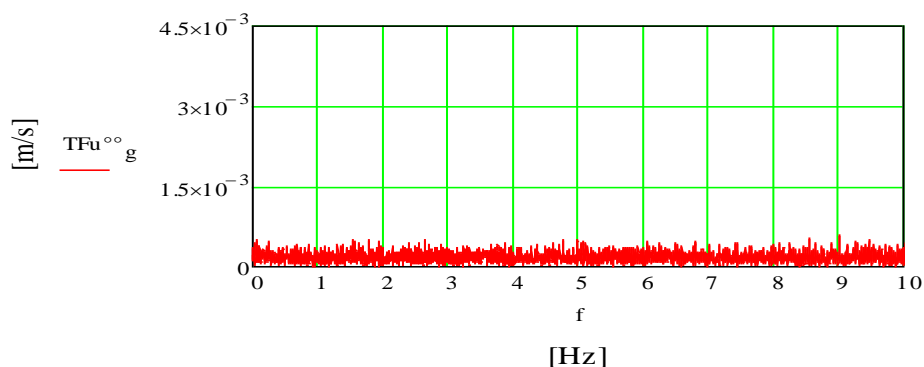


Fig. 6: Transformada de Fourier de la aceleración en el suelo.

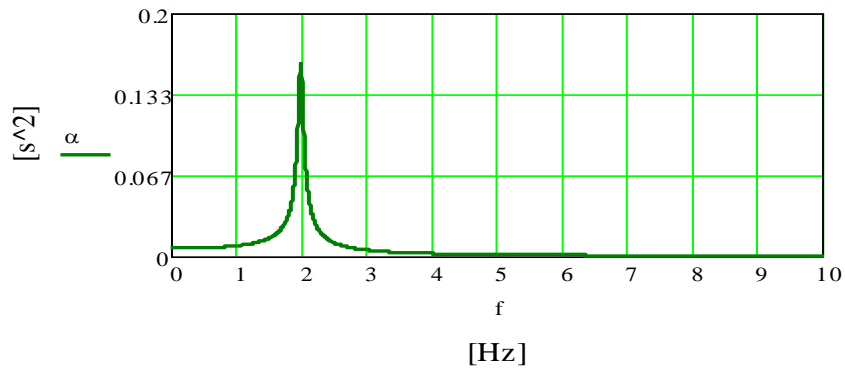


Fig. 7: Módulo de la función de Transferencia para una $f_n=2\text{Hz}$

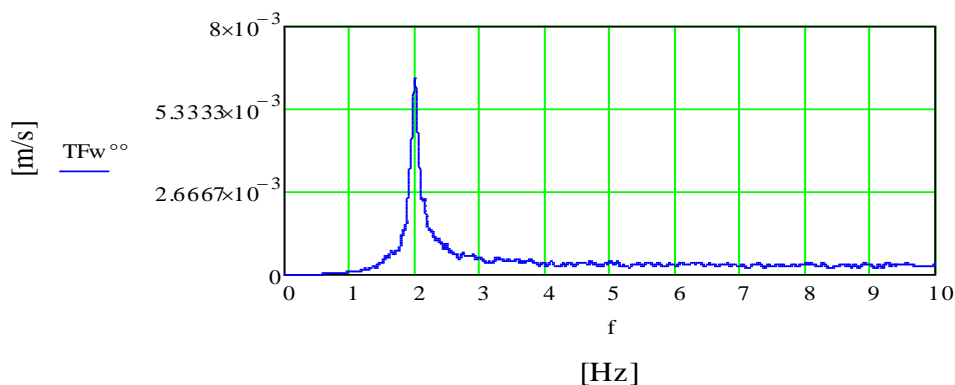


Fig. 8: Módulo de la respuesta (aceleración) del modelo de 1GLG con una $f_n=2\text{Hz}$ en el dominio de la frecuencia

3. DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA NATURAL Y FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO

Previamente a determinar los parámetros de interés del edificio, el registro de aceleraciones (vector de aceleraciones) es editado. El mismo se centra de manera que su media sea cero. Luego es dividido en subregistros, con la precaución que su duración t_s en el tiempo no resulte en una discretización en el dominio de la frecuencia inadecuada, dado que esta es inversamente proporcional a dicha duración ($\Delta f=1/t_s$). Para lograr una mejor representación de la respuesta del edificio, los módulos de los subregistros en el dominio de la frecuencia son promediados [Fig. 9].

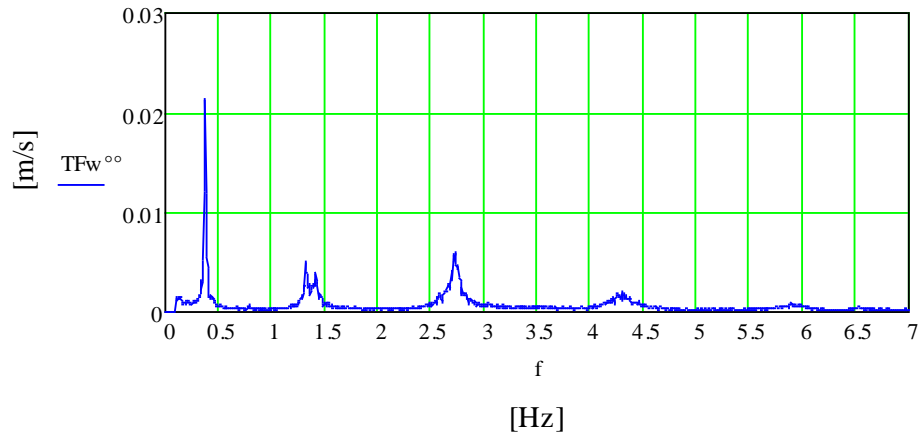


Fig. 9: Respuesta editada de Edificio n°3

En la Fig. 10 puede apreciarse que la respuesta para tres subregistros difiere en amplitud y forma de picos y valores de frecuencia para los máximos, razón por la cual se utiliza el promedio de la respuesta.

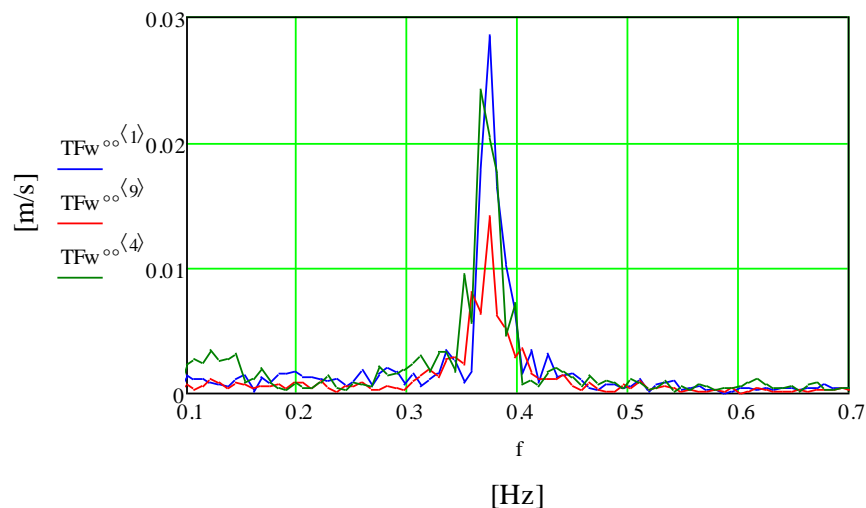


Fig. 10: 3 subregistros de aceleraciones del Edificio n°3.

Obtenida la respuesta promediada se aplica una función de suavizado (Filtro Savitzky-Golay) [4]. Esta función de suavizado reduce el ruido en la señal, transformando los valores de los puntos del registro. La principal ventaja es que tiende a preservar características de la señal inicial tales como máximos y mínimos relativos así como ancho de picos, que normalmente desaparecen con otras técnicas [4]. Esta última ventaja es de gran importancia en la determinación del factor de amortiguamiento.

Una vez editada la señal, se determina la frecuencia natural del edificio como el valor de frecuencia para el cual se da el máximo del módulo de respuesta del edificio en el dominio de la frecuencia.

La metodología numérica que se propone para determinar el Factor de Amortiguamiento ζ , se basa en el ajuste de la respuesta del edificio medido a la respuesta teórica a una excitación de ruido blanco de un sistema 1GLG con igual frecuencia natural.

La respuesta teórica del sistema 1GLG al cual se ajustará la respuesta medida es representada por la $\tilde{w}(\omega) = -\omega^2 \alpha(\omega; \omega_n; \zeta) \tilde{f}(\omega)$ (Ec. 2) antes vista. De la misma se conoce el valor de la frecuencia natural y se desconocen las variables relacionadas al edificio: masa generalizada m^* , factor de excitación sísmico L^* y factor de amortiguamiento ζ que es lo que se desea determinar; y las relacionados a las excitaciones: transformada de la aceleración en el suelo $\tilde{u}_g(\omega)$, transformada de la fuerza generalizada del viento $\tilde{F}^*(\omega)$.

A fin de prescindir de estos valores desconocidos, se analiza la relación del módulo de la transformada de las aceleraciones en función de la frecuencia con el mismo módulo evaluado en la frecuencia natural.

La función de transferencia $\alpha(\omega; \omega_n; \zeta)$ es compleja y se denomina en el análisis:

$$\alpha(\omega; \omega_n; \zeta) = \frac{1}{[\omega_n^2 - \omega^2 + 2\zeta\omega_n i\omega]} = \frac{1}{c + id}$$

donde:

$$c = \omega_n^2 - \omega^2$$

$$d = 2\zeta\omega_n\omega$$

que se denominan c_n y d_n cuando la función es evaluada en la frecuencia natural.

En cuanto a las excitaciones, se aplica la hipótesis adoptada al asumir un proceso de tipo ruido blanco, lo que lleva a la siguiente simplificación:

$$\tilde{u}_g(\omega) \cong \tilde{u}_g(\omega_n) = a + ib \quad \forall \omega \quad \text{en el caso de vibraciones en el suelo}$$

$$\tilde{F}^*(\omega) \cong \tilde{F}^*(\omega_n) = a + ib \quad \forall \omega \quad \text{en el caso de excitación por viento}$$

La transformada de las aceleraciones en el suelo $\tilde{u}_g(\omega)$ y de la fuerza generalizada del viento $\tilde{F}^*(\omega)$ también son valores complejos, que a fines del análisis se los representa de la misma manera pero no tienen relación entre ellos.

Reemplazando las expresiones originales de la $\tilde{w}(\omega) = -\omega^2 \alpha(\omega; \omega_n; \zeta) \tilde{f}(\omega)$ (Ec.

2) por las adoptadas para el análisis, queda la expresión de la transformada de la aceleración:

$$\tilde{w}(\omega) = \begin{cases} -\omega^2 \frac{1}{c + id} \frac{L^*}{m^*} (a + ib) & \text{vibración en suelo} \\ -\omega^2 \frac{1}{c + id} \frac{1}{m^*} (a + ib) & \text{viento} \end{cases}$$

Ambas expresiones similares, pero con distintas constantes. Desarrollando la parte compleja se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{a + ib}{c + id} &= \frac{a + ib}{c + id} \left(\frac{c - id}{c - id} \right) = \frac{ac + i(bc - ad) + bd}{c^2 + d^2} = \frac{1}{c^2 + d^2} (ac + bd + i(bc - ad)) \\ \left| \frac{a + ib}{c + id} \right| &= \frac{1}{c^2 + d^2} \sqrt{(ac + bd)^2 + (bc - ad)^2} = \\ &= \frac{1}{c^2 + d^2} \sqrt{a^2 c^2 + 2acbd + b^2 d^2 + b^2 c^2 - 2acbd + a^2 d^2} \\ &= \frac{1}{c^2 + d^2} \sqrt{c^2(a^2 + b^2) + d^2(a^2 + b^2)} \\ \left| \frac{a + ib}{c + id} \right| &= \frac{1}{c^2 + d^2} \sqrt{(c^2 + d^2)(a^2 + b^2)} \end{aligned}$$

Resultando la expresión del módulo de la transformada de la aceleración:

$$|\tilde{w}(\omega)| = \begin{cases} -\omega^2 \frac{L^*}{m^*} \frac{1}{c^2 + d^2} \sqrt{(c^2 + d^2)(a^2 + b^2)} & \text{vibración en suelo} \\ -\omega^2 \frac{1}{m^*} \frac{1}{c^2 + d^2} \sqrt{(c^2 + d^2)(a^2 + b^2)} & \text{viento} \end{cases}$$

La expresión del módulo evaluado en la frecuencia natural es:

$$|\tilde{w}(\omega_n)| = \begin{cases} -\omega_n^2 \frac{L^*}{m^*} \frac{1}{c_n^2 + d_n^2} \sqrt{(c_n^2 + d_n^2)(a^2 + b^2)} & \text{vibración en suelo} \\ -\omega_n^2 \frac{1}{m^*} \frac{1}{c_n^2 + d_n^2} \sqrt{(c_n^2 + d_n^2)(a^2 + b^2)} & \text{viento} \end{cases}$$

Al dividir $|\tilde{w}(\omega)|$ por $|\tilde{w}(\omega_n)|$ se eliminan las constantes generalizadas del edificio desconocidas $\frac{L^*}{m^*}$ y $1/m^*$, pertenecientes a la expresión de excitación por vibración en suelo y por viento respectivamente, quedando la expresión de la relación igual para

las dos solicitaciones:

$$\frac{|\tilde{w}(\omega)|}{|\tilde{w}(\omega_n)|} = \frac{\omega^2 c_n^2 + d_n^2 \sqrt{(c^2 + d^2)(a^2 + b^2)}}{\omega_n^2 c^2 + d^2 \sqrt{(c_n^2 + d_n^2)(a^2 + b^2)}} = \frac{\omega^2 c_n^2 + d_n^2}{\omega_n^2 c^2 + d^2} \sqrt{\frac{(c^2 + d^2)}{(c_n^2 + d_n^2)}}$$

$$\frac{|\tilde{w}(\omega)|}{|\tilde{w}(\omega_n)|} = \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \sqrt{\frac{c_n^2 + d_n^2}{c^2 + d^2}}$$

Se anulan también los valores desconocidos de a y b asociados a la excitación que solicita al edificio. Reemplazando c ; d ; c_n y d_n por sus valores originales en la última ecuación, resulta:

$$\frac{|\tilde{w}(\omega)|}{|\tilde{w}(\omega_n)|} = \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \sqrt{\frac{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta \omega_n \omega)^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta \omega_n \omega)^2}} = \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \sqrt{\frac{(2\zeta \omega_n^2)^2}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta \omega_n \omega)^2}}$$

$$\frac{|\tilde{w}(\omega)|}{|\tilde{w}(\omega_n)|} = \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \frac{2\zeta \omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta \omega_n \omega)^2}} = \frac{2\zeta \omega^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta \omega_n \omega)^2}}$$

Finalmente, reemplazando $\omega = 2\pi f$ y $\omega_n = 2\pi f_n$ se tiene:

$$R_{\tilde{w}}(f; f_n; \zeta) = \frac{2\zeta f^2}{\sqrt{(f_n^2 - f^2)^2 + (2\zeta f_n f)^2}} \quad (\text{Ec. 3})$$

La función $R_{\tilde{w}}(f; f_n; \zeta)$ provee, para una frecuencia natural y factor de amortiguamiento dados, la relación teórica del módulo de la transformada de la aceleración en función de la frecuencia f respecto del mismo módulo evaluado en la frecuencia natural [Fig. 11], asumiendo que las excitaciones se pueden aproximar a procesos aleatorios de tipo ruido blanco y que la respuesta del edificio es según el primer modo de vibración.

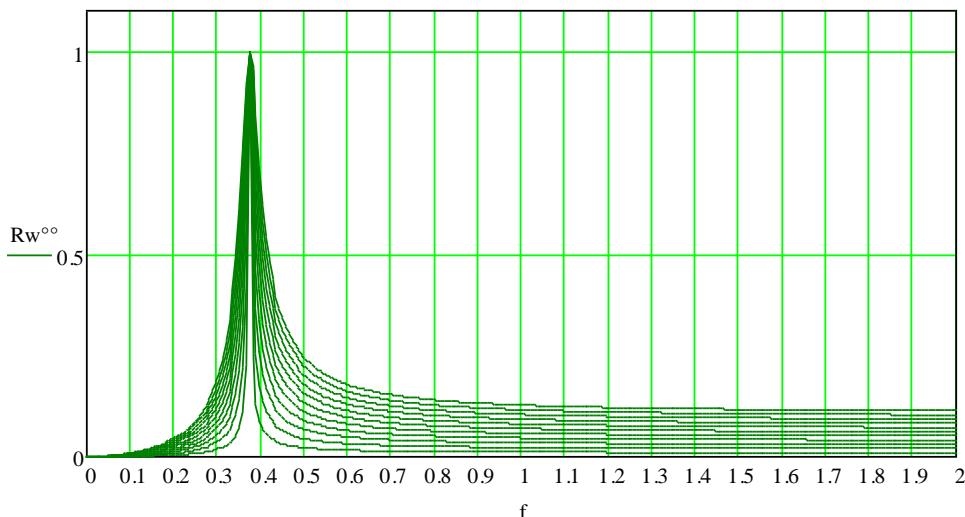


Fig. 11: Función de relación de respuesta teórica, para f_n de Edificio n°3 y 11 curvas de ζ (0.5% a 5.5%)

Hasta aquí, se tiene el registro editado de la respuesta en el dominio de la frecuencia \tilde{w}_{ms} y se conoce la frecuencia natural f_n del edificio medido. Para determinar el factor de amortiguamiento ζ del edificio, se divide el registro editado de la respuesta por el máximo del mismo (correspondiente a la frecuencia natural).

$$R_{\tilde{w}}^{reg}(f) = \frac{\tilde{w}_{ms}}{\text{máx}\{\tilde{w}_{ms}\}}$$

Luego la función teórica $R_{\tilde{w}}(f; f_n; \zeta)$ es evaluada en la frecuencia natural del edificio para ajustarla al vector $R_{\tilde{w}}^{reg}(f)$ de relaciones de respuesta del edificio. Esto se logra a partir del valor del factor de amortiguamiento ζ que minimice el error cuadrático entre los dos vectores, en el intervalo de frecuencias que se adopte.

$$\text{error}(\zeta) = \frac{1}{n_{a,b}} \sum_{f=f_a}^{f_b} [R_{\tilde{w}}^{reg}(f) - R_{\tilde{w}}(f; f_n; \zeta)]^2$$

siendo:

$$n_{a,b} = \frac{(f_b - f_a)}{\Delta f} + 1 \quad \text{cantidad de puntos entre frecuencias límite}$$

$[f_a; f_b]$ intervalo de frecuencias para realizar el ajuste

De esta forma, se determina el Factor de Amortiguamiento ζ , como aquel que mejor ajusta la función teórica al vector de respuesta medida, es decir aquel que minimiza el error cuadrático entre la curva teórica y la medida en el intervalo de frecuencias propuesto [Fig. 12].

$$\zeta = \zeta_c \Rightarrow error(\zeta_c) = \min\{error(\zeta)\}$$

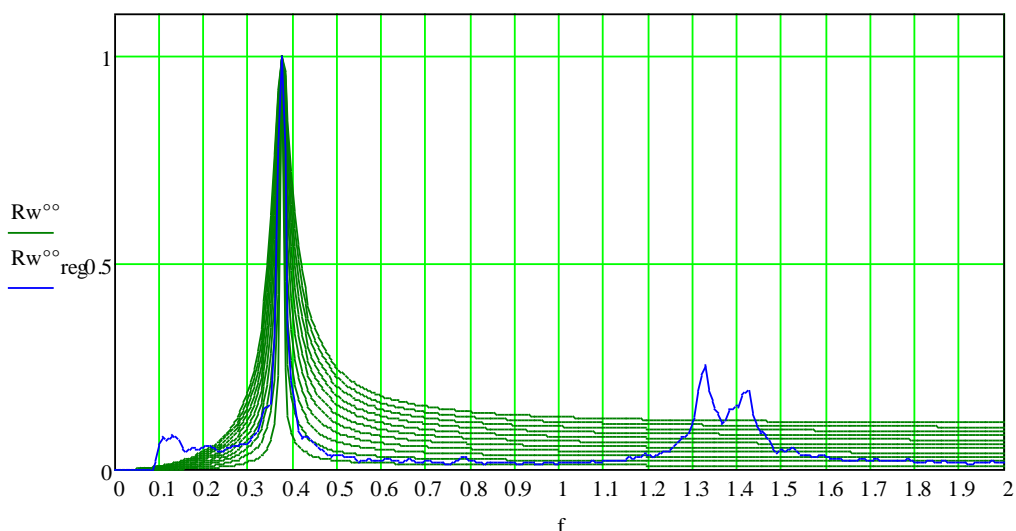


Fig. 12: Ajuste de la función de relación de respuesta del Edificio n°3, con la función de relación de respuesta teórica para su frecuencia natural.

4. Pruebas con modelos computacionales

A fin de evaluar los resultados de la metodología de trabajo propuesta, se simuló la acción de la fuerza de viento sobre edificios que cubren un rango de frecuencias similar al que se puede encontrar en la zona de estudio. Resolviendo la $\tilde{w}(\omega) = -\omega^2 \alpha(\omega; \omega_n; \zeta) \tilde{f}(\omega)$ (Ec. 2) se obtuvo la respuesta de los edificios en el dominio de la frecuencia. Al aplicar la antitransformada rápida de Fourier a esta última, se obtiene la respuesta en el dominio del tiempo, siendo una aproximación de las aceleraciones que se medirán en la campaña de mediciones.

Luego se aplica la edición del registro anteriormente mencionada y la metodología para obtener los parámetros dinámicos de interés. Los resultados son comparados con los valores adoptados para el modelo.

Datos:

$\Delta t = 0.002$ seg Veloc media: 4 m/s
 $N = 524288$ para el registro entero desv= 0.7 m/s
 $T_{reg} = 1048.574$ seg max= 2.782 m/s Velocidad Variable en el tiempo

		fn [Hz]														
		0.95			0.75			0.55			0.45			0.35		
ζ	0.01	0.946	0.010	0.018	0.750	0.010	0.018	0.551	0.010	0.0095	0.450	0.010	0.014	0.347	0.010	0.016
		0.70	1.20	6	0.55	1.00	4	0.35	0.80	4	0.30	0.70	4	0.25	0.70	3
	0.02	0.954	0.020	0.023	0.748	0.020	0.024	0.553	0.020	0.032	0.454	0.020	0.015	0.347	0.020	0.021
		0.70	1.20	10	0.55	1.00	10	0.35	0.80	8	0.30	0.70	8	0.25	0.70	8
	0.03	0.954	0.030	0.027	0.748	0.030	0.033	0.557	0.030	0.039	0.454	0.030	0.031	0.351	0.030	0.023
		0.70	1.20	16	0.55	1.00	16	0.35	0.80	8	0.30	0.70	8	0.25	0.70	9
	0.04	0.961	0.040	0.030	0.748	0.040	0.043	0.557	0.040	0.042	0.458	0.040	0.010	0.351	0.040	0.044
		0.70	1.20	24	0.55	1.00	20	0.35	0.80	16	0.30	0.70	16	0.25	0.70	16
	0.05	0.961	0.050	0.038	0.748	0.050	0.051	0.557	0.055	0.048	0.458	0.045	0.011	0.351	0.045	0.048
		0.70	1.20	24	0.55	1.00	20	0.35	0.80	16	0.30	0.70	16	0.25	0.70	16

RESULTADOS

fnmed [Hz]	ζ_{c1}	ζ_{hpb}
fa [Hz]	fb [Hz]	x1

fn_{med} [Hz]: frecuencia natural calculada
 ζ_{c1} : Factor de Amortiguamiento calculado
 ζ_{hpb} : Factor de Amortiguamiento determinado con método Half-Power Bandwidth
 fa [Hz]: frecuencia inicial de intervalo de ajuste
 fb [Hz]: frecuencia final de intervalo de ajuste
 $x1$: Cantidad de subregistros que se promedian

Tabla 1: Resultados de Modelación Computacional

Como puede apreciarse en la Tabla 1, los resultados obtenidos con la metodología propuesta son muy aproximados a los utilizados para los modelos de 1GLG. Los valores del Factor de Amortiguamiento (ζ) obtenidos por el método propuesto son mejores que los obtenidos por el método Half-Power Bandwidth (HPB) [6] en la mayoría de los casos.

5. Campaña de Medición

La campaña de medición de los edificios se llevó a cabo entre los meses de Abril y Junio del presente año. Para dicha época, la velocidad promedio del viento resulta ser la más baja del año, con una velocidad promedio de $3s \ v=4m/s$ [5].

Los edificios medidos poseen ciertas características comunes: perímetro libre, losas sin vigas, tipología estructural de núcleo de tabique y pórtico [Tabla 2].

Edif	Dir	f_n	T_n	ζ
H [m]		[Hz]	[seg]	[%]
1	N-S	0.309	3.236	1.6%
160	E-O	0.347	2.881	1.7%
2	N-S	0.618	1.618	1.0%
80	E-O	0.694	1.440	2.6%
3	N-S	0.374	2.675	1.1%
161	E-O	0.370	2.702	1.2%
4	N-S	0.618	1.618	1.2%
77	E-O	0.771	1.298	1.5%
5	E-O	0.603	1.659	1.6%
65	N-S	0.855	1.170	1.2%
6	N-S	0.675	1.481	0.9%
51.7	E-O	1.068	0.936	0.9%

Tabla 2: Resultados obtenidos mediante metodología propuesta de los edificios medidos en la campaña de medición.

Edif	Dir	ζ	V	AbsTF(w°)máx	f_a	f_b	N° Subreg	Observaciones
		HPB	[m/s]	[m/s]	[Hz]	[Hz]		
1	N-S	1.5%	6	0.0093	0.28	0.55	5	-
	E-O	2.2%	-	0.0054	0.32	0.42	5	
2	N-S	1.1%	-	0.0060	0.45	1.5	8	Torres vinculadas. Trabajos de terminación.
	E-O	2.3%	-	0.0012	0.6	0.71	10	
3	N-S	1.7%	-	0.0291	0.3	0.7	5	-
	E-O	2.4%	-	0.0241	0.3	0.7	5	
4	N-S	1.1%	-	0.0122	0.45	0.95	10	-
	E-O	0.9%	-	0.0057	0.6	0.95	10	
5	E-O	1.4%	4	0.0135	0.3	1.8	12	-
	N-S	1.0%	-	0.0071	0.75	1	12	
6	N-S	0.98%	1	0.0145	0.63	0.73	5	-
	E-O	0.80%	-	0.0166	0.8	2	5	

Tabla 3: Valores de ζ por método HPB, velocidad promedio de viento, módulo de respuesta, intervalo de ajuste y cantidad de subregistros promediados para los registros de los edificios medidos.

Cabe destacar la similitud de los valores de Factor de Amortiguamiento (ζ) [Tabla 2 y Tabla 3] obtenidos mediante la metodología propuesta y el método HPB [6].

6. Curva de aproximación del Período Natural (T_n) en función de la altura

Se propone como función de aproximación del período natural, una función del tipo:

$$T_n(H) = \alpha H^\beta \quad (\text{Ec. 4})$$

donde α y β son constantes a determinar a partir de la minimización del error que se comete al aproximar con la curva los períodos de los edificios medidos. Para ello, se aplica el método de análisis regresivo [7].

Como resultado del análisis, se obtiene la función:

$$T_n(H) = 0.05H^{0.79} \quad (\text{Ec. 5})$$

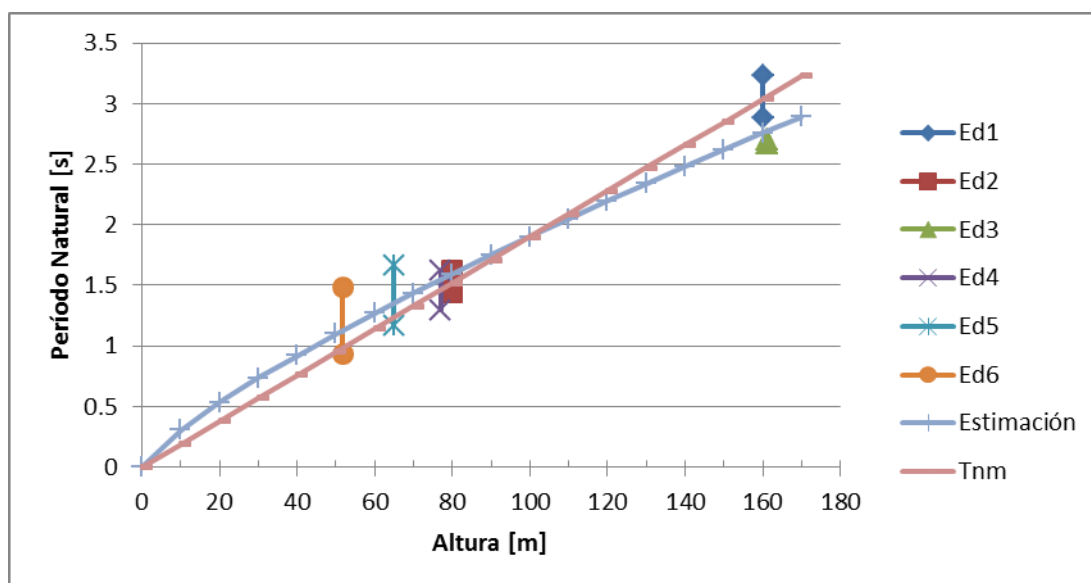


Fig. 13: Curvas de aproximación del período natural y valores medidos en campaña de medición.

Trabajos precedentes [8] han determinado la frecuencia natural de edificios de gran altura en la ciudad de Buenos Aires. En dichos trabajos, se menciona las relaciones extremas entre períodos naturales y altura de los edificios medidos: $0.014\text{s/m} < T_n/H < 0.024\text{s/m}$. La curva media que responde a ésta relación será:

$$T_{nm} = 0.019 \frac{\text{s}}{\text{m}} H \quad (\text{Ec. 6})$$

donde H es la altura del Edificio en metros. En la Fig. 14 se compara ésta curva con la obtenida en el presente estudio $T_n(H) = 0.05H^{0.79}$ (Ec. 5).

El error cuadrático medio obtenido para la curva de la $T_n(H) = 0.05H^{0.79}$ (Ec. 5) es de $e=0.0533s^2$ frente a $e=0.0701s^2$ obtenido con la $T_{nm} = 0.019 \frac{s}{m} H$ (Ec. 6).

7. Conclusiones y Recomendaciones

En el presente trabajo se analizaron dos de las excitaciones dinámicas a la que se encuentran sujetos los edificios de la zona de Puerto Madero: viento y vibraciones en el suelo. Una conclusión importante es que en ambos casos la vibración ambiente puede considerarse como un proceso aleatorio de tipo Ruido Blanco en el rango de frecuencias que contiene los valores de frecuencia natural esperados para los edificios de gran altura.

Otra conclusión importante es que puede aceptarse que los edificios responden principalmente según su primer modo de vibración frente a las excitaciones mencionadas, siendo válidas estas hipótesis para determinar el valor de la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento.

Se propuso una metodología de trabajo que hace uso de las hipótesis anteriormente mencionadas para estimar el Factor de Amortiguamiento (ζ). La misma ajusta una curva de relación de respuesta medida con una curva de relación de respuesta teórica que posee la misma frecuencia natural del edificio que se analiza. En todos los casos analizados, se obtuvieron resultados similares con la metodología propuesta y el método HPB. A su vez, los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango de valores esperados para el rango de muy pequeños desplazamientos.

Por último, se determinó una curva de aproximación del período natural en función de la altura $T_n(H) = 0.05H^{0.79}$ (Ec. 5).

Se recomienda ampliar la base de datos de mediciones para lograr una mejor representación del período natural de los edificios con la altura.

8. Agradecimientos

Se agradece al Ing. Alejandro Lehmann su dedicación y valiosos aportes para facilitar el uso del instrumental de medición del LABDIN.

Se agradece a los señores Alfredo Scotti Vidal y Pablo Barbieri por su valiosa cooperación y tiempo brindado en la campaña de mediciones.

9. Referencias

- 1- NORMA IRAM 4077. Vibraciones de Edificios. Guía para la medición de vibraciones y evaluación de sus efectos sobre los edificios. Junio 1997.
- 2- Bertero, R. D., Lehmann, A., Verri, A., Vaquero, S., Mussat, J.M.(2010). “Vibraciones en edificios cercanos originadas por espectáculos musicales en estadios”, *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural 2010*.
- 3- Diario La Nación. Miércoles 19 de junio de 2002. Información General. <http://www.lanacion.com.ar/406479-temblor-en-buenos-aires>
- 4- Tom O’Haver. A Pragmatic Introduction to Signal Processing. Department of Chemistry and Biochemistry. University of Maryland at College Park. <http://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/Smoothing.html>
- 5- Windfinder. http://es.windfinder.com/windstatistics/buenos_aires
- 6- Chopra, Anil K. (2007). Dynamics of Structures. Theory and application for earthquake engineering. Third Edition. Pág. 83.
- 7- Goel, Rakesh K., Chopra, Anil K. (1998). Period Formulas for Concrete Shear Wall Buildings. *Journal of Structural Engineering*/ April 1998. Pág: 426-433.
- 8- Carmona, J.S., Sisterna, C., Sabbione, N., Magrini, M., Palau, R., Garcia, L., Pincirolí, R. Effects of distant and large magnitude earthquakes on the tallest buildings in Buenos Aires City.