

Estudio de las características dinámicas de estadios de fútbol

Ricardo Barrios D'Ambra, Universidad del Nordeste, Argentina

Ignacio Iturrioz, Universidade de Passo Fundo, Brasil

Graciela Doz, Universidade de Brasília, Brasil

Resumen:

En los últimos años se han presentado diversos problemas en estadios de fútbol, tanto desde el punto de vista de la seguridad estructural como también relacionados con el confort del público. Evidentemente, en las últimas décadas han acontecido grandes cambios en el comportamiento del público durante partidos de fútbol. Por otro lado, los estadios también han sido utilizados para otros fines, como por ejemplo para shows musicales. Es clara entonces la complejidad de la excitación a que son sometidas este tipo de estructuras. De esta manera, los criterios con que fueron proyectadas estas estructuras precisan ser revisados a la luz de las nuevas solicitaciones actuantes.

En este trabajo se analizan los efectos dinámicos producidos por el público en diversos estadios con el objetivo de determinar las características y los problemas típicos comunes a este tipo de estructuras, a fin de establecer criterios que contribuyan para el diseño y cálculo estructural.

Introducción

Hasta unos 50 años atrás, el dimensionamiento de la mayoría de las estructuras era realizado teniendo en cuenta las condiciones de equilibrio estático. La principal preocupación del ingeniero radicaba en dimensionar las estructuras para que resistieran con un cierto margen de seguridad las tensiones generadas por las cargas. Ya en las últimas décadas el ingeniero ha debido enfrentar el problema de considerar las fuerzas dinámicas en el análisis de estructuras, lo cual implica el uso de modelos de cálculo más complejos y criterios de dimensionamiento que tengan en cuenta nuevos parámetros.

Entre los factores que influyeron para que esta realidad se produjera se pueden mencionar:

- el uso de nuevos materiales y técnicas constructivas, los cuales permiten soluciones estructurales con grandes luces, y consiguientemente gran flexibilidad y bajas frecuencias naturales de vibración;
- la disminución del amortiguamiento estructural, producto de la evolución tecnológica en la construcción, como por ejemplo el uso del hormigón pretensado en lugar de hormigón armado, el uso de uniones más rígidas en estructuras de acero, etc.;
- el cambio en la naturaleza e intensidad de las cargas, etc.

Entre los problemas nuevos que se presentan para los ingenieros está el estudio del comportamiento estructural de estadios o auditorios sometidos a cargas producidas por un gran número de personas en movimiento.

Por otro lado, un gran número de estas estructuras han sido construidas hace más de 20 años, sin el auxilio de técnicas como las disponibles ahora para evaluar las características de un tipo de acción tan particular como es la acción de personas en movimiento. También es importante destacar que muchas de estas estructuras han sufrido daño con el paso del tiempo, perdiendo su rigidez original y resultando más vulnerables a la acción de cargas dinámicas.

En este trabajo se realiza un estudio de las cargas producidas por personas en movimiento; posteriormente se analizan los principales problemas detectados en estadios y, finalmente, se realiza un estudio numérico de un estadio de fútbol localizado en la provincia de Corrientes, Argentina.

Cargas producidas por personas en movimiento

Entre las principales actividades que producen vibraciones en estadios de fútbol se pueden mencionar:

- aplausos rítmicos de la audiencia sentada, al compás de la música o pidiendo repeticiones;
- aplausos rítmicos con simultáneos rebotes de la audiencia de pie entre las filas de asientos fijos;
- oscilaciones laterales rítmicas del cuerpo de la audiencia cantando de pie o sentada;
- saltar;
- bailar; etc.

Las cargas producidas por personas realizando estas actividades pueden ser descriptas matemáticamente por una serie de Fourier propuesta en el Documento CEB 209 (1991):

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^n G \cdot \alpha_i \cdot \text{sen}(2\pi f_p t - \phi_i) \quad (1)$$

donde:

- G: peso de la persona (generalmente se considera $G = 800 \text{ N}$);
- α_i : coeficiente de Fourier de la i -ésima armónica;
- $G \cdot \alpha_i$: amplitud de fuerza de la i -ésima armónica;
- f_p : tasa de actividad;
- ϕ_i : retraso de fase de la i -ésima armónica relativa a la primera;
- i : número de la i -ésima armónica;
- n : número total de armónicas contribuyentes.

En Tabla 1 se reproducen los coeficientes α_i y ángulos de fases ϕ_i , obtenidos experimentalmente para las actividades mencionadas.

TIPOS REPRESENTATIVOS DE ACTIVIDADES	TASA DE ACTIVIDAD	FRECUENCIA [Hz]	COEFICIENTES DE FOURIER Y RETARDO DE FASE						DENSIDAD DE DISEÑO [PERSONAS/m ²]
			α_1	ϕ_1	α_2	ϕ_2	α_3	ϕ_3	
Saltar	normal	2.0	1.8		1.3		0.7		~ 0.25 (en casos extremos hasta 0.5) $\phi_2 = \phi_3 = \pi(1 - f_h t_p)$
		3.0	1.7		1.1		0.5		
	altos	2.0	1.9		1.6		1.1		
		3.0	1.8		1.3		0.8		
Bailar		2.0 a 3.0	0.5		0.15		0.1	~4 (en casos extremos hasta 6)	
Aplaudir de pie con saltos.		1.6	0.17		0.10		0.04	~4 hasta ~6	
		2.4	0.38		0.12		0.02	~2 - 3	
Aplaudir	normal	1.6	0.024		0.010		0.009	~ 2 - 3	
		2.4	0.047		0.024		0.015		
	intenso	2.0	0.170		0.047		0.037		
Oscilación lateral del cuerpo	sentado	0.6	$\alpha_{0.7} = 0.4$		--		--	~ 3 - 4	
	parado	0.6	$\alpha_{0.7} = 0.5$		--		--		

Tabla 1: Valores para los coeficientes de la expresión (1) (Documento 209 del CEB 1991)

Las excitaciones verticales típicas para el caso de estadios o auditorios son las producidas por las actividades clasificadas en la tabla 1 como *aplaudir* y *aplaudir de pie con saltos*. La tasa relevante de actividad es de 1.5 a 3.0 Hz.

Para las fuerzas dinámicas horizontales, puede tomarse como representativa la actividad *oscilación lateral del cuerpo*. Pueden ser relevantes los ritmos bajos con frecuencia de batido entre 0.8 y 1.4 Hz, tomándose la tasa de la oscilación lateral del cuerpo igual a un promedio de la frecuencia de batido, entre 0.4 y 0.7 Hz.

Con base en estas consideraciones el Documento 209 del CEB (1991) establece los siguientes valores de carga por persona y frecuencias rítmicas de actividad.

	VALOR EFICAZ DE CARGA (N)	FRECUENCIA RÍTMICA FUNDAMENTAL (HZ)
Carga Vertical	320	1.5 a 3.0
Carga Horizontal	400	0.4 a 0.7

Tabla 2: Cargas inducidas por espectadores según Documento CEB 209 -(1991)

La carga vertical se refiere a un movimiento rítmico de personas de pie, aplaudiendo y balanceándose verticalmente, en tanto que la horizontal representa el movimiento de personas balanceándose lateralmente.

Considerando la ecuación (1) es posible establecer algunas recomendaciones para las frecuencias fundamentales en estadios y auditorios. Estas recomendaciones son útiles para evaluar si la estructura analizada puede presentar problemas debido a la acción de personas en movimiento. Así, el Documento CEB 209 sugiere los valores indicados en Tabla 3 para las frecuencias fundamentales:

TIPO DE ESTRUCTURA Y ACTIVIDAD	FRECUENCIA FUNDAMENTAL
Pisos de salas de concierto y teatros con asientos fijos con conciertos de música clásica o conciertos de música "soft-pop" solamente	$f_1 > 3.4 \text{ Hz}$
Pisos de salas de concierto y teatros con asientos fijos y estructuras de tribunas con conciertos de música "hard pop"	$f_1 > 6.5 \text{ Hz}$
Estructuras de tribunas con asientos fijos y audiencia cantando y oscilando lateralmente.	$f_1 \text{ horiz} > 2.5$

Tabla 3: Límite inferior de frecuencias fundamentales recomendadas para el diseño según el Documento 209 del CEB (1991)

Para un análisis más riguroso, es recomendable calcular la estructura considerando la fuerza normalizada representativa y comparar los resultados con los valores tolerables.

También el Documento 209 del CEB (1991) establece valores máximos tolerables de aceleraciones, los cuales se resumen en Tabla 4.

DESTINO DE LA ESTRUCTURA	MAXIMA ACELERACION TOLERABLE	OBSERVACIONES
Salas de deportes	5%.g	Como máximo 10%.g
Salas de bailes	5%.g	30%.g conciertos de rock (atmósfera de euforia) 2%.g para personas sentadas
Salas de concierto y teatros con música clásica y audiencia aplaudiendo	~ 1%.g	5%.g para conciertos de música "pop"
Tribunas con oscilaciones horizontales de los espectadores	½ de la vertical	

Tabla 4: Máximos valores de aceleración tolerables (comienzo de incomodidad), según Documento 209 CEB (1991)

En Fig. 1 se observa el espectro de la función de carga inducido por los espectadores. Puede observarse que en la definición de la carga no solo es importante la primera armónica sino también las armónicas superiores.

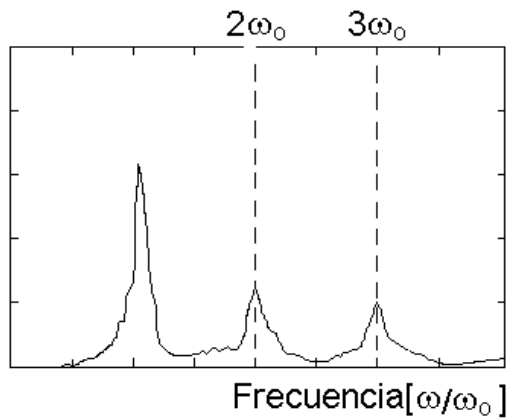


Fig. A: Espectro de carga inducido por espectadores según Documento CEB 209 (1991)

Por otro lado, pueden mencionarse también los estudios llevados a cabo en la COPPE por Batista et al (1991) y los realizados por Prato y Larson (1992). Los primeros consistieron en ensayos experimentales realizados en laboratorio, con una o más personas en actividad sobre componentes estructurales con rigidez equivalente a la de las losas de los peldaños de las tribunas. Ya Prato y Larson (1992) realizaron ensayos dinámicos sobre una estructura premoldeada del estadio de San Lorenzo de Almagro (Argentina) para determinar el factor de amplificación dinámico máximo (K_p) de la estructura, expresado como el cociente entre el desplazamiento dinámico máximo y el desplazamiento estático debido a la misma carga. Los resultados obtenidos en ambas investigaciones se resumen en Tabla 5.

ACTIVIDAD HUMANA	TIPO	K_p	FRECUENCIAS DE EXCITACION (HZ)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE EXCITACION (HZ)
Saltos	Hinchada organizada en cancha San Lorenzo de Almagro (Prato y Larson)	1.96	2.35	$f_p=2.35$
	Hinchada organizada en partidos de fútbol (COPPE)	3.00	2.0 / 4.0 / 6.0	$f_p= 2.00$
	Platea siguiendo a animadores en espectáculos (COPPE)	2.75	2.25 / 4.5 / 6.75	$f_p= 2.25$
Danzas	“Medium Rock” (COPPE)	2.35	2.4 / 4.8	$f_p= 2.40$
	“Light Rock” (COPPE)	2.10	1.45 / 2.9 / 5.8	$f_p= 2.90$

Tabla 5: Factores de impacto, K_p , y frecuencias fundamentales de excitación, f_p .

A partir de los estudios de Prato y Larson (1992) fue posible definir una función de carga producida por una muchedumbre (Fig. 2).

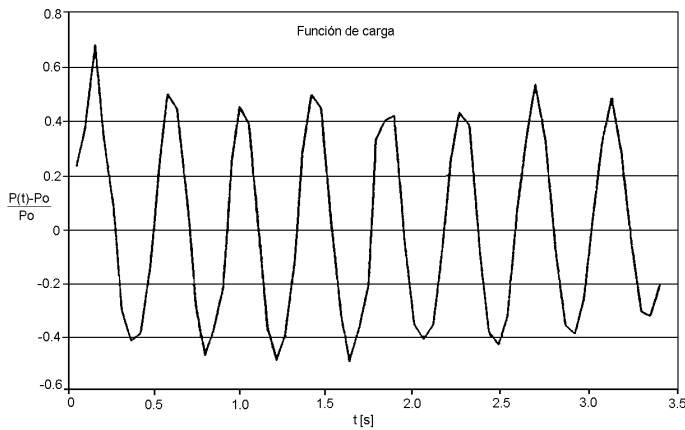


Fig. 2: Excitación en función del tiempo definida experimentalmente por Prato & Larson (1992)

Analizando los valores presentados en Fig. 2 por Prato y Larson (1992), es posible notar que resultan similares a los recomendados por el Documento 209 del CEB (1991).

Evidentemente, la definición de la excitación dinámica que actúa sobre una estructura es uno de los problemas más complejos en el análisis de estructuras que, como los estadios de fútbol, se encuentran sometidas a cargas dinámicas.

Principales problemas detectados en estadios de fútbol

En los últimos tiempos, varios son los estadios de fútbol que han presentado diversos problemas, algunos de los cuales se detallan a continuación.

Estadio Maracanã (Rio de Janeiro - Brasil)

El estadio de Maracanã, en Río de Janeiro - Brasil, diseñado en los años 1948 - 1949 y construido en el año 1950 con una capacidad para 150.000 personas presentó inconvenientes con respecto al confort humano debido a las aceleraciones verticales de corta duración (menos de 5 minutos), como las experimentadas por la parte del público en reposo, producidas por hinchadas organizadas durante los festejos de gol (Batista et al. 1991).

Debido al efecto dinámico de las cargas, se verificaron grandes amplitudes en las oscilaciones de las aceleraciones verticales y de los momentos flectores que determinaron la aparición de fisuras en el encuentro entre las columnas de los pórticos y las tribunas.

Estadio Grêmio (Porto Alegre - Brasil)

El estadio Grêmio de Porto Alegre, construido en hormigón armado con un voladizo de 13 metros de longitud presentó problemas de confort dinámico con predominancia horizontal (Rubio, 1992 y Rios, 1994). Los cuatro primeros modos de vibración de la estructura se encontraron dentro de la faja de frecuencias consideradas de riesgo, esto es, son frecuencias fácilmente excitadas por personas en actividad aeróbica o simplemente en movimiento.

Estadio de Morumbí (São Paulo - Brasil)

Las estructuras de las tribunas del estadio Cícero Pompeu de Toledo fueron construidas en hormigón armado y están formadas por sectores separados por juntas de dilatación radiales. Los sectores están compuestos por columnas, (72 en todo el estadio) distantes aproximadamente 10 m. entre sí, de las cuales se sustentan las estructuras en voladizo que constituyen las plateas numeradas superiores (anillo central) y las tribunas populares (anillo superior). Las primeras tienen una longitud en

voladizo libre de 14 m., posicionada en el lado próximo al terreno de juego, mientras que las segundas poseen dos voladizos, uno interior de 13 m. y otro exterior de 12 m.

Este estadio presentó problemas de vibraciones inadmisibles en cuanto al confort humano, principalmente en el anillo superior tanto en la dirección tangencial como en la vertical (Juliani et al., 1996).

Análisis numérico de la estructura del estadio Huracán (Corrientes - Argentina)

Este estadio fue construido en varias etapas y presenta distintos tipos y formas estructurales. El sector denominado Tribuna Este (Fig. 3) está constituido por columnas de hormigón armado premoldeadas y vigas principales y gradas de hormigón pretensado. Presenta una disposición geométrica y estructural simple. Consta además de una parte inferior construida en hormigón armado realizada in situ.

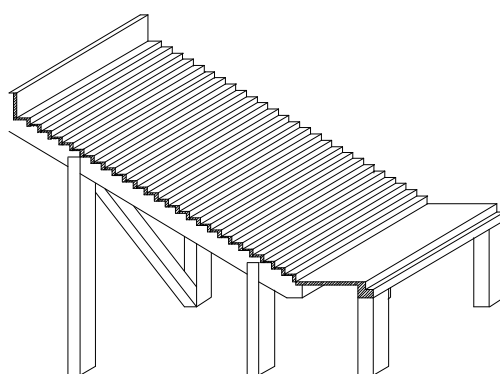


Fig. 3: Esquema del estadio Huracán (Corrientes - Argentina)

El análisis numérico fue realizado con el programa Ansys, considerando 2 alternativas de discretización de la estructura:

- pórtico plano formado por elementos de barras, y
- pórtico tridimensional formado por elemento de barras.

El primero y segundo modo de vibración de la estructura modelada como pórtico plano se grafican en Fig. 4.

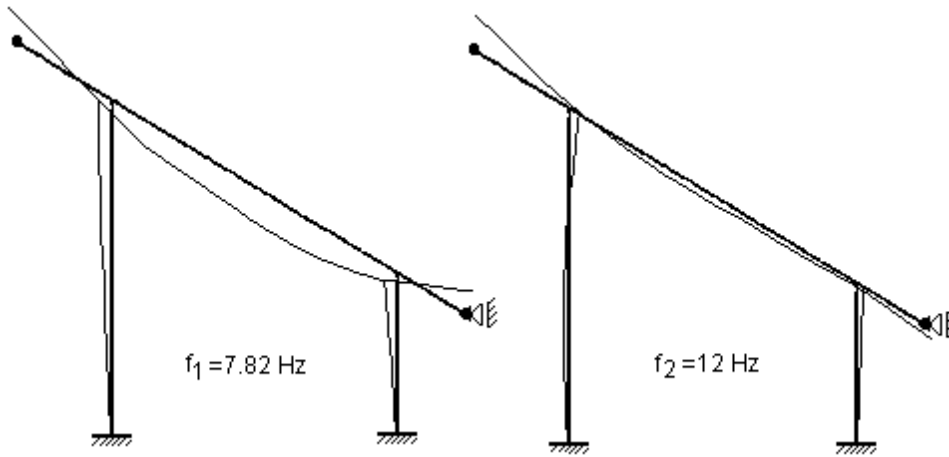


Fig. 4: Modos naturales de vibración del estadio de Huracán para la alternativa 1.

Ya la Fig. 5 muestra un diagrama de la estructura discretizada como pórtico espacial, mientras que las Figs. 6 y 7 presentan la forma del primer y tercer modo de vibración (las flechas indican el sentido de desplazamiento del modo).

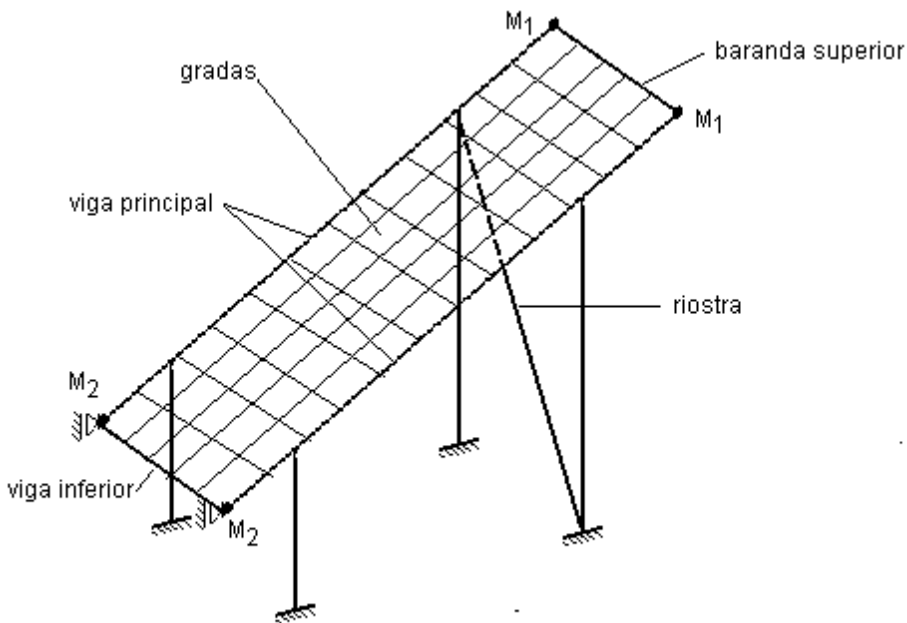


Fig. 5: Esquema de la discretización realizada considerando pórtico espacial

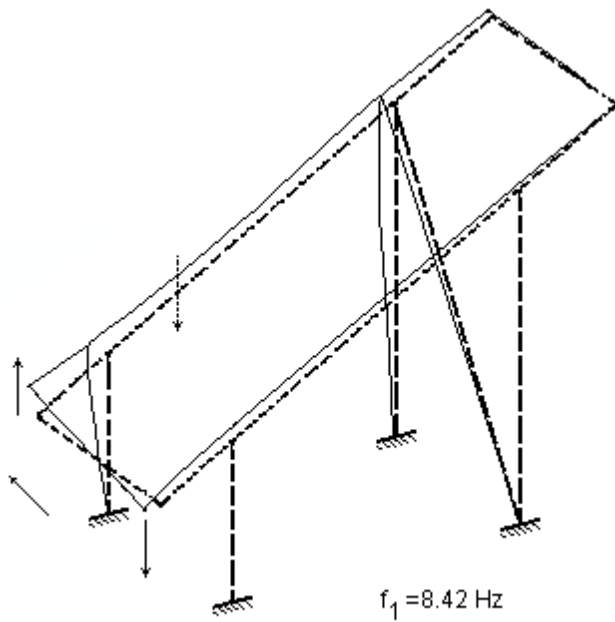


Fig. 6: Primer modo natural de vibración

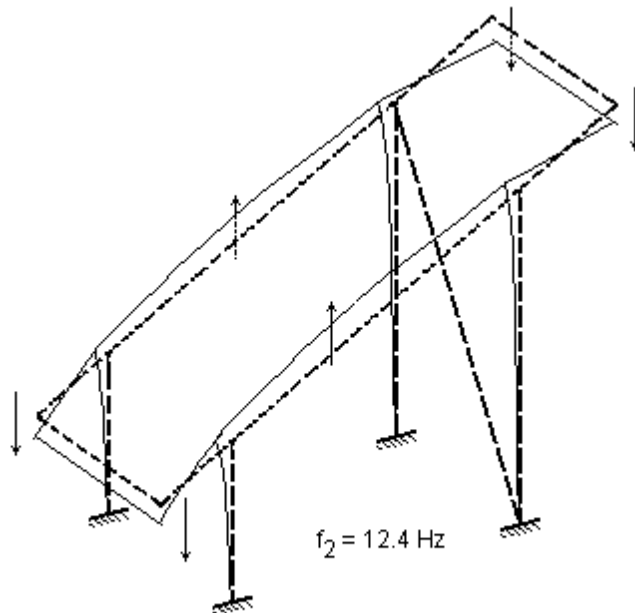


Fig. 7: Tercer modo natural de vibración

Nótese que el primer modo presenta desplazamientos normales al plano de los pórticos, mientras que el tercer modo tiene desplazamientos en el plano de los pórticos. El segundo modo de vibración, de frecuencia 8.73 Hz, corresponde a flexión vertical y horizontal.

Considerando los resultados obtenidos con este estudio, es posible observar:

- el modelo plano presentó la frecuencia fundamental, 7.82 Hz., mucho más baja que la correspondiente al modo de flexión vertical del modelo espacial, 12.4 Hz. Esta diferencia se debe a que en el primer caso (discretización en el plano), no se consideró la riostra inclinada que impediría movimientos tanto en sentido lateral como vertical;

- la consideración del comportamiento de la estructura como tridimensional permite encontrar las dos primeras frecuencias de vibración ($f_1 = 8.42$ Hz y $f_2 = 8.73$ Hz) correspondientes a modos de vibración laterales;
- la frecuencia fundamental de vibración de la estructura, $f_1 = 8.42$ Hz, se encuentra por encima de la zona considerada de riesgo de acuerdo a lo discutido en este mismo trabajo.

Conclusiones

Se presentan en este trabajo algunas consideraciones sobre la definición de la excitación dinámica actuante en estadios de fútbol. Se resumen también algunos de los principales problemas detectados en estadios que ilustran la necesidad de verificar las estructuras de este tipo, a la luz de las nuevas solicitaciones actuantes y recomendaciones normativas.

Bibliografía

- Bachman, H. ; Amman, W. *Vibrations in structures - induced by man and machines*. Zurich: IABSE, 1987.
- Bachman, H. *Case Studies of Structures with Man-Induced Vibrations*, . ASCE vol 118 n°3 pág. 631. 1992.
- Batista, R, Roitman, N., Magluta, C. Pfeil, M., Carvalho, E., Alves, R, Sarquis, F. *Vibrações Induzidas pelo Público a Estrutura do Estádio do Maracanã*,.Claes Documento B/91 - XXV Jornadas Sul - Americanas de Engenharia Estrutural - Porto Alegre, Brasil - 1991.
- De Paula Leite, A. R. *A nova onda do cálculo dinámico*, Técnica n° 22 May/Jun 1996.
- Documento CEB 209 *Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines* . 1991.
- Ebrahimpour, A. , Sack, R. L. *Design Live Loads for Coherent Crowd Harmonic Movements* ASCE vol 118, n°4. Ap. 1992.
- Harris, C. M., Crede, Ch. E. *Shock and Vibration Handbook*, Mc Graw Hill, New York, 1976.
- Juliani, M., Becocci, L. *Estádio do Morumbi*, Técnica n° 25 Nov/Dic 1996. Brasil.
- Prato, C., Larson, C. *Estudio experimental del efecto dinámico de la sobrecarga de muchedumbre en un estadio*. XII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Buenos Aires, Argentina,- 1992.
- Rios, R., *Determinação das Propriedades Dinâmicas das Estruturas Mediante o Emprego de Modelos em Escala Reduzida*. Msc Tesis, UFRGS-". Porto Alegre, Brasil, 1994.
- Rubio, C.E., *Análise Dinâmica de Modelos Estruturais em Escala Reduzida*. MSc Tesis, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1992.
- Riera, J.D., Tamagna, A., *Sobre o Efeito Dinamico de Cargas Produzidas por Grupos de Pessoas em Movimento*.Claes Documento B/91 - Jornadas Sul - Americanas de Engenharia Estrutural, Porto Alegre , Brasil, 1991