

EFFECTO DE LA INTERACCIÓN HUMANO-ESTRUCTURA EN EL ESTADIO PASCUAL GUERRERO

Ing. ALBERT RICARDO ORTIZ

Ingeniero Civil, Universidad del Valle, Colombia. Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Esp. DANIEL GÓMEZ

Ingeniero Civil, Especialista en Estructuras, Universidad del Valle, Colombia. Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Ph.D. PETER THOMSON

Doctor en Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Minnesota, USA. Director Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

RESUMEN: En este documento se presenta el estudio del efecto de la interacción humano-estructura en el Estadio Olímpico en Cali, Colombia. Para este estudio se realizaron mediciones de aceleraciones en las tribunas sur y occidental para casos de vibración ambiental, vibración libre y vibración forzada durante partidos de fútbol y eventos musicales. Los registros obtenidos se procesaron a través de espectros de potencia y distribuciones tiempo-frecuencia, logrando caracterizar la interacción humano-estructura. Una plataforma fue ensayada en el laboratorio para caracterizar las cargas producidas por una persona al saltar e identificar los efectos que tiene las distintas posturas de una persona sobre el amortiguamiento. Las cargas obtenidas de esta caracterización fueron incluidas en modelos de elementos finitos de las graderías estudiadas para calcular la respuesta de estas estructuras y permitir comparaciones con los datos experimentales. Se encontraron sectores de las tribunas con efectos de acoplamiento entre las cargas producidas por el público y la respuesta de la estructura y se observó un incremento de hasta el 200% en el amortiguamiento del sistema humano-estructura. Se presentan algunas observaciones sobre la provisión en la Norma Colombiana de Construcción para cargas dinámicas producidos por humanos.

ABSTRACT: *This paper presents a study of the effects of human-structure interaction at the Olympic Stadium in Cali, Colombia. Acceleration measurements in the southern and western grandstand were recorded for ambient vibration, free vibration and forced vibration during football matches and musical events. The human-structure interaction was characterized by analyzing the data using the power spectrum and a time-frequency distribution. A laboratory setup of a single stand was tested to characterize the loads produced by a single person jumping and the effects on damping due to different human postures. The loads obtained from this characterization were included in a finite element model of the southern and western grandstands to calculate the structural response of the structures and allow comparisons with experimental data. A coupling effect between the loads applied by the crowd and the structural response was observed as well as an increase of up to*

200% in the damping ratio of the human-structure system. A discussion is presented regarding the provisions in Colombia's building code for dynamic loads due to human activity.

1. INTRODUCCIÓN

La interacción humano/estructura es un tema de investigación que ha tomado mucha fuerza en las últimas dos décadas. La agrupación de grandes cantidades de personas en recintos cerrados o escenarios públicos como estadios o auditorios, para realizar actividades de diferente índole, se ha tornado un tema de mucho interés en la ingeniería estructural debido a que el movimiento de las personas produce vibraciones que generan incomodidad y en algunas ocasiones afectan de manera directa la estructura¹. Un ejemplo de esto ocurrió el 25 de abril de 2008 en el estadio Guillermo Plazas Alcid de Neiva, donde una parte de la tribuna occidental se desplomó en pleno concierto musical, dejando una persona muerta y tres heridas (Figura 1)².



Figura 1. Desplome de una parte de la tribuna occidental del estadio de Neiva durante concierto musical. (Foto: Alejandro Saavedra / Diario del Huila)

La interacción humano-estructura es el estudio de los cambios en las propiedades dinámicas naturales de una estructura ocupada por personas y el estudio de la influencia que sobre éstas pueda ejercer la estructura. Las investigaciones se han enfocado a determinar las frecuencias producidas por las personas y la forma como éstas afectan a la estructura, determinando factores de seguridad que varían según las normas de cada país. En Colombia las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente³ en su título B.4.7 *Efectos dinámicos producidos por carga viva* dice: “Las estructuras expuestas a excitaciones dinámicas producidas por el público tales como: estadios, coliseos, gimnasios, pistas de baile, centros de reunión o similares, deben ser diseñadas de tal manera que tengan frecuencias naturales superiores a 5 Hz para vibraciones verticales”.

Para algunos tipos de estructuras que están sometidas a excitaciones dinámicas por el público, el uso de frecuencias mayores al límite que ordena la norma se traduce en factores de seguridad muy altos y, a su vez, en altos costos de construcción. Debido a esto, la caracterización de las excitaciones producidas por las personas y el conocimiento del efecto de distintos tipos de excitación como las producidas en un partido de fútbol, en un concierto de rock y pop ó durante la realización de aeróbicos, etc. son de interés para la ingeniería estructural⁴.

Las configuraciones estructurales de los nuevos estadios, que tienden a ser mas livianos y flexibles, presentan modos de vibración con frecuencias naturales asociadas en el mismo rango de los valores que pueden ser producidos por las personas en movimiento (p.e. una multitud que experimente movimiento repentino o rítmico). Por otro lado, muchas de las estructuras existentes, como el Estadio Pascual Guerrero, que fueron construidas antes de la existencia de normas de sismo resistencia en el país fueron diseñados de manera conservativa, pero sin tener en cuenta los comportamientos actuales del público en eventos musicales y deportivos. En el caso del Estadio Pascual Guerrero, actualmente es posible observar vibraciones con grandes amplitudes en las graderías sur y norte en los partidos de fútbol de mayor asistencia y, en general, en todas las tribunas cuando el escenario es utilizado para eventos musicales y religiosos.

2. MODELACIÓN DE LA INTERACCIÓN HUMANO-ESTRUCTURA

Las cargas dinámicas producidas por las personas pueden clasificarse de acuerdo a: rangos de frecuencias, factores de impacto, razón de contacto, etc., para representar las características y ser idealizados mediante series que poseen componentes armónicas. El movimiento del público y, por ende, la carga que produce esta condicionado por factores externos. Por ejemplo la música influye en el comportamiento de las personas a través del ritmo que depende en alguna medida del género. En el caso de las “barras” o “torcidas” en los partidos de futbol, la coordinación se hace a través de instrumentos musicales como tambores ó bombos que marcan un compás y sirven para coordinar a las personas.

Una estructura puede representarse como un sistema dinámico en función de los parámetros de masa m , amortiguamiento c , rigidez k y una fuerza externa que excita el sistema $p(t)$. La ecuación de movimiento característica de un sistema de un grado de libertad es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (1)$$

Donde las relaciones (ecuación 2 y 3):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

$$\frac{c}{m} = 2\xi\omega_n \quad (3)$$

Se conocen como la frecuencia natural del sistema y coeficiente de amortiguamiento respectivamente, ξ siendo la razón de amortiguamiento.

Según el tipo de excitación los espectadores se clasifican como *activos* y/o *pasivos*⁵ Cuando las personas se encuentran en un estado estacionario sobre la estructura, ya sea de pie o sentados, se conoce como *Movimiento Pasivo*. Se considera que

esta carga estática hace parte del sistema estructural como un aumento de la masa de la estructura y se expresa así (ecuación 4):

$$(m_{est} + m_{per})\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (4)$$

Donde m_{est} es la masa de la estructura y m_{per} es la masa de las personas.

En este caso la fuerza externa $p(t)$ es igual a cero debido a que no existe una carga dinámica que excite el sistema. Así, la frecuencia natural del sistema y los parámetros de amortiguamiento –ecuación 2 y 3– varían a (ecuación 5 y 6):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_{est} + m_{per}}} \quad (5)$$

$$\frac{c}{m_{est} + m_{per}} = 2\xi\omega_n \quad (6)$$

Cuando las personas se encuentran en movimiento sobre la estructura se conoce como *Movimiento Activo* y las cargas externas deben modelarse en el sistema descrito en la ecuación 1, donde $p(t)$ es la carga activa producida por las personas, en este caso la función de carga dinámica para una carga armónica y la ecuación diferencial que describe el movimiento es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = \alpha W_p \sin(\omega t) \quad (7)$$

Siendo α el factor de carga dinámica, W_p el peso de las personas (o persona) y ω la frecuencia de excitación. La respuesta de la estructura depende de la relación entre la frecuencia de excitación ω , y la frecuencia natural de la estructura ω_n . Si ambas frecuencias son similares durante un tiempo considerable, se produce resonancia lo que provoca un aumento de la respuesta estructural (figura 2)

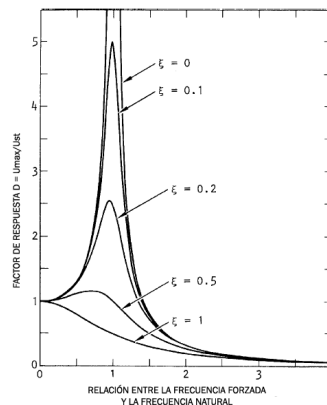


Figura 2. Factor de respuesta en función de la frecuencia de la fuerza externa y la frecuencia natural.

La duración del salto de una persona está relacionada con dos características del movimiento: el factor de impacto y el radio de contacto. El factor de impacto se define como la relación entre la carga producida por la persona al momento de saltar P_{din} y la producida sin estar en movimiento P_{est} . Ver ecuación 8.

$$K_p = \frac{P_{din}}{P_{est}} \quad (8)$$

Algunas veces el factor de impacto se expresa como un porcentaje de la carga estática, este porcentaje se expresa con el coeficiente α en la ecuación 9. La tabla 1 muestra la característica de este factor para diferentes tipos de movimiento.

$$\alpha = K_p - 1 = \frac{P_{din}}{P_{est}} - 1 \quad (9)$$

Tabla 1. Coeficientes de impacto para diferentes tipos de movimiento

Descripción	f [Hz]	α	Referencia
Baile de rock	2.30	0.42	Vannoy v Heins
Baile de rock	3.50	0.36	Rainer v Allen
Baile de rock	3.30	0.14	Matthews et al
Ejercicios de saltos	2.45	1.20	Bachman
Golpear con los pies	3.00	0.20	Allen
Conciertos vigorosos o eventos	1.50	0.25	Allen

Fuente: Estudio estructural de la tribuna occidental del estadio 12 de Octubre de la ciudad de Tulúa⁷.

El radio de contacto α_c se define como la relación entre la duración del tiempo de contacto con la estructura T_s , y el tiempo de salto T , en ecuación 10. De acuerdo a este parámetro, la British Standards Institution citado en Yao (2004)⁴ clasifica el tipo de salto desde alto impacto (valores de 0.25) hasta saltos de bajo impacto (0.66).

$$\alpha_c = \frac{T_s}{T} \quad (10)$$

El factor de impacto K_p se puede expresar como función del radio de contacto⁶ como se muestra en la ecuación 11.

$$K_p = \frac{\pi}{2 \cdot \alpha_c} \quad (11)$$

La carga total producida por personas en conjunto se puede modelar a través de la aplicación de cargas producidas por cada una. Una primera aproximación de la carga inducida se puede expresar como una función sinusoidal, de la forma:

$$p(t) = p_0 \text{sen}(\omega t) \quad (12)$$

En donde P_0 es la componente estática y la función seno es la componente dinámica del salto, con ω como la frecuencia de salto.

Sin embargo, dada las características de la carga, ésta varía en el tiempo sólo cuando está en contacto con la estructura T_s , es decir, es una función periódica de impulsos semi-sinusoidales (ecuación 13):

$$f(t) = \begin{cases} K_p \text{sen}\left(\frac{\pi}{T_s}\right) & \text{para } 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{para } 0 \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (13)$$

En donde T_s y T_{sc} se relacionan de la siguiente manera:

T_s : Tiempo en contacto con la estructura.

T_{sc} : Tiempo en el aire (no hay contacto con la estructura).

Por lo tanto el tiempo que dura el salto esta dado por la ecuación 14 y se obtiene de la figura 3.

$$T = T_s + T_{sc} \quad (14)$$

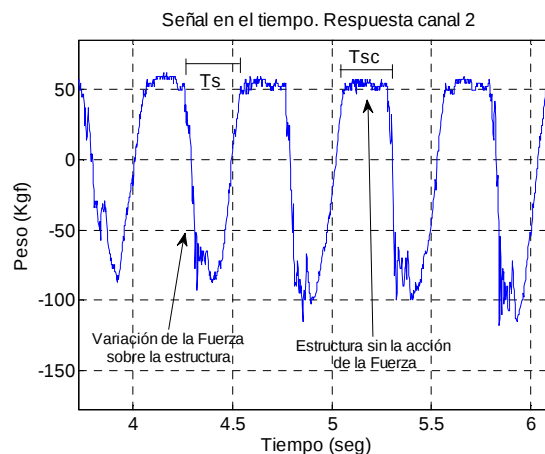


Figura 3. Descripción de fases durante un salto.

De esta forma, la carga dinámica se expresa como (ecuación 15):

$$P(t) = \begin{cases} G \cdot K_p \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{T_s}\right) & \text{para } 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{para } T_s < t \leq T \end{cases} \quad (15)$$

Donde G es el peso de la persona, y K_p es el factor de impacto expresado en las ecuaciones 8 y 11.

3. METODOLOGÍA

Para caracterizar la interacción humano-estructura en el estadio, se realizaron nueve registros de las aceleraciones en las tribunas occidental y sur. Tres de estos registros correspondieron a vibraciones ambientales con la tribuna desocupada para corroborar modos naturales y frecuencias asociadas en la estructura, dos registros correspondían a vibraciones en eventos musicales y cuatro a vibraciones en eventos futbolísticos. Adicionalmente, se instrumentó una plataforma rígida en el laboratorio para realizar pruebas de caracterización de los saltos ejecutados por una persona además de la determinación de la variación del amortiguamiento bajo diferentes condiciones de excitación. Con los resultados de las mediciones en el Estadio y en el Laboratorio se caracterizaron las cargas dinámicas producidas por las personas a nivel individual y en conjunto para posteriormente incluirlas en un modelo de elementos finitos de las tribunas del Estadio en el programa SAP2000 y encontrar la respuesta de la estructura. Los datos se procesaron en el paquete matemático MATLAB⁸ utilizando el Toolbox para procesamiento digital de señales, algoritmos de distribución tiempo-frecuencia usando la transformada en tiempo corto de Fourier (spectrogram) y un Toolbox de análisis en tiempo-frecuencia usando la Transformada de Choi-Williams⁹.

El procedimiento para el procesamiento de los datos consistió en varias etapas: una primera etapa de caracterización de la señal captada (tipo de música, canción o momento específico del partido de fútbol); después se remuestreó a una frecuencia de 15, 20 ó 40 Hz., debido a que el rango de interés de la señal está por debajo de la mitad de esta frecuencia de remuestreo, para luego calcular la densidad espectral de potencia y observar el contenido frecuencial de la señal.

El empleo de las distribuciones tiempo-frecuencia se usa de manera complementaria, puesto que la señal es recortada según la sección de interés y en ella se obtiene el espectro de potencia. En general el espectrograma es usado para comparar diferentes comportamientos del público en un mismo registro y la transformada de Choi Williams para encontrar en tramos muy pequeños de un registro alguna variación de frecuencia, debido a que esta última requiere una alta capacidad computacional pero brinda mejor resolución¹⁰. Un esbozo de las fases del trabajo se muestra en la figura 4.



Figura 4. Descripción del proceso realizado.

4. RESULTADOS

4.1. Registros de vibraciones sin público

Con el fin de determinar las funciones de carga, se realizaron ensayos de vibración forzada en un pórtico central de la tribuna sur. La prueba consistió en registrar la respuesta de la estructura a saltos simultáneos de tres personas, cada una con un peso aproximado de 70 Kg (686 N) durante 30 segundos.

Tabla 2. Descripción de la vibración forzada sobre la tribuna sur

Parámetros	Registro # 1	Registro # 2
Duración saltos, [seg]	34	32
Número de saltos	60	60
Frecuencia calculada de los saltos, [Hz]	1.76	1.87

La respuesta de la estructura se midió en seis puntos del pórtico (base, voladizo inferior y voladizo superior, todos en las direcciones vertical y horizontal). Los saltos iniciaron aproximadamente 40 segundos después de empezar la toma de las aceleraciones, como se muestra en la figura 5.

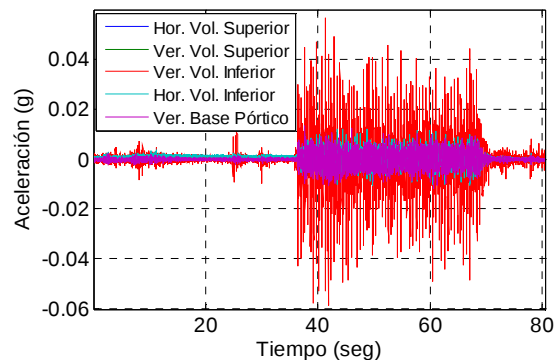


Figura 5. Respuesta de la estructura en el dominio del tiempo.

El comportamiento en el dominio de frecuencias mostró que la frecuencia calculada para los saltos (tabla 2) es similar a la frecuencia obtenida en la respuesta de la estructura, igualmente se observó que el segundo y tercer armónico (3.6 y 5.4 Hz. respectivamente) presentan alta acumulación de energía. (Figura 6).

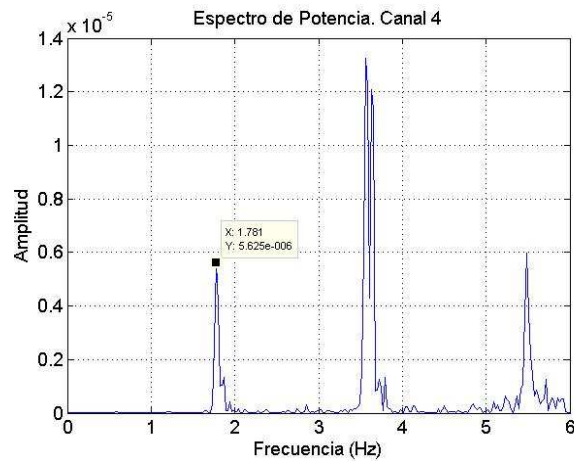


Figura 6. Respuesta de la estructura en el dominio de frecuencia para el registro #1.

La Figura 8 muestra la diferencia en la respuesta de la estructura antes de y durante un salto en un espectrograma que muestra las diferentes frecuencias predominantes con respecto al tiempo.

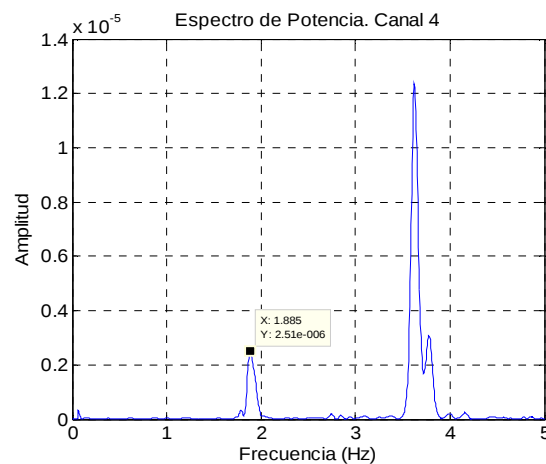


Figura 7. Respuesta de la estructura en el dominio de frecuencia para el registro #2.

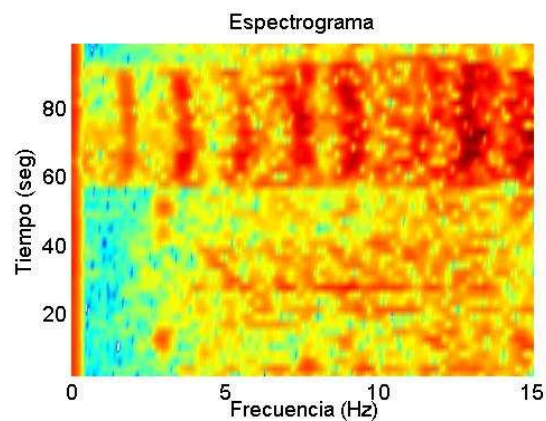


Figura 8. Espectrograma de un registro de vibración forzada.

4.2. Registros de vibraciones en un partido de fútbol

El sábado 1 de diciembre de 2007 durante un partido de fútbol se tomaron registros de las aceleraciones en la tribuna sur con el fin de identificar la respuesta de la estructura a la excitación generada por el público. La tribuna sur –sitio de las mediciones– estuvo completamente llena.

Se monitoreó con video el comportamiento del público para sincronizar el análisis de las señales con los eventos según transcurrieron en el partido, como lo fueron: salida del equipo local, salto sincronizado de las barras, gol, etc. (Figura 9). En el pórtico al extremo occidental de la tribuna sur se realizaron 8 registros de aproximadamente 20 minutos cada uno, a una frecuencia de muestreo de 256 Hz. obteniendo alrededor de dos millones de datos por cada canal.

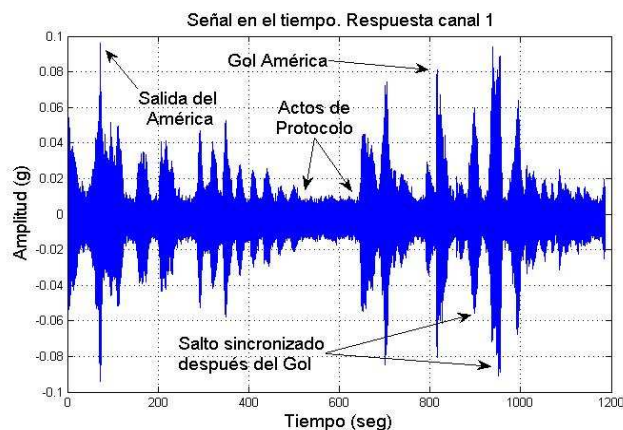


Figura 9. Descripción de aceleraciones durante un partido de fútbol (Tribuna sur).

El salto coordinado del público genera mayores aceleraciones que las generadas en el instante de una jugada u opción de gol, es decir, los instantes de mayor excitación producida por el público se producen segundos después de estas jugadas (Influyen las condiciones subjetivas del partido y del público).

Realizando una gráfica de Aceleración Pico vs. Frecuencia, se obtuvo el comportamiento de la estructura bajo distintas condiciones de carga y en distintos momentos del partido, así, encontramos que los modos de vibración naturales disminuyen hasta en 0.3 Hz cuando la estructura está ocupada.

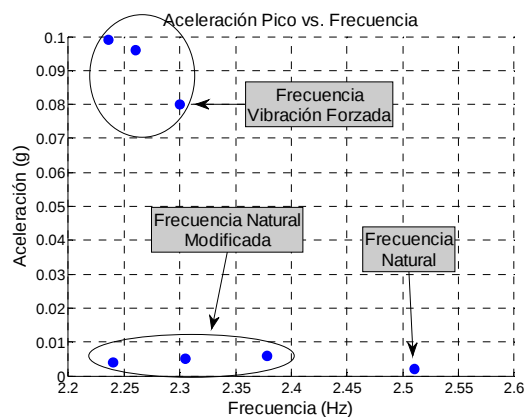


Figura 10. Pico-Aceleración durante un partido de fútbol (Tribuna Sur).

4.3. Registro del salto de una persona en el laboratorio

Los ensayos en el laboratorio consistieron en saltos ejecutados sobre una plataforma rígida (ver Figura 11), para caracterizar el salto individual de las personas. Para esto se efectuaron dos registros, uno para una persona de 85 Kg (833 N) de peso y otro para una persona de 60 Kg (588 N) de peso.

Tabla 3. Descripción de los registros de saltos realizados en laboratorio.

Parámetros	Registro # 1	Registro # 2
Peso persona [Kg]	60	85
Duración saltos, [Seg]	34	32
Número de saltos	60	65
Frecuencia calculada de los saltos, [Hz]	1.765	2.031



Figura 11. Configuración experimental para realizar saltos de vibración forzada en laboratorio.

La fuerza total producida por una persona al saltar es la suma del vector de carga obtenido en cada uno de los apoyos. En la figura 12 se muestra el registro en el tiempo de un canal (apoyo izquierdo) durante el salto de una persona de 85 Kg.

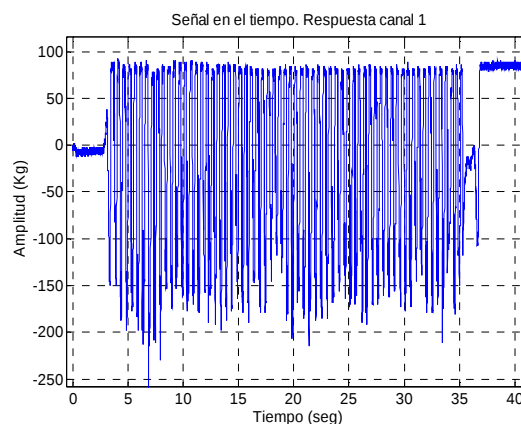


Figura 12. Respuesta en el dominio del tiempo para saltos de una persona de 85Kg.

En la figura 13 se muestra el correspondiente espectro de potencia para la señal de la figura 12.

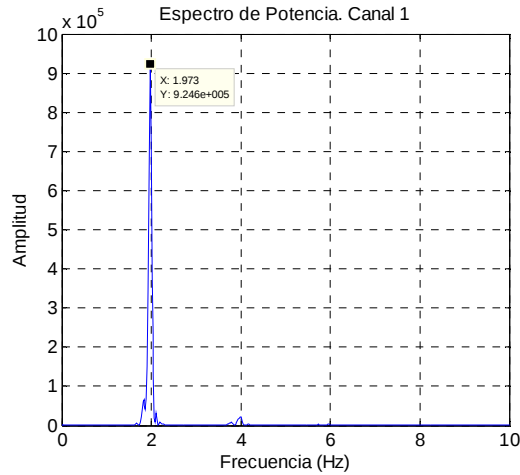


Figura 13. Espectro de potencia para el registro de una persona de 85 Kg saltando.

De acuerdo a los ensayos realizados en laboratorio, los parámetros de contacto y fuerza de impacto obtenidos son:

Tabla 4. Resultados obtenidos de las cargas experimentales en laboratorio.

Característica	Registro # 1	Registro # 2
Peso persona [Kg]	60	85
Frecuencia de salto, [Hz]	1.78	1.99
Periodo de salto, [seg]	0.56	0.50
Tiempo de contacto, [seg]	0.30	0.30
Radio de contacto	0.53	0.60
Clasificación según α_c	Ejercicios rítmicos	Salto de bajo impacto
Factor de impacto	2.97	2.60
Fuerza máxima, [Kg]	178.09	220.92

Así se corrobora la ecuación 15 y se establecen los parámetros para la modelación de las cargas dinámicas en el estadio.

De acuerdo a los parámetros de salto encontrados, la función de carga obtenida se puede expresar mediante Series de Fourier de la siguiente forma⁶:

$$p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (16)$$

Donde $\varpi = \frac{2\pi}{T}$ y T es el periodo de un salto en segundos. Por lo tanto, los coeficientes a_0 , a_n y b_n fueron establecidos y se muestran en la ecuación 17, 18 y 19 respectivamente.

$$a_0 = \frac{4T_s}{\pi T} \quad (17)$$

$$a_n = \frac{T_s}{\pi} \left[-\frac{\cos\left(\pi\left(\frac{T-2nT_s}{T}\right)\right)}{T-2nT_s} - \frac{\cos\left(\pi\left(\frac{T+2nT_s}{T}\right)\right)}{T+2nT_s} + \frac{2T}{T^2 - 4n^2T_s^2} \right] \quad (18)$$

$$b_n = \frac{T_s}{\pi} \left[\frac{\sin\left(\pi\left(\frac{T-2nT_s}{T}\right)\right)}{T-2nT_s} - \frac{\sin\left(\pi\left(\frac{T+2nT_s}{T}\right)\right)}{T+2nT_s} \right] \quad (19)$$

La amplitud de la carga obtenida expresada en Series de Fourier con un coeficiente $n = 10$, se observa en la figura 14 y 15.

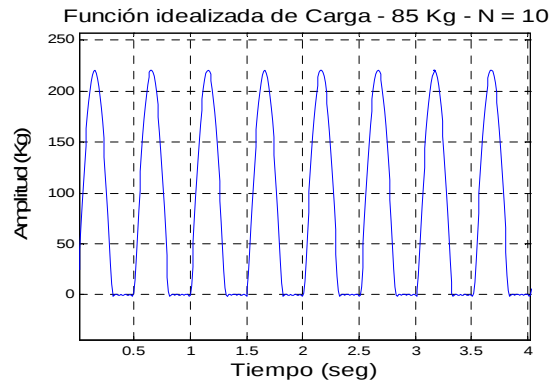


Figura 14: Expresión en series de Fourier del salto de una persona de 85 Kg.

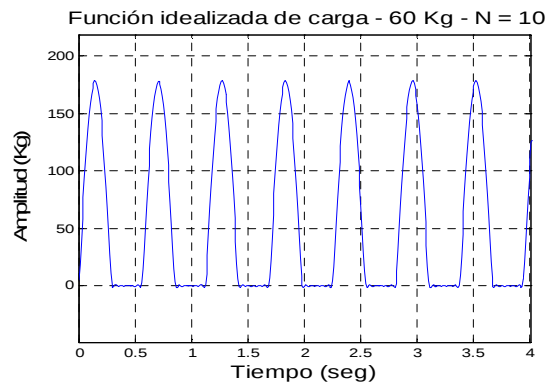


Figura 15. Expresión en series de Fourier del salto de una persona de 60 Kg.

4.4. Registro de vibraciones en un evento musical

La respuesta de la estructura se caracterizó en varios eventos musicales con el fin de obtener la respuesta de la estructura a diferentes generos musicales. Los resultados se agruparon en espectros de potencia tridimensionales para cada género musical. A manera de ejemplo se muestra en la figura 16 los espectros para diferentes grupos y cantantes de salsa.

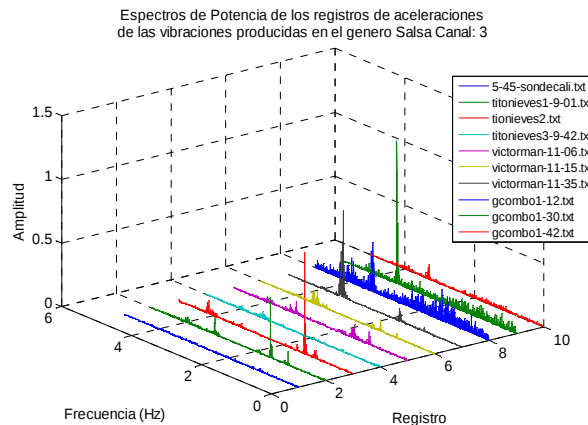


Figura 16. Espectros simultáneos. Género salsa, voladizo vertical 3^{er} piso.

De igual forma, para observar la variación de la respuesta frecuencial de la estructura en función del tiempo, se utilizaron distribuciones tiempo-frecuencia. Los resultados se agruparon en histogramas tal como se muestra en la figura 17. Los resultados se resumen en la tabla 5.

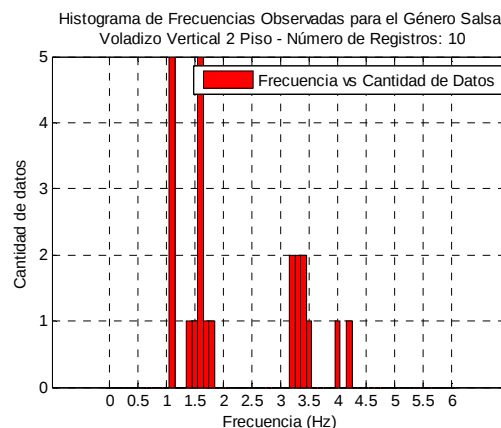


Figura 17. Histograma género Salsa – Voladizo 2° piso.

Tabla 5. Rangos de frecuencias de excitación encontradas durante un concierto para diferentes géneros musicales.

Género	Sitio	Rango de Frecuencia [Hz]
Salsa	Voladizos	1.05 – 1.15
		1.45 – 1.75

		3.15 – 3.45
	Cubierta	1.45 – 1.55 2.95 – 3.45 4.45 – 4.55
	Voladizos	1.05 – 1.25 2.55 – 2.65
	Cubierta	1.05 – 1.25 2.45 – 2.75 Mayores a 4
Merengue	Voladizos	1.15 – 1.25 1.35 – 1.55 1.85 – 1.95 3.45 – 3.65
	Cubierta	1.15 – 1.25 1.35 – 1.45 1.85 – 2.05 3.45 – 3.65 Mayores a 4
	Voladizos	1 a 2 Mayores a 3
	Cubierta	1 a 2 Mayores a 3
Vallenato	Voladizos	1 a 2 Mayores a 3
	Cubierta	1 a 2 Mayores a 3
	Voladizos	1 a 2 Mayores a 3
	Cubierta	1 a 2 Mayores a 3
Reggaetón	Voladizos	1 a 2 Mayores a 3
	Cubierta	1 a 2 Mayores a 3
	Voladizos	1 a 2 Mayores a 3
	Cubierta	1 a 2 Mayores a 3

4.5. Caracterización del amortiguamiento

Para determinar los diferentes valores de amortiguamiento producidos por las personas, se realizaron ensayos de vibración libre sobre la viga mostrada en la figura 10. Los ensayos consistieron en identificar el amortiguamiento de la viga para 5 diferentes combinaciones de carga y son mostrados en la Tabla 6. En cada caso se realizaron entre 3 y 7 impulsos y para calcular los coeficientes de amortiguamiento se utilizó el método de decremento logarítmico¹² (Tabla 7).

Tabla 6. Combinaciones de carga en ensayos de vibración libre.

CASO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
I	Determinación del amortiguamiento al aplicar una carga impulsiva a la viga mediante un golpe de corta duración con un martillo. (Figura 18)	 Figura 18. Caso I.

II	Determinación del amortiguamiento cuando una persona induce un impulso sobre la viga. (Figura 19)	
III	Determinación del amortiguamiento cuando una persona induce un impulso y otras dos personas están sentadas pasivamente sobre la viga. La carga estática es de 155kg (1519N). (Figura 20).	
IV	Determinación del amortiguamiento cuando una persona induce un impulso y otras dos personas están sentadas pasivamente sobre la viga. La carga estática es de 140kg (1372 N).	
V	Determinación del amortiguamiento con un martillo induciendo impulsos y dos personas sentadas.	

Tabla 7. Amortiguamiento para distintas condiciones de carga.

CASO	AMORTIGUAMIENTO		
	MÍN	PROM	MÁX
I	4.54%	5.54%	6.60%
II	6,44%	8,64%	10,96%
III	12,51%	16,62%	17,37%
IV	13,46%	16,94%	20,35%
V	13,69%	15,82%	18,99%

Los resultados se grafican en la figura 21 con la correspondiente desviación para cada uno de los cinco casos.

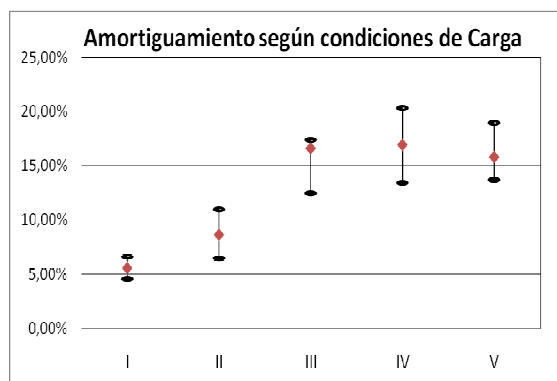


Figura 21. Amortiguamiento para diferentes condiciones de carga.

4.6. Aplicación de cargas en modelos analíticos

Las cargas producidas por las personas fueron modeladas en el programa SAP2000NL. Se utilizó el modelo en FEM del Estadio Olimpico Pascual Guerrero que fue realizado por los ingenieros Zarate, Carrero y Cárdenas¹³. Los vectores de carga se modelaron cada 50cm con el fin de representar las cargas obtenidas por las personas de manera individual. Con la división se obtuvieron 4676 nodos en el segundo piso, lo que representa 4676 vectores de carga o 4676 personas. El modelo subdividido se observa en la figura 22.

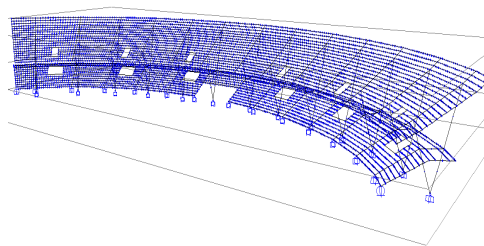


Figura 22. Modelo en FEM de la tribuna sur del Estadio Pascual Guerrero.

Los vectores de carga se aplicaron en el programa a través de funciones de tiempo ('Time History'), colocando a oscilar una carga unitaria. El vector de carga es el encontrado para una persona de 85 Kg. aproximadamente. El desplazamiento máximo encontrado fue de 9cm en el voladizo del extremo oriental de la tribuna, en el dominio de frecuencias los vectores de desplazamiento obtenidos mostraron la misma frecuencia de la carga de entrada. La respuesta de los nodos en los extremos arrojó valores muy distintos para cada sector estudiado de la tribuna (sur-occidental y sur-oriental). La respuesta obtenida en los modelos se resume en la tabla 8.

Tabla 8. .Respuesta de algunos nodos en el modelo analítico.

NODO	DESPLAZAMIENTO [cm]	FRECUENCIA [Hz]
143	9	1.992
126	3.7	1.992
638	3.9	1.992
639	0.4	1.992

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el análisis de la información obtenida se observó un posible efecto de acoplamiento entre la frecuencia de salto del público (2.0 Hz) y un modo de vibración con su frecuencia asociada en el mismo rango de la producida por las personas, este consiste en una disminución de la frecuencia natural de la estructura y un aumento en la frecuencia de salto, los registros obtenidos muestran una frecuencia

de respuesta de 2.2 Hz. El posible acoplamiento es un efecto propio de la interacción humano-estructura que no se detectó en el modelo analítico en SAP2000.

El modo excitado en la tribuna sur corresponde a: “Transversal de toda la tribuna con flexión en el voladizo inferior”, encontrado en el Estudio de vibraciones e identificación del comportamiento dinámico del estadio Pascual Guerrero¹⁴. Este modo presenta una disminución en su frecuencia asociada hasta de 0.3 Hz., valor que se encuentra en el rango descrito por otros estudios realizados en estructuras ocupadas por el público⁵. Llama la atención que es un modo transversal y no vertical, lo cual genera inquietudes sobre lo descrito por la NSR-98 en su título B.4.7.

Dada la forma geométrica de una tribuna, todas las vibraciones producidas por las personas (verticales) van a producir una componente horizontal que en el caso del Estadio Pascual Guerrero se presentan cercanas e incluso mayores a las obtenidas en los registros verticales. En una tribuna en voladizo los modos verticales también son modos horizontales para determinados sectores (Modos locales de voladizos), es decir, que no sólo los modos netamente verticales van a ser los excitados por las personas, sino que otros modos que involucren frecuencias asociadas bajas pueden presentar problemas de vibraciones y resonancia debido a la geometría de la estructura.

Las mediciones realizadas en el desarrollo del concierto del 26 de diciembre de 2006 durante la Feria de Cali permitieron establecer las frecuencias típicas de los géneros musicales Salsa, Merengue, Vallenato y Reggaetón y demostrar que la respuesta de la estructura es diferente en cada uno de estos ritmos, es decir, cada género musical tiene una influencia diferente en el comportamiento dinámico de la estructura.

De igual forma, la NSR-98 en este mismo título expresa que las estructuras sometidas a la acción del público, como estadios, deben estar diseñadas de tal manera que tengan frecuencias naturales verticales por encima de 5Hz. En este estudio se demostró que la respuesta en frecuencia de la estructura ocasionada por los ritmos estudiados están por debajo de este límite, sin embargo, al tener en cuenta los segundos armónicos de las frecuencias identificadas en cada género musical se pueden presentar frecuencias cercanas a este límite^{15,16,17}, tal como se encontró en el género Merengue donde se identificó el segundo armónico en 4.5 Hz sin tener en cuenta que este límite de 5 Hz tiende a disminuir debido a la masa adicional del público sobre la estructura.

El Reggaetón es un género musical nuevo en comparación con los otros géneros musicales analizados. Como se aprecia en la tabla 5, este género musical presenta los resultados más dispersos, por lo que sería errado obtener sólo aquellos rangos en los que coincidió la frecuencia con ambos tipos de análisis. La posible explicación a este fenómeno se debe a que el Reggaetón es un género musical que no maneja una sola frecuencia y que el movimiento del público se realiza de variadas formas, por este motivo, al establecer un rango de las frecuencias excitadas por el público el intervalo sería mucho mayor.

En los registros de saltos caracterizados en laboratorio se encontraron factores de impacto de 2.97 y 2.6 para personas de 85 kg (833 N) y 60 kg (588 N) respectivamente, esto es, que una persona de 85 kg puede alcanzar una carga de impacto al momento de saltar de 252 Kg (2470 N). Las Normas Colombianas de

Diseño y Construcción Sismo Resistente especifican en su Título B que la carga viva de diseño para graderías debe ser de 400 kg/m^2 (4 kPa), sin embargo, se observa en la tribuna sur, que en un partido de fútbol con buena e incluso regular asistencia se ubican hasta cuatro personas por m^2 . Personas con un peso promedio en un salto coordinado pueden producir cargas hasta de 720 kg/m^2 (7.1 kPa) muy por encima de los 400 kg/m^2 exigidos.

Sin bien las cargas producidas por las personas presentan un riesgo para algunos sectores de la estructura, la naturaleza humana de estas cargas no permite que se prolonguen por tanto tiempo. En los registros analizados, el movimiento coordinado de las personas con factores de impacto altos no alcanza una duración mayor a 30 segundos, después de este tiempo, las aceleraciones disminuyen debido a que las personas presentan cansancio. Caso contrario a este movimiento, es el producido en eventos musicales al bailar, debido a que el bajo factor de impacto presente en este movimiento permite que las personas alcancen mayor duración de movimiento coordinado.

En cuanto al amortiguamiento, los resultados de los ensayos experimentales en el laboratorio demostraron que la participación de personas puede incrementar en un 200% el amortiguamiento inicial, es decir, de la estructura sin público. Sin embargo, este valor depende de la masa de la estructura y no es aplicable directamente al estadio. De todas maneras este efecto constituye una ventaja para el comportamiento dinámico de una estructura sometida a las cargas producidas por el público.

Es necesario revisar los criterios expresados en las Normas de Diseño y Construcción Sismorresistente (NSR-98), de tal manera que nuevas versiones permitan tener en cuenta la carga total producida por las personas al momento de saltar, la influencia del movimiento de las personas en modos diferentes a los “verticales”, además de la influencia de segundos y terceros armónicos que se encuentran en el rango de comportamiento natural aceptado por la NSR-98 para este tipo de estructuras.

Agradecimientos

Agradecimientos al Instituto Colombiano para la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas (COLCIENCIAS) por su apoyo en el proyecto: “Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de la interacción humano-estructura en escenarios públicos” (RC-329-2005). De igual forma a la Universidad del Valle por la cofinanciación del proyecto, los recursos materiales y humanos.

Bibliografía

- 1 Ji. T., *Understanding the interaction between people and structures*. The Structural Engineer., 2003, pp. 12-13. Documento en línea: <http://www.istructe.org/technical/files/research/15.pdf>
- 2 EL TIEMPO, *Desplome de una estructura del estadio dejó un muerto y tres heridos en concierto en Neiva*. Disponible en: http://www.eltiempo.com/nacion/2008-04-26/ARTICULO-WEB-NOTA_INTERIOR-4124951.html (último acceso: Abril 27, 2008)
- 3 AIS., Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., *Norma de Diseño y Construcción Sismo Resistente de 1998, NSR-98.*, 1997.

- 4** Yao, S., Reynolds, P., Wright, J., Pavic, A.,. *Experimental study of human-induced dynamic forces due to bouncing on a perceptibly moving structure*. National Research Council Canada (NRC Canada), 2004, pp. 1109-1118.
- 5** H H Sim, J., *Human-structure interaction in cantilever grandstands*. Tesis presentada a la University of Oxford, para optar al grado de Doctor of Philosophy. 2006
- 6** Gómez, D., *Vibraciones de piso inducidas por actividades humanas: comportamiento y modelación*. Documento del curso Dinámica Estructural, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle. Cali, Colombia, 2001.
- 7** Cardenas, Harold., Thomson, Peter., Rivera, Jaime. Estudio estructural de la tribuna occidental del estadio 12 de Octubre de la ciudad de Tuluá. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática (EICG). Universidad del Valle.
- 8** The MathWorks, Inc. *Signal processing toolbox for use with MATLAB*. The MathWorks, Inc., 2003.
- 9** Auger, F., Flandrin, P., Gonçalves, P., Lemoine, O. *Time-Frequency toolbox for use with Matlab*. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1996.
- 10** Tischer H., Marulanda J., Thomson P. *Comparación de tres transformadas para distribuciones tiempo-frecuencia por medio de su aplicación a registros de vibraciones ambientales*. Revista Ingeniería y Competitividad 9 (2), 21-32., 2007.
- 11** Ortiz A., Marulanda J., Thomson P. *Caracterización del comportamiento dinámico de la tribuna occidental del estadio Pascual Guerrero durante un evento musical*. Revista Ingeniería y Competitividad 9 (2), 49-58., 2007.
- 12** Chopra A. K. *dynamics of structures: Theory and applications to earthquake Engineering*. Prentice-Hall, 1985.
- 13** Zarate, B., Carrero, J., Cárdenas, H., *Estudio de Vibraciones e Identificación del Comportamiento Dinámico del Estadio Olímpico Pascual Guerrero*. Santiago de Cali. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática Universidad del Valle (EICG). 2005.
- 14** Reynolds, P., Pavic, A., Yao, S., Sachse, R. *The effect of people jumping on a flexible structure*. Vibration Engineering Research. Departament of Civil and Structural Engineering. The University of Sheffield, 2002.
- 15** Reynolds, P., Pavic, A., Ibrahim, Z. *Changes of modal propoerties of a stadium structure occupied by a crowd*. Vibration Engineering Research. Departament of Civil and Structural Engineering. The University of Sheffield, 2003.
- 16** Reynolds, P., Pavic, A., Mohanty, P. *Statistical analysis of online response data of a stadium structure*. Vibration Engineering Research. Departament of Civil and Structural Engineering. The University of Sheffield, 2004a.
- 17** Reynolds, P., Pavic, A., Willford, M. *Prediction and Measurement of stadia dynamic properties*. Vibration Engineering Research. Departament of Civil and Structural Engineering. The University of Sheffield, 2004b.