ANIVIP

ASOCIACIÓN NACIONAL DE INDUSTRIALES DE VIGUETA PRETENSADA, A.C.

# GUÍA DE DISEÑO POR VIBRACIÓN DEBIDO A LA ACTIVIDAD HUMANA EN PISOS PREFABRICADOS

2013

**Por:**
**M.I. Daniel Manzanares**
**Ing. Rafael Betancourt Ribotta**

# Contenido


**1. Introducción ..... 2**

**2. Objetivos ..... 2**

**3. Tipos de Análisis por Vibración ..... 2**

3.1 Caminar de las personas ..... 3

3.2 Actividades rítmicas ..... 3

3.3 Operación de Maquinaria ..... 3

**4. Criterios de Aceptación en Servicio ..... 3**

4.1 Excitación en la losa al caminar ..... 3

4.2 Actividades rítmicas ..... 3

**5. Frecuencia Natural de Vibración ..... 4**

5.1 Cálculo de la frecuencia natural ..... 5

5.2 Efecto de vigas soportantes ..... 5

5.3 Frecuencia natural mínima ..... 5

**6. Amortiguamiento ..... 6**

**7. Vibración Causada por Caminar ..... 6**

7.1 Peso efectivo W ..... 6

7.2 Aceleración ..... 7

7.3 Ejemplo de aplicación para el diseño por vibración causada por el caminar de las personas. ..... 7

**8. Vibración Causada por Excitación Rítmica .... 10**

8.1 Armónicos ..... 10

8.2 Frecuencia natural mínima ..... 10

8.3 Aceleración máxima ..... 11

8.4 Ejemplo de aplicación para el diseño por vibración causada por excitación rítmica 12

**9. Otros tipos de vibraciones ..... 13**

**10. Recomendaciones para reducir las vibraciones en pisos prefabricados de concreto ..... 13**

**11. Comentarios ..... 15**

**GLOSARIO BÁSICO ..... 15**

**REFERENCIAS ..... 16**

## 1. Introducción

La vibración en los sistemas de piso es un fenómeno que puede considerarse natural, y es provocado por diferentes fuentes o fuerzas dinámicas, tales como: el caminar de las personas, o maquinaria en operación por mencionar algunos.

Todos los sistemas de piso poseen la capacidad de vibrar en diferentes magnitudes, dependiendo de varios aspectos como son: su masa, rigidez, materiales, etcétera. En tal sentido, la vibración en pisos, se considera un problema de la estructura en condiciones de servicio, que repercute en el confort de las personas.

Excesiva vibración produce en las personas sensaciones de incomodidad e inseguridad en la estructura. Sin embargo, desde el punto de vista estructural, generalmente los desplazamientos y esfuerzos generados por vibración son muy pequeños y no comprometen la integridad de la estructura. En general, las vibraciones en pisos de concreto pueden ser atribuidas a:

- Caminar y correr de las personas ocupantes.
- Vibraciones rítmicas, tales como, bailes y eventos deportivos.
- Vibración debido al tráfico vehicular.
- Vibración debido a la operación de maquinaria.
- Impulsos debido a sismo, viento y otras cargas de impacto.

Varios aspectos influyen en el comportamiento del sistema de piso en vibración, entre los más importantes se pueden mencionar:

- La masa involucrada durante la actividad.
- El pico de aceleración permisible (como una fracción de la gravedad).
- El grado de continuidad en los extremos del sistema de piso.
- El ambiente en el cual la vibración ocurre.
- La interacción entre las conexiones de los componentes estructurales del sistema.
- El grado de amortiguamiento.

También existe un aspecto importante que se debe de considerar y es la sensibilidad de las personas a los diferentes niveles de vibración.

En tal sentido, la ubicación dentro de la estructura, la edad, el tipo de actividad que se desarrolla y el tiempo de exposición, son aspectos que influyen en la percepción de las vibraciones.

## 2. Objetivos

Este documento tiene como objetivo dar a conocer los fundamentos para el diseño y revisión de sistemas de pisos prefabricados por vibración, considerando limites de servicio y confort para las personas.

Así mismo, mediante ejemplos numéricos se pretende dar una aplicación práctica a los principios teóricos.

## 3. Tipos de Análisis por Vibración

En este documento se tratan tres tipos de análisis por vibración: Producido por el caminar de las personas, actividades rítmicas y operación

de maquinaria. Los análisis difieren de acuerdo al tipo de carga que se le impone al sistema.

### 3.1 Caminar de las personas

El caminar natural de las personas provoca vibración en los sistemas de piso. Dependiendo de las características del sistema, esta vibración puede ser imperceptible o molesta para los ocupantes. Aunque en un panel de losa pueden caminar varias personas con diferentes frecuencias al andar, es poco común que estas se sincronicen al andar, por tal razón el análisis se basa en el efecto que produce al caminar individualmente una persona. Este análisis es un poco más complejo que otros, dado que la fuerza cambia de ubicación con cada paso.

### 3.2 Actividades rítmicas

No son raros los casos en donde varias personas estén involucradas en actividades total o parcialmente sincronizadas. Este caso es común en salones de aeróbicos, baile, eventos deportivos y estadios por mencionar algunos.

Se ha encontrado que en algunos casos, las aceleraciones cíclicas del piso pueden alcanzar el 50% de la gravedad, resultando en problemas de fatiga en el sistema de piso.

Las personas que se ven envueltas en actividades rítmicas tienen mayor tolerancia a las vibraciones inducidas que aquellas aledañas que se encuentran en estado inmóvil o en reposo.

### 3.3 Operación de Maquinaria

La operación de equipo y maquinaria pueden producir impulsos constantes a una frecuencia definida, causando en la estructura vibraciones.

## 4. Criterios de Aceptación en Servicio

La respuesta de las personas al movimiento de los pisos es sumamente subjetiva y compleja, esta depende en gran medida de la percepción de cada individuo.

Por ejemplo el umbral de percepción de un piso vibrando en un lugar con mucho tránsito de personas puede ser mayor que el que se tiene para un lugar totalmente calmo. Una persona de edad mayor percibe en forma distinta la vibración que más joven. Una persona en movimiento es más tolerante a los efectos de la vibración que una que está en estado de reposo.

### 4.1 Excitación en la losa al caminar

La Asociación Internacional de Estándares (ISO, por sus siglas en ingles) sugiere límites para la aceleración en términos de múltiplos de la línea base que se muestra en la figura 4.1. Los múltiplos para el criterio propuesto, los cuales están expresados en términos de la aceleración pico, son 10 para oficinas, 30 para centros comerciales y 100 para pasarelas al aire libre. Para efectos de diseño los límites pueden ser tomados en un rango entre 0.8 y 1.5 veces los valores recomendados dependiendo de la duración y frecuencia de los eventos de vibración.

### 4.2 Excitación por Actividades rítmicas

Recientemente se han desarrollado los criterios para ejercicios rítmicos (Allen 1990, 1990a, NBC 1990). El criterio se basa en la respuesta dinámica del sistema estructural para ejercicios rítmicos distribuidos total o parcialmente en la superficie del sistema de piso; puede ser utilizado para evaluar sistemas estructurales soportando aeróbicos, baile, participación de la

audiencia y eventos similares, siempre y cuando se conozca la función de carga.

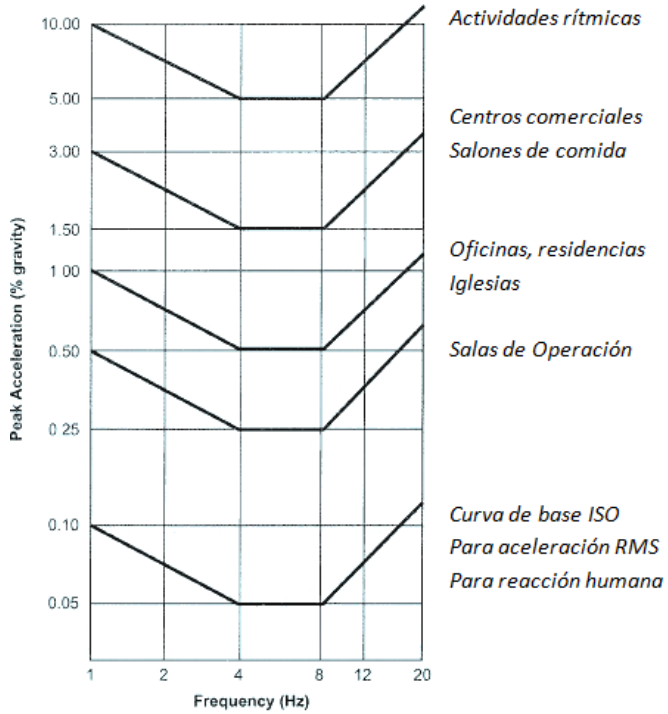
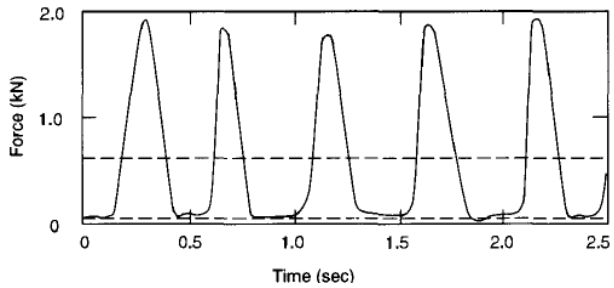


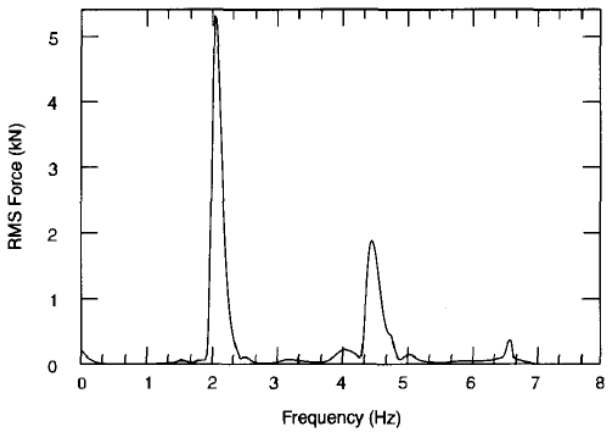

**Fig. 4.1. Picos de aceleración recomendados para confortabilidad humana provocados por diferentes actividades.**

Por ejemplo, la figura 4.2 muestra la función de carga en el tiempo y su respectivo espectro para ocho personas saltando a una frecuencia de 2.1 Hz.

La aceleración pico de un piso debido a una fuerza armónica rítmica se obtiene de la solución clásica, asumiendo que la estructura de piso tiene solo un modo de vibración (Allen, 1990).




**a) Función de carga**




**b) Espectro**

**Fig. 4.2 Ejemplo de función de carga y espectro para una actividad rítmica**

Las fuerzas dinámicas para actividades rítmicas tienden a ser grandes y la vibración resonante generalmente es muy grande para ser reducida incrementando el amortiguamiento o la masa. Eso significa que para fines de diseño, la frecuencia natural $f_n$, debe ser mayor que la frecuencia de la fuerza, $f$, de los armónicos mayores que puedan causar grandes vibraciones resonantes.

## 5. Frecuencia Natural de Vibración

Determinar la frecuencia natural del sistema de piso es de suma importancia ya que a través de esta podemos conocer cómo responde el sistema de piso a las fuerzas que causan la vibración. Así mismo, mediante la frecuencia natural se determina como las personas perciben la vibración.

Se ha encontrado que el cuerpo humano es más sensible a frecuencias en el rango de 4 a 8 Hz. Este rango de frecuencia es comúnmente encontrado en sistemas de piso típicos.

### 5.1 Cálculo de la frecuencia natural

La frecuencia natural de un sistema de piso depende de su rigidez y de su masa. De la misma forma, la deflexión de una viga simplemente apoyada depende de su rigidez y masa o carga aplicada. Se establece una relación simple para determinar la frecuencia natural de vibración de una viga simplemente apoyada y uniformemente cargada:

$$f_n = 0.18\sqrt{g/\Delta_j} \qquad (1)$$

donde:

$f_n = frecuencia\ natural\ en\ el\ modo\ fundamental\ de\ vibración, Hz.$

$g = aceleración\ debida\ a\ la\ gravedad$

$\Delta_j = deflexión\ instantanea\ del\ panel\ de\ piso\ debido\ a\ la\ carga\ muerta\ mas\ carga\ viva\ mínima\ real$

En la ecuación 1 la deflexión para $\Delta_j$ esta dada por:

$$\Delta_j = \frac{5wl^4}{384EI} \qquad (2)$$

donde:

$l = Claro\ libre\ del\ miembro$

$I = Momento\ de\ inercia\ grueso\ del\ miembro\ de\ concreto$

Para calcular $w$ se debe considerar el peso propio mas la carga viva mínima más realista y no las que especifican los códigos.

Para el módulo de elasticidad, $E$, como medida de la frecuencia natural es mayor que el módulo de elasticidad estático usualmente utilizado. Se recomienda que el módulo de elasticidad estático sea incrementado en un 20% cuando se calcula $\Delta_j$ para determinar $f_n$.

Para claro continuos de igual longitud, la frecuencia natural es la misma que para un claro simple.

Para claro con longitudes desiguales y para continuidad parcial con soportes, la frecuencia natural puede verse incrementada por una cantidad pequeña.

Si combinamos las ecuaciones 1 y 2, y resolvemos para $f_n$ se obtiene:

$$f_n = \frac{1.58}{l^2}\sqrt{\frac{EIg}{w}} \qquad (3)$$

### 5.2 Efecto de vigas soportantes

La deflexión que se puede presentar en las vigas principales que sostienen el sistema de piso también puede afectar la frecuencia del piso que sostienen.

En este caso la frecuencia natural del sistema de piso se calcula como:

$$f_n = 0.18\sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} \qquad (4)$$

Donde $\Delta_g$ se calcula con la ecuación 2 usando las propiedades de las vigas soportantes. Para vigas de concreto $\Delta_g$ generalmente es muy pequeña y se desprecia, no pasa así cuando las vigas de soporte del sistema son de acero. Para sistemas de piso apoyados en muros estructurales $\Delta_g$ se considera cero.

### 5.3 Frecuencia natural mínima

No se recomiendan pisos con frecuencias naturales menores a 3 Hz debido a que las personas pueden sincronizar con mayor

facilidad sus acciones a bajas frecuencias, esto podría favorecer que se presenten en el sistema de piso frecuencias cerca de la resonancia.

## 6. Amortiguamiento

El amortiguamiento determina que tan rápido la vibración se atenúa y termina. Generalmente se expresa como un porcentaje del amortiguamiento crítico.

El amortiguamiento en un sistema de piso depende mucho de los elementos no estructurales (particiones, muebles, cielo falso y otros). En un sistema de piso desnudo se pueden tener amortiguamientos del orden de 0.01. Los elementos no estructurales pueden incrementar el amortiguamiento hasta 0.05.

Se debe señalar que los resultados de los análisis se ven influenciados por la elección del valor del amortiguamiento, el cual puede variar ampliamente.

## 7. Vibración Causada por Caminar

Las vibraciones causadas por el caminar de las personas generalmente no representan un problema en sistemas de piso de concreto debido a su rigidez y masa. Sin embargo cuando se diseñan sistemas de piso con claros considerables o con proporciones esbeltas, se pueden presentar problemas de servicio por vibración.

Las personas son más sensibles a la vibración cuando están involucradas en actividades sedentarias.

Mayores niveles de vibración son tolerados por personas caminando o en actividades que implican movimiento. En tal sentido, se establecen diferentes criterios para oficinas, residencias, iglesias, centros comerciales etc.

Se ha desarrollado una fórmula empírica basada en los efectos de resonancia al caminar, de modo que se pueda determinar la frecuencia natural mínima del sistema de piso de tal forma que se puedan prevenir vibraciones excesivas al caminar.

$$f_n \geq 2.86 \ln\left(\frac{K}{\beta W}\right) \qquad (5)$$

donde:

$K = constante, dada\ en\ la\ tabla\ 1$

$\beta = relación\ de\ amortiguamiento\ modal$

$W = peso\ por\ unidad\ de\ área\ del\ panel\ de\ piso\ afectado\ por\ una\ carga\ puntual$

La constante 2.86 tiene unidades Hz.

**Tabla 7.1. Valores para K y β para utilizarlos en la ecuación 5**

| Tipos de edificaciones | K | | $\beta$ |
|---|---|---|---|
| | Kips | kN | |
| Oficinas, iglesias, residencias | 13 | 58 | 0.02[1]<br>0.03[2]<br>0.05[3] |
| Centros comerciales | 4.5 | 20 | 0.02 |
| Pasarelas al aire libre | 1.8 | 8 | 0.01 |

1. Para pisos con pocos componentes no estructurales y muebles, áreas de trabajo abiertas, iglesias.
2. Para pisos con componentes no estructurales, particiones, cubículos, muebles.
3. Para pisos con particiones a altura completa.

### 7.1 Peso efectivo W

El efecto de un impacto sobre un sistema de piso depende en gran medida de la masa o peso del área afectada. Normalmente este peso se toma como la carga muerta por unidad de área, más una carga viva realista o no de acuerdo a los códigos, multiplicado por la longitud del claro y por un ancho efectivo $B$.

Para losas sistemas de piso formado por unidades rígidas a torsión como ser losas solidas

y placas alveolares se recomienda tomar $B$ igual a la longitud del claro.

Para pisos formados por vigas doble T que no sean de gran peralte, $B$ puede variar de 0.8L a L.

Para claros continuos W puede ser incrementado en un 50%.

## 7.2 Aceleración

La ecuación 7, está dada en la referencia 2:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o e^{-0.35 f_n}}{\beta W} \qquad (6)$$

donde:

$P_o = fuerza\ constante\ de\ la\ persona\ caminando$

$f_n = frecuencia\ natural\ del\ sistema\ de\ piso, Hz$

$a_p = aceleración\ pico$

$g = aceleración\ debido\ a\ la\ gravedad$

$\beta$ y W fueron definidas en la ecuación 6.

**Tabla 7.2 Valores recomendados de los parámetros de la ecuación (6)**

| | Fuerza constante ($P_o$) | Amort. $\beta$ | Límite máximo de aceleración $\frac{a_p}{g} x100$ |
|---|---|---|---|
| Oficinas, iglesias, residencias | 0.29 kN (29.6 kg) | 0.02-0.05* | 0.5% |
| Centros comerciales | 0.29 kN (29.6 kg) | 0.02 | 1.5% |
| Pasarelas al aire libre | 0.41 kN (41,8 kg) | 0.01 | 5.0% |
| 0.02 Para pisos con pocos componentes no estructurales y muebles, áreas de trabajo abiertas, iglesias.<br>0.03 Para pisos con componentes no estructurales, particiones.<br>0.05 . Para pisos con particiones a altura completa. | | | |

Para determinar el valor de $P_o$ existen varios criterios de diferentes autores que pueden variar entre sí. Se utiliza en este texto, el criterio mostrado en la referencia 2, como se observa en la tabla 7.2.

## 7.3 Ejemplo de aplicación para el diseño por vibración causada por el caminar de las personas.

Las especificaciones del sistema de piso de un proyecto para uso residencial se detallan a continuación.

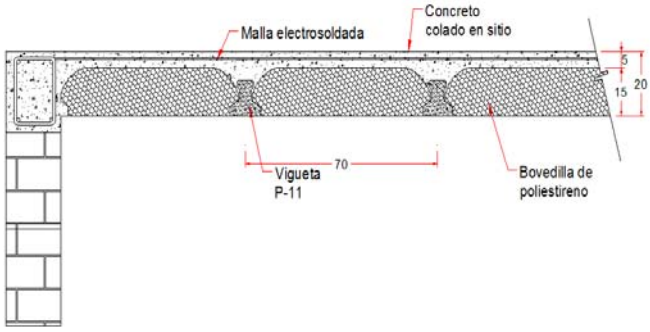



**Fig. 7.1 Sistema de vigueta y bovedilla**

**Tabla 7.3 Especificaciones del sistema**

| Concepto | Valor |
|---|---|
| Longitud del Claro | 450 cm |
| Distancia entre ejes de vigueta | 70 cm |
| Peso propio del sistema | 180 kg/m$^2$ |
| Resistencia a la compresión del concreto de la vigueta | 400 kg/cm$^2$ |
| Resistencia a la compresión del concreto firme | 250 kg/cm$^2$ |
| Modulo de elasticidad concreto vigueta | 280,000 kg/cm$^2$ |
| Modulo de elasticidad del concreto del firme | 173,925 kg/cm$^2$ |
| Peralte terminado | 20 cm |
| Espesor del firme | 5 cm |

Para fines de análisis se considera el ancho tributario del elemento portante como se detalla en la figura 7.2.

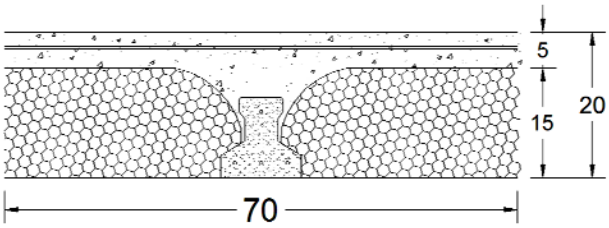
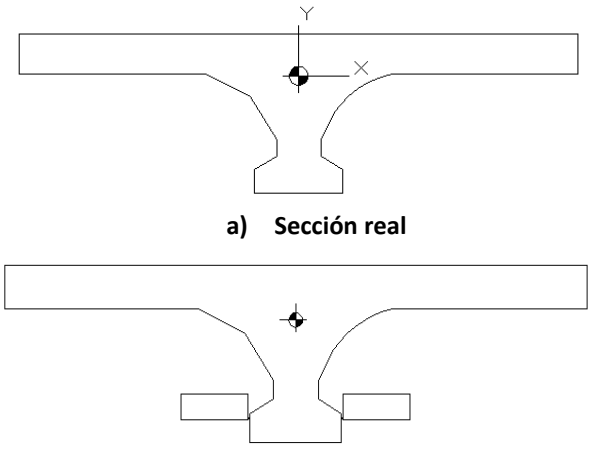



**Fig. 7.2 Ancho tributario considerado para el análisis**

En vista de las diferencias en módulos de elasticidad entre el concreto de la vigueta y el firme de concreto, para fines de cálculo, es preciso tener una sección homogénea, lo cual se logra a través de la relación modular (n) de ambos materiales obteniendo así una sección transformada, como se muestra en la figura

$$n = \frac{E_{cv}}{E_{cf}} = \frac{280{,}000}{173{,}925} = 1.61$$




**a) Sección real**

**b) Sección trasformada**

**Figura 7.3 Sección real y transformada**

El momento de inercia de la sección transformada (figura 7.3.b) respecto al eje horizontal es de 19,180 cm$^4$.

Para el caso de análisis por vibración se debe tomar como cargas de diseño la carga muerta del peso propio mas una carga viva realista. En el caso de la carga viva a incluir, no se determina de acuerdo a las cargas vivas que establecen los reglamentos, sino a una carga viva real estimada que pueda participar como peso o masa en el sistema.

**Frecuencia natural**

Se determina la carga actuante en el sistema (peso propio y carga viva). De la tabla 7.3 se tiene que el peso propio del sistema es de 180 kg/m$^2$. Se considera para este caso una carga viva real de 40 kg/m$^2$. Por tanto, se obtiene la carga por unidad de longitud en un ancho de 70 cm.

$$w = (180 + 40)\text{x}0.70 = 154 \text{ kg/m}$$

Determinamos la deflexión instantánea producida por la carga para un tramo simplemente apoyado. Sustituyendo datos se tiene que:

$$\Delta = \frac{5wl^4}{384EI} = \frac{5x\left(\frac{154}{100}\right)x(450)^4}{384x173{,}925x19180} = 0.246\ cm$$

Determinamos la frecuencia natural de vibración del tramo, considerando que las trabes de confinamiento del panel de losa son lo suficientemente rígidas para no influir en la vibración del tramo de estudio:

$$f_n = 0.18\sqrt{\frac{g}{\Delta}} = 0.18\sqrt{\frac{986}{0.246}} = 11.39\ Hz$$

**Frecuencia natural mínima**

La frecuencia natural mínima que debe tener un sistema para que éste no presente problemas de vibración está dada por la siguiente expresión:

$$f_n \geq 2.86 \ln\left(\frac{K}{\beta W}\right)$$

donde $\beta\ y\ K$ están dados en la tabla 7.1, de acuerdo al uso que se le de a la estructura.

$$W = wBL$$

donde:

$w = carga\ soportada\ por\ unidad\ de\ área$

$L = longitud\ del\ claro$

$B = ancho\ efectivo$

En vista de que el sistema compuesto es poco susceptible a los efectos de torsión se considera $B = L$. Mas detalles sobre el ancho efectivo se encuentran en la referencia 2. Entonces:

$$W = 220x4.5x4.5 = 4455\ kg$$

De la tabla 7.2 se tiene que:

$K = 58\ kN = 5914\ kg$ y $\beta = 0.03$.

$$f_n = 2.86 \ln\left(\frac{K}{\beta W}\right)$$
$$= 2.86 \ln\left(\frac{5914}{0.03x4455}\right) = 10.84\ Hz < f_n$$
$$= 11.39\ Hz \qquad \boldsymbol{OK}!!$$

**Revisión por aceleraciones permisibles**

Para que no se generen molestias por vibración en los pisos, la aceleración que se genera por causa de las cargas debe limitarse, tal como se plantea en la siguiente expresión:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o e^{-0.35 f_n}}{\beta W}$$

Donde:

$a_p = aceleración\ pico$

$g = Aceleración\ debido\ a\ la\ gravedad$

$\beta = Relación\ de\ amortiguamiento\ modal$

$W = Peso\ efectivo\ del\ piso\ más\ la\ sobrecarga$

$P_o = fuerza\ constante\ que\ representa\ la\ fuerza\ al\ caminar$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior y conforme a la tabla 7.2, se tiene que:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(29.48)e^{-0.35(11.39)}x100}{0.03x4455} = 0.41\%$$
$$< 0.5\% \qquad OK!!$$

Graficamos los valores de $\frac{a_p}{g}$ y $f_n$ en la figura 7.4 se aprecia que el sistema es adecuado por vibración bajo cargas provocadas por caminar, dado que se encuentra por debajo del máximo permitido, es decir con un porcentaje de aceleración menor al 0.5%.

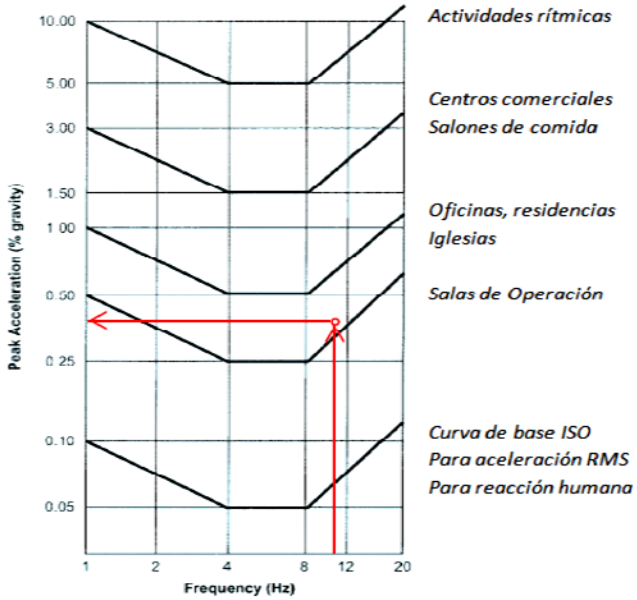



**Figura 7.4 Criterio de aceptación por aceleración máxima**

## 8. Vibración Causada por Excitación Rítmica

Las excitaciones rítmicas en un piso ocurren cuando se presenta un grupo de personas moviéndose al unísono o en forma sincronizada. Por ejemplo, este tipo de excitaciones pueden ocurrir en gimnasios, estadios y en toda instalación en donde se desarrollen actividades en las cuales las personas se muevan en forma sincronizada, a una frecuencia constante.

Debido a la magnitud de las fuerzas que se generan es de gran importancia que la frecuencia de excitación rítmica no sea igual o se encuentre cerca de la frecuencia natural del piso, dado que en tal caso se experimentaría el fenómeno de resonancia en el piso, amplificando en forma considerable los desplazamientos verticales en el sistema de losa. Por tanto, se debe procurar que la frecuencia fundamental del piso siempre sea mayor que la frecuencia esperada de la excitación

Inicialmente (1970) el Código Nacional de Canadá (NBC), por sus siglas en ingles, especificaba que en pisos con frecuencias naturales menores a 5 Hz la resonancia podría ser un problema. Posteriormente en 1975 este valor fue incrementado a 10 Hz.

En 1990 la NBC propone los criterios de diseño basados en rangos límites de aceleración provocados por vibración (tabla 8.1).

**Tabla 8.1 Aceleraciones límites recomendadas para vibraciones debido a actividades rítmicas (NBC 1990)**

| Destino de la estructura | Aceleración limite $\frac{a_0}{g}$ |
|---|---|
| Oficinas y residencias | 0.004-0.007 |
| Comedores y zonas de levantamiento de pesas | 0.015-0.025 |
| Únicamente actividades rítmicas | 0.04-0.07 |

### 8.1 Armónicos

Se define un armónico como toda aquella frecuencia mayor a una frecuencia dada, multiplicada por un número entero.

Cuando se analiza un piso bajo excitaciones rítmicas el concepto de armónico toma gran importancia. Por ejemplo, si se tiene una frecuencia cualquiera de 2 Hz sus armónicos son 4,6 y 8 hz, dado que se han multiplicado por 2,3 y 4 respectivamente.

En el caso de sistemas de piso, si la frecuencia natural del sistema coincide con alguno de los armónicos se podría presentar resonancia. Usualmente solo el primer y segundo armónico necesitan ser considerados en sistemas con firme de concreto (Mast 2001).

### 8.2 Frecuencia natural mínima

Cuando un sistema de piso estará sometido a excitaciones rítmicas se debe evitar que la frecuencia natural del sistema se encuentre cerca de aquélla que provoque una condición de resonancia.

A continuación se propone un criterio de diseño basado en la respuesta dinámica del sistema de piso bajo cargas dinámicas.

$$f_n \geq f\sqrt{1+\frac{k}{a_0/g}\frac{a_i w_p}{w_t}} \qquad (7)$$

donde:

$f_n = frecuencia\ natural\ de\ vibración$

$f = frecuencia\ de\ la\ fuerza\ de\ excitación$

$k = constante\ (1.3\ para\ baile, 1.7\ conciertos\ en\ vivo, 2\ para\ aeróbicos)$

$a_o/g = límite\ de\ aceleracion\ (0.05\ o\ menos\ si\ ocupantes\ sensibles\ son\ afectados)$

$a_i = coeficiente\ dinámico$

$w_p = peso\ efectivo\ por\ unidad\ de\ área\ de\ los\ participantes\ distribuidos\ sobre\ el\ panel\ de\ piso$

$w_t = peso\ efectivo\ por\ unidad\ de\ área\ de\ de\ piso\ incluyendo\ participantes$

La frecuencia natural del sistema ( $f_n$), puede ser estimada de acuerdo a la ecuación 4. Es importante mencionar que cuando sea necesario se debe incluir es este cálculo el acortamiento de las columnas o elementos verticales, especialmente cuando la actividad rítmica se lleva a cabo en pisos superiores.

**Tabla 8.2 Cargas estimadas durante eventos rítmicos (Allen et al. 1997)**

| Actividad | Frec. de excitación f, Hz | Peso de los participan -tes, $w_p$ (kg/m²) | Coeficiente dinámico, $a_i$ |
|---|---|---|---|
| Baile<br>1er. armónico | 1.5-3 | 62 | 0.5 |
| Conciertos en vivo y eventos deportivos<br>1er. armónico<br>2do. armónico | 1.5-3<br>3-5 | 153<br>153 | 0.25<br>0.05 |
| Ejercicios de saltos<br>1er. armónico<br>2do. armónico<br>3er. armónico | 2-2.75<br>4-5.5<br>6-8.25 | 21<br>21<br>21 | 1.5<br>0.6<br>0.1 |
| *Basada en la densidad máxima de participantes sobre el área ocupada para encuentros en condiciones comunes. Para eventos especiales esta densidad puede ser mayor. | | | |

Los efectos del acortamiento de las columnas son generalmente despreciables en edificios de hasta 5 pisos. Para edificios de mayor número de pisos, sí pueden ser considerables debido al incremento de la longitud de la columna.

En algunos casos se deben considerar las deformaciones por continuidad de los elementos. Asimismo, en ocasiones es necesario incluir las deformaciones por cortante que se pueden dar debido a los cambios de sección del piso o a la excentricidad de las fuerzas. Este tipo de deformaciones no se discuten en este texto; información detallada de estos tópicos se encuentra en la referencia 2.

En la ecuación 7 se recomienda que el coeficiente $a_0/g$ no exceda de 0.05. Este valor mínimo se toma para proteger a los ocupantes que pueden ser muy sensibles.

Los valores recomendados para $w_p$, pueden ser tomados de la tabla 8.2 o cualquier otro criterio similar. Cuando los participantes se ubican solo en una parte del claro el valor $w_p$ se reduce en base a su efecto equivalente para un claro totalmente cargado.

## 8.3 Aceleración máxima

Para determinar la aceleración máxima esperada en el sistema del piso, provocada por actividades rítmicas, se utiliza la siguiente expresión, como fracción de la aceleración de la gravedad:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3}{\left(\frac{f_n}{f}\right)^2 - 1} \frac{a_i w_p}{w_t} \qquad (8)$$

Cuando la frecuencia natural del sistema se encuentra muy cerca o es igual a la frecuencia de excitación, es decir en resonancia, las condiciones de aceleración esperadas pueden estimarse de acuerdo a la ecuación 9:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3}{2\beta}\frac{a_i w_p}{w_t} \qquad (9)$$

donde:
$\beta = amortiguamiento\ del\ sistema$

En ocasiones la vibración provocada por los armónicos menores (primero y segundo) puede ser considerable, en tales casos se recomienda utilizar la ecuación 8.

Las fuerzas dinámicas derivadas de actividades rítmicas tienden a ser importantes y la vibración resonante es generalmente muy grande para ser reducida incrementando el amortiguamiento o la masa. Por tanto, para fines de diseño, la frecuencia natural del sistema debe ser mayor que la del armónico más alto de fuerza de excitación que pueda causar resonancia (Allen et al. 1990). En tales casos la ecuación 8 debe ser utilizada.

**Tabla 8.3 Criterios de aceleración máxima según la actividad desarrollada**

| Actividad | Aceleración límite $a_0/g$ |
|---|---|
| Baile y comida (comedores) | 0.02 |
| Conciertos en vivo y eventos deportivos | 0.05 |
| Únicamente aeróbicos | 0.06 |
| Ejercicios de salto y levantamiento de pesas | 0.02 |

La tabla 8.3, muestra los criterios de aceleración máxima en los sistemas de piso según la actividad que se lleva a cabo.

## 8.4 Ejemplo de aplicación para el diseño por vibración causada por excitación rítmica

Se desea hacer la revisión por vibración provocada por actividades de baile de salón con un sistema de piso que posee las mismas especificaciones que se describen en la tabla 7.3.
Dado que el espacio entero se destina para baile y los participantes se distribuyen uniformemente en el claro , el peso de los participantes, según la tabla 8.2 es de 62 kg/m$^2$.

Para fines de cálculo se supone que las trabes soportantes perimetrales del sistema son suficientemente rígidas para despreciar su deflexión. A continuación se obtiene la deformación al centro del claro del sistema considerado:

$$\Delta = \frac{5wl^4}{384EI} = \frac{5x\left(\frac{(180+62)x0.7}{100}\right)x(450)^4}{384x173{,}925x19180} = 0.271\ cm$$

Se obtiene la frecuencia natural del sistema:

$$f_n = 0.18\sqrt{\frac{g}{\Delta}} = 0.18\sqrt{\frac{986}{0.271}} = 10.85\ Hz$$

Utilizando la ecuación 7, obtenemos la frecuencia natural mínima del sistema para evitar vibraciones inaceptables a una frecuencia de excitación rítmica dada.

Considerando:
$k = 1.3, \quad a_0/g = 0.02, \quad w_t = 242\ kg/cm^2$, $a_i w_p = 0.50x62 = 31\ kg/cm^2$y $f = 3\ Hz$ , se sustituye en la ecuación 7:

$$f_n \geq 3\sqrt{1 + \frac{1.3}{0.02}\frac{31}{242}} = 9.16\ Hz.$$

Se determina la aceleración máxima esperada del sistema:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3}{\left[\left(\frac{10.85}{3}\right)^2 - 1\right]}\frac{31}{242} = 0.013 < 0.02$$

Dado que la frecuencia natural del sistema es mayor a la frecuencia mínima, y la máxima aceleración esperada es menor a la máxima aceleración permitida, se determina que el sistema de piso es apto para que se puedan desarrollar actividades de baile.

## 9. Otros tipos de vibraciones

En este texto se han estudiado los criterios de revisión y diseño de dos tipos de vibraciones habituales en estructuras comunes.
Sin embargo, existen otros tipos de vibraciones que conllevan análisis más rigurosos.
Uno de estos tipos de vibraciones ocasionadas pueden ser aquéllas ocasionadas por el funcionamiento y operación de maquinaria. Es importante conocer las características de la maquinaria, dado que estas pueden presentar excitaciones del tipo armónico, periodico, transiente o impulsos.

Generalmente la solución más utilizada es el aislamiento de la maquinaria mediante diferentes sistemas. Es importante tener en cuenta que el piso soportante debe ser mas rígido que el sistema de aislamiento, de lo contrario el sistema de piso pasa a formar parte del sistema vibratorio y el sistema de aislamiento resulta ineficiente. En general la deflexión del sistema de piso debe estar limitada un 15% de la que experimenta el sistema de aislamiento (Mast 2001).

También, los sistemas presentan vibraciones más complejas que involucran el comportamiento global de la estructura como son las ocasionadas por el viento, aquéllas que son inducidas por el tráfico y actividades de construcción y en algunos casos las producidas por actividad sísmica. Información más detallada sobre esos temas se puede encontrar en la referencia 6. Asimismo, algunos sistemas de piso pueden presentar vibraciones debido a la presencia de estructuras subterráneos como ser la operación sistemas de trenes subterráneos o metros.

## 10. Recomendaciones para reducir las vibraciones en pisos prefabricados de concreto

Para evitar problemas de vibración en la etapa de diseño del piso se deben tomar en cuenta los factores que afectan directa o indirectamente el sistema.

En general, las vibraciones en un sistema de piso se ven influenciadas por tres aspectos principales:

- La masa del sistema (Peso propio y carga viva efectiva)
- La rigidez del sistema
- Cargas humanas que provocan las vibraciones (depende del uso que se le dé al sistema de piso)

Cuando la masa del sistema de piso no aporta a la rigidez del sistema esta no favorece el desempeño por vibración del sistema. Por tanto aunque es poco común, se puede reducir los efectos de las vibraciones disminuyendo la masa del sistema sin que se vea afectada la rigidez del mismo. De esta manera se induce que el sistema alcance frecuencias más altas que no se encuentren cercanas a la frecuencia de resonancia.

Sin embargo, aunque los sistemas con bovedilla arena-cemento son más pesados que aquellos con poliestireno, se ha notado que los primeros funcionan muy bien ante las vibraciones a pesar de poseer más masa.

Es bastante probable que eso se deba a la contribución indirecta a la rigidez del sistema de la bovedilla de cemento-arena dada su buena adherencia al firme de concreto, aunque hasta ahora no se ha podido cuantificar en forma precisa dicha aportación.

No obstante, el aspecto que más influye en el comportamiento del sistema es la rigidez del mismo. En sistemas de piso prefabricados varias acciones se pueden tomar para reducir las vibraciones como; rigidizar los extremos de los elementos prefabricados creando empotramientos rígidos o aumentar el peralte del sistema o el espesor del firme de concreto armado.

Una solución muy utilizada es el uso de nervios de rigidez de concreto. Estos nervios de rigidez son trabes armadas coladas en sitio perpendiculares a los elementos portantes. El objeto es reducir la longitud efectiva de los elementos portantes de tal forma que su deformación vertical se vea igualmente disminuida.

También, otra forma de reducir las vibraciones en el sistema de piso es incrementar el tamaño de la cuña de concreto, de esa forma se incrementa el momento de inercia de la sección y por ende su rigidez.

En todo caso se recomienda que la relación claro-peralte del sistema no exceda de 25. Se ha observado que a relaciones mayores de 25 los efectos de las vibraciones se vuelven más evidentes.

Asimismo, es importante que el uso al que originalmente la estructura estaba destinada no sea cambiado drásticamente, de tal forma que induzca al sistema de piso a un comportamiento estructural muy diferente para el que inicialmente estaba pensado.

## 11. Comentarios

Los métodos de revisión y diseño que se detallan en este texto, bajo los criterios correctos, pueden también ser aplicados a otro tipo de sistemas de pisos prefabricados, diferentes a vigueta y bovedilla, como ser: sistemas basados en vigas tubulares, placas alveolares, placas TT u otras similares.

Se debe señalar que los criterios de aceptación por vibraciones en sistemas de piso, dependen en gran medida de la percepción humana, por consiguiente se encontrarán varios casos en que los resultados numéricos obtenidos pueden tender a ser subjetivos (Mast, 2001) en tales casos análisis más rigurosos deben ser aplicados.

## GLOSARIO BÁSICO

(Tomado de la referencia 2)

***Cargas dinámica.*** Pueden ser clasificadas como armónicas, periódicas, transientes e impulsivas**.** Armónicas son usualmente relacionadas con maquinaria en rotación. Las cargas periódicas son causadas por actividad rítmica como bailes y aeróbicos. Cargas transientes, ocurren con el movimiento de las personas, incluyen el caminar y correr. Simples saltos o el golpe de tacones son ejemplos de cargas de impulsivas.

***Periodo y frecuencia.*** Periodo de tiempo, usualmente en segundos, entre cada pico sucesivo en eventos repetitivos. El periodo está relacionado con funciones de tiempo armónicas o repetitivas. Frecuencia, es el reciproco del periodo y es expresado usualmente en Hertz (ciclos por segundo).

***Frecuencia natural y vibracion libre.*** La frecuencia natural en la frecuencia a la cual un cuerpo o estructura vibrara cuando sea desplazada y rapidamente liberada. Este estado de vibracion es conocido como vibracion libre. Todas las estructuras tiene una gran cantidad de frecuencis naturales, la menor de ellas se conoce como frecuencia fundamental y es la que mas nos concierne.

***Amortiguamiento.*** Se refiere a la perdida de energía mecánica de un sistema en vibración. Usualmente es expresado como una relación o porcentaje del amortiguamiento critico.

***Amortiguamiento crítico.*** Es la menor cantidad de amortiguamiento viscoso para el cual un sistema en vibración libre que es desplazado desde el equilibrio y liberado, vuelve a su posición de reposo si oscilar.

***Resonancia.*** Si una componente de frecuencia de una fuerza de excitación es igual a la frecuencia natural de la estructura, ocurrirá la resonancia. En resonancia la amplitud del movimiento tiende a ser muy grande.

***Armónico.*** Es un numero entero múltiplo de la frecuencia de aplicación de una fuerza repetitiva.

***Forma Modal.*** Cuando una estructura de piso vibra libremente en una forma en particular, se mueve hacia arriba y abajo con cierta configuración o forma modal.

***Espectro***. Un espectro muestra la variación de la amplitud relativa con la frecuencia de la componente de vibración que contribuye a la carga o al movimiento.

## REFERENCIAS


1. PCI Industry Handbook Committee, *PCI Handbook Precast and Prestressed Concrete*, 5th. Ed., Precast and Prestressed Concrete Institute, Chicago IL., 1999.
2. AISC/CISC, *"Steel Design Guide Series 11, Floor Vibration Due to human Activity"*, American Institute of Steel Construction, Chicago IL., 1997.
3. R. F. Mast, *"Vibration of Precast Prestressed Concrete Floor"*, PCI Journal Vol. 46, Precast/Prestressed Concrete Institute, 2001.
4. D.E. Allen, T.M. Murray, *"Design Criterion for Vibrations Due to Walking"*, Engineering Journal, Fourth Quarter, American Institute of Steel Construction, 1993.
5. National Research Council of Canada. *National Building Code of Canada*, Supplement-Commentary A, Serviceability criteria for deflections and Vibrations, 1990.
6. H. Bachmann et al., "Vibration Problems in Structures, Practical Guidelines", 1995.