

# DISEÑO DE INGENIERÍA

## VIBRACIONES EN ENTREPISOS



©Derechos Reservados

**ACESCO** 

Mejores materiales. Mejores obras.

# VIBRACIONES EN ENTREPISOS

Durante la etapa del diseño de un entrepiso u otro sistema estructural se tiene en cuenta la resistencia de los materiales componentes, donde se toman todos aquellos efectos de esfuerzos y límites de funcionalidad aplicables, producto generalmente de un análisis estructural, de tal manera que la estructura final sea segura y capaz de soportar todas las condiciones de servicio consideradas o idealizadas en el modelo usado.

El avance agigantado de la ingeniería y la ciencia ha llevado a utilizar materiales más livianos, métodos más eficientes y rápidos de construir y teorías de diseño que redunden en economía y optimización del servicio de la estructura. No obstante, esto último lleva consigo el estudio de otros efectos no considerados y que pudieran presentarse, donde es importante utilizar una ingeniería de buen juicio basada en el correspondiente estado del arte de la ciencia.

En el caso de los entrepisos metálicos, viguetas metálicas más una losa en concreto fundido en sitio tipo Composite Steel Floor Deck (Metaldeck), el resultado es un sistema de entrepiso liviano, fácil y rápido de construir y con un ahorro importante de material que beneficia, principalmente, en dos aspectos el proyecto. El primer aspecto tiene que ver con el uso eficiente de los materiales, generando menos desperdicios; el segundo se relaciona con el aligeramiento total de la estructura (peso muerto) resultando en elementos estructurales principales menos exigidos, como columnas y vigas, especialmente con lo relacionado a cargas sísmicas debido a la reducción de masa dinámica ó, viéndolo de otro modo, en la posibilidad de disminuir secciones transversales de los elementos portantes. Sin embargo, pese a todas estas ventajas, para grandes separaciones entre apoyos siempre es aconsejable hacer un análisis de las vibraciones inducidas por los ocupantes humanos y evaluar el nivel de perturbación durante su uso.

En la mayoría de los proyectos manejados en el país, con el uso típico de separaciones entre apoyos, las vibraciones generadas por los propios ocupantes no representan un pro-

blema para la vida útil de un sistema de losa. Podría decirse que muchas de las vibraciones caen en rangos no perceptibles, independiente del sistema estructural seleccionado para la losa, debido a la configuración geométrica con que se manejan las edificaciones en Colombia. No obstante, bajo aquellas situaciones para las cuales se plantean amplias luces con un sistema estructural liviano (ej: tipo metálico o concreto presforzado), donde si se presentan vibraciones debido a la presencia del hombre, existen rangos aceptables que dependerán del uso destinado al sistema de entrepiso.

Las vibraciones de entrepiso han sido categorizadas con respecto a la respuesta humana como sigue:

1. Las vibraciones, aunque presentes, no son percibidas por los ocupantes
2. La vibración es percibida pero no causa molestia
3. La vibración molesta y causa perturbación
4. La vibración es tan severa que enferma a las personas.

La mayoría de los sistemas de entrepiso caen en las dos primeras categorías. Obviamente la última categoría no puede ser tolerada. El objetivo de este boletín es presentar un método de análisis adecuado de una vigueta de acero en combinación de un tablero de concreto (Metaldeck) para determinar si cae dentro de la tercera categoría.

### PERCEPTIBILIDAD HUMANA

La perceptibilidad humana a vibraciones transitorias de entrepiso depende de tres factores: frecuencia, amplitud inicial y amortiguamiento. Aunque se han desarrollado un número de escalas para medir la sensibilidad humana en estado estable (cero amortiguamiento), solo se dispone de dos escalas que incluyan los efectos del amortiguamiento: La escala Reiher-Meister modificada<sup>(1)</sup> y la escala Wiss-Parmelee.

(1) En este estudio se utilizará solo la escala Reiher-Meister modificada.

La escala Reiher-Meister modificada relaciona los efectos de la amplitud y frecuencia a cuatro niveles de percepción humana. Aunque la escala fue desarrollada originalmente para vibraciones en estado estable, después de un estudio sobre 46 viguetas metálicas en combinación con tableros en concreto sujetos al impacto de pisadas humanas, se modificó la escala al multiplicar con un factor de 10 para tener en cuenta la naturaleza transitoria de las vibraciones. Para la vibraciones transitorias “la amplitud” es definida como la primera máxima amplitud, por lo tanto implícitamente se tomo en cuenta el amortiguamiento típico en los sistemas de entrepiso.

Después de mediciones y evaluaciones subjetivas obtenidas de diferentes sistemas de viguetas metálicas en combinación con losas de concreto, con relativas áreas abiertas libres de particiones y amor-

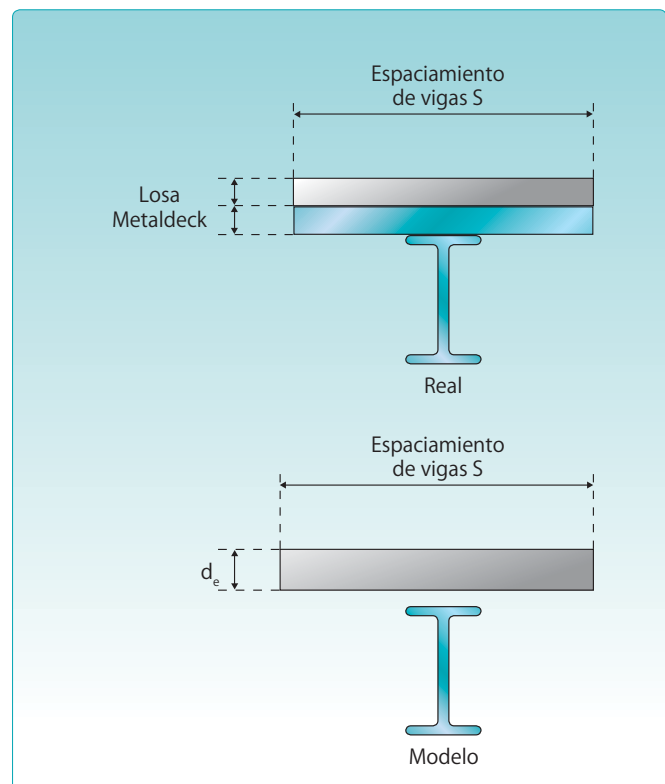


Figura 1. Modelo viga T para el cálculo del momento de inercia transformado

tiguamiento entre 4 y 10%, los cuales caen en la mitad superior del rango “distintamente perceptibles”, se encuentra que estos resultan en quejas por parte de los ocupantes y aquellos cayendo en el rango “fuertemente perceptibles” serán inaceptables.

## FRECUENCIA

Las mediciones en campo los sistemas viga de acero-losa de concreto sujetos al impacto de pisadas humanas muestran que la frecuencia puede ser calculada con exactitud usando la fórmula de frecuencia para una viga T simplemente soportada si el momento de inercia se calcula asumiendo:

1. Acción compuesta, no importando el método de construcción
2. Un ancho efectivo de losa,  $S$ , igual a la suma de las mitades de la distancia a vigas adyacentes.
3. Un altura efectiva de losa,  $d_e$ , tal que la losa rectangular utilizada para el cálculo del momento de inercia es igual en peso a la losa real incluyendo el concreto en los valles del Metaldeck y el peso de la lámina de acero.

La figura 1 muestra el modelo de viga T para el cálculo del momento de inercia transformado.

La primera frecuencia natural de una viga T simplemente apoyada está dada por:

$$f = 1.57 \left[ \frac{gEI_t}{WL^3} \right]^{1/2}$$

Donde:

$g = 386 \text{ pulg/seg}$

$E = \text{Módulo de Elasticidad, ksi}$

$I_t = \text{Momento de Inercia transformado, pulg}^4$

$W = \text{Peso total soportado por la viga T, kips}$

$L = \text{Luz de la viga T, pulg}$

El peso total  $W$  utilizado en la ecuación 1 debería incluir la totalidad de la carga muerta más un estimado de la carga viva en las veces cuando el movimiento del entrepiso puede ser más molesto. Por ejemplo, se han presentado quejas de profesores respecto al movimiento de entrepisos de salones escolares después de las horas de clases, cuando la mayoría de los niños han partido hacia su casa. Un estimado razonable de carga viva para ser incluido en  $W$  es del 10% al 25% de la carga viva de diseño.

## AMPLITUD

El impacto de un hombre de **190lb (86.18kgf)** ejecutando una pisada fue medido por Ohmart (2) y tomado como base para esta investigación. La amplitud de una sola viga T simplemente apoyada sujeta a un impacto aproximado puede ser determinada a partir de las siguientes ecuaciones:

Si  $t_0 = (1/\pi f) \tan^{-1} \alpha \leq 0.05$  :

$$At_0 = \frac{246L^3}{EI_t} (0.10 - t_0)$$

Si  $t_0 > 0.05$  :

$$A_{ot} = \frac{246L^3}{EI_t} \left[ \frac{1}{2\pi f} \sqrt{2(1 - \alpha \sin \alpha - \cos \alpha) + \alpha^2} \right]$$

En las anteriores ecuaciones,  $\alpha = 0.1\pi f$

Siendo más simples, para cualquier valor de  $t_0$  se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

Para  $E = 29 \times 10^3 \text{ psi}$

$$A_{ot} = (DLF)_{max} \times \frac{600 L^3}{48EI_t}$$

Para  $E = 29 \times 10^3 \text{ ksi}$

$$A_{ot} = (DLF)_{max} \times \frac{L^3}{80EI_t}$$

Donde  $(DLF)_{max}$  = Factor dinámico de carga máximo, el cual puede ser obtenido de la figura 2.

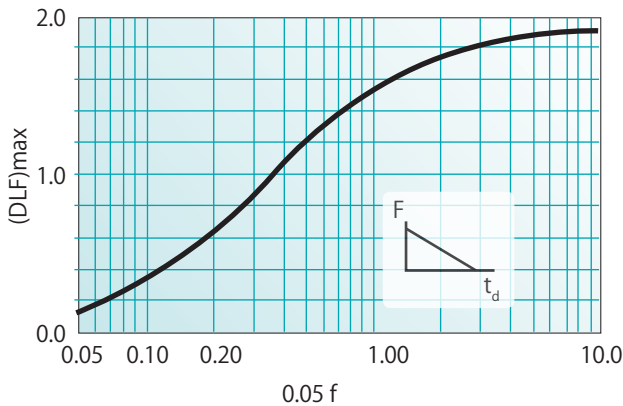


Figura 2. (DLF) máx. vs. 0.05f

Usualmente más de una viga T es efectiva en la resistencia del impacto. De allí, la primera amplitud máxima de un sistema de entrepiso puede ser estimada a partir de:

$$A_0 = A_{ot} / N_{eff}$$

Donde  $N_{eff}$  = Número de vigas T efectivas. Para una serie de vigas T con igual ancho de ala efectivo y apoyos simples, se tiene que:

$$N_{eff} = 2.967 - 0.05776(S/d_e) + 2.556 \times 10^{-8} (L^4/I_t) + 0.00010(L/S)^3$$

Donde:

$S$  = Espaciamiento entre vigas

$d_e$  = Espesor efectivo de la losa

$L$  = Luz entre apoyos

$I_t$  = Momento de inercia transformado usando el modelo de la figura 1

Si  $L/S$  es demasiado grande, por ejemplo mayor a 10,  $N_{eff}$  puede ser aproximado a partir de:

$$N_{eff} = 2.97 - \frac{S}{17.3d_e} + \frac{L^4}{1.35EI_t}$$

Donde  $E = 29 \times 10^6$  psi  $S$ ,  $d_e$ ,  $L$ ,  $I_t$  son en unidades de **pulgadas**

## AMORTIGUAMIENTO

Aunque el amortiguamiento es el más importante parámetro de las vibraciones de entrepiso, no es posible actualmente predecir el amortiguamiento que existi-

rá en un sistema de este tipo. Se piensa que el amortiguamiento es influenciado por el espesor de placa, el peso del concreto, la protección al fuego, particiones, cielos rasos, ductería, etc. Muy pocas investigaciones han conducido a determinar la cantidad de amortiguamiento contribuida por los varios componentes de un completo sistema de entrepiso y solo unos cuantos procedimientos se han publicado.

La Asociación de Estándares Canadiense sugiere los siguientes valores de relación de amortiguamiento<sup>(3)</sup>: Entrepiso sin acabados, 3%; entrepisos acabados (cielo raso, ductos, plantilla, muebles), 6%; entrepiso acabado con particiones, 13%.

Algunos valores recomendados por el estudio son:

- **Entrepiso sin acabados**, 1 – 3% (límite inferior para losas delgadas con concreto ligero, y el límite superior para una losa gruesa con concreto de peso normal)
- **Cielo Raso**, 1 – 3% (límite inferior para cielo raso colgado y el límite superior para tableros de yeso, láminas, láminas de mineral de roca sujetas firmemente a las vigas)
- **Ductos y elementos mecánicos**, 1 – 3% dependiendo de la cantidad
- **Particiones**, 10 – 20% si han sido sujetas al sistema de losa y no están separadas más allá de cinco veces la distancia entre vigas.

Es importante hacer notar que los porcentajes presentados anteriormente no son el resultado de un estudio sistemático y deben ser usados con precaución.

Si el amortiguamiento estimado en un entrepiso es menor que 8 – 10%, debe utilizarse el método que se presenta a continuación; por el contrario, si el amortiguamiento resultante es mayor al 8 – 10% no hay necesidad de realizar análisis por vibraciones.

(3) La relación de Amortiguamiento o fracción del Amortiguamiento crítico para un sistema con un amortiguamiento viscoso es la relación entre amortiguamiento real y el amortiguamiento crítico. El amortiguamiento crítico es el mínimo amortiguamiento en un medio viscoso que permitirá a un sistema desplazado regresar a su posición inicial sin ninguna oscilación.



## PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

1. Calcule el amortiguamiento del sistema de entrepiso terminado; si es mayor al 8 – 10% entonces no se necesita hacer análisis por vibraciones
2. Calcule el momento de inercia transformado de una sola viga T, utilizando el modelo de la figura 1.
3. Calcule la frecuencia,  $f$ , de la ecuación 1.
4. Calcule la Amplitud de impacto de pisadas hu-
- manas de una viga sola viga T,  $A_{ot}$ , utilice las ecuaciones 2 y 3 y la figura 2.
5. Estime el número efectivo de vigas T,  $N_{eff}$ , utilizando la ecuación 5 ó 6
6. Calcule la amplitud del sistema de entrepiso utilizando la ecuación 4,  $A_o = A_{ot} / N_{eff}$
7. Grafique sobre la escala Reiher-Meister, figura 3
8. Rediseñe si es necesario.

## EJEMPLO

Verifique el siguiente sistema de entrepiso ante susceptibilidad por vibraciones:

- Losa en concreto normal ( $\gamma = 2.400 \text{ kg/m}^3$ ) espesor sobre la cresta 80mm.
- Metaldeck 2" calibre 22 (h=120mm)
- Luz entre apoyos: 8.00m, Separación entre viguetas: 1500mm
- Vigueta PHR C 305 x 80 – 3.0mm (Calibre 11) Cajón.  $A_s = 2.951 \text{ mm}^2$ ,  $I_x = 38'525592 \text{ mm}^4$ (4)
- Cielo raso colgado y muy pocos ductos

## Solución:

### Paso 1.

Amortiguamiento: Losa + viga: 1.5%  
 Cielo raso colgado: 1.0%  
 Ductos: 1.0%  
 3.5% < 8% (5)

Como el amortiguamiento es menos al 8% es necesario hacer análisis por vibraciones.

### Paso 2.

$$d_e = 110 \text{ mm} - 50.8 \text{ mm} / 2 = 84.6 \text{ mm}$$

(Se toma la mitad de la altura del MD2 como área que aporta para vibraciones, para tener en cuenta el aporte del concreto en los valles del tablero)

$$Y_b = \frac{11536.1 \times 372.7 + 2951.0 \times 152.5}{11536.1 + 2951.0} = 327.8 \text{ mm}$$

$$I_t = 6'880449.9 + 11536.1 \times 44.9^2 + 38'525592.0 + 2951.0 \times 175.3^2 = 159.347430.5 \text{ mm}^4$$

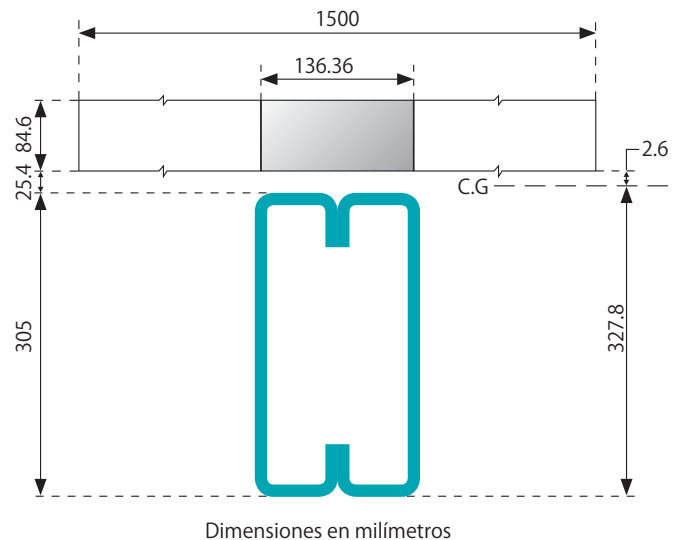


Figura 3. Sección transversal vigueta PERFIL-ACESCO con tablero metálico en METALDECK 2" (0.75mm). Losa en concreto de 110mm de espesor

### Paso 3.

Se calcula la frecuencia:

$$I_t = 159'347430.5 \text{ mm}^4 = 382.8 \text{ pulg}^4$$

$$g = 386 \text{ pulg/seg}$$

$$E = 29500 \text{ ksi}$$

$$L = 6.0 \text{ m} = 236.2 \text{ pulg}$$

$$W = (380 + 205.43 + 180 \times 0.20) \times 6.0 \times 1.5 = 5592 \text{ kgf}$$

$$W = 12.33 \text{ kips}$$

- (4) Valor de la inercia efectiva del perfil en sección cajón. Consulte el MANUAL DE PERFILES ACESCO.  
 (5) Note que la inclusión de particiones elevaría inmediatamente el valor del amortiguamiento por lo cual no se necesitaría hacer análisis por vibraciones del sistema. Por ello, la gran mayoría de los sistemas no necesitan análisis por vibraciones.

Entonces:

$$f = 1.57 \sqrt{\frac{gEI_t}{WL^3}} = 1.57 \left[ \frac{386 \times 29500 \times 382.8}{12.33 \times 236.2^3} \right] = 8.13 \text{cps}$$

$$f = 8.13 \text{cps}$$

**Paso 4.**

Calculamos la Amplitud a partir de la figura 2:

$$0.05f = 0.407$$

Entonces se obtiene:

$$(DLF)_{max} = 1.051$$

$$A_{ot} = (DLF)_{max} \times \frac{L^3}{80EI_t}$$

$$A_{ot} = \frac{1.051 \times 236.2^3}{80 \times 29500 \times 382.8} = 0.0153 \text{pulg}$$

$$A_{ot} = 0.0153 \text{pulg}$$

**Paso 5.**

Se obtiene el número efectivo de viguetas (Ecuación 5 ó ecuación 6):

$$L/S = 6000 / 1500 = 4, \text{ entonces se toma la ecuación 5}$$

$$N_{eff} = 2.967 - 0.05776(S/d_e) + 2.556 \times 10^{-8} (L^4/I_t) + 0.00010(L/S)^3$$

$$S/D_e = 1500 / 84.6 = 17.73$$

$$L^4/I_t = 6000^4 / 159'347430.5 = 8'133171.6$$

Reemplazando:

$$N_{eff} = 2.15$$

**Paso 6.**

La Amplitud del sistema de piso viene dada por:

$$A_0 = A_{ot} / N_{eff}$$

$$A_0 = 0.0153 / 2.15 = 0.0071 \text{pulg}$$

$$D_{e_t} = 8.13 \text{cps} \text{ y } A_0 = 0.0071 \text{pulg}$$

**Paso 7**

Con la figura 4 y con los valores de  $f$  y  $A_0$  se determina el nivel de perceptibilidad humano (tomar el eje vertical izquierdo que corresponde a la escala de Reihier-Meister modificada)

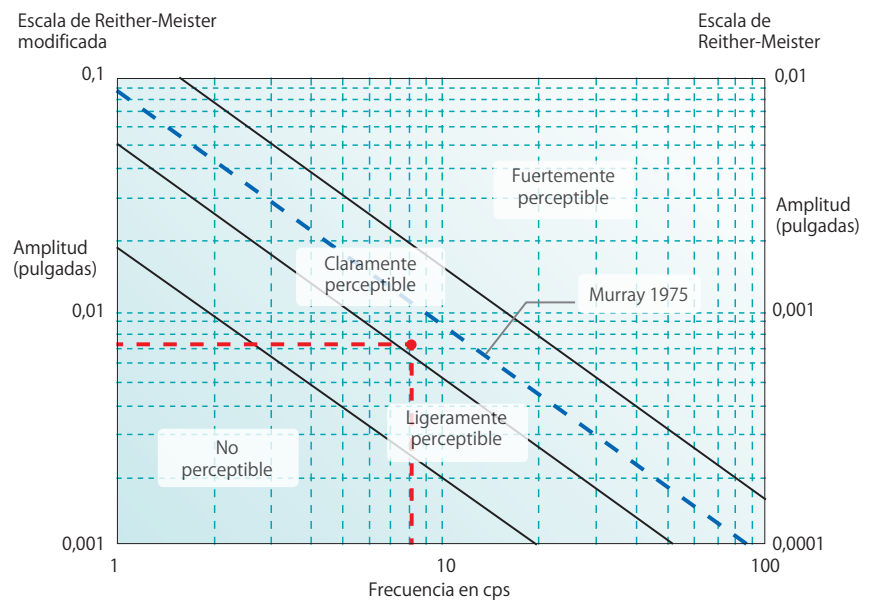
El sistema cae en el rango de "claramente perceptibles" por debajo de la recta MURRAY1975. Puede tomarse este diseño como aceptable, sin embargo, se mejora el comportamiento al incrementar el amortiguamiento del sistema (nótese el punto de ubicación del sistema en la figura 4)

Si el sistema cae por debajo de la mitad inferior del rango "claramente perceptibles" es satisfactorio aún si el amortiguamiento es menor al 3%-4%. Si el sistema cae en la parte superior de "claramente perceptibles" pero con un amortiguamiento relativamente bajo, menor al 6%-8%, pudieran presentarse quejas por parte de los ocupantes. Un sistema por encima del rango "claramente perceptible" será inaceptable si el amortiguamiento es menor al 10%-12%.

El incrementar el tamaño de la viga no es el método más efectivo para disminuir la perceptibilidad ante vibraciones. Cuando la viga es incrementada 50mm hay muy poca variación en la clasificación del sistema. Sin embargo, al incrementar el espesor de la losa los cambios son notables, esto aumenta peso al sistema lo cual mejora su comportamiento ante las vibraciones.

**FUENTES BIBLIOGRÁFICAS**

1. Engineering Journal / American Institute of Steel Construction. Design to prevent Floor Vibrations. Thomas M. Murray. 2003
2. Engineering Journal / American Institute of Steel Construction. Floor Vibration and Cantilevered Construction. Thomas M. Murray. 2003



**Figura 4. Escala Reihier-Meister para definición del nivel de perceptibilidad humano**



Mejores materiales. Mejores obras.

## CONTÁCTENOS

Su opinión es muy importante para nosotros, escríbanos sus comentarios y sugerencias sobre este boletín a [servicioalcliente@acesco.com](mailto:servicioalcliente@acesco.com)



ACERÍAS DE COLOMBIA ACESCO & CÍA. S.C.A. • Parque Industrial Malambo PIMSA  
Malambo, Atlántico • Colombia • Tel. 5 - 371 8111