



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL y GEOMÁTICA.**

**“ EFECTOS DINÁMICOS INDUCIDOS POR EL BRINCO DE  
ESPECTADORES EN ESTADIOS ”**

**TESIS**

**Que para obtener el título  
de Ingeniero Civil**

**Presenta:**

**HUGO ARTURO GUTIÉRREZ GARCÍA**

**DIRECTOR GENERAL:**

**M.I OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ**

**CO DIRECTOR:**

**DR GUSTAVO AYALA MILLÁN**



**CIUDAD UNIVERSITARIA MÉXICO, D.F. FEBRERO, 2013.**

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/136/10



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Señor  
HUGO ARTURO GUTIÉRREZ GARCÍA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

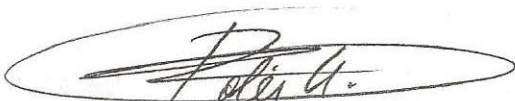
**"EFECTOS DINÁMICOS INDUCIDOS POR EL BRINCO DE ESPECTADORES EN ESTADIOS"**

- INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES
- I. CARGAS DINÁMICAS Y SUS EFECTOS EN ESTADIOS
  - II. EVALUACIÓN Y REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS PARA EVENTOS DEPORTIVOS
  - III. SISTEMAS DE MONITOREO
  - IV. OBTENCIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS
  - V. ALGUNAS PROPUESTAS PARA DISMINUIR LOS EFECTOS DEBIDO A VIBRACIONES
  - VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

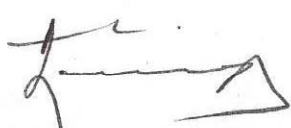
Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.


Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.


Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 19 de Noviembre del 2010.  
EL PRESIDENTE

  
ING. RODOLFO SOLÍS UBALDO

RSU/MTH\*gar.

Vo Bo  
  
MIGUEL A. ZUBISA B.

Vo Bo  
  
LUIS CANELLAS R.  
6-02-13

Vo. Bo.  
  
OCTAVIO GARCÍA  
24 FEB 2011

---

## AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a mis padres, por la comprensión, apoyo, dándome la confianza y respaldo para salir a delante, en muchos momentos y en especial en este momento tan importante de mi carrera.

A mis hermanos por el apoyo e impulso que me brindaron en todo momento bueno o malo presente.

A la Facultad de Ingeniería Civil, a los profesores que tuve durante este camino, por compartirme sus conocimientos y formarme profesionalmente.

A la UNAM por ser la mejor universidad de México, formadora de profesionales de calidad, vanguardia y compromiso social.

---

---

<b>INDICE:</b>		<b>Pág.</b>
	<b>Introducción y Antecedentes.</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1</b>	<b>Cargas dinámicas y sus efectos en estadios</b>	<b>13</b>
	1.1 Recomendaciones o normatividad existente.	15
	1.2 Caracterización del efecto de la interacción humano-estructura.	18
<b>CAPITULO 2</b>	<b>Evaluación y reparación de estructuras para eventos deportivos</b>	<b>32</b>
	2.1 Sistemas estructurales de soporte típicos	32
	2.2 Tipos de pruebas para evaluación de la integridad	66
	2.3 Reparaciones en estadios	71
<b>CAPITULO 3</b>	<b>Sistemas de monitoreo.</b>	<b>79</b>
	3.1 Monitoreo remoto	79
	3.2 Tipos de transductores para medición de vibraciones	89
<b>CAPITULO 4</b>	<b>Obtención de propiedades dinámicas.</b>	<b>93</b>
	4.1 Equipos mecánicos para generar vibraciones controladas	93
	4.2 Equipos de medición de señales o vibraciones	95
	4.3 Registro y análisis de señales	103
	4.4 Presentación de un caso de estudio	109
<b>CAPITULO 5</b>	<b>Algunas propuestas para disminuir los efectos.</b>	<b>118</b>
<b>CAPITULO 6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.</b>	<b>124</b>
	<b>Referencias.</b>	<b>126</b>

---

## **Introducción y Antecedentes.**

### **Problemática a nivel mundial**

Los cambios en el comportamiento de la gente y en el uso de los lugares donde se presentan espectáculos deportivos han generado, en los tiempos actuales, diversos problemas en los estadios que afectan no solo el confort de los asistentes, sino también la propia seguridad de las estructuras, induciendo vibraciones excesivas en las gradas debido a brinco, aplausos y en general, movimientos rítmicos de las personas como la famosa "Ola".

Las cargas dinámicas inducidas a cualquier estructura, pueden producir daño y hasta el colapso parcial o total de la misma. Los daños que se generan son el agrietamiento y degradación de la rigidez y resistencia de los elementos estructurales y estos dependen de la intensidad y duración de dichas cargas.

Las razones principales por las cuales las vibraciones en graderíos de estadios son cada vez más problemáticas son:

1. Las estructuras en estadios se están construyendo cada vez más esbeltas y ligeras, haciendo uso de la eficiencia de las nuevas tecnologías de construcción.
2. Las multitudes son cada vez más enérgicas, particularmente cuando la música de fondo es tocada durante los eventos deportivos.
3. Los estadios de deportes están siendo usados como lugares para conciertos de de música pop o rock entre otras.

A nivel mundial son varios los estadios de fútbol que han presentado problemas en su estructura. A continuación se presentan algunos de estos casos.

## **Estadio Maracaná (Rio de Janeiro - Brasil)**

El estadio de Maracaná se encuentra en Río de Janeiro, Brasil, fue inaugurado el 16 Junio 1950, con una capacidad para 150,000 personas.

Presentó afectaciones al confort humano debido a las aceleraciones verticales de corta duración, como las experimentadas por la parte del público en reposo, producidas por aficionados organizados durante los festejos de gol.

Debido al efecto dinámico de las cargas, se verificaron grandes amplitudes en las oscilaciones con las aceleraciones verticales y correspondientes momentos flexionantes que determinaron la aparición de fisuras en las uniones entre las columnas de los marcos y las tribunas. (Ref 1)



*Figura. 1.1.1 Vista del estadio de Maracaná, Brasil.*

## **Estadio Grêmio (Porto Alegre - Brasil)**

El estadio Grêmio de Porto Alegre fue construido en concreto armado con un voladizo de 13 metros de longitud.

Presentó problemas de confort dinámico con aceleraciones predominantemente horizontales. Los cuatro primeros modos de vibración de la estructura se encontraron dentro del rango de frecuencias de riesgo, es decir, frecuencias fácilmente excitadas por personas en actividad aeróbica o simplemente en movimiento por el brincotear del público. (Ref 2)



*Figura. 1.1.2. Vista del estadio de Porto Alegre, Brasil.*

### **Estadio de Morumbí (São Paulo - Brasil)**

Las estructuras de las tribunas del estadio Morumbí, fueron construidas en concreto armado y están formadas por sectores separados por juntas de dilatación radiales.

Los sectores están compuestos por 72 columnas en todo el estadio distantes entre si aproximadamente 10 m, en las cuales se sustentan las estructuras en voladizo que constituyen las plateas 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 tribunas 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.



*Figura 1.1.3. Vista del estadio Morumbí.*

Algunos otros problemas presentados en estádios son:

### **Estadio Fonte Nova (Salvador-Brasil).**

Este estadio presenta debilitamiento de las estructuras por, falta de mantenimiento ya que se combinó el comportamiento de los aficionados que danzan, brincan y realizan coreografías, danzan, causando una vibración mayor a la permisible por la estructura, causando el colapso de una grada.

### **Estadio Guillermo Plazas (ciudad de Neiva-Bogotá Colombia).**

Este estadio presenta un desplome de gradas debido a las vibraciones que produjeron los brincos rítmicos del público, que asistía a un concierto de música, provocando el debilitamiento y desplome de la estructura ocasionando la muerte de una mujer murió y cinco personas más resultaron heridas.





*Figura 1.1.4. Vista del estadio de Neiva Bogotá Colombia.*



*Figura 1.1.5. Desplome de una parte de la tribuna occidental del estadio de Neiva durante concierto musical*

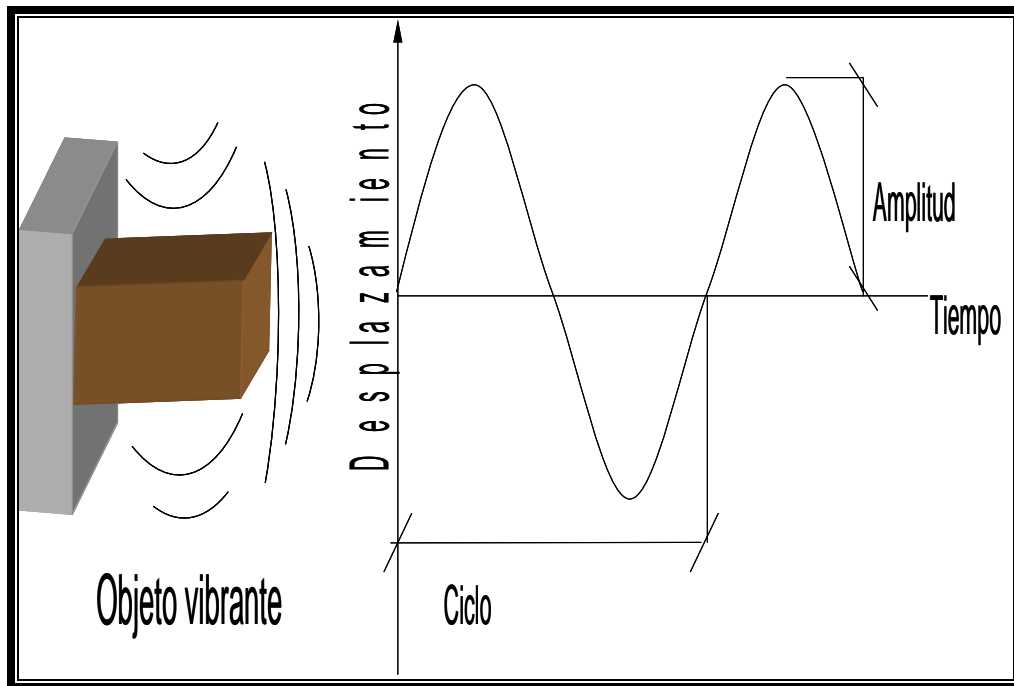
Los ejemplos presentados son solo una pequeña muestra de la problemática que se tiene a nivel mundial sobre fallas de estructuras de estadios y centros deportivos que arbitrariamente cambian el uso para el que fueran diseñados.

## Vibraciones en cuerpos.

Para entender los efectos dinámicos inducidos a las estructuras es primordial entender cómo se generan y transmiten las vibraciones.

El estudio de las vibraciones es referido a los movimientos de los cuerpos y a las fuerzas asociadas con ellos. Todos los cuerpos que poseen masa y características de elasticidad, son capaces de vibrar.

En su forma más general una vibración podría definirse como un movimiento periódico de un sistema elástico alrededor de un punto en equilibrio.



*Figura 1.2.1. Movimiento periódico de un sistema elástico.*

Entre más lejos y entre más rápido se mueva un objeto se podrá determinar sus características, como lo son la frecuencia, la amplitud y la aceleración. Para explicar estos conceptos véase la figura 1.2.1.

### La Frecuencia.

Es movimiento que realiza el objeto desde que sale de su punto de equilibrio llega al punto más alejado superior, luego inferior y llega al punto de equilibrio se denomina ciclo. La cantidad de ciclos por segundo es mide en Hertz y define la frecuencia de vibración.

### La Amplitud.

La amplitud esta representada por la distancia entre el punto de equilibrio y la máxima distancia de alejamiento. Esto también se define como la intensidad de la vibración.

Cuando un cuerpo oscila, la velocidad del objeto en movimiento pasa de un valor cero en los puntos extremos (cambio de sentido del movimiento) a un valor máximo cuando pasa por el punto de equilibrio.

La aceleración es una medida de cuán rápido varia la velocidad del cuerpo en movimiento. Comúnmente la aceleración se mide en  $m/s^2$  y es habitual que esta sea el parámetro medido cuando se trata de evaluar vibraciones, por la facilidad que ofrece la técnica de medición.

Una vibración se produce cuando el sistema en cuestión es desplazado desde una posición de equilibrio estable, el sistema tiende a retornar a dicha posición, bajo la acción de fuerzas de restitución elástica o gravitacional, moviéndose de un lado a otro hasta alcanzar su posición de equilibrio.

Los sistemas oscilatorios pueden clasificarse como lineales o no lineales. Para los sistemas lineales rige el principio de superposición y las matemáticas para su tratamiento (Ley de Hooke).

Por el contrario las técnicas para el análisis de sistemas no lineales son más complicadas y no muy conocidas.

En términos generales existen dos clases de vibraciones, las libres y las forzadas:

Un sistema elástico puede tener una vibración libre dada por un impulso inicial, donde el movimiento es mantenido únicamente por las fuerzas de restitución inherentes al mismo.

Cuando al sistema se le aplican fuerzas externas, el movimiento resultante es una vibración forzada. Cuando la excitación es oscilatoria, ya sea periódica o no, como la de un sismo, el sistema es obligado a vibrar a la frecuencia de excitación, si ésta coincide con una de las frecuencias naturales del sistema se produce resonancia.

## **Comportamiento experimentado debido a cargas dinámicas**

Los efectos dinámicos producidos por la gente en un estadio, puede ocurrir cuando la multitud responde y excita a la estructura de las gradas en forma rítmica por el seguimiento de alguna música o instrumento de percusión como los que usan las porras o los grupos musicales. Estos efectos son generados físicamente por el balanceo de las personas, que aplauden, brincan o dan patadas en el suelo. Aunado a lo anterior, muchas de estas instalaciones poseen diseños estructurales con grandes voladizos, originando que las gradas sean cada vez más flexibles, con bajas frecuencias de vibración, lo cual ocasiona desplazamientos apreciables y por tanto inseguridad en los espectadores.

Para el diseño de este tipo de estructuras, a base de marcos que soportan sistemas de gradas, algunos reglamentos recomienda tomar en cuenta que los efectos dinámicos de la gente pueden inducir frecuencias de excitación vertical entre 1.5Hz - 3.5Hz, es decir, periodos entre 0.67 y 0.29 segundos. Estas debe ser considerada para cargas individuales de baile y brinco excepto para grupos más grandes debido a la coordinación en las frecuencias más altas, en dicho caso se reduce el rango de 1.5Hz - 2.8Hz ( 0.67 a 0.36 seg ).

Trabajos más reciente sugieren que estas frecuencias de excitación pudieran ser de 1.8Hz - 2.3Hz para grupos grandes de personas, como los que concurren en los conciertos y 0.7 Hz podría ser considerado un valor más representativo para los propósitos del diseño.

El objeto de tomar en cuenta estos rangos de frecuencia es proporcionar a los sistemas estructurales y a sus elementos, características de rigidez que les permitan alejarse de dichos rangos para evitar problemas de desplazamientos excesivos y particularmente efectos de resonancia, que pudieran producir colapsos parciales o totales de la estructura.

## Daños reportados en estructuras.

Algunos de los daños mas frecuentes en estadios son.

Debido al comportamiento de la gente que brinca, aplaude y canta rítmicamente puede traer como consecuencia la fractura en losas así como grietas que pueden afectar a la estructura, otro tipo de daños que se presentan son la oxidación de los elementos estructurales, daños en las uniones de vigas y columnas que son generalmente por falta de mantenimiento principalmente.

Un ejemplo claro es el estadio Fonte Nova en Rio de Janeiro Brasil, en el cual se desprendió una parte de la grada debido a la falta de mantenimiento y por el comportamiento rítmico de los asistentes ocasionando la muerte de un espectador.



*Fig. 1.4.1. Estructura rota en el estadio Fonte Nova.*

### **EL Molinon, de la comunidad de Asturias, ciudad de Gijón España.**

La estructura del estadio el Molinón, de la ciudad de Gijón España, tuvo problemas desde su construcción pues se construyó con concreto en el que se mezcló con arenas de playa, la cual tiene una alta presencia de sales, que por sí misma es un agente corrosivo de primer nivel.

Su construcción fue realizada en 1908, este estadio fue sede de la copa mundial de 1982 en España, en este estadio se detectó la presencia de elementos con problemas de oxidación ocasionado por el escaso mantenimiento particularmente en las vigas, las consecuencias se presentaron al quererse reforzar la estructura debilitada para poder implementar diferentes locales de lujo sobre una zona que abarca aproximadamente 15 de los marcos de soporte.



*Fig. 1.4.2. Vista exterior de la estructura del estadio el Molinon en Gijón España.*

## **Estadio Nemesio Camacho el Campín de la ciudad de Bogotá, Colombia:**

En estudios realizados a este estadio, se detectaron fisuras en las estructuras de soporte de las gradas altas, las cuales fueron reforzadas utilizando cables de pos tensado. Ref. 10.



*Fig. 1.4.3 Fisuras en la estructura principal del estadio Nemesio Camacho el campín.*



*Figura 1.4.4 Fisuras en la estructuras de escaleras.*



*Figura 1.15. Fisuras diagonales en placas de tribunas.*



# 1 Cargas dinámicas y sus efectos en estadios.

Las personas en movimiento durante conciertos pueden brincar (generando fuerzas impulsivas) o bailar (generando fuerzas quasiperiódicas). Estos movimientos son continuos y rítmicos durante las canciones. En ocasiones, dependiendo del tipo de música, parte del público puede brincar coordinadamente.

La carga viva en lugares de reunión se determina combinando la máxima densidad de personas que pueden aglomerarse en dichos lugares e incluyendo un factor de impacto que cubre la posibilidad de que estas personas se levanten o salten simultáneamente.

Dichas cargas dinámicas que produce una persona pueden ser clasificadas por rangos de frecuencias, factores de impacto y por el contacto para poder ser representadas teniendo como condicionantes, factores tales como la música, que genera la coordinación de las personas. A continuación se presentan las frecuencias típicas de diferentes movimientos durante conciertos o partidos de fútbol.

TIPOS REPRESENTATIVOS DE ACTIVIDADES.	TASA DE ACTIVIDAD	FRECUENCIA HZ
Brincar	Normal	2.0-3.0
	Alta	2.0-3.0
Bailar		2.0 a 3.0
Aplaudir de pie con brincos		1.6 o 1.4
Aplaudir	Normal	1.6 o 2.4
	Intensa	2
Oscilación lateral del cuerpo	Sentados	0.6
	Parados	0.6

*Tabla 1.1 Frecuencias típicas durante conciertos.*

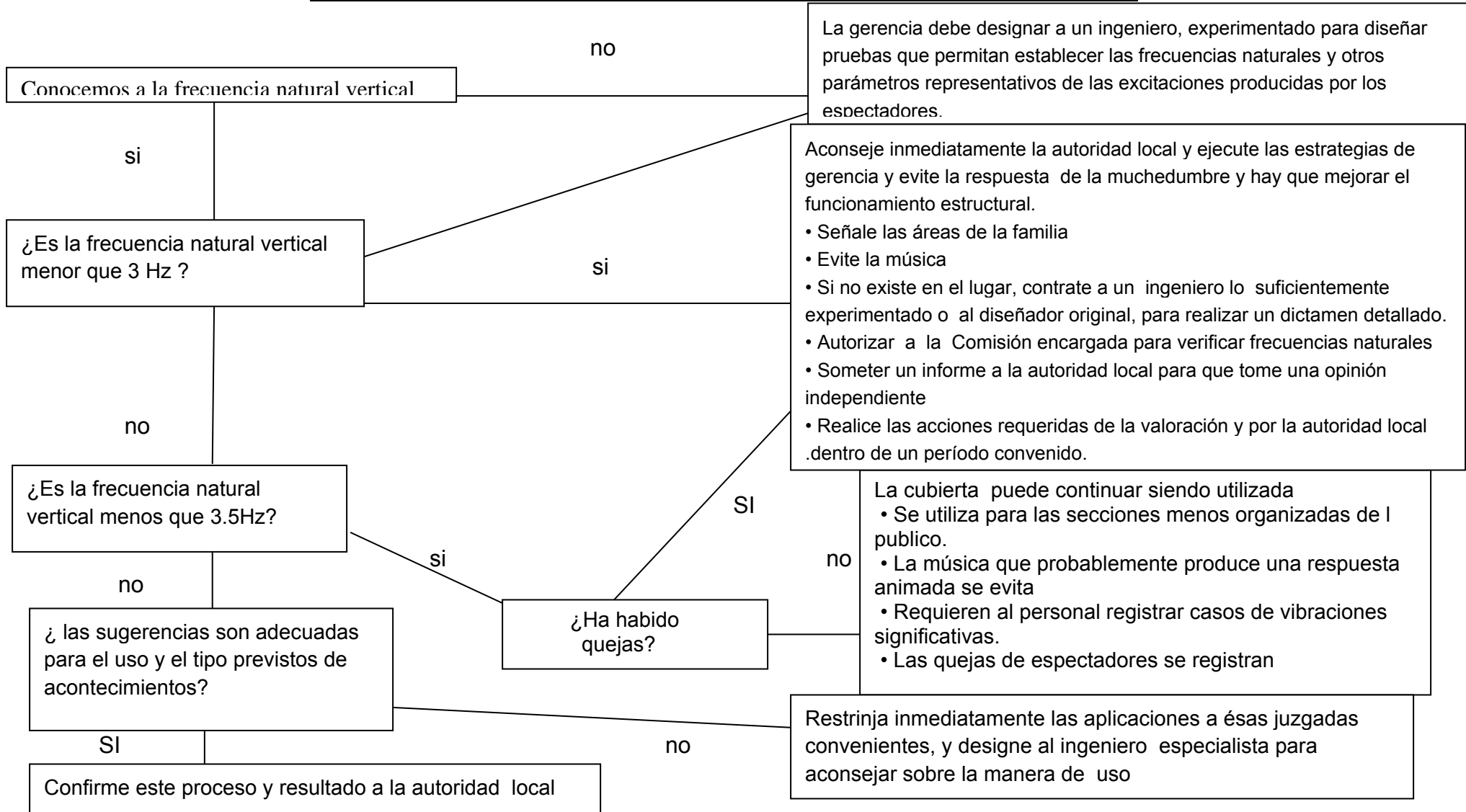
Las cargas dinámicas generadas por personas en movimiento (brincando, aplaudiendo, bailando) inducen vibraciones al sistema de gradas y éstas las transmiten al sistema estructural principal del soporte.

Las vibraciones inducidas por la carga dinámica durante conciertos varían con el tiempo y se conocen como vibraciones no estacionarias, pero si las propiedades promedio de las vibraciones no cambian rápidamente durante un lapso de tiempo determinado, pueden ser consideradas como estacionarias.

Para estudiar los efectos que las vibraciones ocasionadas por personas en movimiento (brincando, aplaudiendo acompasadamente, bailando) producen sobre las estructuras, éstas deben ser estudiadas durante los lapsos de duración de la actividad, coincidente con las canciones, cuando el público brinca (a veces coordinadamente al compás de la música rock), cuando el público pide repetición y/o zapatean coordinadamente y cuando el público hace la famosa “ola”.

En el siguiente capítulo se describen algunas de las recomendaciones a seguir que en el caso de este tipo de estructuras sometidas a cargas dinámicas.

# 1.1 Recomendaciones o normatividad existente.



Recomendaciones generales contenidas en diversos reglamentos:

- Las gradas deberán tener una altura mínima de 40 cm y máxima de 50 cm y un ancho mínimo de 70 cm. Para el cálculo del cupo se considera un modulo longitudinal de 45 cm de espectador. Los asientos deberán construirse de materiales incombustibles, solo en caso justificado la dirección podrá autorizar que se construyan de materiales que no cumplan con este requisito.
- Las gradas tendrán escaleras cada 9 m, con ancho mínimo de 90 cm, huellas mínimas de 27 cm y peraltes máximos de 18 cm. Cada 10 filas habrá pasillos paralelos a las gradas con un ancho mínimo igual a la suma de las anchuras de las escaleras que desemboquen a ellos.
- Todas las construcciones deberán poseer un sistema estructural capaz de resistir las fuerzas sísmicas, cuando menos para dos direcciones horizontales ortogonales y sin exceder los esfuerzos permisibles especificados.
- Estas estructuras se clasifican como de gran importancia (GRUPO A, en algunos códigos), es decir, toda construcción cuya falla estructural podría causar la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas o culturales excepcionalmente altas, o que constituyan un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o explosivas, así como construcciones cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia urbana, como hospitales y escuelas; estadios, templos, salas de espectáculos y hoteles que tengan salas de reunión que pueden alojar más de 200 personas; gasolineras, depósitos de sustancias o tóxicas, terminales de transporte y estaciones de bomberos, subestaciones eléctricas y centrales telefónicas y de telecomunicaciones, archivos y registros públicos de articular importancia a juicio de la Secretaría, museos, monumentos y locales que alojen equipo especialmente costoso.
- Las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente (AIS, 1997), en su título B.4.7, "Efectos dinámicos producidos por carga viva" mencionan lo siguiente; 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.
- El reglamento de Construcciones para el Distrito Federal estipula en el capítulo V, artículo 199, disposición V, en la tabla de cargas vivas unitarias inciso d, que para estadios y lugares de reunión sin asientos individuales se asignará 450 Kg./m<sup>2</sup> de carga viva máxima.

En estos casos deberá presentarse particular atención a la revisión de los estados límites de servicio relativo a vibraciones.

Los elementos para resistir cargas laterales serán de los siguientes tipos:

- a) Marcos rígidos de acero o concreto reforzado formados por columnas con las uniones diseñadas y construidas de tal modo que se garantice la continuidad.
- b) Muros de mampostería de ladrillo sólido reforzados con vigas de amarre y columnas.
- c) Muros de mampostería de piezas huecas reforzados con vigas de amarre y columnas.
- d) Muros de concreto reforzado.
- e) Combinaciones de muros y columnas de acero o concreto reforzado, que satisfagan los requisitos para torsión.
- f) Elementos de otros tipos o materiales, siempre que se demuestre que poseen la capacidad necesaria para resistir las fuerzas laterales que fijen las autoridades competentes de acuerdo con su ductilidad y otras características de su comportamiento ante cargas sísmicas.

## **1.2 Caracterización del efecto de la interacción Humano-estructura.**

El estudio del comportamiento de grandes aglomeraciones de personas en escenarios públicos como son estadios de fútbol y auditorios han dado origen en las últimas décadas a un tema muy importante y de gran interés para la ingeniería estructural.

El estudio de los cambios en las propiedades dinámicas de una estructura y el análisis de la influencia que esta pueda ejercer sobre la gente que la misma estructura pueda soportar, es conocido como la interacción humano-estructura.

Los movimientos originados por la gente generan vibraciones que causan incomodidad y daños directos a las estructuras en muchas ocasiones, como los ocurridos en un concierto musical en el Estadio Guillermo Plazas Alcid, de Neiva, en Bogotá Colombia, donde una tribuna se desplomó en pleno concierto. A dicho estadio se le realizó un estudio de interacción humano estructura a través del comportamiento dinámico presentado en eventos musicales y deportivos y a su vez se compararon los resultados con modelos analíticos de la estructura, simulando el comportamiento del público en movimiento; las funciones de carga implementadas fueron desarrolladas con ensayos de laboratorio de brincos sobre plataformas monitoreadas con sensores.

### **Modelación de la interacción humano-estructura.**

Una estructura puede ser representada como un sistema dinámico en función de la masa  $m$ , amortiguamiento  $c$ , rigidez  $k$ , y una fuerza externa  $p(t)$  que excita el sistema, teniéndose así una ecuación para describir el movimiento de un sistema de un grado de libertad.

$mu + cu + ku = p(t)$  Donde:

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  es la frecuencia natural del sistema y

$\frac{c}{m} = 2\xi\omega_n$  es el coeficiente de amortiguamiento.

De acuerdo a las excitaciones que sufre una estructura por la posición del público cuando este se encuentra en estado estacionario parado o sentado se dice que su movimiento es pasivo, y se considera a esta carga como parte del sistema de la estructura aumentando su masa y expresándose así:

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

Siendo  $m_{ext}$  : la masa de la estructura y  
 $m_{per}$  : la masa de las personas.

Por lo tanto, en este caso al no haber carga dinámica externa  $p(t)$  que excite al sistema, es igual a cero, cambiando así las ecuaciones de frecuencia natural y parámetros de amortiguamiento respectivamente.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_{ext} + m_{per}}} \text{ y } \frac{c}{m_{ext} + m_{per}} = 2\xi\omega_n$$

En caso contrario cuando las personas están en movimiento se dice que el movimiento es activo y la acción de la carga dinámica se puede describir como:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = \alpha W_p \text{sen}(\omega t)$$

Donde:

$\alpha =$  : el factor de carga dinámica

$W_p =$  : el peso de las personas

$\omega =$  : la frecuencia de excitación.

La respuesta de la estructura depende de la relación entre las frecuencias  $\omega$  y  $\omega_n$ ; si estas son similares se puede producir resonancia, aumentando los desplazamientos o respuesta de la estructura, ver figura 1.2.1.

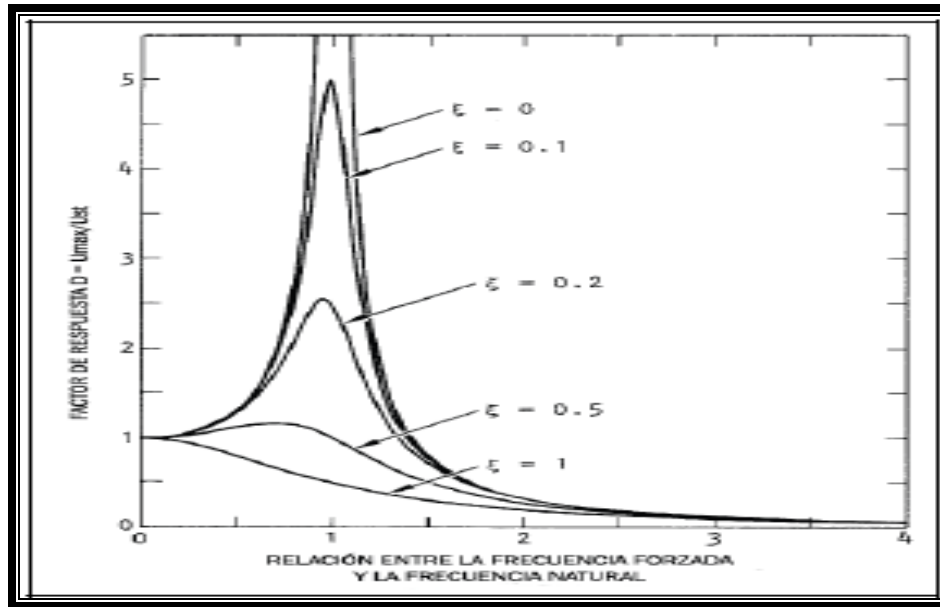


Figura 1.2.1 Respuesta en función de las frecuencias.

El salto de una persona está determinado por el factor de impacto  $K_p$ , definido como la relación entre las cargas estática y dinámica producidas por las personas.

$$k_n = \frac{P_{din}}{P_{est}}$$

Frecuentemente este factor se expresa como un porcentaje de la carga estática, expresado con el coeficiente  $\alpha$ . En la tabla 2.2.1 se muestran las características de este factor para diversos tipos de movimiento.

$$\alpha = K_p - 1 = \frac{P_{din}}{P_{est}} - 1$$

y el radio de contacto, definido como la relación entre tiempo de contacto con la estructura  $T_s$  y el tiempo de brinco  $T$ .

$$\alpha_c = \frac{T_s}{T}$$

El factor de impacto se puede expresar en función del radio de contacto de acuerdo a como lo establece la British Standards Institution, citada en (HHSim, 2006) Ref. 9, donde también clasifica el tipo de brinco desde alto hasta bajo impacto con valores de 0.25 hasta 0.66.

$$k_p = \frac{\pi}{2 \cdot \alpha_c}$$



En la tabla 1.2.1 se presentan factores de impacto estudiados en la tribuna occidental del estadio de la ciudad de Tulúa en Colombia.

DESCRIPCIÓN	f(HZ)	a	REFERENCIA
Baile de rock	2.3	0.42	vanny y Heins
Baile de rock	3.5	0.36	Rainer y Allen-1987
Baile de rock	3.3	0.36	Rainer y Allen-1987
Ejercicios de brincos	2.45	1.2	Bechman 1992
Golpear con los pies	3	0.2	Allen (1985)
Conciertos vigorosos o eventos deportivos	1.5	0.25	Allen (1985)

Tabla 1.2.1 Factores de impacto para variados movimientos.

La simultaneidad de las personas al brincar generan vibraciones y como la carga varia con el tiempo al estar en contacto con la estructura es decir es una función periódica de impulsos la cual se puede modelar como:

$$f(t) \left\{ \begin{array}{l} K_p \text{sen} \left( \frac{\pi}{T_s} \right) \dots \text{para } 0 \leq t \leq T_s \\ 0 \dots \dots \dots \text{para } 0 \leq t \leq T_s \end{array} \right\}$$

Por lo tanto, el tiempo que dura el brinco está dado por la siguiente ecuación y por la descripción de fases durante un brinco.

$$T = T_s + T_{sc}$$

Donde:

Ts : es el tiempo en contacto con la estructura.

Tsc: es el tiempo en el aire (no hay contacto con la estructura).

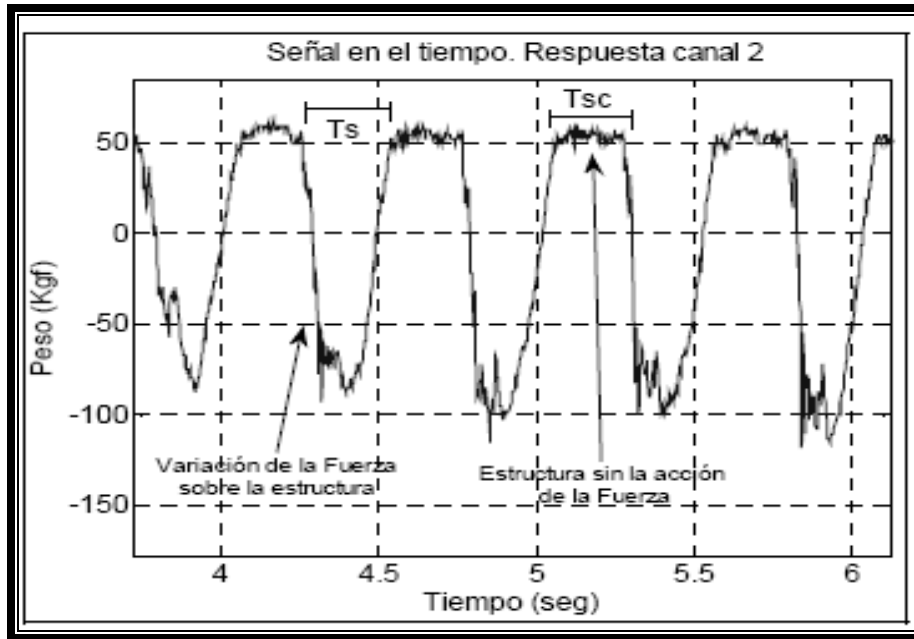


Figura 1.2.2. Descripción de fases durante un salto.

De esta forma la carga dinámica se expresara como.

$$P(t) \begin{cases} G * K_p \text{sen} \left( \frac{\pi t}{T_s} \right) \dots \text{para } 0 \leq t \leq T_s \\ 0 \dots \dots \dots \text{para } T_s \leq t \leq T \end{cases}$$

Siendo: G el peso de la persona.

### Metodología para caracterizar la interacción humano- estructura.

En el Estadio Olímpico de Cali, Colombia se obtuvieron nueve registros de las aceleraciones en las tribunas occidental y sur.

- Tres registros se hicieron y correspondieron a vibraciones ambientales teniéndose la tribuna desocupada y queriéndose obtener modos naturales y frecuencias asociadas a la estructura.
- Se realizaron dos registros de vibraciones correspondientes a eventos musicales.
- Por último se obtuvieron cuatro registros de vibraciones en eventos futbolísticos.

También en el laboratorio se realizaron pruebas para caracterizar los brinco de personas además de determinar la variación de amortiguamiento bajo diferentes condiciones de excitación.



Figura 1.2.3 Descripción del proceso realizado.

El comportamiento en el dominio de frecuencias mostró que la frecuencia calculada para los brinco 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.

Las diferencias que se obtuvieron entre la frecuencia calculada para los brinco y la de respuesta en la estructura fue de 0.02 Hz, debido a que los brinco de las personas no son constantes variando en el tiempo.

Se tomaron registros de las aceleraciones con el fin de obtener la respuesta de la estructura ante la demanda del público. Para este caso se monitoreo diferentes fases del partido como fue la salida del equipo local, el festejo sincronizado del público y la hora del gol, considerando una frecuencia de muestreo de 256 Hz.

A modo de ejemplificar el brinco de una persona en el laboratorio se llevó a cabo un experimento con brinco sobre una plataforma rígida efectuándose registros para dos personas una de 85 kg y otra de 60 kg.

La viga rígida utilizada en estos ensayos es una viga simplemente apoyada a la cual se le adaptaron sensores en sus extremos los cuales registraban la fuerza en

función del tiempo por lo tanto la fuerza total es la suma del vector resultante en cada apoyo.

PARAMETROS	REGISTRO # 1	REGISTRO #2
Peso Persona (Kg)	60	85
Duración de brinco (seg)	34	32
Número de brincos	60	65
Frecuencia calculada de los brincos (Hz)	1.765	2.031

*Tabla 1.2.2. Registros de laboratorio ante saltos de personas.*



*Figura 1.2.4 Viga simplemente apoyada utilizada para el evento.*

Del experimento realizado se obtuvieron los resultados de fuerza de impacto y parámetros de contacto como se muestran en la tabla siguiente.

CARACTERISTICA	REGISTRO # 1	REGISTRO # 2
Peso persona (Kg)	60	85
Frecuencia de brinco (Hz)	1.78	1.99
Tiempo de brinco (seg)	0.56	0.3
Tiempo de contacto (seg)	0.3	0.3
Radio de contacto	0.53	0.6
Clasificación según el radio de contacto	Ejercicios rítmico	Brinco de bajo impacto
Factor de impacto	2.97	2.6
Fuerza máxima (Kg)	178.09	220.92

*Tabla 1.2.3 Fuerza de impacto para cargas experimentales de laboratorio.*

Por lo tanto con dichos resultados la función de carga obtenida se expresa en series de Fourier.

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

donde,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  y T es el periodo del brinco en segundos, los coeficientes

$a_0$ ,  $a_n$  y  $b_n$  fueron establecidos.

$$a_0 = \frac{4T_s}{\pi T},$$

$$a_n = \frac{T_s}{\pi} \left[ \frac{\cos(\pi(\frac{T - 2nT_s}{T}))}{T - 2nT_s} - \frac{\cos(\pi(\frac{T + n2t_s}{T}))}{T + 2nT_s} + \frac{2T}{T^2 - 4n^2T_s^2} \right]$$

$$b_n = \frac{T_s}{\pi} \left[ \frac{\text{sen}(\pi(\frac{T - 2nT_s}{T}))}{T - 2nT_s} - \frac{\text{sen}(\pi(\frac{T + n2t_s}{T}))}{T + 2nT_s} \right]$$

En la figura 1.2.5 se presenta los resultados de las vibraciones para un evento musical en donde se presentan varios géneros musicales con la finalidad de obtener la repuesta estructural.

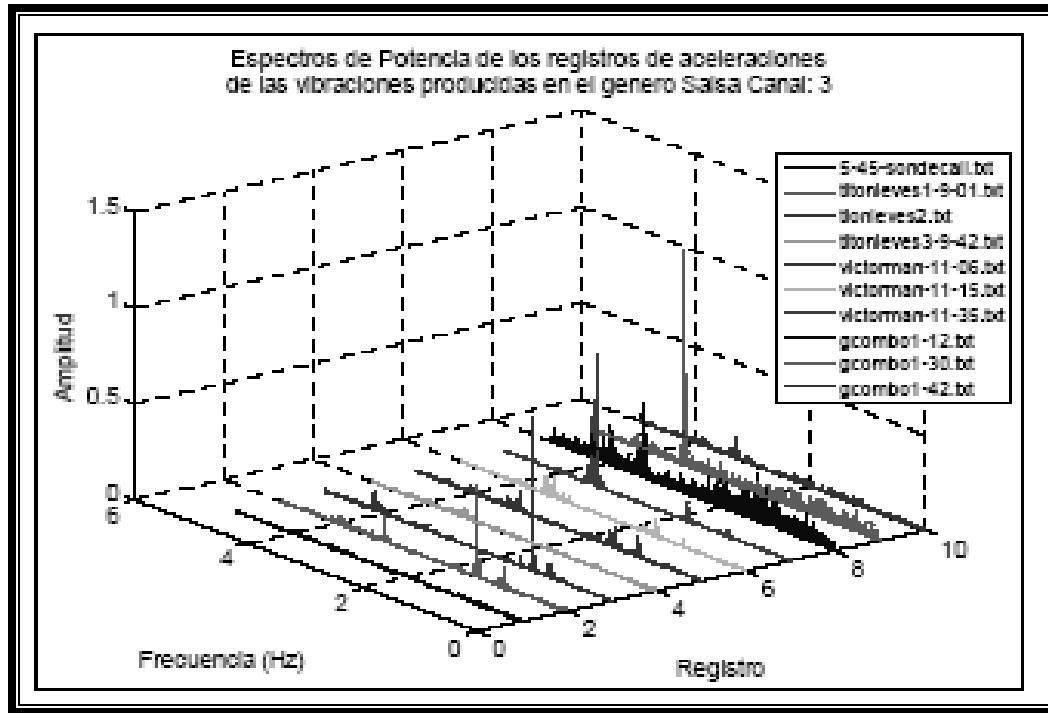


Figura 1.2.5 Espectros para diferentes géneros musicales.

La variante de la respuesta de la frecuencia en función del tiempo se expresa en el histograma siguiente.

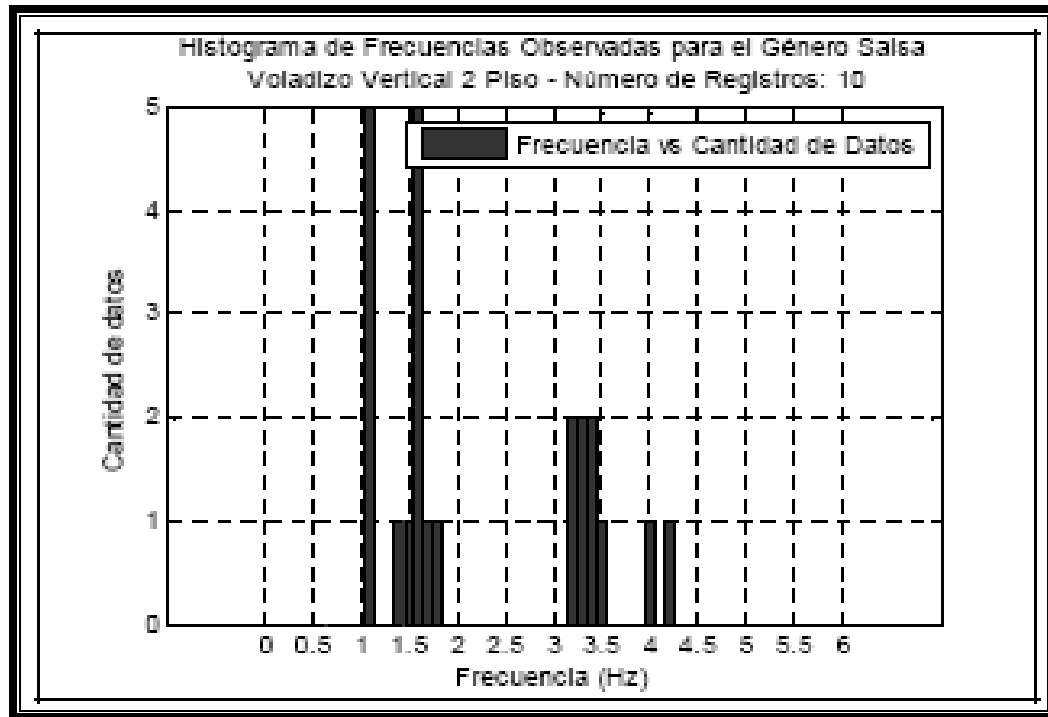


Figura 1.2.6 Histograma de respuesta ante evento musical.

GENERO	SITIO	RANGO DE FRECUENCIAS (HZ)
Salsa	Voladizos	1.05-1.15
		1.45-1.75
	Cubiertas	3.15-3.45
		1.45-1.55
Merengue	Voladizos	2.95-3.45
		4.45-4.55
	Cubiertas	1.05-1.25
		2.55-2.65
Vallenato	Voladizos	1.05-1.25
		2.45-2.75
	Cubiertas	Mayores a 4
		1.15-1.25
Reguetón	Voladizos	1.35-1.55
		1.85-1.95
	Cubiertas	3.45-3.65
		1.15-1.25
Reguetón	Voladizos	1.35-1.55
		1.85-2.05
	Cubiertas	3.45-3.65
		Mayores a 4
Reguetón	Voladizos	1 a 2
		Mayores a 3
	Cubiertas	1 a 2
		Mayores a 3

Tabla 1.2.4 Frecuencias de excitación ante varios géneros musicales.

### Amortiguamiento.

Para la determinación del amortiguamiento se realizaron diferentes pruebas de vibración libre sobre una viga sin carga. Los escenarios incluyeron a una persona brincando.

Para estas mediciones se realizaron diferentes tipos de combinaciones.



1. El amortiguamiento se calculó aplicando una carga impulsiva mediante el golpe de un martillo.



*Figura 1.2.7 Golpe de martillo sobre viga.*

2. Cuando una persona salta sobre la viga.



*Figura 1.2.8 Persona generando impulsos sobre una viga.*

3. Cuando una persona brinca y otras permanecen sentadas con un peso de 155 kg sobre la viga.
4. Cuando una persona brinca y otras permanecen sentadas con un peso de 140 kg sobre la viga.

5. Golpeando con un martillo y dos personas sentadas sobre la viga.



Figura 1.2.9 Personas sentadas sobre la viga y otra saltando.

Los resultados ante dichas combinaciones se presentan en la tabla 1.2.5.

CASO	AMORTIGUAMIENTO		
	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO
1	4.54 %	5.54 %	6.60 %
2	6.44 %	8.64 %	10.96 %
3	12.51 %	16.62 %	17.37 %
4	13.46 %	16.94 %	20.35 %
5	13.69 %	15.82 %	18.99 %

Tabla 1.2.5. Tabla de resultados ante combinación de carga.

### **Comentarios:**

Se observa una disminución de la frecuencia natural de la estructura y un aumento en la frecuencia de brinco siendo este valor de 2.0 Hz.

Las personas en movimiento producen vibraciones verticales principalmente, pero dada la forma geométrica de una tribuna todas las vibraciones 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 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 efectuadas 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 distinta en el comportamiento dinámico de la estructura.

De igual forma, la NSR-98 de Colombia, 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 está 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, como el género merengue, donde se identificó el segundo armónico en 4.5 Hz. (Ref. 7)

# **2**

## **Evaluación y reparación de estructuras para eventos deportivos**

En un análisis y evaluación del comportamiento dinámico para una estructura, el periodo natural de vibración y el coeficiente de amortiguamiento son parámetros esenciales, debido a que su respuesta debido a una sacudida sísmica esta influenciada principalmente por estos parámetros. Por ello, para predecir el comportamiento dinámico y los daños potenciales durante terremotos, es esencial medir dichos parámetros.

El periodo natural de vibración caracteriza la rigidez dinámica de la estructura que define el modo de comportarse de la misma ante el movimiento producido por un sismo, el amortiguamiento influye directamente sobre la modificación de la respuesta dinámica de la estructura y la forma como se atenúa el desplazamiento hasta volver a su posición inicial.

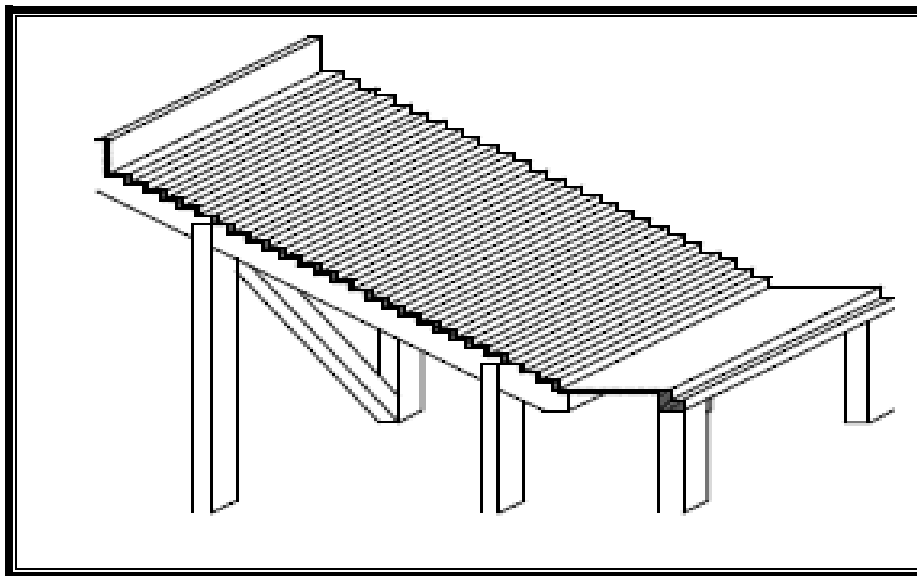
### **2.1 Sistemas estructurales de soporte típicos**

#### **Estadio Huracán Corrientes, Argentina.**

El estadio Huracán Corrientes, Argentina, fue construido con distintos tipos y formas estructurales. El sector denominado Tribuna Este está constituido por columnas de concreto armado prefabricadas y vigas principales y gradas de concreto pretensado. Presenta una disposición geométrica y estructural simple. Consta además de una parte inferior construida en concreto armado realizada in situ.



*Figura 2.1. Estructura del estadio Huracán Corrientes – Argentina.*



*Figura 2.2. Esquema del estadio Huracán (Corrientes – Argentina).*

A continuación se presenta, las propiedades dinámicas obtenidas analíticamente del estadio Huracán.

MODELO PLANO		
MODO	FRECUENCIA (HZ)	PERIODO (seg)
1	7.82	0.128
2	12	0.083

MODELO TRIDIMENCIONAL		
MODO	FRECUENCIA (HZ)	PERIODO (seg)
1	8.42	0.119
3	12.4	0.081

Tabla 2.1 Resultados de frecuencias y periodos del estadio de Huracán.

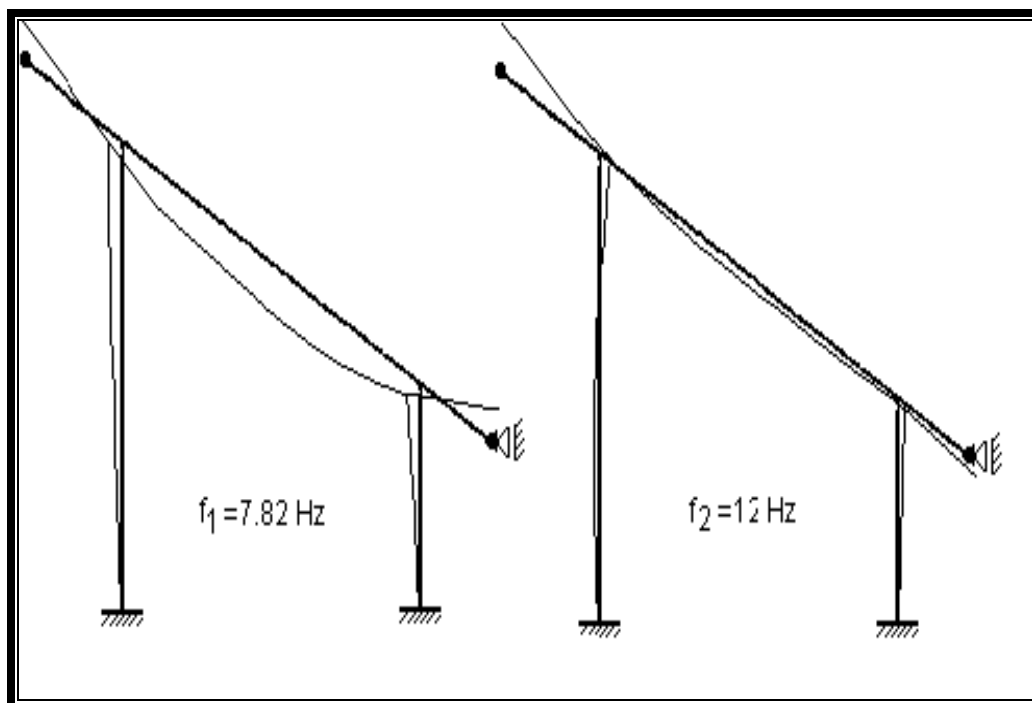


Figura 2.3. Primero y segundo modo natural de vibración del estadio de Huracán.

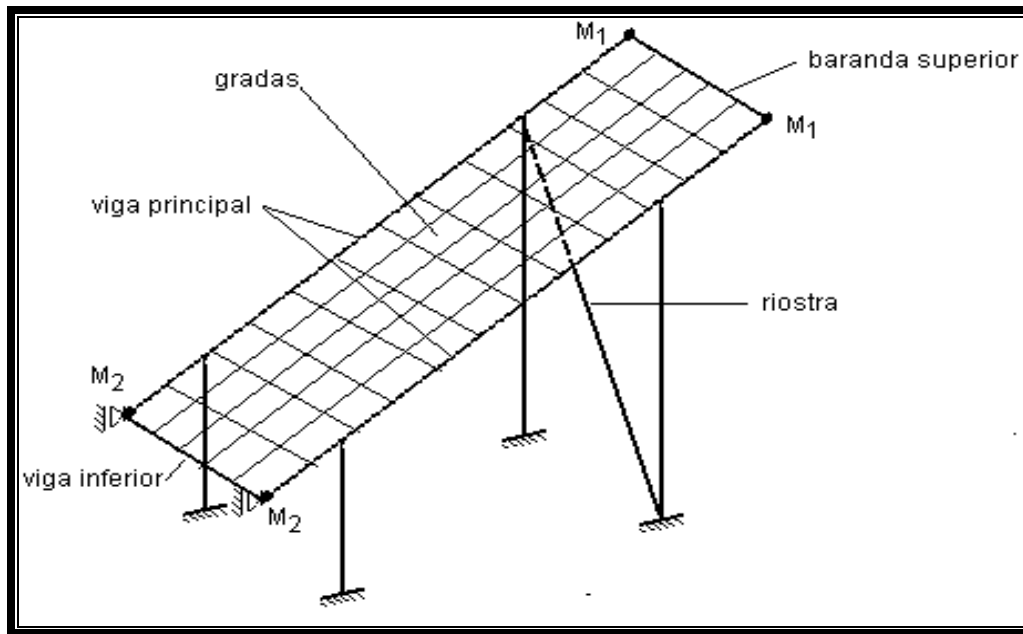


Figura 2.4. Diagrama de la estructura discretizada como marco espacial.

Se presentan el primer y tercer modo de vibración (las flechas indican el sentido del desplazamiento del modo). (Ref 4)

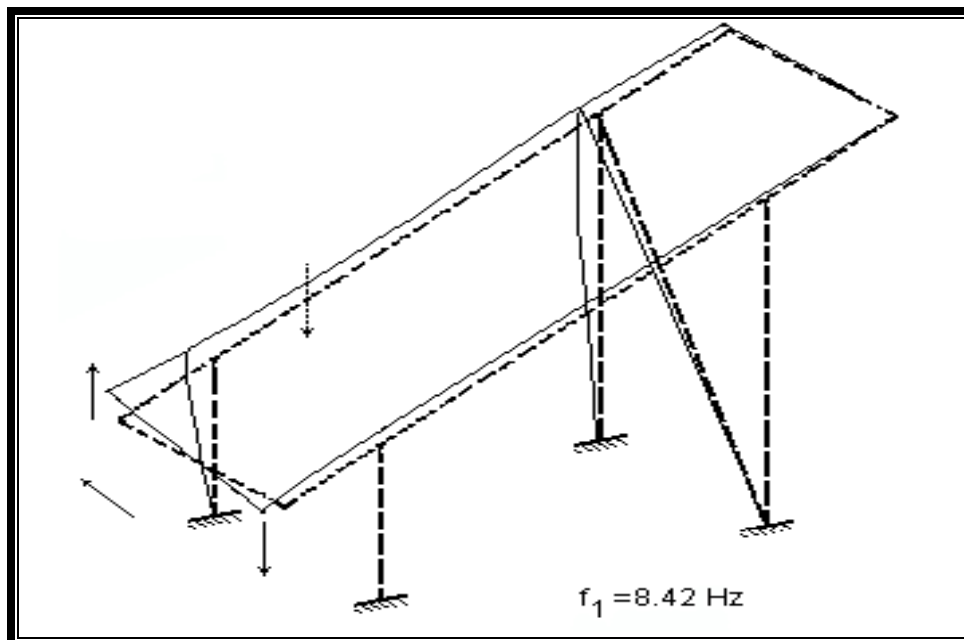


Figura 2.5. Primer modo natural de vibración.

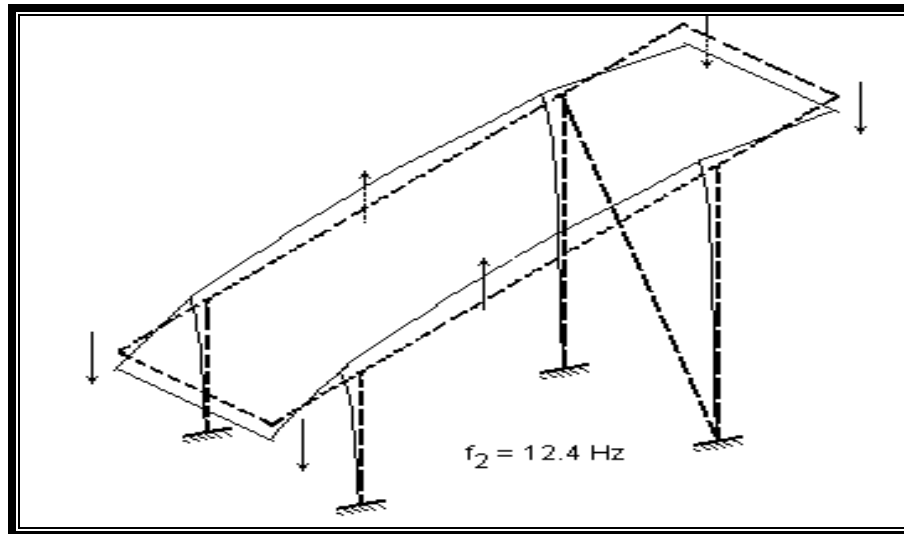


Figura 2.6. Tercer modo natural de vibración.

### Estadio Jalisco Guadalajara, México.

Su estructuración consta de 93 marcos de concreto reforzado prefabricados distribuidos en forma radial, fig. 2.8, con dos columnas de apoyo, los cuales soportan al graderío. En la fig. 2.7, se aprecia el doble voladizo que tienen los marcos para soportar las gradas, ofreciendo una vista espectacular a sus asistentes. En las figs 2.9 a 2.11, se aprecia el proceso constructivo y su estado final. Entre sus datos constructivos se encuentra: Tribunas, material armado de acero y concreto, 28 gradas en parte baja y 24 en parte alta, palcos ubicados en 3 niveles, entre la parte baja y alta del estadio, techo de lámina galvanizada y acanalada con estructura de acero.

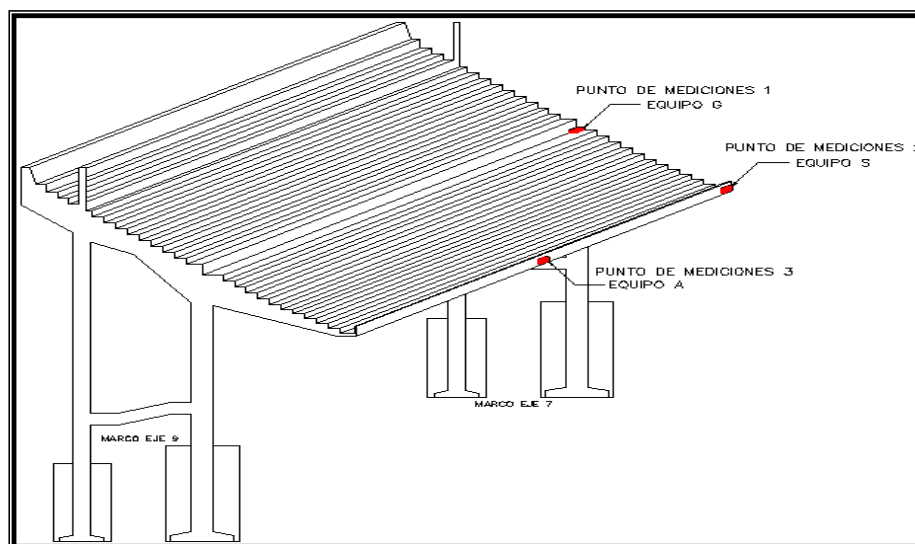


Figura 2.7. Sistema estructural del estadio Jalisco.



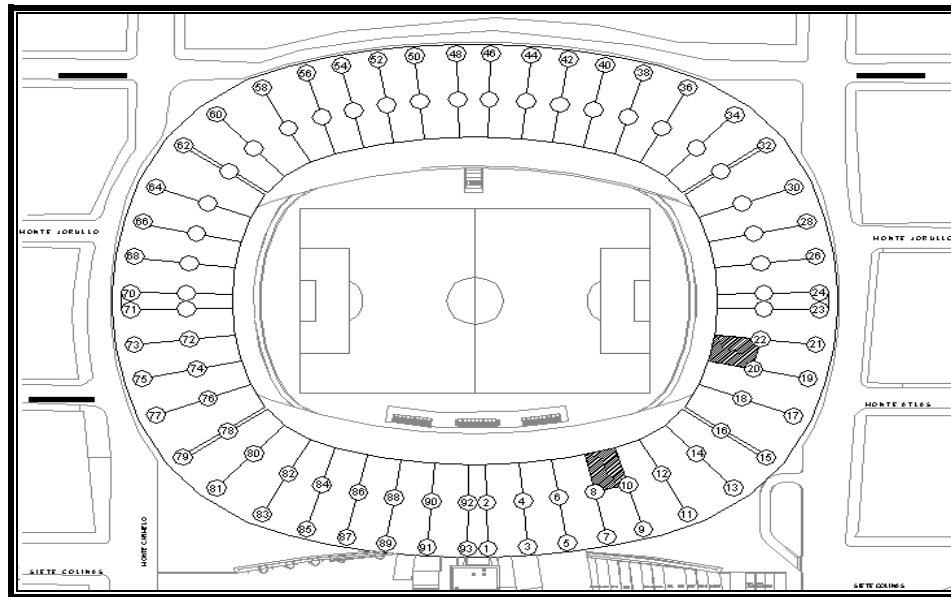


Figura 2.8. Vista en planta del estadio Jalisco México.



Figura 2.9. Estadio Jalisco Guadalajara México.



*Figura 2.10 Construcción del estadio Jalisco, México.*



*Figura 2.11 Palcos para TV en estadio jalisco, México.*

## **Nuevo Estadio Valencia**

El estadio lo conforma un cuerpo ovalado de gran tamaño que rodea un espacio interior libre donde se ubica el campo de fútbol.

Se trata de una edificación en forma de anillo, en realidad, el conjunto del estadio y sus áreas de apoyo, se podría describir en tres partes principales, siendo estas La grada interior, La estructura envolvente, y la Fachada principal.

En primer lugar la grada interior es el escenario donde se ubica el público para ver y participar en el espectáculo del fútbol. La geometría y estrategia de la grada interior es de suma importancia ya que de ello depende la atmósfera interior del estadio en un día de partido.

Debido al tamaño de aforo requerido en un programa el estadio consta de tres gradas, una baja con capacidad para 24 960 espectadores, una intermedia con capacidad para 16 485 espectadores y un alta con capacidad para 32 410 espectadores, cada una con sus espacios correspondientes de circulación. Para conseguir la mejor visibilidad posible en todo el estadio se ha optado por gradas en forma ovalada, de forma que todas las localidades estén orientadas de la mejor manera hacia el campo.

La cimentación está compuesta por una losa maciza de espesores 0.75 m, 1.00 m y 1.60 m dependiendo de las cargas transmitidas por las columna y pantallas de los núcleos de comunicación, teniendo que mejorar el terreno bajo estos.

En general, la construcción horizontal sin juntas de dilatación se compone de placas alveolares de espesor 0.20 m mas 0.10 m de capa de compresión, apoyadas sobre vigas de concreto armadas o pretensadas de ancho 1.2 m y canto 0.65 m. la planta baja y tercera se han ejecutado con losa maciza de concreto armado y canto de 0.30 m, para que las cargas horizontales de las cerchas metálicas de cubierta viajen hasta los núcleos de comunicación vertical.

La estructura vertical está compuesta por columnas de concreto armado in situ, junto con 8 núcleos de comunicación vertical muy rígidos que reciben las cargas horizontales de cubierta y las transmiten a la cimentación. (Ref. 8).



*Figura 2.12 construcción estadio Valencia.*

### **Estadio olímpico Flamingo, Roma.**



*Figura 2.14 Estadio olímpico Flamingo ROMA 1957-59.*

Este estadio se construyó para los juegos olímpicos de Roma de 1960. Unas galerías exteriores, en voladizo, resuelven los accesos del público hasta las localidades, colgadas de la estructura principal. Los marcos de concreto quedan unidos entre ellas por elementos transversales.



*Figura 2.15 fachada Estádio Olímpico Flamingo.*

Toda la construcción se hizo de concreto armado y se utilizó el colado in situ para los marcos que recibirían todo el entramado de graderíos rigurosamente estudiados para ser construidos con piezas prefabricadas.

Esta prefabricación obligaba a mantener un estricto control de la parte de obra ejecutada in situ para evitar las piezas especiales. La consecuencia inmediata de esto es la posibilidad de una losa muy delgada y ligera. Además se practican unos agujeros en la parte plegada, donde hay mayor momento, restando peso muerto allí donde no se necesita para el trabajo a flexión.

## **Estadio Nacional de Beijing**

El estadio nacional apodado “el nido de pájaros” debido a la red de torsión de acero que forma su estructura.

Este estadio fue diseñado con elementos de arte y cultura del país, teniendo unas dimensiones de 333 metros de largo, 294 metros de ancho y 69.2 metros de alto, con una capacidad de 91 000 asientos.

La construcción del estadio comenzó a finales del 2003, con la adaptación de la superficie e instalación de los cimientos, aun que los principales trabajos de construcción no comenzaron hasta marzo del 2004. Las obras de construcción se detuvieron por la percepción del alto costo por lo cual cambio el diseño para optimizarlo.

El nuevo diseño omitió el techo por completo asegurando con esto que el estadio fuese más seguro ante sismos. Con dicho cambio el consumo total de acero en la

estructura principal se redujo un 22.3 % del diseño original. Con la apertura de la parte superior del estadio, se amplió aun más la superficie total de su estructura.

Para el diseño óptimo se requirió la utilización de un software especializado para analizar la compleja geometría. Con esto se aseguraba que la red de torsión de acero se ajustaba a medida, ya que se tiene que girar y doblar a la superficie con precisión, los principales elementos se apoyaban mutuamente y convergen a una red de formación, la parte superior y la estructura de acero están separados el uno del otro, pero ambos se encuentran en cimientos comunes. El techo fue cubierto con una membrana de doble capa, en la parte superior de la estructura compuesta por un etileno tetra fluoroetileno transparente y en su parte inferior por un politetrafluoroetileno translucido. En la fachada el relleno de las protecciones están montadas en el interior de la estructura para así proporcionar la máxima seguridad contra el viento.

Con objeto de minimizar la construcción de cimbras, el equipo de diseño propuso el uso de elementos prefabricados de concreto. Unas hileras en forma de “L” prefabricadas abarcando el área entre el soporte del concreto reforzado in situ y la viga en las secciones de los niveles medio y superior. El estadio cuenta con el apoyo de 24 grandes columnas, con un peso muy superior al de las columnas convencionales en un estadio. Finalmente en la construcción del estadio se requirió un total de 42 000 toneladas de acero.



*Figura 2.16 Construcción Estadio Nacional de Beijing.*

## Estadio Allianz Arena Alemania

El recinto elegido para recibir a la selección nacional de Alemania en el partido inaugural de la Copa Mundial de la FIFA 2006, el 9 de junio de 2006, posee un exterior verdaderamente excepcional, que garantiza al estadio un lugar entre los recintos deportivos más excepcionales y espectaculares del mundo. La fachada, de líneas suaves, formada por paneles romboidales traslúcidos, brilla con una variedad de colores y envuelve la estructura con un aura resplandeciente y casi mágica, posee un aforo total de 66,000 localidades.

La estructura está basada en elementos estructurales de concreto armado con un total de siete pisos de altura quedando terminada en abril de 2005. En ella se emplearon unos 120,000 metros cúbicos de concreto y 20,000 toneladas de acero.

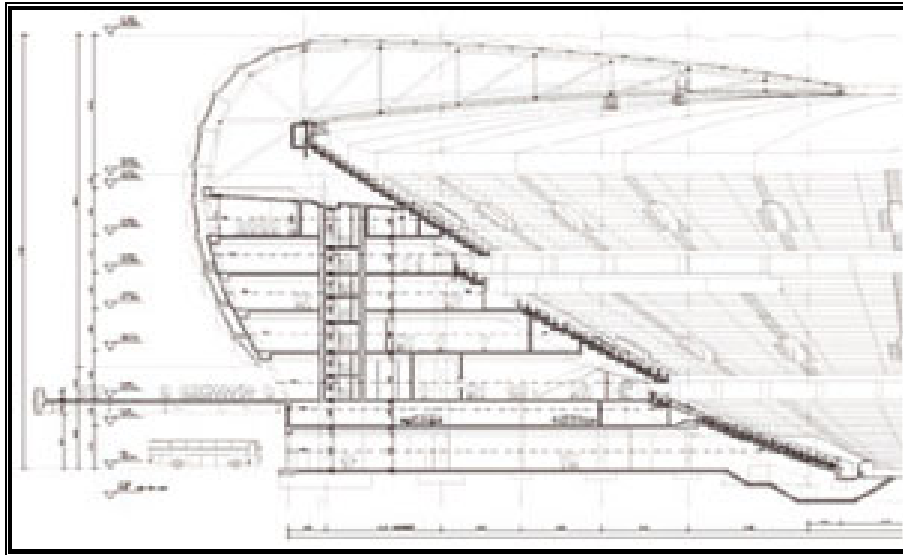
Su extraordinaria fachada está compuesta por 2,874 paneles metálicos de copolímero de etileno-tetrafluoretileno.

Los paneles autolimpiables, resistentes al fuego, al calor y al frío, se hinchan a una presión permanente de 350 pascales. Cada panel se puede iluminar individualmente con un color blanco, azul o rojo para crear un telón de fondo imponente a las noches de partido. La grada superior ofrece vistas impresionantes, gracias a sus 34 grados de inclinación. El estadio también posee el aparcamiento subterráneo más grande de Europa, con 10,000 plazas de capacidad.



*Figura 2.17 Estadio Allianz arena, Alemania.*

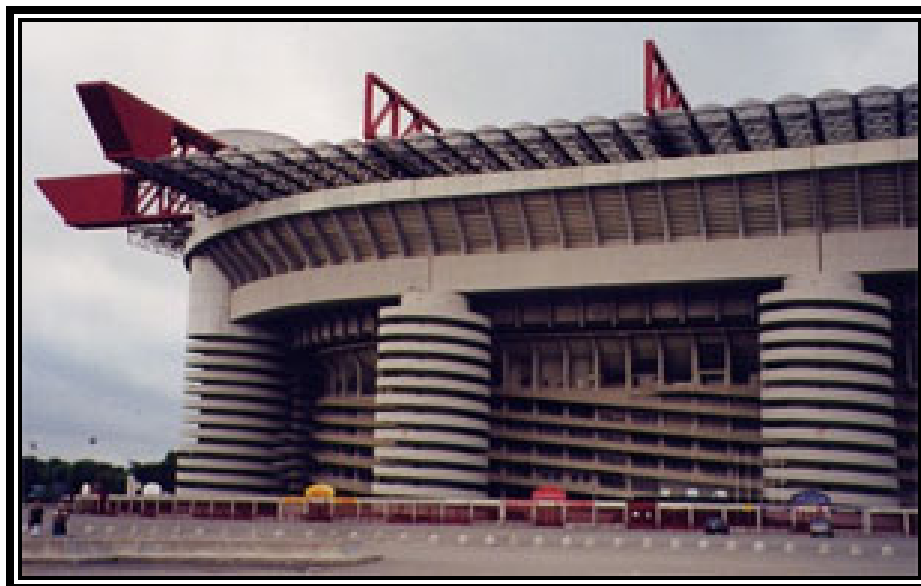
El estadio alcanza una considerable altura de 50 metros a pesar del hecho de que el menor anillo de gradas y el terreno de juego se encuentran debajo de la superficie terrestre como se aprecia en la figura 2.18.



*Figura 2.18 vista de corte lateral del Estadio Allianz Arena.*

### **Estadio Giuseppe Meazza (San Siro) ciudad de Milán.**

Estadio de Milán fue inaugurado en 1925. El estadio estaba basado inicialmente en un modelo, que se caracteriza por cuatro tribunas independientes que se colocaron cerca del campo de juego. Tenía inicialmente una capacidad para 20 000 espectadores.



*Figura 2.19 fachada principal del Estadio San Siro.*

Posteriormente en 1939, con la nueva remodelación de gradas el estadio podía albergar 55 000 espectadores.





*Figura 2.20 union de techo y gradas a las columnas portantes.*

Una vez más en 1955 tuvo lugar otra remodelación, un segundo anillo de gradas fue construido. Las nuevas gradas se apoyaron a una gran estructura autónoma de concreto armado como se observa en la figura 2.21.



*Figura 2.21 vista de las gradas superiores apoyadas de la columna de concreto.*

Para la Copa del Mundo 1990, a finales de los años ochenta se modernizó el estadio con la adición de un tercer anillo de gradas y un techo. El tercer anillo se sustenta de 11 grandes torres cilíndricas de concreto armado que adornan la fachada exterior y el acceso a ella es a través de escaleras helicoidales que rodean las grandes torres como se muestra en la figura 2.22.



*Figura 2.22 Torres cilíndricas de concreto armado.*

Las cuatro torres son de 51 metros de altura e interrumpen la continuidad de la planta superior de los niveles a fin de sostener el techo de vigas metálicas de soporte principal, las vigas se extienden a lo largo del perímetro del estadio y tienen una estructura rectangular. Se cortan en las cuatro esquinas del estadio y se extienden hacia el exterior figura 2.23.



*Figura 2.23 columnas de soporte de gradas y techo.*

## **Estadio Municipal, (Maracaná) Rio de Janeiro Brasil.**

La construcción de un gran estadio en el centro de la ciudad de Río de Janeiro, se planeo para la Copa del Mundo de 1950. El estadio se llamó inicialmente "Municipal". Sin embargo, el estadio siempre ha sido apodado 'Maracaná'.



*Figura 2.24 Estadio Municipal Rio de Janeiro Brasil.*

Después de que fuera construido, el estadio Maracanã fue el mayor estadio del mundo y hoy en día sigue siendo famoso por su marco imponente elíptico, que es casi circular. El estadio se caracteriza por dos anillos grandes de los niveles establecidos en todo el campo de juego, figura 2.25.



*Figura 2.25 Anillo que forman las gradas del Estadio Municipal, Brasil.*

Desde fuera, el estadio no se ve tan imponente como uno esperaría. La altura máxima es de solo 24 metros. Sin embargo, la fachada se caracteriza por una estructura de concreto sólido y reforzado que contiene 60 grandes pilares en forma de 'Y', los cuales sostienen a las gradas superiores como se observa en la figura 2.26.

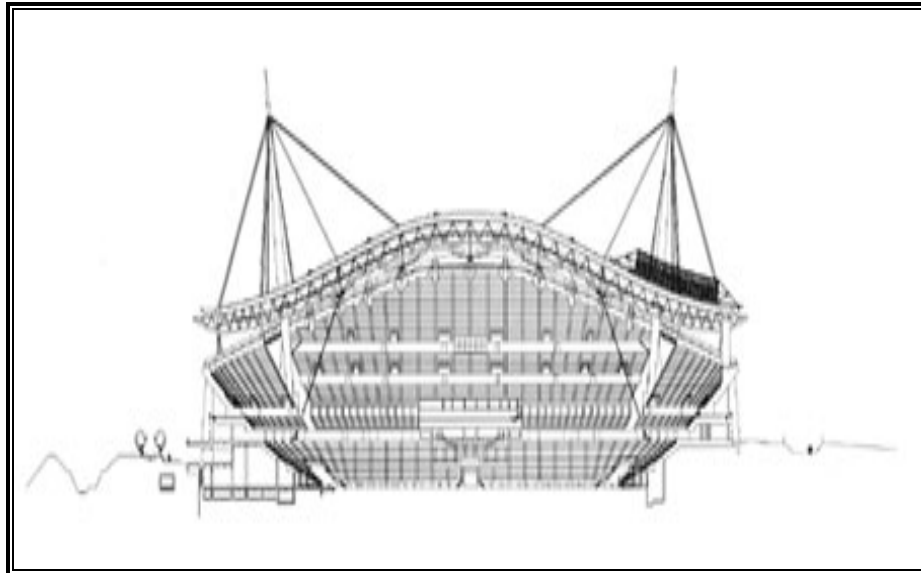


*Figura 2.26 Pilares que adornan la fachada principal.*

El estadio Maracanã fue renovado en gran medida a finales de los años noventa su capacidad total se redujo de manera significativa, para mejorar el confort de los asistentes y su seguridad estructural.

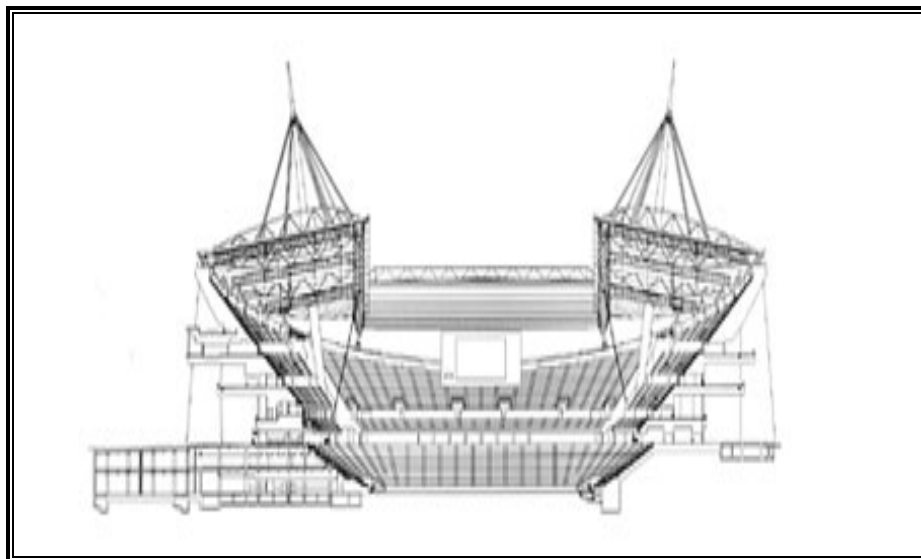
## Estadio Toyota en Japón.

Representa un espacio compacto ligeramente inclinado de concreto reforzado. El exterior se caracteriza por cuatro grandes columnas de acero y también por un perfil ondulado continuo en los niveles superiores que se elevan hacia las tribunas principales.



*Figura 2.27 Esquema general del estadio Toyota, Japon.*

La forma del techo metálico se ve acentuada por las ondas sutiles por encima de los niveles de gradas que se asemejan a la forma tradicional de techos japoneses.



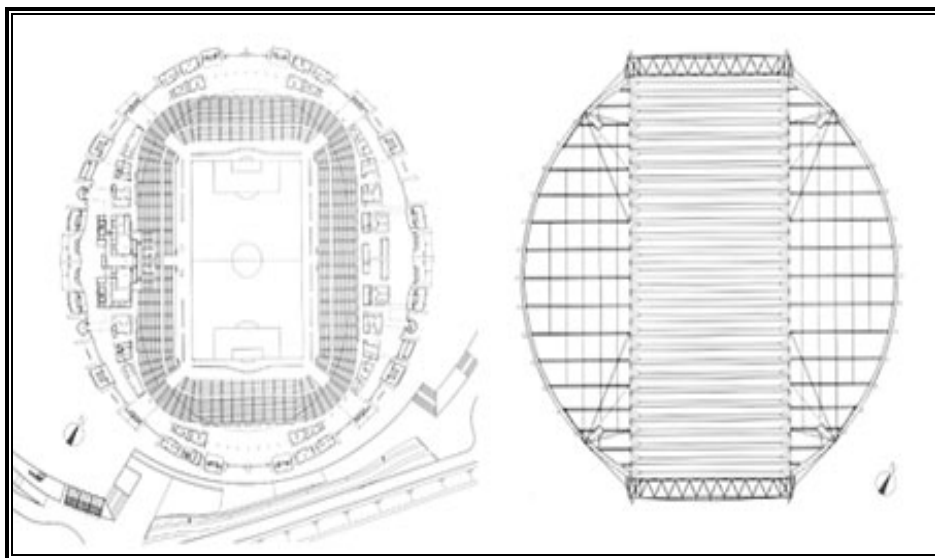
*Figura 2.28 corte transversal del estadio Toyota, Japon.*

El interior del estadio se define por el techo elegante formado de numerosos elementos metálicos que se apoyan en vigas de amarre en los cuatro grandes pendones. Los pendones emergen a través de agujeros en el techo y se adelgazan gradualmente hasta alcanzar una altura de 93 metros, figura 3.29.



*Figura 2.29 Pendones emergiendo a través de la estructura del techo.*

El techo es móvil se abre y se cierra como un acordeón funcionando en un sistema de aire almohada que aligera el peso de la estructura. Las funciones únicas de la tecnología móvil del techo permiten que el techo se cierre completamente.



*Figura 2.30 Vista en planta del techo abierto y cerrado.*

## Estadio da Luz.

Es un estadio avanzado tecnológicamente con un diseño innovador. Fue construido al lado del famoso estadio Estadio Sport Lisboa e Benfica, que también se llamaba Estadio da Luz.



*Figura 2.31 Vista interior del Estadio de la Luz.*

El espacio interior se caracteriza por tres anillos de gradas continua y se caracteriza por la luminosidad que hace que los colores, principalmente rojo brillante resalte y el perfil ondulado de los niveles dan una gran sensación de ligereza de la estructura del estadio como se muestra en la figura 2.31.



*Figura 2.32 Vista del techo Estadio de la luz.*

El techo, que parece flotar sobre las tribunas subyacentes, está conformado por viguetas formando cuatro arcos de acero de gran tamaño que tienen una altura de 43 metros como se ilustra en la figura 2.32.



*Figura 2.33 Arcos de acero sobre pilares angulares.*

El estadio fue construido con concreto armado y prefabricados en las tribunas lo que permite un rápido proceso de trabajo para la construcción de las mismas. El techo se caracteriza por los arcos que descansan sobre pilares angulares, extendiéndose a lo largo de una distancia de 190 metros por 120 metros figura 2.33.

### **Estadio Telstra ciudad de Sídney Australia.**

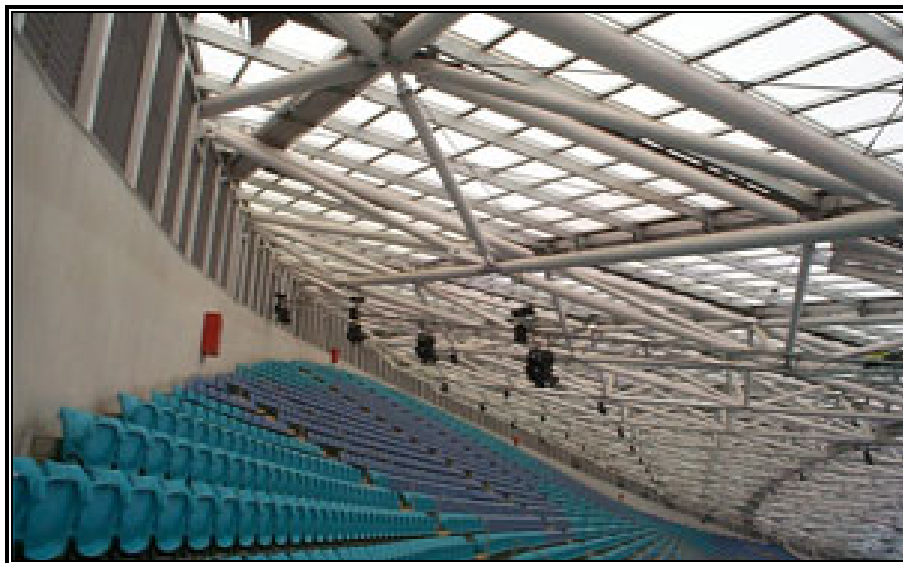
Inicialmente denominado Estadio de Australia, y más tarde Telstra Stadium, fue el centro de los Juegos Olímpicos del 2000 en Sídney. La capacidad original fue 110 000, pero descendió a 83 500 después de las obras de renovación que se le realizaron a este estadio.





*Figura 2.34 Tribunas cubiertas por una gran cubierta.*

El proyecto se inspiró en "Akubra", que es un típico sombrero blando de Australia. El estadio presenta dos tribunas principales que están cubiertas por una gran cubierta que se construye a partir de policarbonato translúcido, figura 2.34.



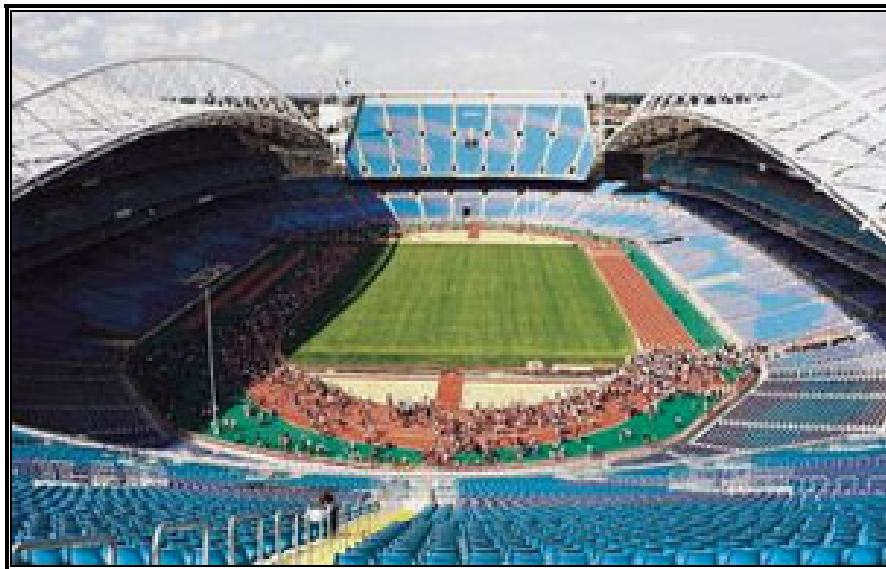
*Figura 2.35 Estructura para soportar el techo del Estadio Telstra Australia.*

Los dos soportes en ambos extremos fueron de 15 metros por encima de las tribunas principales y que no estaban cubiertas por el techo. En la remodelación la parte superior de las gradas fueron demolidas y la parte inferior se colocó más cerca del campo de juego. El techo se amplió para abarcar también las partes más bajas y, en consecuencia todo el estadio estaba cubierto por un techo que tiene la forma de una silla de montar, figura 2.36.



*Figura 2.36 Techado del Estadio Telstra Australia.*

La elegancia del techo es uno de los aspectos más agradables de la estructura, se encuentra suspendido de una estructura de gran arco, el techo tiene una longitud 300 metros. A pesar de su inmensa dimensión, el techo ofrece una sensación de ligereza que se acentúa por el material transparente.



*Figura 2.37 Estructura en forma de arco del Estadio Telstra Australia.*

En el exterior, las cuatro torres de entrada aparecen imponentes haciendo del estadio el punto de referencia de la Villa Olímpica.



*Figura 2.38 Fachada principal del Estadio Telstra Australia.*

### **Parque de los Príncipes Francia.**

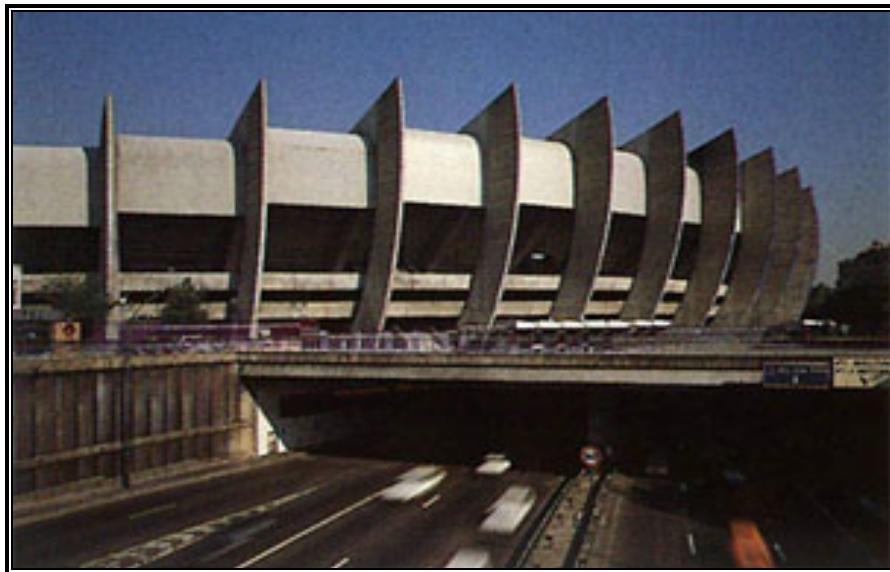
Fue construido en 1897 para acoger la llegada del Tour de Francia. Fue el primero en acoger la final de la Liga de Campeones en 1955 y de la Copa de Europa en 1960. En 1932, tras una renovación el estadio se transformó en un estadio con capacidad para 45 000 plazas de asiento para el fútbol soccer y el rugby.



*Figura 2.39 Vista aérea del Estadio de los Principes Francia.*

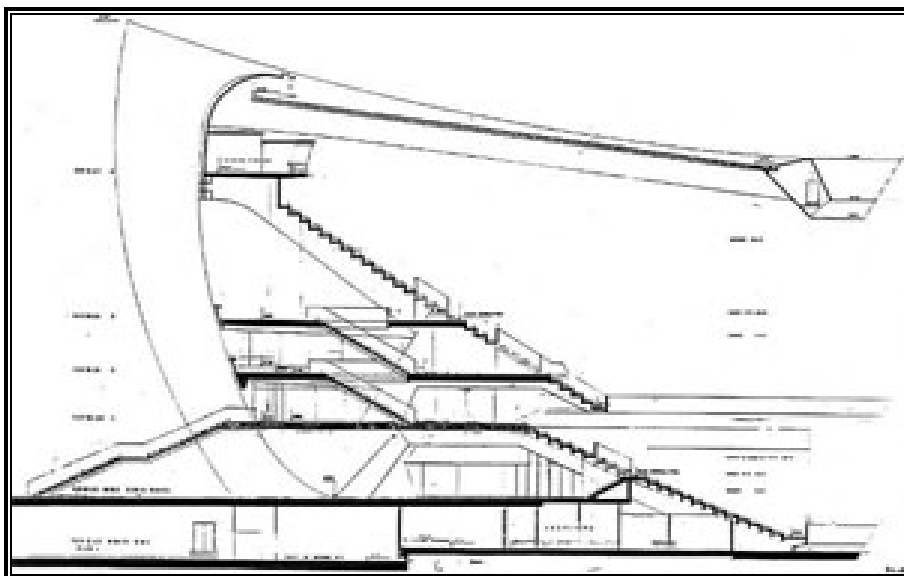
En los años sesenta, la amenaza de una nueva carretera de circunvalación dio paso a una segunda reestructuración imponente. El llamado "Periférico" tenía que

pasar por uno de los rincones del estadio. Entre 1967 y 1972 el estadio fue completamente reconstruido y la carretera de circunvalación terminó pasando por debajo de las nuevas gradas como se muestra en la figura 2.40.



*Figura 2.40 Periferico que pasa por debajo de las gradas del Estadio.*

El estadio es imponente, caracterizado por 50 grandes costillas de concreto armado a lo largo de todo el perímetro elíptico. Las costillas dobles ligeramente curvadas hacia el campo central sostienen el techo y se desprenden las tribunas como se observa en la figura 2.41.



*Figura 2.41 Cortel transversal de las gradas del estadio de los Prncipes, Francia.*

Las vigas en el techo tienen diferente longitud y conectan el perfil externo con el perfil interno, contribuyendo en la creación de un ambiente agradable y cálido.



*Figura 2.42 Vista del interior del Estadio de los Principes Francia.*

### **Estadio Azteca de la ciudad de México.**

El coloso de Santa Úrsula fue inaugurado el 29 de mayo de 1966. Considerado como uno de los más importantes a nivel mundial; tiene cabida para 114,464 personas, además de espacio suficiente para 7,397 cajones estacionamiento. Este monumento, emblema para los mexicanos no está considerado como un estadio más, sino como un conjunto arquitectónico, sobre 63,590 metros cuadrados. Se desplanta la base de las pilas de cimentación, sobre la capa anterior al manto freático que se considera bastante bueno para el desplante. En la cimentación, se uso, zapatas aisladas en cada columna, diseñadas para ligar la estructura basada en traveses, cada zapata mide 7 por 11.50 metros. Estos artefactos de la mecánica están sustentados en pilas de concreto que varían de 8 a 10 metros de profundidad, con una sección de 0.60 metros y con una base de campana como desplante.

El número de pilas en cada zapata, son de 6 a 8. Se utilizaron 8,000 toneladas de varilla de alta resistencia para la estructura de concreto y 1,200 toneladas de acero laminado en perfil para la construcción de la cubierta, este no sería un estadio más, sino un conjunto arquitectónico en el que sumarán todas las comodidades posibles para el público y los jugadores.



*Figura 2.43 Interior del Estadio Azteca.*



*Figura 2.44 Columnas del Estadio Azteca.*

## **Autódromo Hermanos Rodríguez, México D.F.**

La obra fue realizada con gradas prefabricadas más de 4,684 elementos de entre 3 a 12 metros de longitud con un acabado excelente que realza la gran belleza arquitectónica del foro.

El sistema se diseñó para que las secciones rectas de gradas se pudieran colocar en las zonas curvas de la gradería. Fueron utilizadas secciones T para estas gradas, permitiendo una adecuada isóptica para los eventos que se presentan. Su forma general es de una herradura partida en dos precisamente por la pista de automóviles del autódromo.

El diseño se pensó para servir de gradería para las carreras de autos o bien, mediante la colocación de un escenario, al centro de la herradura, sirviera de foro para eventos masivos

La estructura fue sometida exitosamente a pruebas de vibración como las que se producirían masivamente en conciertos de música, así como las de la gente celebrando en dichos eventos. Cuenta con columnas prefabricadas, travesaños T presforzados y escalones prefabricados, siendo esto una muestra de la versatilidad actual de la construcción industrializada en México.



*Figura 2.45 Gradas Autódromo Hermanos Rodríguez, México, D.F.*

## **Lienzo Charro Morelia de la ciudad de Morelia, Michoacán.**

Estructura basó su diseño en columnas circulares, trabes portantes, trabes de rigidez, gradas tipo T y losa extruida spiroll. El lienzo charro cuenta con capacidad para cinco mil personas, mas una área de palcos. El transporte y montaje de la obra se llevó a cabo en un lapso de ocho semanas, cumpliendo así con las expectativas del cliente en cuanto a calidad, costo y tiempo.



*Figura 2.46 Construcción de Gradas Lienzo Charro Morelia, Michoacán.*



*Figura 2.47 Columnas circulares Gradass Lienzo Charro Morelia, Michoacán.*



## **Estadio de futbol Brujos, San Francisco del Rincón, Gto. México.**

Estadio Brujos construido en el año de 1994, basado en gradas de concreto con traveses portantes prefabricados y gradas presforzadas para cubrir un ancho de pasillo de 40 cm y un ancho de asiento de 40 cm con altura entre gradas de 42.5 cm, fueron montadas las gradas prefabricadas y presforzadas con sección de 60 cm de peralte por 90 cm de ancho de 7.50 m de longitud para las tribunas como se observa en la figura 2.48.



*Figura 2.48 Montaje de tribunas estadio Brujos Gto. México.*

A continuación se presentan diferentes fachadas de estadios de fútbol los cuales sobresalen por su impresionante arquitectura resaltando sus formas constructivas y perfecta armonía que generan con el medio que los rodea, mezclando de forma perfecta el entorno, la arquitectura y la ingeniería, diferenciándose por los grandes elementos estructurales que los conforman y que son parte de su estética.

## **Estadio Fráncfort, Alemania.**

El estadio Fráncfort, fue construido especialmente para el mundial 2006 en Alemania. La estructura del estadio es de tipo minimalista combinada con un sistema de luz natural que se filtra por todo el estadio dando buena vista en el día y, por la noche, el sistema de luz artificial alumbró la cancha completamente. Se emplearon en su construcción 80 mil metros cúbicos de concreto y 12 mil toneladas de acero. En el techo se utilizaron grandes vigas y cables de acero que en conjunto pesan cerca de 2500 toneladas. Este gran peso hace que la mega pantalla de video de treinta toneladas parezca de papel. Su capacidad es de 48 132 asientos.



Figura 2.50 Estadio Fráncfort.

### **Estadio Colonia, de la ciudad de Alemania**

El estadio de Colonia está situado en la ciudad del mismo nombre en Alemania, conocido anteriormente como estadio Müngersdorfer. Fue un proyecto de reconstrucción inaugurado en la primavera del 2004. El nuevo recinto construido en el mismo lugar del antiguo, que abrió sus puertas en el año de 1923, tuvo las siguientes mejoras: Las hileras superiores de las gradas tienen una inclinación de 34 grados y tan solo 8 metros separan las gradas de la cancha, 4 mástiles de 72 metros de altura sostienen el techo a través de tensores y funcionan como originales balizas luminosas, teniendo una capacidad para 46 mil personas.



*Figura 2.51 Estadio Colonia, Alemania.*

## Estadio Gelsenkirchen.



*Figura 2.52 Estadio Gelsenkirchen, Alemania.*

Estadio construido para la copa mundial del 2006, abrió oficialmente sus puertas en agosto del 2001 y la UEFA le dio categoría de cinco estrellas refiriéndose al arte en la construcción de estadios. La FIFA visitó oficialmente la ciudad de Gelsenkirchen en 2002 con motivo de la ceremonia de la presentación del emblema oficial: las ya famosas caras de la alegría del fútbol. La gran calidad del estadio se ve reflejada en su terreno de juego desmontable y su gigantesca pantalla cúbica y un techo retráctil y controles electrónicos de accesos.

## Estadio Dortmund de la ciudad de Alemania.

El estadio de la copa mundial de la Fifa de Dortmund. Dicho estadio se construyó originalmente para la copa mundial del 74 y solo se remodeló para la copa del 2006. En noviembre del 2001 se unieron las cuatro tribunas independientes por lo cual su capacidad aumentó considerablemente.

Entre las obras de reconstrucción destacan la ventilación del estadio, la ampliación de las gradas, la construcción del la zona de personalidades y acondicionamiento de vestuarios y zonas para los equipos.

Además de que se puso en funcionamiento el sistema de control de acceso. Sus ocho pilares de sujeción, de 62 metros de altura y de un amarillo intenso, se han convertido en una característica distintiva y pintoresca de la ciudad de Dortmund.



Figura 2.53 *Estadio Dortmund Alemania.*

### **Estadio Mercedes-Benz Arena, (Gottlieb-Daimler), en la ciudad Stuttgart de Alemania**

El estadio original se construyó en 1933 y que con el paso de los años ha sufrido remodelaciones continuas; ya para la copa mundial del 2006 la mayor de sus mejoras consistió en la construcción de los palcos ejecutivos, 1500 asientos, un estacionamiento de varios niveles con acceso directo e instalaciones para visitantes, atletas y medios de comunicación. Cabe destacar la cubierta de tejido del techo que está fabricada con una fibra de poliéster de PVC y cubre las tribunas con 34 000 metros cuadrados de material y a una altura que varía entre los 18 y 25 metros. Este estadio es la sede del famoso club de la Bundes liga Stuttgart.



*Figura 2.54 Estadio Mercedes-Benz Arena, Stuttgart Alemania.*

## COMENTARIOS

De los diferentes estadios que se presentan se pueden observar similitudes en su estructuración, la cual es a base de marcos típicos de concreto, la mayoría de ellos prefabricados y distribuidos en la planta en forma elíptica.

La geometría irregular de los marcos de soporte se ajusta al perfil de las gradas, las cuales son también prefabricadas y simplemente apoyadas. Todos ellos están divididos en módulos estructurales mediante juntas constructivas para mejorar su comportamiento.

Lo que los hace diferentes es, principalmente, la forma de su techumbre, la cual, además de cumplir con una función estructural, de protección y confort para sus ocupantes, forma parte de su fachada e identidad.

## **2.2 Tipos de pruebas para evaluación de la integridad**

Las pruebas que se realizan para evaluar la integridad estructural de los estadios son:

### **Pruebas de vibración ambiental.**

Las pruebas de vibración ambiental determinan los modos de vibración globales, es conocida como prueba operacional la cual mide las vibraciones típicas longitudinales y laterales y son utilizadas a menudo cuando es difícil provocar una excitación sobre una estructura. Fundamentalmente son vibraciones de muy pequeña amplitud y periodos comprendidos entre 0.1 y 10 s.

Para los estudios de la vibración ambiental el ruido es la señal y las ondas que lo integran, en castellano se suelen llamar microtemblores, micro vibraciones o vibración ambiental.

Las características principales de las vibraciones ambientales son.

- El método depende de la excitación ambiental, típicamente producida por los vientos, tráfico de vehículos, equipos y/o maquinaria interna en funcionamiento, la cual induce pequeñas vibraciones a la estructura, muchas veces imperceptibles para los ocupantes, pero que pueden ser registradas por equipos de alta sensibilidad. La respuesta de la estructura es medida y a partir de esta se calculan los espectros para determinar los parámetros dinámicos.
- Su aplicación podría ser limitada cuando mide los modos verticales de cubiertas de asientos.
- La prueba puede ser usada aisladamente pero, debido a los problemas en su interpretación, es usada con mejores resultados en combinación con otras técnicas.
- Un estudio de vibración ambiental podría ser el único método factible para detectar la presencia de modos horizontales de la vibración de alguna tribuna.

Dentro de las ventajas de la prueba de vibración ambiental encontramos:

- La prueba es relativamente económica, bajo la respuesta de la estructura debido a las excitaciones de la multitud.
- En la prueba no se requiere ningún equipo de excitación.
- Las mediciones son hechas en las condiciones de operación de la estructura así que la identidad de los parámetros modales representan el comportamiento dinámico de la estructura.

### **Prueba de vibración Heel-drop, (caída de talón).**

Este método es apropiado para una prueba de arreglos estructurales simples, asegurando que sean excitados todos los modos de vibración.

Las frecuencias naturales de los modos de vibración serán los máximos puntos en los espectros de respuesta.

Se ha desarrollado para medir la fuerza aplicada durante la medición de las vibraciones del piso utilizado. La célula de carga fue desarrollada para contrarrestar la respuesta del piso, que se mide en esta prueba. La célula, es portátil, se compone de cuatro sensores de carga de acero entre las placas de los elementos de aleación de aluminio.

La prueba realizada con un número determinado de individuos, demuestra que la potencia de pico se alcanza en las frecuencias en el rango de 2-15 Hz.

El procedimiento de ensayo da una resolución de frecuencia observándose que requiere menos tiempo en comparación con otras pruebas.

### **Prueba de impacto controlada.**

La técnica es usada comúnmente en la prueba del laboratorio pero no parece haber sido usada sobre tribunas donde la energía requerida para provocar a la estructura es mucho más grande.

La prueba de impacto medida debe ser considerada como una prueba de caída de talón actualizada en la que la excitación está calculada como la más frecuente.

## **Prueba de vibración tipo vibrador ó agitador mecánico.**

Las pruebas de vibración tipo shaker nos sirve para determinar los modos verticales en una grada originados por los espectadores, considera las frecuencias naturales de los modos de vibración como los máximos valores en los espectros de respuesta.

Los procedimientos de prueba pueden ser adoptados dependiendo de la calidad de la excitación que está siendo usada, y de la disponibilidad de instrumentos y de la cantidad del detalle requerido en los resultados, hacer pruebas completamente instrumentadas que proveen una medición directa de la fuerza / tiempo, ha sido la práctica usualmente en ingeniería aeroespacial y está siendo usada para aplicaciones de ingeniería estructural. La disponibilidad de frecuencias completas hace a este método el más exacto de todos aquellos disponibles, particularmente donde los modos son espaciados en la frecuencia, además de incrementar y distribuir la contribución de energía, el uso simultáneo de agitadores en más de una ubicación ayuda a mejorar la identificación de los modos de las frecuencias naturales y para minimizar la posibilidad de extrañar un modo de vibración como puede ocurrir con un agitador usado en un solo lugar. (Ref. 13)

Un ejemplo de la aplicación de estas pruebas fue realizado en el estadio de Manchester, Old Trafford de la ciudad de Inglaterra, figura 2.55.

Las frecuencias naturales pronosticadas para los marcos analizados del estadio durante un evento de música rock fueron de 1.0 hertz y 7.0 hertz.

1. La prueba shaker determino los modos verticales de las cubiertas de asientos sobre el oeste del estadio.
2. La prueba ambiental determino todos los modos del lado oeste del estadio.

La prueba modal de agitador fue llevada a cabo sobre las gradas medias y superiores para determinar los modos verticales de excitación. La magnitud de la fuerza fue medida fijando acelerómetros a las masas de reacción para medir su aceleración.

Se encontró en primer lugar, que las ménsulas de vigas suministran una sobreestimación de la rigidez, el concreto se agrieta generalmente mientras está en uso y por lo tanto puede disminuir la rigidez.





*Figura 2.55 Estadio Manchester, Inglaterra.*

**EFFECTOS DINÁMICOS INDUCIDOS POR EL BRINCO DE ESPECTADORES EN ESTADIOS**

Características de prueba			Resultados de prueba y requisitos de la guía interna				
			Resultado esencial	Resultado deseable	Los resultados no necesarios que tiene que cubrir la guía, pero pueden ser especificados por el ingeniero para certificación de diseño detallados, precisando datos de tipo 2		
Tipo de prueba	Excitación	Medición de fuerza	Frecuencias naturales	Formas modales	Proporciona amortiguamiento	función de respuesta de frecuencia	masa modal
Tipo 1	Ambiental	No es posible	Sí, pero se necesita tener cuidado al interpretar. Puede combinarse con otro tipo para su interpretación	Sí, si la energía de excitación es suficiente	No seguro	No	No
Tipo 1	Caída de talón	No se realiza normalmente	Apropiado para las estructuras simples. Difícil con las estructuras complejas o modos de vibración alejados.	Provee la señal exacta para los arreglos estructurales	No seguro	No	No
Tipo 1	Golpe de martillo	Medible	Si	Si	Mejor que heel-drop	Posible con mas desenvolvimiento si la energía de excitación es suficiente	
Tipo 1 o 2 de acuerdo con las técnicas y los instrumentos de trabajo.	agitador con la variedad de tipos y técnicas posibles	Medible o deducible dependiendo de la técnica	Si y proporciona más resultados que las pruebas heel-drop , impacto o ambientales	Si	Si	de los resultados se da en función de la técnica e instrumentos. Los resultados más confiables son con el agitador midiendo la secuencia de fuerzas.	

*Tabla 2.2 resultados de pruebas y requisitos de acuerdo a la guía.*

## 2.3 Reparaciones en estadios.

Se presentan algunos casos de las reparaciones que se han hecho en los elementos estructurales de gradas y cubiertas en estadios dañados, deteriorados por el tiempo y por las diversas actividades que se realizan en los mismos.

### **Estadio Nemesio Camacho el Campín de la ciudad de Bogotá, Colombia:**

Estudios del estadio mostraron, fisuras en las estructuras de soporte de las gradas, las cuales se reforzaron utilizando cables de pos tensado como se muestra en las siguientes figuras. Ref 10.



*Fig. 2.56. Fisuras en la estructura del estadio Nemesio Camacho el Campín.*



*Figura 2.57. Reforzamiento de la estructura con cables de postensado.*



*Figura 2.58. Cables de postensado para las tribunas altas del Estadio Nemesio Camacho el Campín.*

En las tribunas norte se implementó un reforzamiento de la estructura principal aumentando las secciones de los elementos y colocando elementos adicionales a la estructura original.



*Figura 2.59. Reforzamiento de Tribunas Norte y Oriental.*



*Figura 2.60. Reforzamiento de las tribunas sur.*

En la tribuna de la parte oriente se implementaron tensores para mejorar la estabilidad ya que al igual que en la grada se encontraron fisuras en las escaleras.



*Figura 2.61. Cables de tensionamiento en tribuna oriental.*

### **Estadio Nacional, Chile, Julio Martínez Prádamo.**

Estadio ubicado en la comunidad de Nuñoa, en Santiago de Chile. La cubierta del estadio se diseñó bajo la norma sísmica NCh 433 – 1996, teniendo en cuenta que al ser esta una estructura que envuelve y rodea una existente, debe trabajar sísmicamente en todas las direcciones, por lo que la estructura será dividida en secciones, para que responda de mejor manera con respecto a los esfuerzos longitudinales y transversales dependiendo de su disposición espacial.

De este modo se generan sub-estructuras que trabajan de forma independiente a la respuesta del sismo, liberando de esta manera torsiones provocadas por el movimiento. Entre los elementos estructurales y las sub-estructuras que conformen la cubierta, deberán existir juntas de dilataciones para lograr absorber los distintos sentidos del movimiento sísmico. De esta manera se responde a la norma NCh 433 – 1996 en el párrafo 5.10.1.

La estructura tiene una resistencia tal que, con un eventual sismo de medianas proporciones, sufra daños menores, quedando la estructura intacta, permitiendo que siga cumpliendo su objetivo.

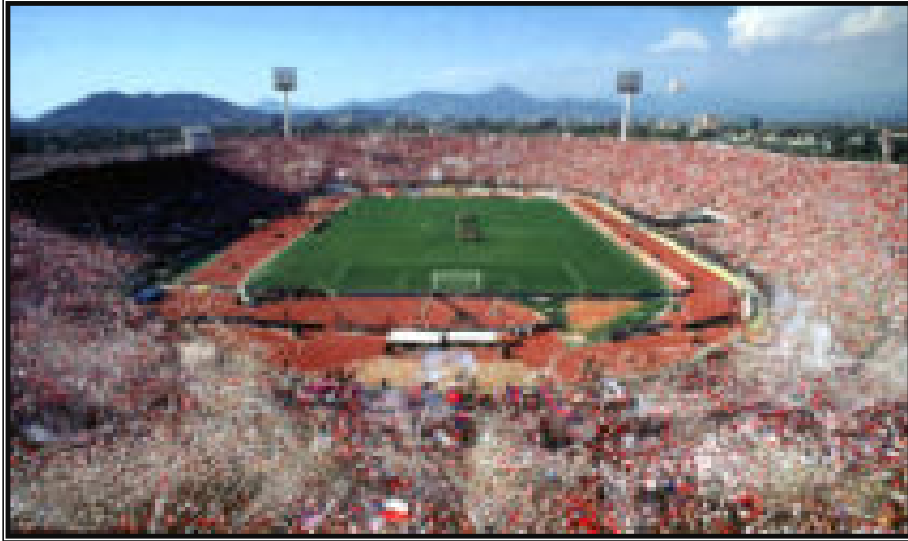


Figura 2.62 *Estadio Nacional de Chile.*

### **Remodelación del Estadio Chapin.**

El estadio se encuentra ubicado en la región de Andalucía, España. La ampliación de las instalaciones existentes (cubierta) mediante nueva estructura metálica ensamblada a la estructura existente de concreto armado, generó nuevos estados de sobrecargas (derivados en general de la acción del viento) para las cuales la estructura original no estaba diseñada. A tal efecto, los trabajos de refuerzo tenían como principal objetivo incrementar la capacidad portante de la estructura existente, actuando, principalmente, en la rigidización y armado de las zonas cercanas a los nudos de entrega entre estructura metálica y de concreto. La solución adoptada por la ingeniería incluía el cosido interno mediante anclaje químico pretensado pasante así como el refuerzo externo mediante fibras de carbono adheridas al concreto.

Con el objetivo de reducir la longitud de anclaje y para que la fibra absorbiera esfuerzos del soporte lo antes posible, el diseño incluía un dispositivo adicional de anclaje, aprisionado la fibra mediante una pequeña chapa metálica, libre de pernos o anclajes adheridos sobre el soporte y sobre la fibra de exclusivamente mediante adhesivo.

Se colocaron a cada lado de una columna de concreto, un lienzo de fibra adherido al soporte en una longitud de 20 cm. Sobre esta zona de anclaje de 20 cm, se colocó una chapa de acero de dimensiones 200 x 220 x 10 mm, adherido al concreto con adhesivo.



Figura 2.63 Laminado y chapa de acero.

Se realizó un ensayo, mediante un gato hidráulico apoyado en la columna de concreto, aplicando un esfuerzo de tensión sobre los lienzos de fibra de carbono hasta alcanzar el agotamiento de la unión.

El refuerzo colocado, se muestra en la figura 2.64.

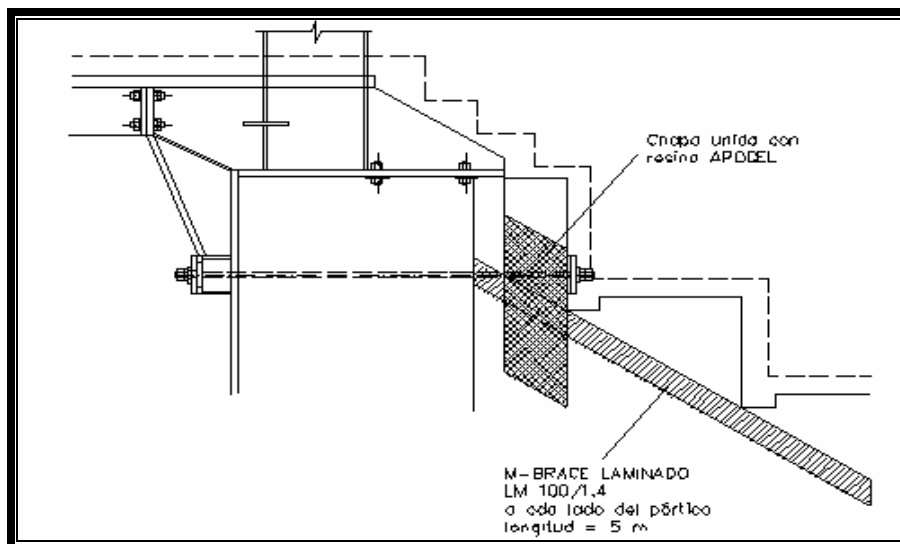


Figura 2.64 Esquema del refuerzo.

El refuerzo con fibra de carbono, consistía en la colocación de una tira de lienzo en cada uno de los laterales de las vigas que sostienen las gradas.





Figura 2.65 Aplicación de adhesivo.



Figura 2.66 Colocación del laminado en vigas.



Figura 2.67 Estado final del refuerzo.

#### Reparación de gradas

El deterioro de las gradas hizo necesario su aparición. Para esto se procedió a realizar la limpieza de la parte superior del concreto (asiento) mediante chorro de agua a presión.

Posteriormente y ya humectada la zona se aplica el mortero de reparación cosmética POLYCRET en dos capas. Una vez endurecido el POLYCRET se aplica el revestimiento de poliuretano para proporcionarle una mayor durabilidad.



Figura 2.68 Estado final de la aplicación.

# 3

## Sistemas de monitoreo

### 3.1 Monitoreo remoto

El monitoreo remoto es de mucha importancia, ya que va a permitir obtener datos de vibraciones para el estudio de gradas o también podrá ayudar a controlar a la gente que asista al estadio cuando se utilice un sistema de video vigilancia, no sólo en eventos deportivos, sino también en cualquier tipo de actividad que se realice, por ejemplo en la implementación del sistema de video vigilancia gracias a la implementación de cámaras rotatorias con un movimiento angular de 180° y un alcance de hasta 300 metros, facilitando una adecuada seguridad en el estadio, desde cualquier punto.



*Figura 3.1. Unidad de control*

Este sistema cuenta con unidades de control donde se registra todo lo que sucede en los lugares de reunión como estadios de fútbol. Las imágenes captadas permiten enviar a las fuerzas del orden a eliminar todos los incidentes. El coordinador de seguridad que es adonde llega toda la información controla en cada encuentro a la Policía Nacional y Local, a Protección Civil y a la Cruz Roja, en un despliegue que abarca la totalidad del estadio. Por ejemplo, en La liga Premier del fútbol Ingles, solo se aplica el sistema a algunos de sus estadios, como el del Manchester United.

Otro gran ejemplo es el esquema de seguridad de la Liga española el cual es objeto de estudio para otras naciones. No en vano, en sus estadios se reparten 1748 cámaras de televisión, 718 domos móviles y 716 objetivos de zoom, cifras que provocan un despliegue técnico y de personal que no existe en otro país.

### **Tecnología de punta en video vigilancia.**

La tecnología de punta en video vigilancia fue utilizada en el mundial de Alemania 2006 para garantizar la seguridad de los aficionados durante partidos de futbol, con un sistema que le permite obtener una visibilidad como la mostrada en la figura 3.2.



*Figura 3.2. Imagen desde una cámara instalada.*

Este sistema de video vigilancia permitió proveer imágenes de un área amplia de igual manera se obtienen amplias imágenes de individuos en específico. Esta tecnología ha sido excelente en términos de costos, desempeño y calidad. En cuanto a la organización y economía, definitivamente es la solución más rentable gracias a imágenes con alto detalle.



*Figura 3.3. Cámara instalada en un acceso*

En el estadio Kaiserslautern se implementó este tipo de sistema el cual fue el menos costoso de todos los estadios para la Copa del Mundo Alemania 2006.



*Figura 3.4. Imagen desde Cámara.*

El sistema de video vigilancia de marca MOBOTIX ha diseñado sus cámaras sin partes móviles para garantizar que fueran muy robustas y de muy bajo mantenimiento. Así, no necesitan calentador en invierno, y consumen muy poca potencia, es decir, por debajo de 3 voltios, cuando otras necesitan de 7 a 10, o hasta 25 voltios en invierno.



*Figura 3.5. Cámara tipo domo para exteriores.*

Para las áreas exteriores se especificaron domos, y para las áreas interiores como entradas y gradas, cámaras de alta resolución.



*Figura 3.6. Controladores de vibraciones.*

Otro tipo de sistema para monitorear una estructura y poder obtener datos de vibraciones, son los sistemas de observación remoto RMS. Este sistema es empleado por su eficiencia y bajo costo, ya que proporciona una gran cantidad de datos de la estructura analizada.

Los Sistemas RMS.

Pueden ser instalados sobre una tribuna para medir vibraciones por un período de hasta un mes. Este sistema se conecta a la Internet usando una conexión de banda ancha la cual permite el control remoto del sistema y descarga los datos adquiridos, uno de sus problemas es que una vez que se pierde la señal esta no se restablece en automático.

La información de la vibración puede ser recabada para una estructura que puede estar o no en servicio, lo cual permite revisar el comportamiento de la estructura por un período largo de tiempo y sobre todo a distancia. Por esta razón se ha pensado en la utilización de varios de estos RMS para ser instalados en diversos estadios, y que puedan ser monitoreados remotamente desde una sola posición.

El fin de este sistema es monitorear continuamente la respuesta de vibración de la estructura por la excitación provocada del público, y también adquirir datos de vídeo de actividades del público durante distintos eventos.

Las reacciones de vibración son medidas en este sistema usando una serie de 12 acelerómetros piezoeléctricos ya que son apropiados para frecuencia de 1 hertz y una sensibilidad de 1000 mv / g. Además de las respuestas de vibración, el sistema incorpora los datos de vídeo adquiridos de las actividades del público.



*Figura 3.7. Sistema de video vigilancia utilizado.*

Los RMS funcionan enviando la información a un centro de adquisición de datos.



*Figura 3.8. Gabinetes para centro de adquisición de datos.*

A manera de ejemplo la utilización de este sistema de RMS fue implementado en el estadio Midland Road de Bradford, mostrado en la figura 4.9, construido en los inicios de 1990 y consta de una serie de marcos acerados. La cubierta de distribución de los asientos, en el cuál el espectador está situado, se construyó de concreto simple.



Figura 3.9 Vista general del Estadio Midland Road, en Bradford.

El comportamiento dinámico de esta estructura es muy inusual para una tribuna. Usualmente, los modos verticales en estadios que son excitados por el público son encontrados en filas en cantiléver. Sin embargo, esta estructura en particular esta soportada por la columna trasera como se observa en la siguiente figura.

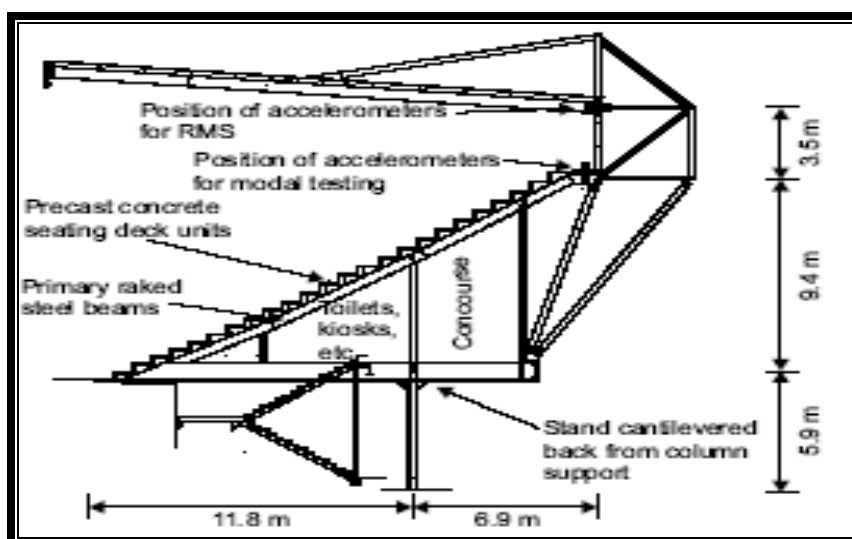


Figura 3.10 La Sección Transversal Típica de la Estructura analizada.

Se realizó una prueba modal estándar para examinar el comportamiento dinámico con la estructura sin público. Esta información se usó para seleccionar posiciones óptimas de transductores usados para el sistema de RMS.

Los primeros modos de vibración estimados de la prueba modal son presentados en la figura 3.11. Como se esperaba, hubo una familia de vigas en cantilever con modos globales, con frecuencia natural mínima en 3.28 Hz.



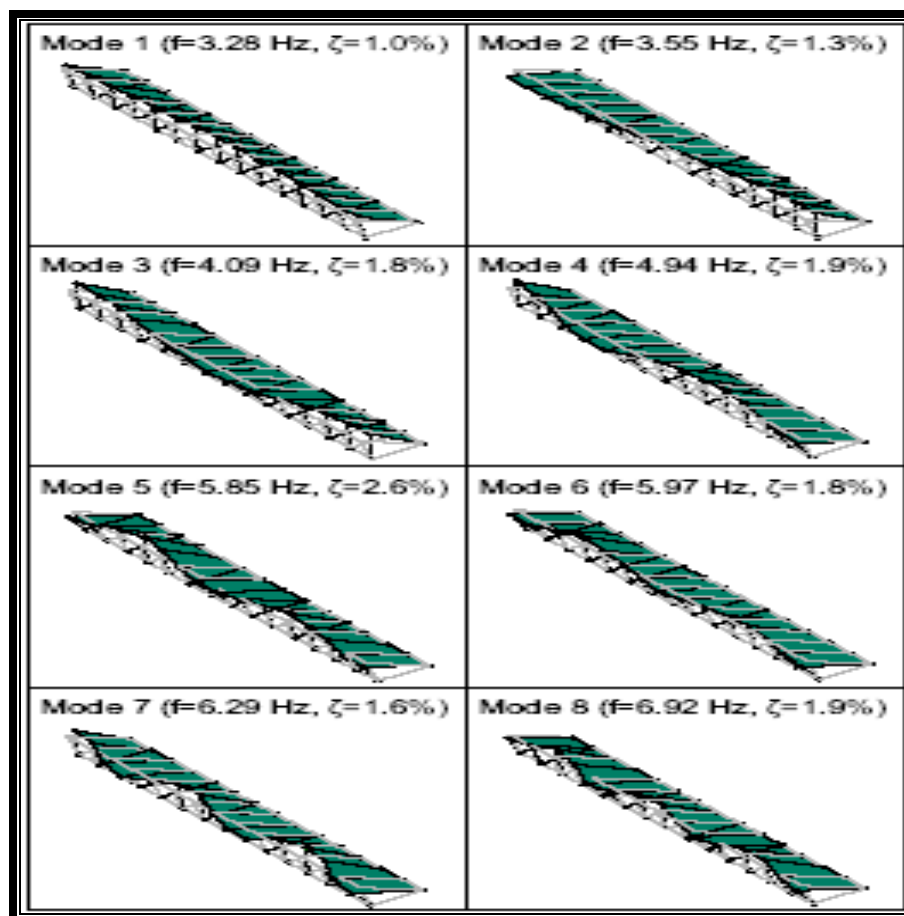


Figura 3.11 Resultados de la prueba modal para la estructura vacía.

Los transductores de vibración son empleados para medir la velocidad lineal, desplazamiento, proximidad, y también la aceleración de sistemas sometidos a vibración. Convierten la energía mecánica en energía eléctrica, lo que significa que producen una señal eléctrica la cual está en función de la vibración.

Desde el fin de diciembre del 2001, cuando se terminó la instalación de los RMS han estado adquiriendo 12 canales de datos de aceleración continuamente en una tasa de muestreo de 80 Hz. esto incluye una gran cantidad de datos no solo cuando la estructura está vacía, sino que también datos de todos los eventos deportivos que han tenido lugar durante el año. En esta tasa de muestreo, los archivos generados son típicamente de 5 megabyte de datos para todos los canales. Adicionalmente, cuando un acontecimiento es programado, un cronómetro está dispuesto automáticamente para la adquisición de vídeo.

El histograma típico de tiempo - aceleración medido durante un partido de fútbol es presentado en la figura 3.12.

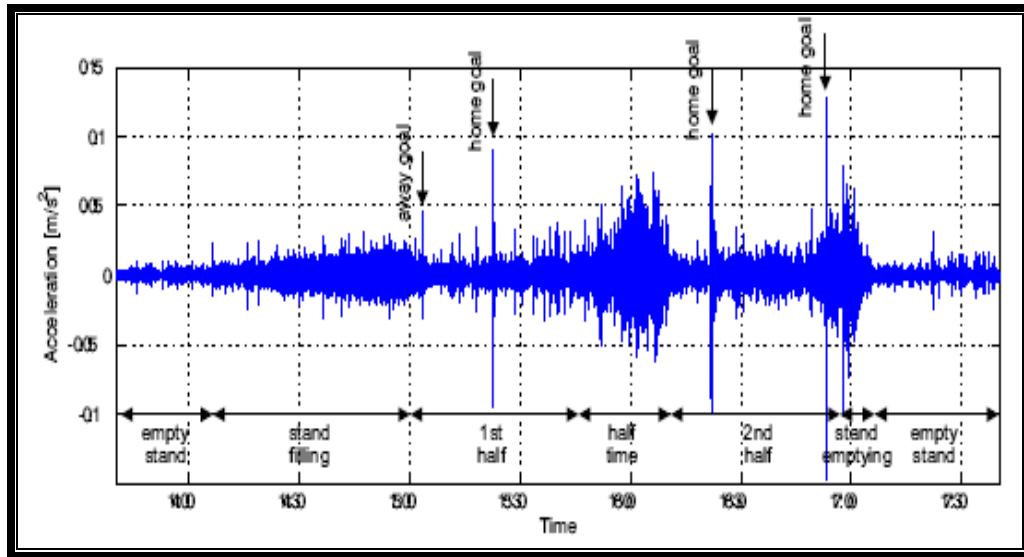


Figura 3.12 Registro Típico.

Hay usualmente períodos cortos de respuesta alta durando 5-10s causados por el público brincando y aplaudiendo.

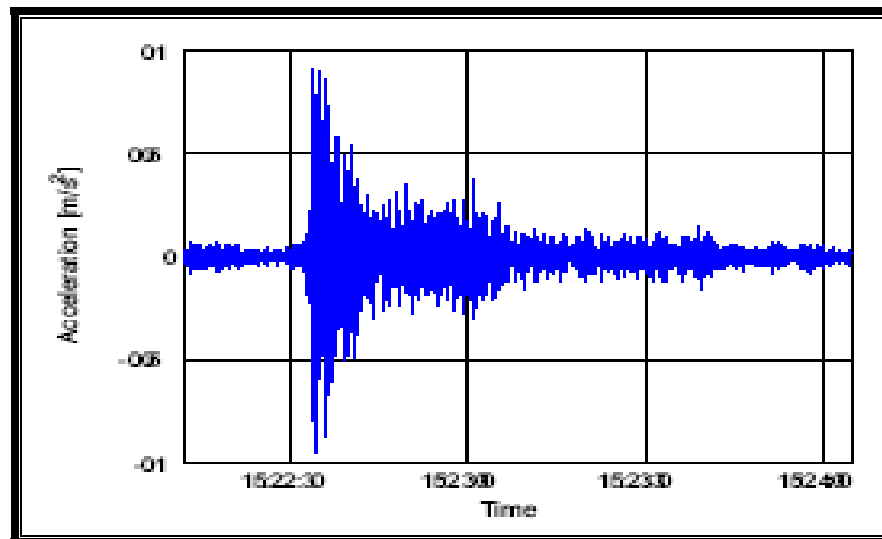


Figura 3.13 La Cronología Para diversas actividades de corta duración.

Son usualmente estos acontecimientos los que causan las respuestas más altas en conjunto. En el medio tiempo, hay un período de respuesta alto por las personas que desocupan sus asientos para comprar bebidas y después en el fin del encuentro, hay otro período de respuesta alto.

Las razones principales para adquirir datos de vídeo son tener un registro de la distribución del público en la estructura e indicar las razones posibles de el por qué se registran períodos de respuesta alta.

Por ejemplo, en la figura 3.14 se presentan dos vídeos típicos adquiridos durante un encuentro.

En el primer video, puede verse que el público se sienta generalmente y hay algunos asientos que no son ocupados.



*Figura 3.14 video de gente sentada.*



*Figura 3.15 video de gente parada.*

El segundo video es tomado poco después de que se anotó un tanto. Como puede verse, el público está ahora de pie y aplaudiendo.

Como apoyo del sistema de RMS se utilizaron transductores, Preamplificadores, servoacelerómetros y acelerómetros para la obtención de vibraciones en la estructura.

Los transductores pueden tener de uno a tres ejes de medición, siendo estos ejes ortogonales. Al momento de seleccionar transductores de vibración es necesario considerar cinco características principales a saber:

- Rango de medición, rango de frecuencia, precisión, sensibilidad transversal y condiciones ambientales.

El rango: puede ser en unidades “g” para la aceleración, en pulgadas/seg para velocidad lineal (y otras distancias en el tiempo), y pulgadas u otras distancias para desplazamiento y proximidad.

La frecuencia: es medida en Hz, (Hertz) la precisión es comúnmente representada como un porcentaje del error permisible sobre el rango completo de medición del dispositivo.

La sensibilidad transversal: se refiere al efecto que una fuerza ortogonal puede ejercer sobre la fuerza que se está midiendo. (Ref. 11).

## **3.2 Tipos de transductores para medición de vibraciones.**

Los diferentes tipos de transductores usados para la medición de vibración son:

- Transductores de Aceleración
  - Acelerómetros Piezoresistivos
  - Acelerómetros Piezoeléctricos
- Transductores de desplazamiento
  - LVDTs
  - Corriente *Eddy*
  - Capacitivos
- Transductores de velocidad
  - Vibrómetros Láser

### **Transductor de Desplazamiento**

Los instrumentos de corriente son dispositivos de desplazamiento sin contacto, que miden directamente la posición de un eje giratorio con respecto a un punto "fijo". El cambio en la posición de un eje provee una indicación directa de la vibración.

La punta de la sonda contiene una bobina encapsulada, la cual cuando es excitada con una señal de alta frecuencia genera un campo electromagnético. A medida que el eje rota bajo condiciones de vibración, se alejará o acercará a la punta de la sonda interactuando por consiguiente, con el campo electromagnético. Se inducirá una corriente, cuya energía es proporcional a la interferencia del campo magnético. Por lo tanto, midiendo el valor de la corriente, se puede determinar la posición del eje y por consiguiente la vibración. Los componentes electrónicos asociados con la sonda de corriente *Eddy*, proveen la señal de excitación de alta frecuencia y una salida proporcional a la señal de corriente *Eddy*.



*Figura 3.16 Equipo Portátil de Medición de Vibración (Eddy).*

### **Vibrómetros Doppler Láser (LDV):**

El vibrómetro Láser es un dispositivo de medición que emplea la tecnología láser y la interferometría, proceso de cuantización del fenómeno que se observa cuando se superponen dos frentes de onda luminosos, que dependen del retraso relativo entre las ondas que se superponen.

Tecnología óptica para medir de forma remota, velocidades de superficie o vibraciones de puntos específicos en una estructura en vibración, con una alta resolución espacial, y un amplio rango de amplitud y frecuencias.

El principio de la Vibrometría Láser (LDV) se apoya en la detección de un cambio Doppler en la frecuencia de la luz coherente dispersada por un objetivo en movimiento, del cual se obtiene una medición resuelta en el tiempo de la velocidad del objetivo. Para ello, se proyecta un rayo láser sobre la superficie en vibración. El cambio en frecuencia de la luz recogida de vuelta desde la superficie, es una cantidad proporcional a la velocidad de la superficie (El efecto Doppler).

Un vibrómetro típico comprende una "cabeza" o sensor óptico interferométrico y una unidad electrónica de control. El controlador procesa la señal de la cabeza óptica y entrega un voltaje analógico proporcional a la velocidad o desplazamiento de un punto de la superficie.

Los vibrómetros láser operan completamente sin contacto y no son afectados por la superficie, ni por las condiciones ambientales tales como la temperatura y presión. Los vibrómetros láser están técnicamente bien adaptados a las aplicaciones generales pero ofrecen beneficios especiales donde se imponen ciertas restricciones de medición, por ejemplo altas frecuencias de operación, alta resolución espacial u operación de transductores remotos, o por la estructura misma, la cual puede ser de una superficie caliente, de luz, o rotatoria. Las mediciones sobre tales estructuras son a menudo, aplicaciones importantes para LDVs.

Servoacelerómetro.

Registra los movimientos vibratorios en tres direcciones ortogonales en puntos seleccionados. Estos movimientos se transforman internamente en señales eléctricas en función de niveles de voltaje directamente proporcionales a las señales de entrada y se almacenan en dispositivos de memoria que permite su recuperación vía puerto serial usando equipos de cómputo personales. Está compuesto por:

Preamplificadores:

Son de utilidad en la amplificación de la señal obtenida del sensor.

Filtros:

Se emplean para eliminar las señales producidas por distintas fuentes de ruido ajenas al experimento, mismas que pueden dificultar las tareas de identificación de las señales.

Amplificadores:

Para amplificar las señales a niveles apropiados para su interpretación y procesamiento. Estos instrumentos tienen un convertidor analógico digital de los registros de voltaje.

Durante el registro de señales es posible monitorear las mediciones utilizando un analizador de espectros virtual y observar in situ las señales procesadas en diferentes puntos de medición y en consecuencia estimar de manera preliminar algunos parámetros estructurales. Es de importancia mencionar que las señales registradas se obtienen como archivos binarios que contienen las historias de aceleraciones en tres direcciones ortogonales las señales registradas se extraen de tal forma que puedan ser procesadas numéricamente, y manipuladas en gabinete.

Acelerómetros:

Los acelerómetros son dispositivos para medir aceleración y vibración. Estos dispositivos convierten la aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración.

Los acelerómetros miden la aceleración en fracción de la aceleración de la gravedad "g".

Los acelerómetros son direccionales, esto quiere decir que sólo miden aceleración en un eje. Para monitorear aceleración en tres dimensiones, se emplea acelerómetros multi-ejes (ejes x,y,z), los cuales son ortogonales.

Los acelerómetros se clasifican en activos, pasivos y piezoeléctricos.

Los acelerómetros pasivos envían la carga generada por el elemento sensor y debido a que esta señal es muy pequeña, estos acelerómetros requieren de un amplificador para incrementar la señal.

Los acelerómetros activos incluyen circuitos internos para convertir la carga del acelerómetro a una señal de voltaje, pero requieren de una fuente constante de corriente para alimentar el circuito.

Acelerómetros Piezoeléctricos.

Este tipo de acelerómetros aprovechan los fenómenos piezoeléctricos en algunos materiales, para generar una señal eléctrica proporcional, a la aceleración de la vibración a la que son sometidos. El elemento activo del acelerómetro es un cristal piezoeléctrico pegado a una masa conocida.

Cuando el acelerómetro se encuentra sometido a vibración, se genera una fuerza, la cual actúa sobre el elemento piezoeléctrico. Esta fuerza es igual al producto de la aceleración por la masa sísmica. Debido al efecto piezoeléctrico, se genera una salida de carga proporcional a la fuerza aplicada. Puesto que la masa sísmica es constante, la señal de salida de carga es proporcional a la aceleración de la masa.



# 4 Obtención de propiedades dinámicas.

## 4.1 Equipos mecánicos para generar vibraciones controladas.

Se presenta a continuación dos casos de equipos para generar vibraciones las cuales pueden ser controladas.

Excitador de Masa excéntrica.

El vibrador de masa excéntrica se desarrolla para proporcionar una fuente de excitación apropiada y probar estructuras. Este equipo desarrolla fuerzas armónicas a través de la rotación de masas unidas al eje. La respuesta de la estructura a la fuerza armónica, evalúa las propiedades dinámicas de las estructuras tales como frecuencia y modos naturales. La respuesta de una estructura a las fuerzas armónicas sobre un rango de frecuencias, da como resultado la curva de respuesta en frecuencia, la cual muestra los picos de resonancia correspondientes a cada frecuencia natural de la estructura.

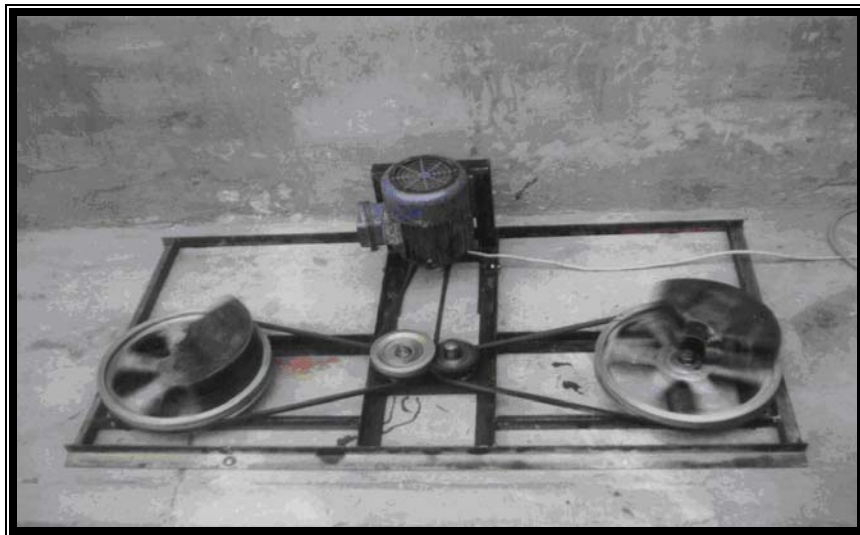


Figura 4.1.1 Acelerómetro electromagnético.

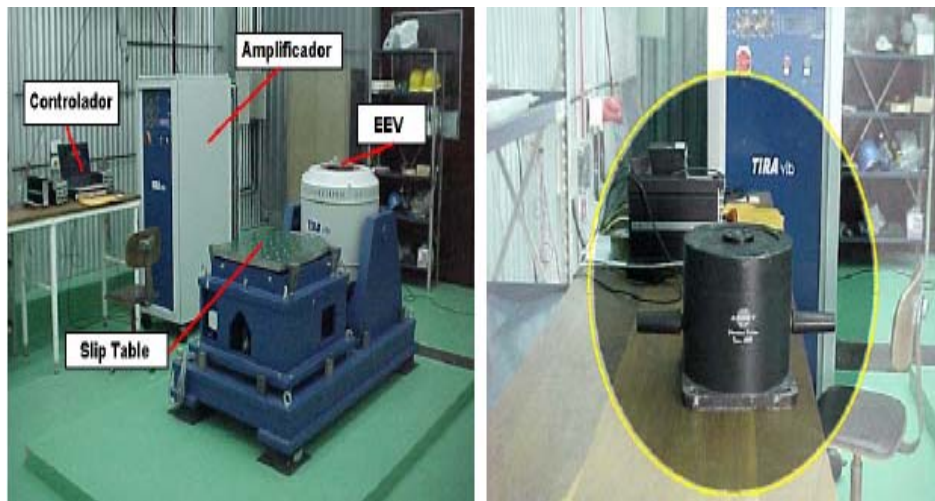
Los vibradores de masa excéntrica usan una o mas masas excéntricas girando para producir una fuerza. Una sola masa girando produce un vector de fuerza omnidireccional, cuya magnitud es proporcional a la masa.

Cuando el vibrador de masa excéntrica tiene dos masas con el mismo peso rotando en direcciones opuestas sobre el eje vertical, la componente de la fuerza de inercia en una de las direcciones se cancela y los componentes de la otra dirección se combinan para producir fuerzas sinusoidales. Por lo que la fuerza de excitación es proporcional al cuadrado de la frecuencia circular de giro de la masa.

### **Excitador electrodinámico de vibraciones:**

Un excitador electrodinámico de vibraciones, utiliza el concepto básico de fuerza vs. corriente de los motores eléctricos para generar la fuerza de vibración. Su construcción y principio de funcionamiento es similar al de un altavoz, convirtiendo la corriente eléctrica proveniente de un generador de funciones y un amplificador de corriente, en fuerza mecánica en todo el rango de frecuencias de trabajo, con una distorsión espectral mínima de la forma de onda de alimentación.

La fuerza de vibración es transmitida a una armadura, la cual posee una guía que proporciona una única dirección de movimiento aportando mayor rigidez en cualquiera de las otras direcciones. En la figura 4.1.2 se observan las imágenes de los EEV de 11 KN y 112 N respectivamente, el controlador y amplificador de potencia de la Unidad.



*Figura 4.1.2. Excitador electrodinámico de vibraciones.*

El control de la excitación se realiza mediante un acelerómetro instalado en algún punto característico del componente, el cual produce una señal de realimentación al excitador. El control de las aceleraciones también puede realizarse en varios puntos de acuerdo a las necesidades del ensayo.

Para estructuras con zonas de baja rigidez, se utiliza un control multipunto al efecto de disminuir las cargas dinámicas en ese punto, por ejemplo, el instante en el cual la pieza está sometida a la frecuencia correspondiente a algún modo natural de vibración.

Los límites de operación del equipo EEV de 112 N están relacionados con la frecuencia de ensayo, así para frecuencias de ensayo inferiores a 12 Hz, la limitación la produce el máximo recorrido del cabezal, siendo este de 50.8 mm; y para el rango de frecuencias entre 12 y 90 Hz el límite está dado por la velocidad de ensayo: 1,8 m/s. Puede observarse cómo los máximos niveles de aceleración cambian con el aumento de la masa, verificándose que la máxima aceleración posible con el EEV excitado en vacío es de 102 g, en tanto que con una masa total de ensayo de 20 Kg la aceleración se reduce a 55.5g, y a 28.75 g con una masa de 40 Kg montada en el cabezal del excitador.

## **4.2 Equipos de medición de señales o vibraciones.**

El monitoreo estructural es una técnica la cual nos permite detectar daños que pueden afectar a la estructura, emplea diversos instrumentos como son los acelerómetro, strain gauges y anemómetros, entre otros, los cuales nos permitirán obtener las propiedades dinámicas que determinan el comportamiento de una estructura.

El registro o adquisición de señales se realiza mediante instrumentos de alta sensibilidad (acelerómetros) distribuidos de acuerdo a las características del sistema estructural entre otros. Dentro de los equipos de medición en el mercado se encuentran los siguientes. (Ref. 5)

### **Vibrómetro PCE-VT 2000 & PCE-VT 2600.**

Aparato de bolsillo para velocidad de vibración, el medidor de vibraciones sirve principalmente para el mantenimiento preventivo de instalaciones y máquinas de producción. Este medidor de vibración realiza mediciones rápidas y comprueba el estado de los mecanismos. También se emplea para valorar el estado de pequeños electromotores. Mide la velocidad de vibración; mide adicionalmente la aceleración de vibración y el desplazamiento, además mantiene el valor después de cada medición, se alimenta por baterías.

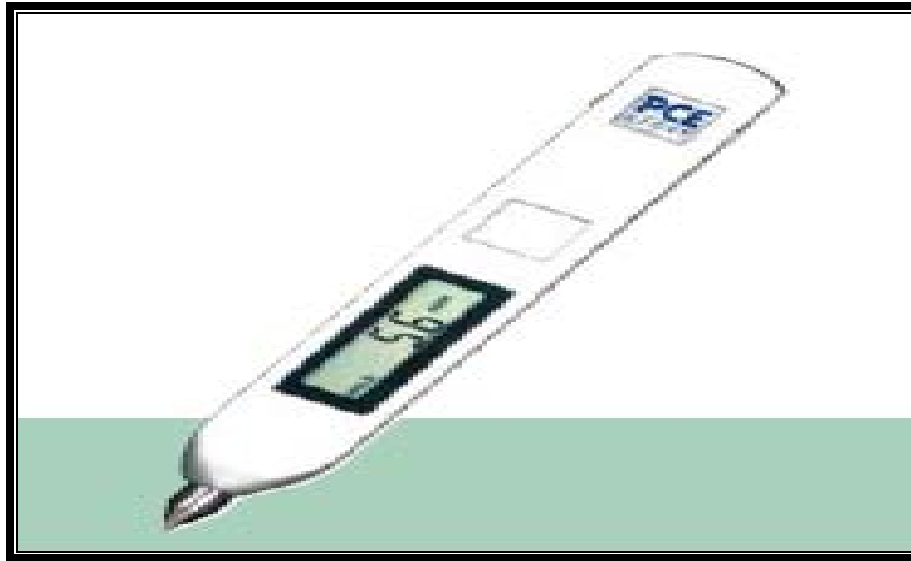


Figura 4.2.1. Vibrómetro, PCE-VT 2000.

**Especificaciones técnicas:**

- Aceleración:	199,9 m/s <sup>2</sup>
- Velocidad :	199,9 mm/s
- Desplazamiento	1,999 mm

Resolución:

- Aceleración	0,01 m/s <sup>2</sup>
- Velocidad	0,01 mm/s
- Desplazamiento	1 $\mu$ m

Rango de frecuencia

- Aceleración	10 Hz	1000 Hz
- Velocidad	10 Hz	1000 Hz
- Desplazamiento	10 Hz	500 Hz

### Vibrómetro PCE-VT 2700.

El vibrómetro sirve básicamente para medir los parámetros de velocidad, aceleración y desplazamiento. Este pequeño comprobador es ideal para el personal de mantenimiento y los técnicos de reparación. Este aparato se puede usar en cualquier lugar gracias a su funcionamiento por batería, mide velocidad, aceleración y desplazamiento cuenta con una gran pantalla y amplio rango de frecuencia.



Figura 4.2.2. Vibrómetro, PCE-VT 2700.

#### Especificaciones técnicas.

- Aceleración	0,01	400,0 m/s <sup>2</sup>
- Velocidad	0,01	400,0 mm/s
- Desplazamiento	0,001	4,000 mm
- velocidad de vibración	10 Hz	1000 Hz
- aceleración de vibración	10 Hz	1000 Hz
- Dimensiones	124 x 62 x 30 mm	
- Peso	240 g	

### Vibrómetro PCE-VT 204:

Vibrómetro con sensor de aceleración externo y función de tacómetro para la medición de revoluciones (con y sin contacto). El vibrómetro tipo PCE-VT 204 combina bajo una carcasa un vibrómetro y un tacómetro de mano. Se trata de un aparato ideal para el control de instalaciones con relación a las revoluciones y vibraciones. Esto permite detectar con antelación posibles daños y programar con anticipo reparaciones. Mide velocidad, desplazamiento y aceleración, también mide revoluciones ópticamente a través de un punto láser y bandas reflectantes hasta una distancia de 1.5 m o por medio de contacto, mide velocidades en m/min por medio de medición por contacto. Esta dotado de sensor de vibración externo ( $\varnothing$  18 x 40 mm), memoria para 1000 valores de medición.



Figura 4.2.3. Vibrómetro, PCE-VT 204.

#### Especificaciones técnicas.

-Rango de aceleración	0,5	199,9 m/s <sup>2</sup>
-Rango de velocidad	0,5	199,9 mm/s
-Rango de desplazamiento	0,005	1,999 mm
-Resolución		0,001 mm
-Rangos de frecuencia	10 Hz	1000 Hz
-Rango de revoluciones (óptico)	10	99.999 r.p.m.
-Rango de revoluciones (contacto)	0,5	19.999 r.p.m.
-Rango de velocidad (contacto)	0,05	1.999 m/min
-Alimentación	4 baterías de 1,5 V AA	
-Dimensiones	188 x 76 x 47 mm	
-Peso	400 g.	

### Vibrómetro PCE-VT 3000

El vibrómetro ofrece una manera rápida y sencilla de medir la aceleración, el camino y la velocidad de oscilación. Una ventaja especial consiste en la posibilidad de guardar los valores de medición en el aparato de manera directa. Por medio del cable de datos para el PC. Analiza aceleración, velocidad, vía de vibración, velocidad de giro y frecuencia, está integrada por memoria interna de valores para 1800 valores (en 25 grupos de 72 valores, muestra valores pico de aceleración, velocidades de giro en RMS, desviación de valor pico simultánea.



Figura 4.2.4. Vibrómetro, PCE-VT 300.

#### Especificaciones técnicas:

-Rango de aceleración	0,1 m/s <sup>2</sup>	392 m/s <sup>2</sup>
-Rango de velocidad	0,01 cm/s	80 cm/s (RMS)
-Rango de desplazamiento	0,001 mm	10 mm

#### Características generales.

- Resolución 0,25 Hz
- Condiciones ambientales +40 °C
- Dimensiones 171 x 78,5 x 28 mm
- Peso aprox. 230 g con acumulador incluido.

**Ejemplo de Vibrómetros para medición de señales.**



*Figura 4.2.5 Vibrómetros típicos para medir vibraciones.*



*Figura 4.2.6. Vibrómetros.*





*Figura 4.2.7. Acelerómetros típicos.*

### **Acelerómetros.**

Los más comunes para la medición de vibraciones producidas por cargas dinámicas, los cuales nos miden las aceleraciones absolutas que al ser integradas dos veces arrojan los desplazamientos. Para minimizar los errores en este método, se ha implementado la utilización de sensores láser los cuales miden deformaciones ante cargas dinámicas y estáticas. Dichos sistemas laser se basan en un sistema de posicionamiento digital y visión artificial con las cuales se procesan imágenes que contienen información de la posición del puntero láser en la estructura. Se tienen reportes de la aplicación de esta tecnología en estadios como el Pascual Guerrero de la ciudad de Cali, donde se realizan pruebas en monitorear las vibraciones inducidas por las porras en una tribuna durante eventos deportivos, teniéndose resultados semejantes a los arrojados por acelerómetros. Además este implemento de láser a sido comparado con un LVDT (transductor lineal de desplazamiento) el cual fue ubicado en una mesa vibratoria uniaxial donde se obtuvieron resultados similares.

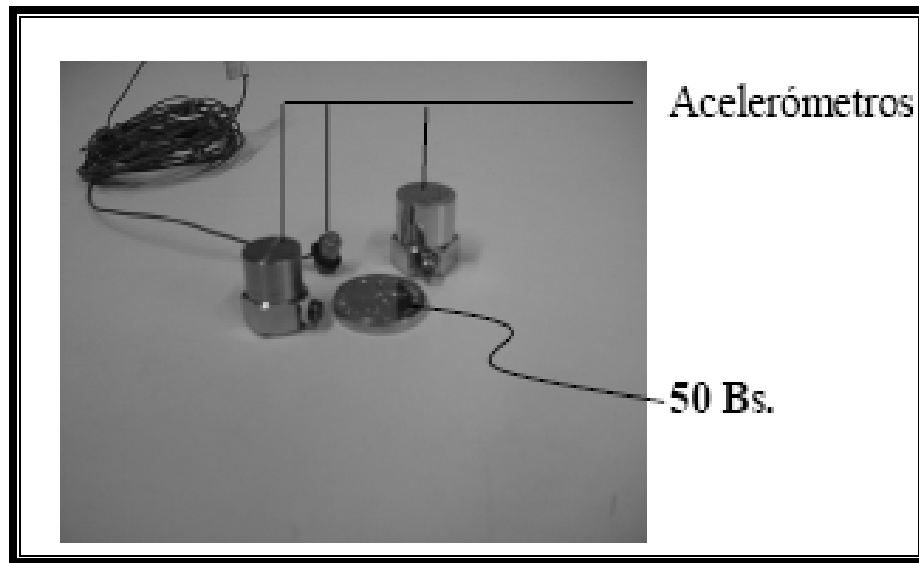


Figura 4.2.7. Acelerómetros.

**Acelerómetros Piezoeléctricos:**

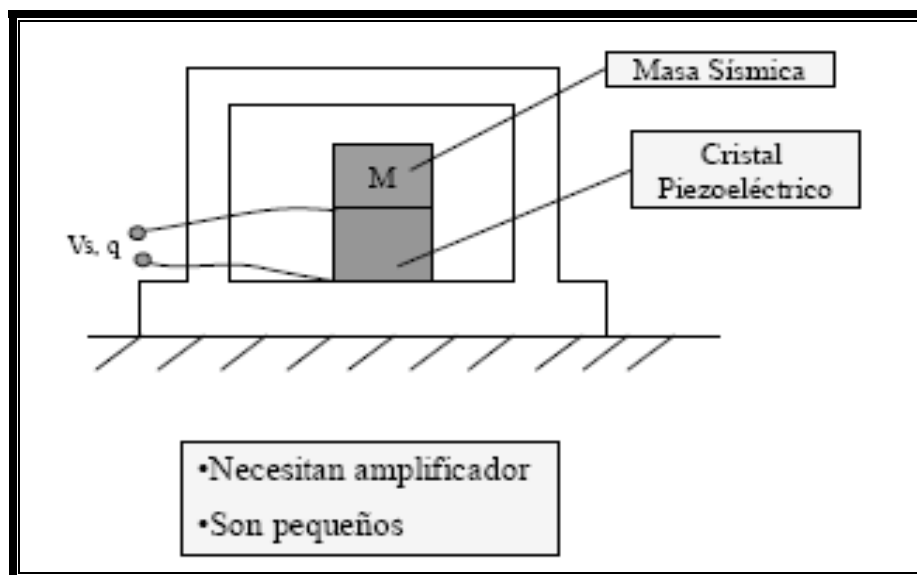


Figura 4.2.9. Acelerómetros piezoeléctricos.

## 4.3 Registro y análisis de señales.

Un análisis de señales nos permitirá obtener los principales parámetros en el comportamiento dinámico de una estructura para obtener aceleración vs. tiempo.

Algunas de las fuentes de excitación de las estructuras que están en zonas urbanas bajo vibraciones ambientales, son producidas principalmente por el tráfico de vehículos las cuales llegan asta la cimentación de la estructura.

Las señales son analizadas por un estudio basado en análisis de Fourier el cual consiste en una formulación matemática que pasa del dominio tiempo al dominio frecuencia (aceleración vs tiempo ,amplitud vs frecuencia), para identificar frecuencias propias de la vibración presente utilizando sistemas de medición como el mostrado en la figura donde se utilizo un acelerómetro GSR-16 que registra aceleraciones contra tiempo, el cual cuenta con un sistema de disparo configurado a una computadora personal.



*Figura 4.3.1. Acelerómetro GSR-16.*

Para realizar un estudio de vibraciones se debe de tomar en cuenta las siguientes características:

- La localización de los puntos a medir en la estructura, estos puntos deben ser localizados estratégicamente pues la definición adecuada de los puntos sobre la estructura identificará comportamientos dinámicos tomando como base sus frecuencias y modos dominantes de vibrar.

- Para la calibración del sistema de medición se puede utilizar el sistema operativo propio de los equipos y también efectúa, desde una computadora personal, el disparo simultáneo del sistema de registro.
- En este sistema de medición la característica principal radica en que las señales registradas tengan un tiempo común de inicio, ya que se pueden tener respuestas variables con el tiempo y es de vital importancia para estudiar el movimiento e identificar correctamente la estructura.
- Obtención de valores aceleración - tiempo, para lo cual se pueden emplear acelerómetros que nos permitan registrar diferentes tipos de amplitudes, producidas por ejemplo por un sismo o vehiculó.
- Procesamiento de la información, se basa en equipos de medición que permitan la obtención y el respaldo de los registros de aceleración apoyados de una computadora personal para visualizar las señales y llevar acabo un análisis preliminar de las características.
- Determinación de las propiedades dinámicas para interpretar las señales, que dependen de los espectros de Fourier o de potencia con los cuales se determinan las frecuencias en las cuales se generan los picos mas grandes. Los espectros muestran la señal en el dominio de la frecuencia, así como, estimaciones preliminares de las frecuencias naturales de vibración. En ocasiones, no basta con analizar las amplitudes del espectro de potencia para el cálculo de las frecuencias por lo cual se debe calcular las transformadas de Fourier entre dos señales registradas en un mismo experimento o medición, obteniéndoseles también su modulo y elevándose al cuadrado para dibujar sus resultados en función de la frecuencia.
- Se obtiene el Angulo de fase entre las señales y se dibujan en función de la frecuencia. se obtiene la magnitud del ángulo de fase y de acuerdo con ello se define el modo dominante de vibración.



Figura 4.3.2. Forma de colocación de los equipos para registro de señales.

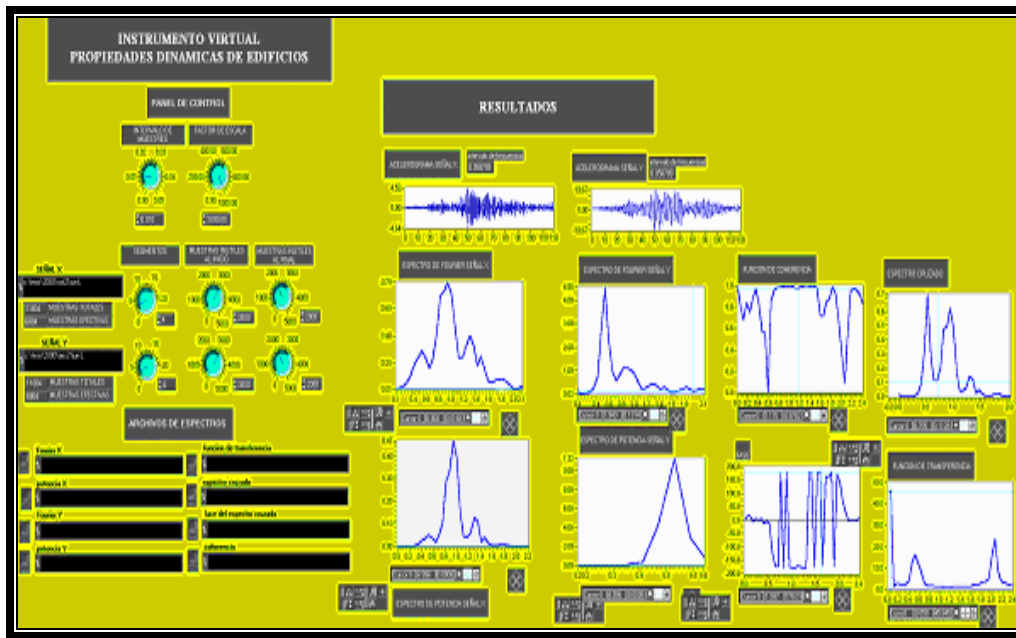


Figura 4.3.3. Panel del analizador de espectros virtual para el análisis de señales.



Figura 4.3.4. Medición de señales.

Tradicionalmente, la transformada rápida de Fourier se ha usado para estimar el espectrograma, y así hallar la distribución tiempo-frecuencia de la señal. La evolución de los programas y nuevas herramientas de cómputo han demostrado las ventajas de este método.

Las diferentes cargas producidas por personas son descriptas matemáticamente por una serie de Fourier que se expresa de la siguiente manera:

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

Donde:

G: peso de la persona (generalmente se considera  $G = 800$  N).

$\alpha_i$ : 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.

$\phi_i$ : 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 la siguiente tabla 4.3.1 se presentan algunos valores para los diferentes coeficientes que se manejan en la expresión definida por series de Fourier.

TIPOS REPRESENTATIVOS DE ACTIVIDADES	TASA DE ACTIVIDAD	FRECUENCIA (Hz)	COEFICIENTES DE FOURIER Y RETARDO DE FASE						DENSIDAD DE DISEÑO (personas/m <sup>2</sup> )
			$\alpha_1$	$\phi_1$	$\alpha_2$	$\phi_2$	$\alpha_3$	$\phi_3$	
Brincar	normal	2.0	1.8		1.3		0.7	0.25 (en casos extremos hasta 0.5) $\phi_2=\phi_3=\pi(1-f_{htp})$	
		3.0	1.7		1.1		0.5		
	alta	2.0	1.9		1.6		1.1		
		3.0	1.8		1.3		0.8		
Bailar		2.0 a 3.0						4 (en casos extremos hasta 6)	
Aplaudir de pie con brincos		1.6	0.17		0.10		0.04	4 hasta 6-2-3	
		2.4	0.38		0.12		0.02		
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	$\alpha_{1/2}=0.4$		-		-	3 - 4	
	parado	0.6	$\alpha_{1/2}=0.5$		-		-		

*Tabla 4.3.1 Para los diferentes coeficientes de la expresión.*

La tabla 5.3.2 presenta los valores de frecuencia rítmica fundamental tanto para cargas verticales como horizontales.

	VALOR EFICAZ DE CARGA (N)	FRECUENCIA RITMICA FUNDAMENTAL (HZ)
Carga vertical	320	1.5 a 3.0
Carga horizontal	400	0.4 a 0.7

*Tabla 4.3.2 Cargas inducidas por espectadores.*

En la tabla 4.3.3 se presentan las frecuencias fundamentales para diferentes tipos de estructuras y actividades recomendadas en el diseño estructural.

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.	$f_1 \text{ horizontal} > 2.5$

*Tabla 4.3.3 Límite inferior de frecuencias recomendadas para el diseño.*

DESTINO DE L ESTRUCTURA	MAXIMA ACELERACION TOLERABLE	OBSERVACIONES
Salas de deportes	5 % g	como máximo 10 % g
Salas de baile	5 % g	30 % g conciertos de rock (atmosfera de euforia) 2% para peronas sentadas
Salas de conciertos y teatros con música clásica y audiencia aplaudiendo	1 % g	5 % g para conciertos de musica " pop "
Tribunas con oscilaciones horizontales de los espectadores	1/2 de la vertical	

*Tabla 4.3.4 Máximos valores de aceleración (comienzo de incomodidad).*

En la tabla 4.3.5 se presentan los resultados de los 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.(Ref. 6).



ACTIVIDAD HUMANA	TIPO	Kp	FRECUENCIAS DE EXCITACIÓN (HZ)	FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE EXCITACIÓN (HZ)
Brincos	Hinchada organizada en cancha San Lorenzo de Almagro.	1.96	2.35	fp=2.35
	Hinchada organizada en partido de futbol (COPPE)	3.00	2.0/4.0/6.0	fp=2.00
	Platea siguiendo a animadores espectáculos (COPPE)	2.75	2.25/4.5/6.75	fp=2.25
Danzas	" Medium rock " (COPPE)	2.35	2.4/4.8	fp=2.40
	" Light rock " (COPPE)	2.1	1.45/2.9/5.8	fp=2.90

*Tabla 4.3.5 Factores de impacto, Kp, y frecuencias de excitación, fp.*

## **4.4 Presentación de un caso de estudio.**

Se presenta un caso de medición de propiedades dinámicas en estadios.

Para representar el comportamiento dinámico del estadio del Manchester City en Inglaterra se desarrolló un modelo 3D de forma general del estadio. Esto previo información precisa de los modos globales de las filas en cantiliver.

La presencia de vibraciones en estadios deportivos se presenta por la excitación del público que cada vez ha ido incrementando, por tal motivo es importante que los diseñadores puedan predecir la susceptibilidad de estadios para vibraciones excesivas en la etapa del diseño. Para ello hay que predecir las propiedades modales de la posición estructural y sus respuestas probables de vibración bajo excitación dinámica producida por el público. Sin embargo, la experiencia ha mostrado que aun con sofisticados modelos numéricos producidos por diseñadores pueden presentarse errores significativos.

Por consiguiente, una motivación para llevar a cabo el análisis de la respuesta de propiedades dinámicas de estadios existentes, es compararse con las medidas en campo y poder proveer una guía para el modelaje numérico en la etapa del

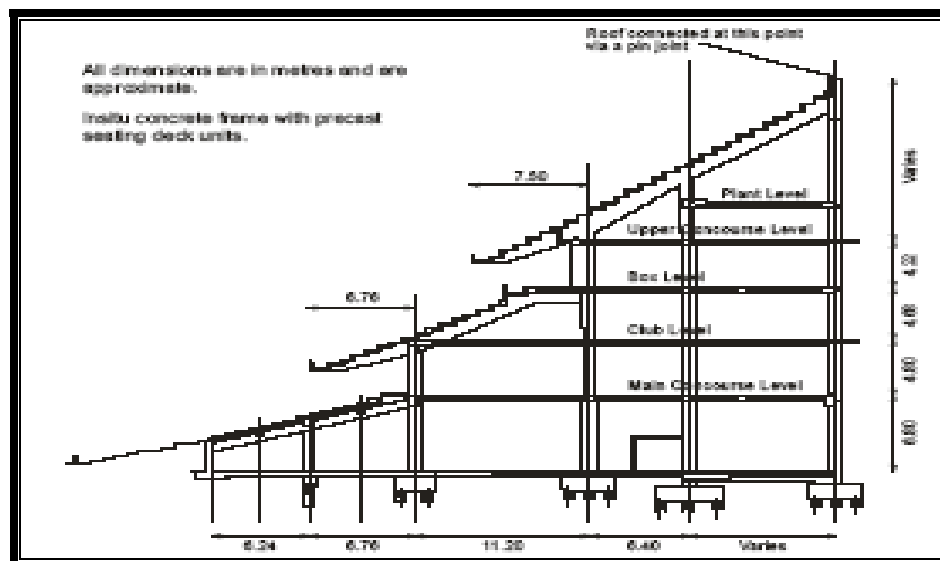
diseño. Se presentan los resultados de un caso donde la prueba previa modelada y experimentada ha sido efectuada para entender mejor a la estructura.

La estructura considerada aquí es el estadio del Manchester City en Inglaterra, una vista externa e interna del estadio es mostrada en la Figura 4.4.1.



*Figura 4.4.2 Vista exterior del Estadio.*

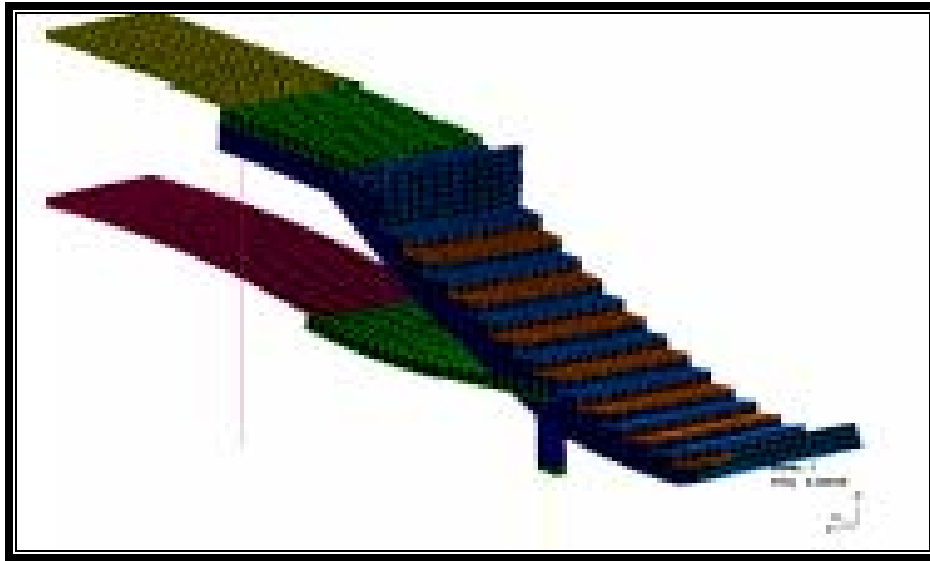
El estadio tiene una configuración en forma de tazón moderno con una buena vista del campo desde todos los asientos. La estructura está construida de marcos de concreto armado y las cubiertas de distribución de asientos forman una L. Una sección transversal típica a través del oeste del estadio es mostrada en la Figura 4.4.3.



*Figura 4.4.3 Típica sección del Oeste del Estadio.*

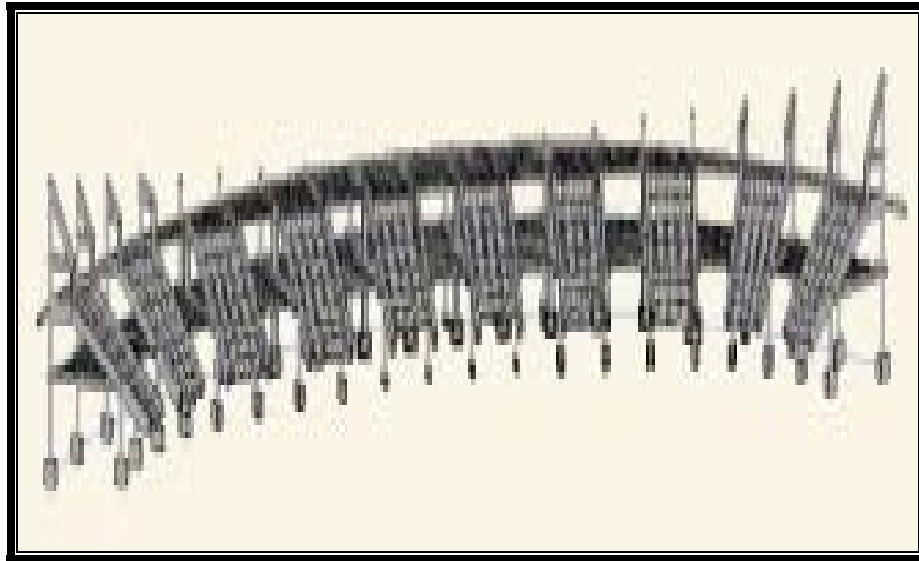
Existen muchas paredes y otros elementos estructurales que cambian las propiedades dinámicas de la estructura. El techo del estadio está conectado a las columnas que lo soportan por detrás de las gradas y es también soportado por un sistema de cables suspendidos de postes fuera del estadio. La prueba modelada que se proporcionó durante el diseño estructural, fue efectuada en la parte Sur, la cual tiene sólo una fila en cantiliver. El primer modelo realizado fue un modelo detallado en 3D de un solo marco que se usó para analizar los modos verticales de la distribución de los asientos. El segundo modelo fue un modelo 3D completo, el cual fue diseñado para ser investigado longitudinal y lateralmente.

Este modelo pretendió representar frecuencias naturales verticales en las filas en cantiliver. La cual es el área más vulnerable de la tribuna para la carga dinámica inducida por el público de forma vertical. Se encontró que la frecuencia natural del modo 1 de vibración Figura 4.4.4 fue de 5.03 Hz y 5.84 Hz.



*Figura 4.4.4 Modo Vertical 1 de Vibración de Cantiliver.*

El modelo, mostrado en la Figure 4.4.5, incluye, marcos transversales, columnas, pisos y una pared de concreto a lo largo del perímetro exterior.



*Figure 4.4.5 Modelo de la posición sur del Estadio.*

En el estadio fueron efectuados, tres tipos de prueba dinámica y de monitoreo:

1. La prueba agitador para determinar modos verticales de la distribución de los asientos en el oeste de la grada.
2. Las pruebas ambientales para determinar modos globales del oeste de las gradas.
3. Un monitoreo dinámico durante un concierto.

La prueba de agitador fue realizada en la distribución de los asientos para determinar los modos verticales provocados por los espectadores que asisten a un estadio. Considerando la sección transversal típica del oeste de las gradas mostradas, se llevó a cabo el análisis en las filas intermedias y superiores mostradas en la Figure 4.4.6.

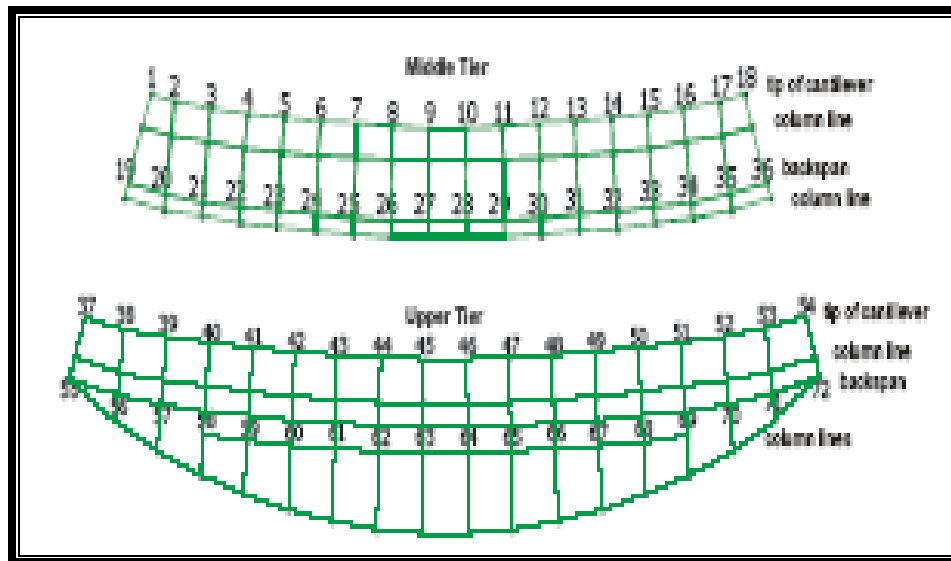


Figura 4.4.6 Fila superior analizada por pruebas de agitador.

Los acelerómetros utilizados para la prueba fueron del tipo electrodinámico Modelo 400 como el mostrado en la Figura 4.4.7.

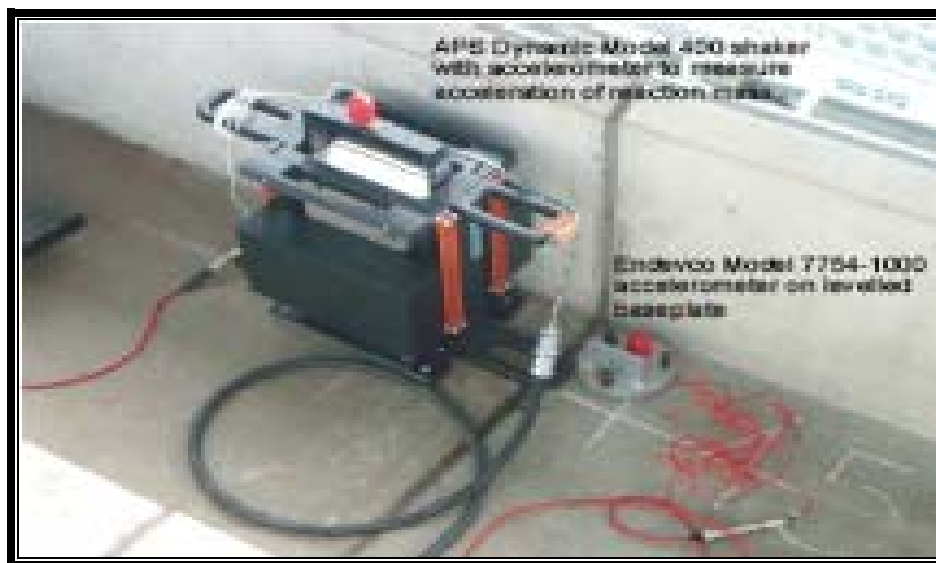


Figura 4.4.7 Acelerómetro electrodinámico modelo 400.

Este acelerómetro tienen una sensibilidad de 1000 mV/g, y pueden medir frecuencias menores de 0.5 Hz. Las propiedades modales de las filas intermedias y superiores son mostradas en las Figuras 4.4.8 y 4.4.9 respectivamente.

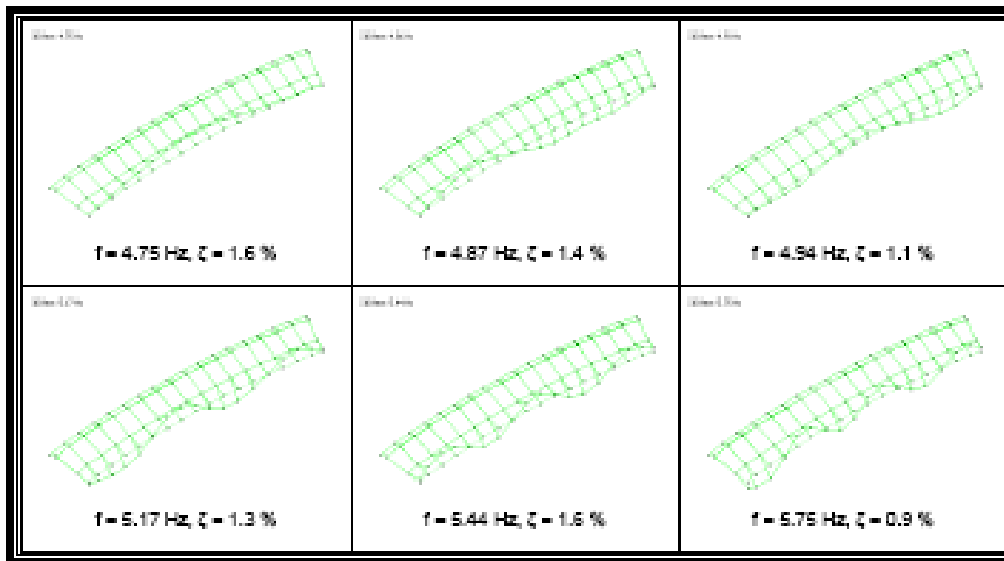


Figura 4.4.8 Propiedades Modales en la fila intermedia.

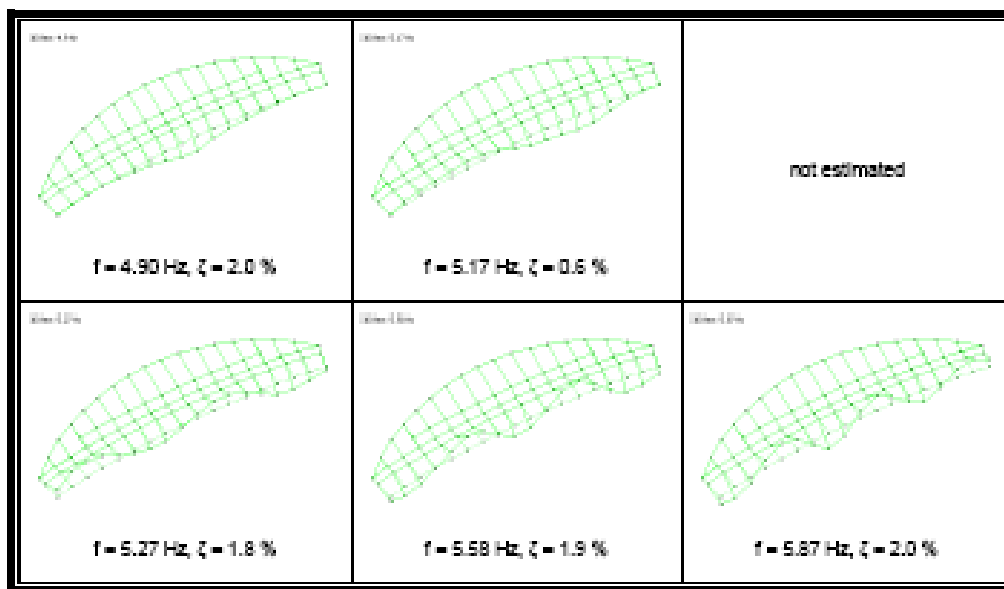


Figura 4.4.9 Propiedades Modales en la fila superior.

Para ambas filas, se obtiene que los modos de vibración se encuentren primordialmente en las vigas voladizas.

### La prueba ambiental.

En el caso de la prueba ambiental conocida como prueba operacional es una técnica útil para determinar las propiedades globales de vibración. Los modos globales de vibración son típicamente longitudinales y laterales, los modos longitudinales, también tienden a producir una respuesta medible en la estructura. Los primeros tres modos globales de vibración en el Estadio del Manchester City en Inglaterra, son presentados en la figura 4.4.10.

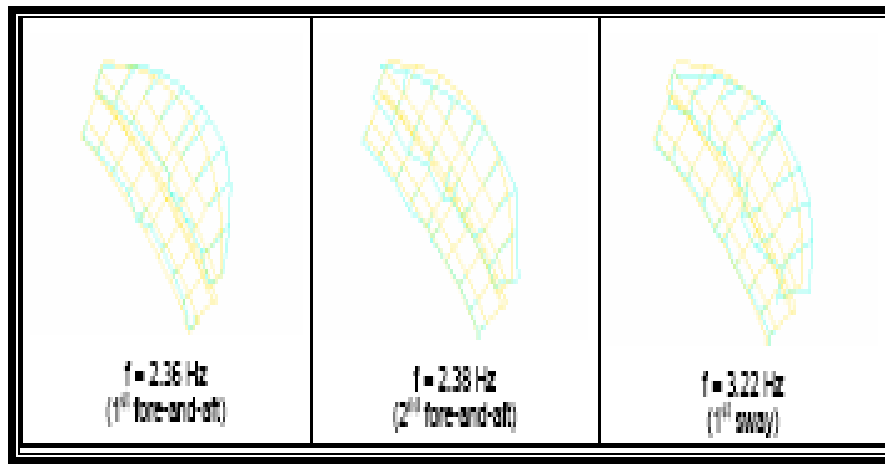


Figura 4.4.10 Propiedades globales medidos para modos de vibración.

Siguiendo con la prueba dinámica, un modelo detallado 3D del oeste del estadio fue creado esperando obtener propiedades dinámicas de interés, es decir modos en cantiliver locales y globales longitudinales y laterales, como se muestra en la Figura 4.4.11.

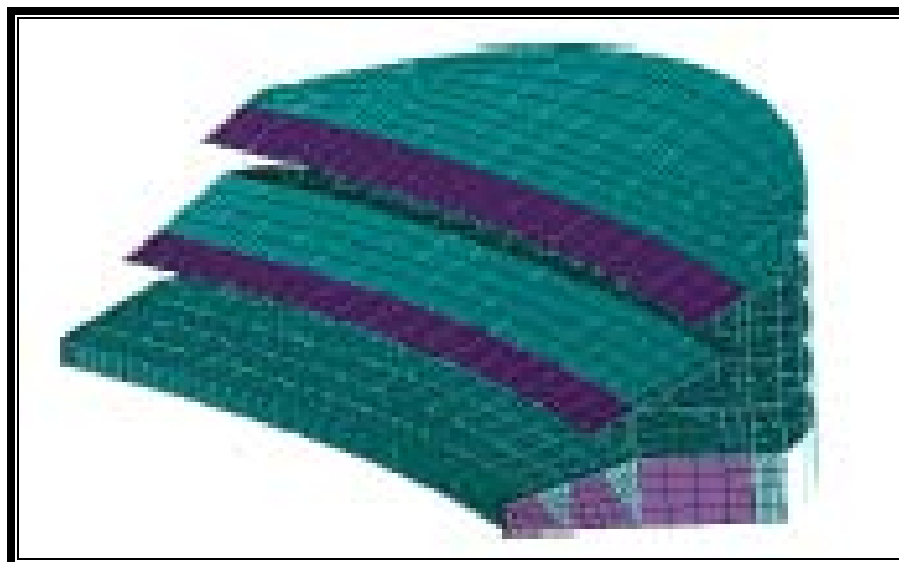


Figura 4.4.11 Modelo 3D de oeste del estadio.

Se asumió que la estructura es monolítica formada por marcos de concreto, los cuales fueron modelados, para representar la diferencia entre los centroides, las áreas fueron modeladas usando elementos con rigideces calculadas para representar las secciones transversales reales, y a si determinar las propiedades globales y locales.

Un resumen de los primeros 3 modos globales se presentan en la Figura 4.4.12.

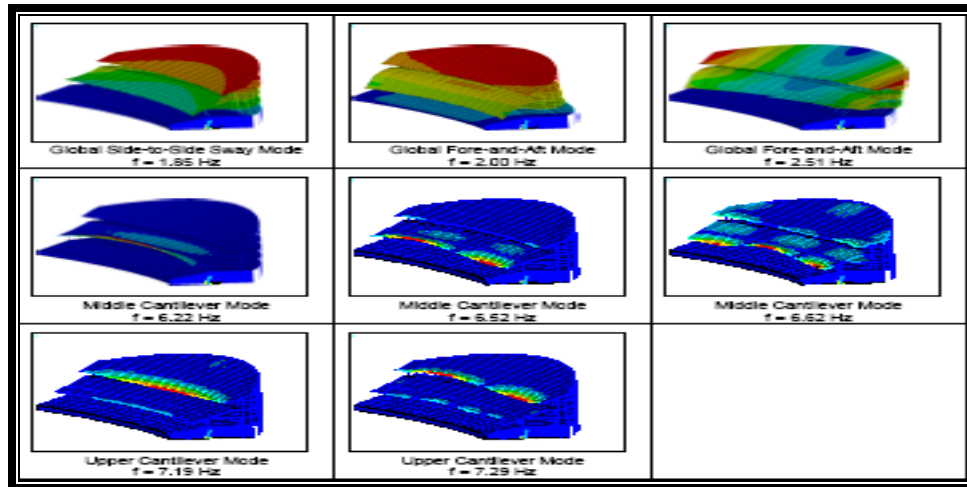


Figura 4.4.12 Los modos globales del modelo 3D.

Los modos globales, para el modelo fueron de 1.85 Hz, comparados con 3.22 Hz. Ésta es una discrepancia significativa debido a la presencia en la estructura real de muros de corte alrededor del perímetro del estadio.

Las frecuencias de los primeros dos modos longitudinales globales fueron de 2.00 Hz y 2.51 Hz, se compararon con 2.36 Hz y 2.38 Hz. esta es una correlación razonable, una de las omisiones más significativas del modelo es la presencia de la estructura del techo, ya que la masa adicional del techo reduce las frecuencias naturales locales.

Hay claramente rigidez adicional en el modelo comparado con la estructura real. Esto puede ser debido a las siguientes razones.

En primer lugar, el uso de las propiedades no agrietadas para el cantiliver provee una sobre-estimación de la rigidez. La segunda razón es que las distribuciones de los asientos se considero en un plano y sin escalones, actuando como una 'brida' este efecto proporciona una sobre-estimación de la rigidez, además los asientos fueron modelados monolíticamente con los marcos, lo cual no es estrictamente real.

La prueba ambiental y de agitador demostraron un comportamiento dinámico complicado de la estructura real del estadio. Los modos más importantes en términos de la funcionalidad de vibración son los modos verticales presentes por



la actividad dinámica del público, primordialmente en las filas en cantiliver, y también modos globales que podrían ser generados por masas concentradas.

La prueba previa del modelo general, creado en la fase del diseño fue para predecir un modo global de balanceo. Sin embargo, la sensibilidad del modelo para una pared poco estructural de block fue muy alta así es que hay una necesidad para fomentar una guía estructural en el futuro. El modelo experimental en 3D reprodujo los modos globales medidos, con discrepancias en las frecuencias, probablemente por deberse a la presencia de elementos poco estructurales y la omisión del techo en el modelo. La prueba previa en 3D del modelo de un solo marco y cantiliver probó una estimación razonable del primer modo vertical de vibración. Sin embargo, la prueba modal demostró un comportamiento mucho más complicado de las vigas voladizas que produjeron una familia de modos estrechamente espaciados. Esto es común pues este comportamiento no puede ser reproducido usando un solo modelo del marco. (Ref. 12).

# **5** Algunas propuestas para disminuir los

## efectos debido a vibraciones.

Dentro de las propuestas para disminuir los efectos de las vibraciones encontramos los siguientes:

El concepto de los aisladores sísmicos de base, es un recurso conocido como artificio amortiguador, generalmente formado por láminas de goma alternadas con otras de metal que, intercaladas en las bases de las columnas, tienen la virtud de "ablandar" la respuesta sísmica de la estructura, aumentando considerablemente el periodo propio del conjunto. En estructuras relativamente rígidas de periodos del orden de 0.5 segundos, los aisladores tienen la misión de aumentar el periodo hacia los 2 y 3 segundos. Mediante este artificio se reducen las aceleraciones sísmicas del conjunto a solo una fracción de la que corresponde a la estructura rígida, sin dichos aisladores.

Los aisladores son empleados principalmente en puentes, constituyéndose en estructuras de gran importancia estratégica, sobre todo al momento de un terremoto, donde es imposible recurrir a la ductilidad estructural propia, como permiten las normas sísmicas actuales.

Las técnicas de aislamiento en la base y control de vibración han tenido un incremento notorio en su uso en construcciones localizadas en zonas sísmicas en los últimos años, como alternativa a la disipación de energía por medio de la tolerancia de daño por ingreso de los elementos estructurales en el campo no lineal, esto los convierte en sistemas que sin duda llegarán a ser de gran importancia en la construcción de edificios en general, debido a las crecientes exigencias de seguridad estructural y no estructural ante terremotos fuertes, y de comodidad ante vibraciones ambientales.

Pueden clasificarse en dos grupos: sistemas de aislamiento y sistemas de control de vibración.

Estos sistemas de aislamiento son sistemas que absorben la energía en la base de excitación por medio de grandes deformaciones, amortiguamiento o combinación de ambos. Pueden clasificarse en los siguientes subgrupos:

### **Sistemas de aislamiento**

Entre los dispositivos más utilizados se encuentran:

- Soportes de caucho y acero: Se trata de soportes de alta rigidez y resistencia a carga vertical, lo que les permite resistir las cargas derivadas del peso y uso de la construcción, mientras que su alta flexibilidad ante movimientos horizontales permite que gran parte de la energía del sismo se disipe en ellos. En algunos casos, el caucho tiene además características de alto amortiguamiento, mientras que en otros el soporte tiene un núcleo de plomo que realiza el papel de amortiguador, lo que hace innecesaria la combinación con amortiguadores.
- Amortiguadores en la base: Pueden ser amortiguadores de fricción, viscosos, o barras de acero flexible ancladas en amortiguadores viscosos, que se colocan en la base del edificio con el fin de reducir la energía sísmica en el edificio. En muchos casos son suficientes para disipar la energía de vibraciones ambientales y sismos de poca intensidad, pero para el caso de terremotos fuertes deben combinarse con los soportes de acero y caucho. Su coeficiente de amortiguamiento puede alcanzar valores superiores a 30%.
- Los sistemas de aislamiento de entarimados consisten en dispositivos cuyo fin es aislar las vibraciones de los entarimados donde se encuentran equipos electrónicos y de precisión, que pueden ser averiados o descalibrados por el movimiento dinámico. Su colocación se realiza entre la losa y el entramado que soporta la tarima del equipo. Están compuestos por soportes de caucho o de balines y/o amortiguadores viscosos para control de la vibración horizontal y resortes de aire para la vibración vertical.

**Los sistemas de control de vibración**, han sido ideados principalmente para amortiguar las vibraciones eólicas, ambientales y sísmicas en el interior mismo del edificio. Pueden clasificarse en los siguientes grupos:

Sistemas de Control Pasivo.

Los sistemas de control pasivo son adecuados para vibraciones ambientales, pero en el caso de sismos no son generalmente útiles más que para casos de moderada intensidad. Entre ellos se encuentran los siguientes mecanismos:

- Amortiguadores estructurales pasivos: Son amortiguadores de diferentes materiales (acero flexible al corte, caucho de silicona, caucho plástico, caucho bituminoso, etc.) que se colocan generalmente debajo de los diafragmas de piso, con el fin de participar en la absorción de la energía inducida de manera uniforme en toda la altura del edificio.
- Amortiguadores de palanca: Consisten en amortiguadores que convierten el movimiento horizontal de la estructura en un movimiento vertical amplio de amortiguadores verticales dobles colocados en los extremos de una palanca, cuya viscosidad permite la reducción de las vibraciones.

- Péndulos resonantes pasivos: En este sistema, el control de la vibración se efectúa por medio de la colocación de un péndulo de gran masa, cercana al 1% de la masa total, y diseñado con un período igual al de la estructura, con el fin de que entre en resonancia. Con ello se obtiene la máxima eficiencia del péndulo, puesto que éste, debido a su rigidez, induce una fuerza inercial contraria a las fuerzas elásticas de la estructura, en su punto más alto. Así se obtiene una fuerza que equilibra al menos en parte las fuerzas inerciales derivadas del peso de la construcción. Entre los sistemas usados se encuentra el péndulo simple con masas de acero o concreto, péndulos múltiples o tanques de agua con control de vertimiento. En este último caso el tanque puede ser usado como tanque normal de reserva de agua en el edificio.

## Sistemas de Control Activo

Los sistemas de control activo se diferencian de los anteriores en el hecho de que adecuan las condiciones de trabajo a la excitación, de acuerdo a las lecturas de sensores colocados en diversas partes del edificio, y cuyas señales son leídas y analizadas por computador. Por norma disponen de fuentes alternas de generación de energía eléctrica, para evitar las consecuencias de cortes de suministro en el caso de sismos fuertes. Entre ellos son dignos de mención los siguientes tipos:

- Péndulos activos: Se trata de péndulos como los descritos anteriormente, que incorporan una fuerza activa contraria a las fuerzas inerciales de la estructura en cada ciclo, fuerza que el sistema de control automático calcula por medio del computador a partir de las señales suministradas por los sensores.
- Controladores estructurales activos: Consisten en diagonales de acero conectadas a un mecanismo que recibe las señales del computador y los sensores. El mecanismo tiene como fin modificar la rigidez de las diagonales de acuerdo a las señales con el fin de alejar a la estructura de la zona de resonancia en cada ciclo.

Algunas medidas de la normativa de sismo resistencia son las siguientes:

- Las juntas entre elementos deben ser planas evitando los enlaces entre bloques separados por juntas.
- Evitar compartir elementos entre bloques distintos (canalizaciones, vigas, etc.)
- Evitar acumulaciones de masas en plantas altas y distribuir las masas uniformemente.
- Procurar que el eje mayor del edificio sea paralelo a la dirección de propagación de las ondas, porque sufre menor deformación.
- No construir escaleras sobre bóvedas, ni sobre voladizos empotrados en muro.
- Aplicar las nuevas tecnologías sismorresistentes: cimientos de caucho, amortiguadores hidrodinámicos, etc.
- Cimentaciones homogéneas para cada bloque.

Para evitar o aminorar los daños sísmicos se han elaborado normativas para la construcción de edificios e infraestructuras en zonas de peligrosidad sísmica.

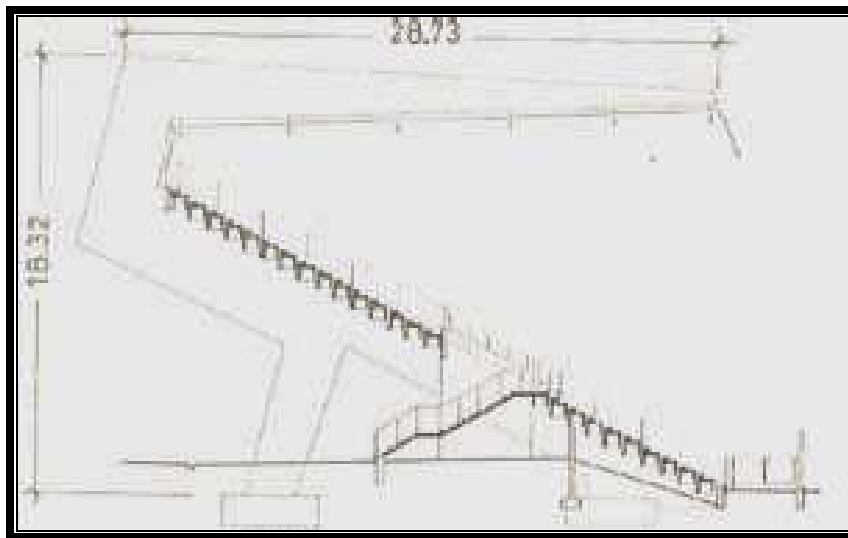
Destaca la normativa que regula la resistencia para cargas estáticas y dinámicas:

- a) Las cargas estáticas se refieren al peso del edificio y a las cargas normales que debe soportar.
- b) Las cargas dinámicas engloban los efectos del tráfico, la acción del viento, las vibraciones de los terremotos, etc. Las cargas dinámicas pueden afectar a las estructuras cuando las vibraciones superen los límites de elasticidad de los materiales.

A continuación se presentan algunos casos en los que se tomaron acción para prevenir efectos dinámicos en su estructura.

### **En el nuevo Estadio de Bochum, en Alemania.**

Los elementos principales de este estadio son los pórticos de concreto armado y pretensados, ubicados con una separación de 13 m entre ellos. Para reducir efectos se han evitado las conexiones rígidas entre estructuras. Con esta finalidad las viguetas escalones prefabricados se apoyan sobre la viga oblicua inferior mediante elementos flexibles de neopreno. Este apoyo flexible evita, igualmente, la transmisión de las vibraciones que pueda originar el público, apoyado sobre estos escalones, que sigue un partido de fútbol.



*Figura 5.1. Pórticos de concreto armado*

Para su dimensionamiento y construcción, fue considerado como estructura individual aptas para soportar las cargas que actúen en el plano de la estructura o normales a él.

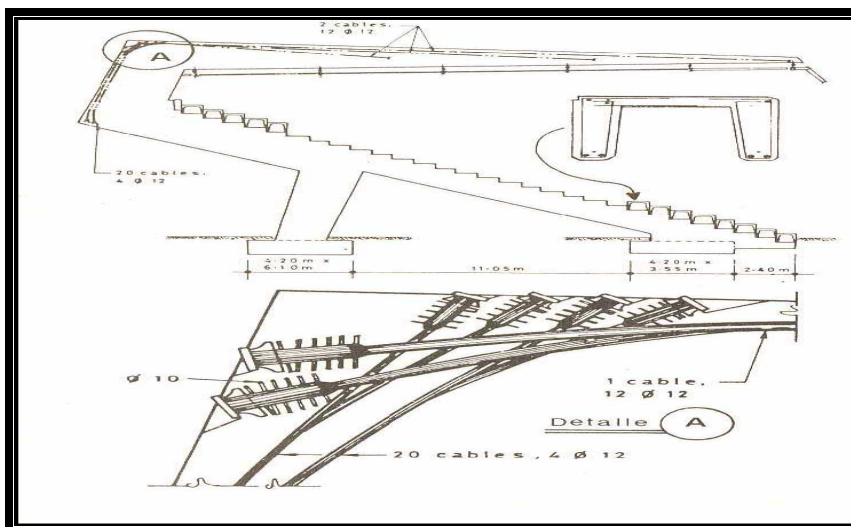


Figura 5.2. Pórticos de concreto armado.

La forma cerrada del estadio influye notablemente sobre la magnitud y dirección de la presión del viento.

**Estadio chivas, Guadalajara México.**

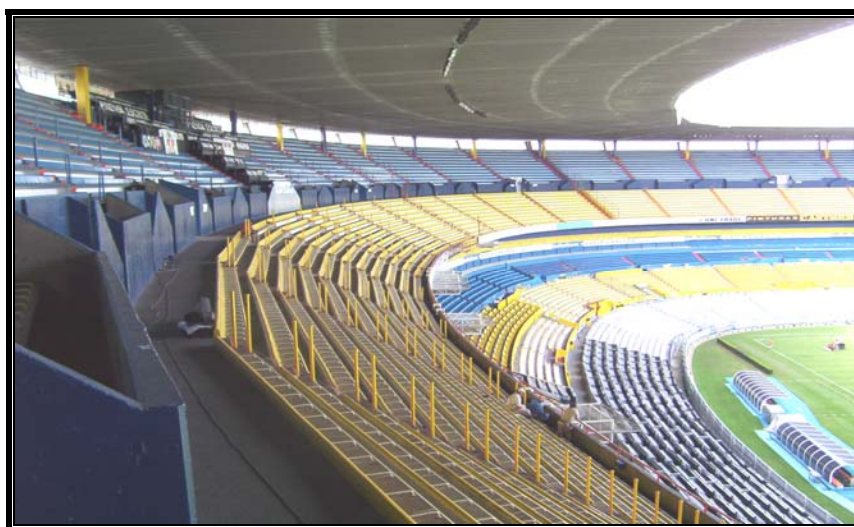


Figura 5.3. Vista interior Estadio Jalisco, Guadalajara México.

Aspecto innovador del estadio es su configuración de los elementos portagradas. Convencionalmente en los estadios de todo el mundo las gradas son elementos prefabricados de hasta 7-8 m. Dada la dificultad de fabricar las gradas pretensadas (por los moldes especiales que se necesitarían) esta luz es una constante en estadios. Para las gradas del estadio de las chivas se empleo un molde convencional (con 4 costillas verticales), pero éstas se postensaron a pie de obra. De esta forma su claro se incremento al doble de lo habitual, es decir hasta 15 m. Adicionalmente los elementos portagradas (también separados cada 15 m) se apean en vigas anulares también postensadas. De esta forma se apean dos elementos portagradas cada cuatro elementos, resultando en una planta diáfana de

hasta 23 m. Por tanto, cuando un espectador accede al graderío se encuentra con una planta libre de pilares única en el mundo.

Las vigas portagradas y en general todos los elementos anulares son postensados dado que en todo el estadio no se disponen de juntas de dilatación. Así tenemos una estructura muy rígida y simétrica (muy resistente para sismos) pero sujeta a los efectos reológicos del concreto. Adicionalmente las vigas anulares que apean las gradas tienen un trazado de los cables de postensado bi-lineal para balancear la reacción de éstas y transferirlas hasta sus apoyos laterales.

Con relación a las frecuencias naturales de vibración de la cubierta el primer modo resultó de 1,4 hz ( $T=0,725$ ). Esta frecuencia fue muy superior a la inicialmente prevista y que motivó en su momento la propuesta de usar "tuned mass dampers" o "TMDS". Dada la gran rigidez de los anillos y macro cerchas, la frecuencia resultante (y a pesar de los muy pocos apoyos) es lo suficientemente elevada para no prever oscilaciones autoalimentadas por el viento.

El "tuned mass dampers" o TMDS, también conocido como amortiguador armónico, es un dispositivo montado en estructuras para prevenir daño, o falla estructural absoluta causada por la vibración. Se utilizan con frecuencia en la transmisión de energía, automóviles, y en edificios.

# 7 Conclusiones y recomendaciones.

La estructuración de los diferentes estadios muestra una semejanza en cuanto a la distribución del sistema de soporte, basado en marcos de concreto y gradas prefabricadas diferenciándose, en la mayoría de los casos, por la estructura de su techumbre la cual da a cada uno de ellos una identidad única.

De la revisión realizada en este trabajo, gran parte de los diferentes problemas presenciados en las gradas de los estadios, se asocian al escaso mantenimiento que se les da a las estructuras, provocando con esto el debilitamiento de los elementos estructurales, la generación de grietas y en algunos casos hasta la falla, causando tragedias.

Otro de los aspectos que conducen frecuentemente a fallas estructurales de graderías tiene que ver con los diseños vanguardistas que los ingenieros estructurales consideran en sus diseños, ya que frecuentemente se proponen estructuras cada vez más ligeras, que al mismo tiempo son más vulnerables a presentar problemas de vibraciones pues sus periodos de respuesta son mayores a los permitidos en los reglamentos existentes.

Dadas las condiciones actuales que vive la sociedad y dadas las exigencias que hoy día reclaman los espectadores que asisten a un lugar de reunión como es una gradería de estadio de futbol, para presenciar un concierto de música pop o un encuentro de futbol, es necesario implementar y vigilar el cumplimiento de normas que especifiquen los rangos de frecuencia que garanticen la seguridad el diseño de una grada ante diversos sistemas de carga, ya que el movimiento de las personas sobre una estructura genere cambios en las características dinámicas e inducen vibraciones que pueden alterar las condiciones de servicio y seguridad.

Es evidente que la mayoría de los estadios con cierta antigüedad no contaron con una norma de construcción para considerar vibraciones en su diseño como las que se producen hoy día, por lo cual es necesario que se realice una revisión periódica para detectar anomalías que pudieran poner en riesgo la integridad.

Otra característica de los estadios es que su estructura puede tener grandes voladizos en sus gradas, permitiendo vistas mas atractivas para los espectadores, sin embargo, estas zonas son las que regularmente presentan los mayores desplazamientos verticales por vibración debido al brinco de los espectadores.

De las mediciones de frecuencias de excitación producidas por los espectadores en diferentes estadios se encontró que por ejemplo en el estadio Midland Road en Bradford se presentaron frecuencias naturales de 3.28 Hz, en el estadio de la ciudad de Tulúa en Colombia se presentaron frecuencias para baile de 2.3 a 3.3 Hz, en brinco la frecuencia fue de 2.45 Hz, mientras que para golpear con los pies



la frecuencia es de 3 Hz, en el estadio San Lorenzo de Almagro, Argentina se presentaron frecuencias para saltos de 2.0 Hz, a 2.25 Hz, en danzas las frecuencias fueron de 1.45 Hz a 2.4 Hz, por otro lado se han realizado pruebas experimentales en laboratorios, con gente brincando sobre una viga simplemente apoyada, cuyos resultados arrojan que la frecuencia de salto para una persona de 60 kg es de 1.78 Hz y para una persona de 80 kg es de 1.89 Hz, en promedio.

Por lo anterior la literatura especializada y la normatividad que se reviso en este trabajo, recomiendan que en estructuras sometidas a efectos dinámicos inducidos por el brinco de la gente, se debe evitar el diseño de elementos estructurales de soporte que posean frecuencias en un rango de 1.5 Hz a 3.5 Hz.

De forma particular se recomienda que el diseño de pisos, salas de conciertos y teatros con asientos fijos, la frecuencia fundamental de vibrar de una estructura sea mayor a 3.4 Hz, en estructuras de tribunas con asientos fijos, la frecuencia debe ser mayor a 6.5 Hz y en tribunas con aficionados cantando y oscilando lateralmente la frecuencia tendrá que ser mayor a 2.5 Hz. Todas estas recomendaciones están encaminadas a proporcionar rangos de valores de frecuencias permisibles para que la estructura no presente problemas asociados a su seguridad y funcionalidad.

Hoy día existen diferentes pruebas como la vibración ambiental, la prueba de caída de talón o la prueba con agitador que, apoyadas de equipos de medición como los acelerómetros, vibrómetros, strain gauges y anemómetros por mencionar algunos, permiten obtener datos precisos para estudiar y/o determinar el comportamiento dinámico de la estructura y sus gradas.

En caso de existir vibraciones, es recomendable disminuirlas o eliminarlas ya que además de la incomodidad a los aficionados generan daños a la estructura. Para ello existen diferentes alternativas como pueden ser los aisladores sísmicos construidos con placas de alternadas de acero y de hule que tienen por objetivo aumentar el periodo de la estructura; por ejemplo en una estructura rígida son capaces de aumentar el periodo de 0.5 segundos a los 2 o 3 segundos. Otros sistemas de aislamiento conocidos son los amortiguadores, los péndulos resonantes pasivos y activos. Otra forma de disminuir las vibraciones es evitando las aglomeraciones en puntos definidos por espectadores los cuales pueden ser perfectamente identificados.

Por último, en este trabajo, se identificó que un sistema común de reparación y/o reforzamiento de las estructuras para estadios, consiste en la colocación de cables de postensado y adición de tensores que mejoran la estabilidad de los elementos.

## **REFERENCIAS:**

- (1) Batista, R, Roitman, N, Magluta, C. Pfeil, M, Carvalho, E. Alves, R, Sarquis, F. Vibraciones Inducidas por el Publico en Estructuras en el estadio de Maracanã, Documento B/91 – XXV Jornadas Americanas de Ingeniería Estructural - Porto Alegre, Brasil - 1991.
- (2) Rubio, C.E. Análisis Dinámico de Modelos Estructurales  
MSc Tesis, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1992.
- (3) Juliani, M, Becocci, L. Estadio do Morumbi,  
Téchne nº 25 Nov/Dic. 1996. Brasil.
- (4) Ricardo Barrios D’Ambra. Estudio de las características dinámicas de estadios de fútbol, Universidad del Nordeste, Argentina.
- (5) Jean Michel franco L, Implementación de sensores laser para medir Desplazamientos en estructuras, Universidad del Valle, Colombia.
- (6) Comite European de Beton, Vibration Problems in Structures, document CEB 209, Practical Guideline, 1991.
- (7) Ortiz, Albert Ricardo, Revista ingeniería e investigación vol. 29 No. 1, Abril del 2009.
- (8) [http://www.worldstadiums.com/stadium\\_menu/tournaments/worldcup2006.shtml](http://www.worldstadiums.com/stadium_menu/tournaments/worldcup2006.shtml).
- (9) Sin, H J. Human-structure interaction in cantilever grandstands,  
Tesis presentada a la Universidad de Oxford, para optar al grado De Doctor of Philosophy, 2006.
- (10) <http://www.sire.gov.co>.
- (11) Paul R, Aleksandar P and Zainah I, A remote monitoring system for stadia dynamics, The University of Sheffield.
- (12) Paul R, Aleksandar P and Michael W, Prediction and measurement of stadia dynamic properties, The University of Sheffield.
- (13) The Institution of Structural Engineers, Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action, London, November 2001