

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO



Análisis de Vibraciones en Sistemas de Entrepiso

“Manual del Usuario”

M.I. Francisco José Luna Rodríguez

Dr. Julio César Leal Vaca

Chávez Espínola Sergio Andrés

Licea Puga Olga Casandra

Mendoza Hernández Deriam Antonio

Mortera Villalobos Andrea Minerva

Núñez Mendoza Héctor

Veranos de la ciencia 2022

MANUAL – ANÁLISIS DE VIBRACIONES POR LA ACCIÓN DE ACTIVIDADES RÍTMICAS

El procedimiento para la determinación de vibración por las actividades rítmicas se realiza de forma similar al de vibración por la acción del caminar en sus diversos casos:

- Caso I: Modo Panel Viga Secundaria
- Caso II: Modo Panel Viga Principal
- Caso III: Modo Panel Combinado

La variante que se presenta es al momento de calcular las deflexiones en el modo panel a analizar. Ya que las deflexiones axiales en columnas son muy importantes cuando en el sistema de piso se realizan actividades rítmicas, estas deberán ser consideradas.

Los casos mencionados anteriormente son los que contempla la hoja de cálculo y que se muestran a detalle más adelante en este manual de usuario.

Datos de entrada

En el manejo de la hoja de cálculo de Excel se podrá observar que se cuenta con algunas celdas con letra en color rojo, las cuales indican las celdas que deberán modificarse o en su caso ser escritas directamente por el usuario según las necesidades del problema que se desea analizar. Algunas otras celdas contienen letra en color azul (se recomienda no modificarlas), en dichas celdas se encuentra ya escrita una fórmula/constante/sugerencia para obtener el valor que se presenta en dicha celda, sin embargo, si se considera pertinente por el usuario, este podrá sobrescribir en estos valores para introducir datos que hayan sido calculados u obtenidos de algún proceso de cálculo manual o por medio de algún software de análisis estructural cuidando que sea modificado específicamente el dato en la celda correspondiente para lo que se ha obtenido. Finalmente, celdas con letras en color negro representan los valores correspondientes en diferentes unidades que podrían ser en algunos casos útiles para el usuario.

Este manual describirá a detalle cada uno de los apartados que posee la hoja de cálculo, así como las celdas en las que el usuario deberá ingresar los datos para realizar el análisis de vibraciones; posteriormente se presentará la imagen correspondiente a dicho apartado en la hoja de cálculo como referencia a los datos que se describen.

Características Geométricas del Sistema de Piso

Ancho del Sistema de Piso (Floor Width) (A_{piso})

En base a la guía de diseño número 11 del AISC (American Institute of Steel Construction, 2016) el ancho del sistema de piso es la distancia perpendicular al claro de las vigas o viguetas secundarias del sistema estructural, es idéntica o casi idéntica en los tramos adyacentes.

Largo del Sistema de Piso (Floor Length) (L_{piso})

En la guía 11 del AISC (American Institute of Steel Construction, 2016), se especifica que es la distancia perpendicular al claro de las vigas principales en el vano considerado sobre la que se estructura, es idéntica o casi idéntica en los tramos adyacentes.

Panel de Piso

Porción plana rectangular de un piso definido por el claro y un ancho efectivo. Se utiliza para el cálculo de momentos de inercia transformados, cálculo de la deflexión, etc.; queda definido en la siguiente Ilustración 1 como la porción rectangular plana de un piso definido por cuatro columnas.

Nota: En todos los casos, el ancho y largo del piso para el análisis de cada panel queda definido por la regularidad de los paneles que lo rodean, tanto en dirección horizontal como vertical.

Separación de Vigas (S)

Distancia perpendicular entre las vigas secundarias o viguetas que forman el panel de piso entre columnas, es idéntica o casi idéntica en los tramos adyacentes.

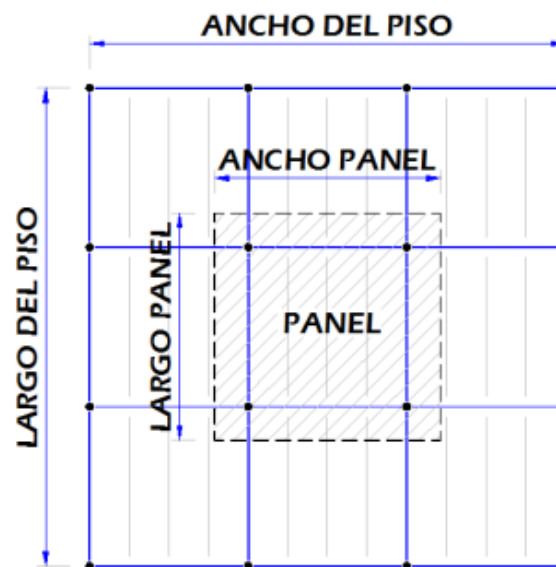


Ilustración 1.- Sistema de Piso

Características geométricas del sistema de piso				
Ancho del sistema de piso (Floor Width)	A_{piso}	8.00 m	8000.00 mm	26.25 ft
Largo del sistema de piso (Floor Length)	L_{piso}	18.00 m	18000.00 mm	59.06 ft
Ancho del panel a analizar	A_{panel}	8.00 m	8000.00 mm	26.25 ft
Largo del panel a analizar	L_{panel}	6.00 m	6000.00 mm	19.69 ft
Separación de vigas	S	1.60 m	1600.00 mm	5.25 ft

Ilustración 2.- Características Geométricas del Sistema de Piso

Características Gravitacionales para el Análisis de Vibraciones

Ocupación del Sistema de Piso y Carga Viva (LL) para el Análisis de Vibraciones

El usuario deberá seleccionar entre tres diferentes actividades que pueden provocar vibraciones en el sistema de piso debido a actividades rítmicas, las cuales son: aerobics, baile (Dancing) o concierto (Lively Concert) con el fin de obtener la carga viva (LL) que la guía 11 del AISC (American Institute of Steel Construction, 2016) propone para el análisis de las vibraciones, dicho dato aparece automáticamente al seleccionar el tipo de actividad.

Nota: Si se desea otra carga viva, ingresar manualmente en la celda correspondiente, cuidando que dicha carga sea justificada para usarse para el cálculo de las vibraciones.

Carga Muerta (DL)

El usuario ingresará de acuerdo con sus consideraciones la carga muerta total en kg/m^2 sin incluir el peso del concreto. En este apartado podrá considerar como ejemplo la capa de mortero, el tipo de piso, pegapiso, etc.

Características Gravitacionales para el análisis de vibraciones				
Ocupacion del sistema de piso		<i>Aerobics</i>		
Carga Viva para el analisis de vibraciones	<i>LL</i>	<i>20.50 kg/m²</i>	<i>201.02 N/m²</i>	<i>4.20 psf</i>
Carga Muerta (sin incluir peso del concreto)	<i>DL</i>	<i>72.00 kg/m²</i>	<i>706.03 N/m²</i>	<i>14.75 psf</i>

Ilustración 3.- Características Gravitacionales para el Análisis de Vibraciones

Características y Propiedades de la Losa de Piso (Losacero)

Losacero

Por el momento la hoja únicamente realiza el cálculo de las vibraciones para sistemas estructurales basados en perfiles de acero, por lo que, para la losa de piso se sugiere considerar losacero. La hoja propone LOSACERO Ternium 25 de diferentes calibres, sin embargo, en caso de usar otro tipo de losacero los datos necesarios para este apartado pueden obtenerse de la ficha técnica de la losacero seleccionada, estos datos corresponden a los datos denominados como “ h_r ” y el “peso de la lámina” mostrados en la Ilustración 4. El dato de la celda con W_r para el caso de vibraciones no tiene gran importancia por lo que el llenado de este dato se podrá omitir.

Nota: la hoja muestra sugerencias de pesos para la LOSACERO Ternium 25 de diferentes calibres, es por ello por lo que dicho dato se encuentra en color azul, sin embargo, se debe verificar dicho dato en caso de cambiar la propuesta y en su defecto ingresarlo manualmente.

Peso Volumétrico del Concreto (w_c)

El concreto de resistencia normal empleado para fines estructurales cuenta con un peso volumétrico que varía de 22 kN/m^3 (2.1 t/m^3) hasta 24 kN/m^3 (2.4 t/m^3). En el diseño del concreto (reforzado), el peso unitario de la combinación del concreto con la armadura (acero de refuerzo) normalmente se considera 2400 kg/m^3 (150 lb/ft^3).

Resistencia del Concreto (f'_c)

Para concreto de clase 1. La resistencia especificada, f'_c del concreto no será menor que 25 MPa (250 kg/cm²). Se entenderá por concreto de alta resistencia, aquel que tiene una resistencia a la compresión f'_c igual o mayor que 40 MPa (400 kg/cm²).

Capa de Compresión del Concreto (t_c)

Es la capa de concreto que se extiende sobre la losacero del sistema de piso, y que sirve para transmitir las cargas verticales del vano hacia las viguetas, y posteriormente hacia las columnas y el suelo.

Características y propiedades de la losa de piso (Losacero)				
		LOSACERO Ternium 25 Cal.20		
	$h_r=6.35\text{cm}$	$h_r=63.50\text{mm}$	$h_r=2.50\text{in}$	
	$W_r=12.50\text{cm}$	$W_r=125.00\text{mm}$	$W_r=4.92\text{in}$	
	9.54 kg/m^2	93.55 N/m^2	1.95 psf	
Módulo de elasticidad del concreto	E_c	190533.8 kg/cm^2	18683.74 Mpa	2710.04 ksi
Peso volumétrico del concreto	w_c	2100.00 kg/m^3	20592.60 N/m^3	131.10 pcf
Resistencia del Concreto	f'_c	200.00 kg/cm^2	19.61 Mpa	2844.68 psi
Capa de compresion de concreto	t_c	6.00 cm	60.00 mm	2.36 in
Peralte efectivo para el analisis de vibraciones	d_e	9.18 cm	91.75 mm	3.61 in
Peso efectivo de losa (Slab)	DL_{losa}	192.68 kg/m^2	1889.37 N/m^2	39.46 psf
Peso efectivo de losa+lamina(Slab+Deck Weigth)	$DL_{losa+lamin}$	202.22 kg/m^2	1982.92 N/m^2	41.42 psf

Ilustración 4.-Características y Propiedades de la Losa de Piso

Caso I: Modo Panel Viga Secundaria

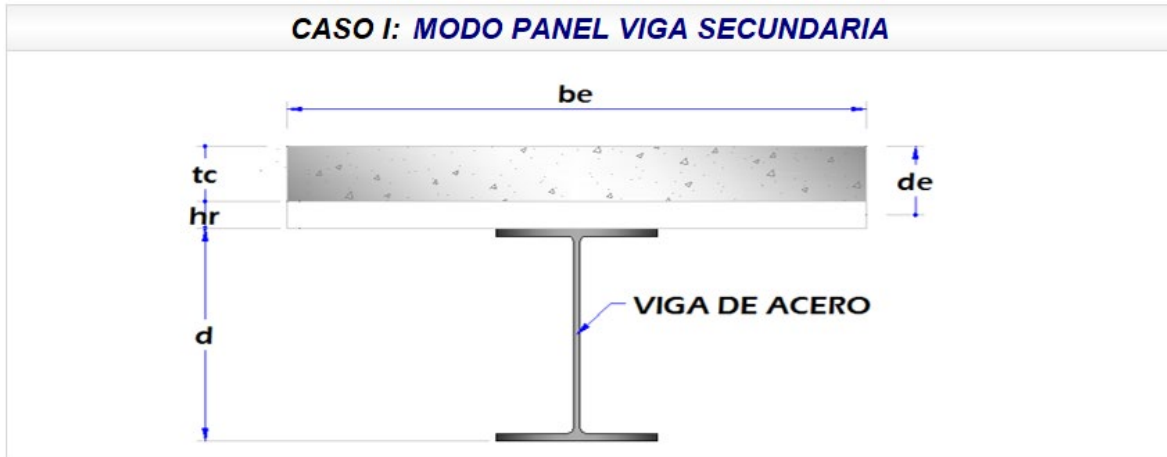
Propiedades Geométricas de la Viga

El libro de Excel contiene diferentes pestañas, en este apartado el usuario deberá colocarse en la pestaña que lleva por nombre “VS” (específica para cuando se analiza vigas secundarias) y podrá seleccionar la sección que requiera, así como también indicar el tipo de acero que desee utilizar, esta selección como ejemplo se muestra en la Ilustración 5 en un recuadro color rojo.

PERFIL I RECTANGULAR PROPIEDADES DE LA SECCION MOSTRADA				
	SECCION		PERFIL I RECTANGULAR	
	W14X26		DESIGNACION AISC W14X26lb/ft	
	ASTM A572 Gr.50		DESIGNACION IMCA IR353.1X38.69kg/m	
DIMENSIONES		PROPIEDADES DEL MATERIAL		
TRANSVERSALES		ITEM	METRICO DECIMAL	INTERNACIONAL
$d =$	35.31 cm	$F_y =$	3,515.34 kg/cm ²	350.00 MPa
$t_w =$	0.65 cm	$E =$	2,038,897.20 kg/cm ²	200000.00 MPa
$b_f =$	12.78 cm	$G =$	787,436.16 kg/cm ²	77241.38 MPa
$t_f =$	1.07 cm	$\gamma_{acero} =$	0.00785 kg/cm ³	76970.32 N/m ³
$k_{DES} =$	2.08 cm			50 ksi
$k_1 =$	1.91 cm			29000 ksi
				11200 ksi
				490.00 lb/ft ³

Ilustración 5.-Propiedades de la Sección Viga Secundaria

Automáticamente en la hoja de Excel, en la pestaña de “Actividades Rítmicas” se pondrá la designación seleccionada y mostrará las propiedades de dicho perfil para la viga secundaria en base a un catálogo de perfiles del AISC.



Propiedades geométricas de la viga		DESIGNACION AISC W14X26lb/ft		
Resistencia del acero empleada	F_y	3515.3 kg/cm ²	344.71 Mpa	50.00 ksi
Modulo de elasticidad del acero	E_s	2038897 kg/cm ²	199934.26 Mpa	29000.00 ksi
Longitud de la viga	L_j	6.00 m	6000.00 mm	19.69 ft
Peralte de la viga	d	35.31 cm	353.06 mm	13.90 in
Area de la sección transversal	A_a	49.61 cm ²	4961.29 mm ²	7.69 in ²
Peso por metro lineal	W_a	38.69 kg/m	379.43 N/m	26.00 lb/ft
Momento de inercia en X	I_a	10197.67 cm ⁴	1.02E+08 mm ⁴	245.00 in ⁴

Ilustración 6.-Propiedades Geométricas de la Viga Secundaria

Propiedades: Modo Panel Viga Secundaria

Constante C_j para tableros

Dependiendo del panel analizado se deberá indicar si este corresponde a un tablero interior o exterior los cuales son los casos que considera la guía 11 del AISC (American Institute of Steel Construction, 2016) y cuyo ejemplo de selección se muestra en la Ilustración 7. Dicho dato servirá para el cálculo de la constante C_j que aparece automáticamente al indicar el tipo de tablero y que se emplea en el cálculo del ancho efectivo del panel de viga (B_j).

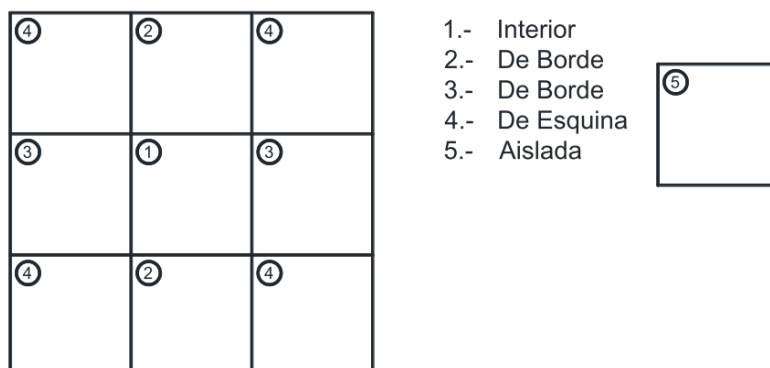


Ilustración 7.-Tipos de Tableros

Peso Efectivo del Panel Viga (W_j)

Se tienen dos opciones con claro continuo y sin claro continuo, debido a que dependiendo del caso se utilizará un factor (F_c) para el cálculo del peso efectivo del panel de la viga (W_j). Al indicar el tipo de claro, el factor F_c se mostrará en automático dependiendo del caso.

PROPIEDADES: MODO PANEL VIGA SECUNDARIA

Formulas empleadas:

$$\Delta_j = \frac{5w_j L_j^4}{384 E_s I_j} \quad f_j = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j}}$$

$$D_s = \frac{d_e^3}{12n} \quad D_j = \frac{I_j}{S}$$

$$B_j = C_j \left(\frac{D_s}{D_j} \right)^{\frac{1}{4}} L_j \leq \frac{2}{3} \times \text{Ancho de piso}$$

$$W_j = (w_j / S) B_j L_j F_c$$

El peso soportado por unidad de longitud	w_j	510.24 kg/m	5003.39 N/m	322.11 lb/ft
Deflexión máxima presente (Viga ART-ART)	Δ_j	0.12 cm	1.17 mm	0.04 in
Frecuencia natural del sistema	f_j	16.51 Hz	16.51 Hz	17.03 Hz
Momento de inercia transformado de la losa por unidad de ancho	D_s	811.98 cm ⁴ /cm	8120 mm ⁴ /mm	5.95 in ⁴ /ft
Momento de Inercia transformado de la viga por unidad de ancho	D_j	226.40 cm ⁴ /cm	226400 mm ⁴ /mm	165.79 in ⁴ /ft
Constante C_j para tableros interiores	C_j	2.000	2.000	2.000
Ancho efectivo del panel viga	B_j	5.33 m	5222.15 mm	17.13 ft
Peso efectivo del panel viga con claro continuo	W_j	15307.12 kg	146972.31 N	31.04 kips

Ilustración 8.-Modo Panel Viga Secundaria

Caso II: Modo Panel Viga Principal

Propiedades Geométricas de la Viga

En este apartado el usuario deberá colocarse en la pestaña que lleva por nombre “VP” (específica para cuando se analiza vigas principales) y podrá seleccionar la sección que requiera, así mismo como el tipo de acero.

**PERFIL I RECTANGULAR
PROPIEDADES DE LA SECCION MOSTRADA**

SECCION		PERFIL I RECTANGULAR			
W14X26		DESIGNACION AISC W14X26lb/ft			
ASTM A572 Gr.50		DESIGNACION IMCA IR353.1X38.69kg/m			
DIMENSIONES		PROPIEDADES DEL MATERIAL			
TRANSVERSALES		ITEM	METRICO DECIMAL	INTERNACIONAL	INGLES
d	35.31 cm	F_y	3,515.34 kg/cm ²	350.00 MPa	50 ksi
t_w	0.65 cm	E	2,038,897.20 kg/cm ²	200000.00 MPa	29000 ksi
b_f	12.78 cm	G	787,436.16 kg/cm ²	77241.38 MPa	11200 ksi
k_1	2.08 cm	γ_{acero}	0.00785 kg/cm ³	76970.32 N/m ³	490.00 lb/ft ³
k_2	1.91 cm				

Ilustración 9.-Propiedades de la Sección Viga Principal

Peso Efectivo del Panel Viga (W_g)

Se tienen dos opciones con claro continuo y sin claro continuo, esto debido a que dependiendo del caso se utilizará un factor (F_c) para el cálculo del peso efectivo del panel de la viga (W_g). Al indicar el tipo de claro, el factor F_c se mostrará en automático dependiendo del caso.

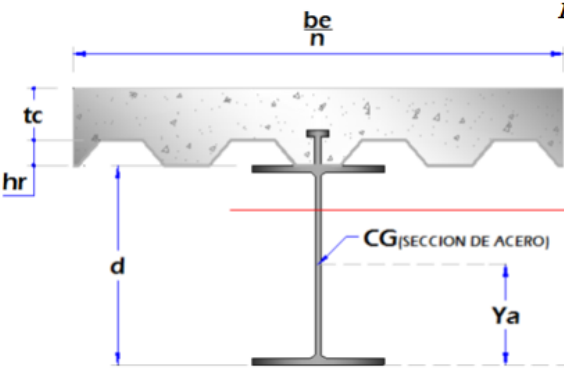
PROPIEDADES: MODO PANEL VIGA PRINCIPAL				
		Formulas empleadas: $w_g = L_j \left(\frac{w_j}{S} \right) + w_{pp\text{viga principal}} \quad f_g = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_g}}$ $D_s = \frac{d_e^3}{12n} \quad D_g = \frac{I_g}{L_j} \quad \Delta_g = \frac{w_g L_g^4}{384 E_s I_g}$ $B_g = C_g \left(\frac{D_j}{D_g} \right)^{1/4} \quad L_j \leq \frac{2}{3} \times \text{Longitud del piso}$ $B_g = \frac{2}{3} L_j \quad W_g = (w_g / L_j) B_g L_g F_c$		
El peso soportado por unidad de longitud	w_g	1972.92 kg/m	19346.43 N/m	1247.92 lb/ft
Deflexión máxima presente (Viga EMP-EMP)	Δ_g	0.14 cm	1.40 mm	0.05 in
Frecuencia natural del sistema	f_g	15.09 Hz	15.09 Hz	15.55 Hz
Momento de inercia transformado de la losa por unidad de ancho	D_s	811.98 cm ⁴ /cm	8120 mm ⁴ /mm	5.95 in ⁴ /ft
Momento de inercia transformado de la viga por unidad de ancho	D_g	123.27 cm ⁴ /cm	35935 mm ⁴ /mm	26.31 in ⁴ /ft
Constante Cg tableros con conexión a cortante	C_g	1.800	1.800	1.800
Ancho efectivo del panel viga	B_g	12.00 m	12000.00 mm	39.37 ft
Peso efectivo del panel viga sin claro continuo	W_g	31566.68 kg	309542.85 N	65.51 kips

Ilustración 12.-Modo Panel Viga Principal

Los datos y procedimientos descritos en este manual hasta antes de los apartados

Propiedades: Modo Panel Viga Secundaria y Propiedades: Modo Panel Viga Principal son necesarios para el cálculo de la deflexión presente ya sea en la viga principal o en la viga secundaria y a partir de esta calcular la frecuencia natural del sistema (f_n) dato que es de gran interés para el cálculo de las vibraciones por actividades rítmicas, sin embargo como se mencionó al inicio de este documento si el usuario cuenta con los datos de la deflexión presente en la viga principal y secundaria que brindan soporte al sistema de piso ya sea que se obtuvo por medio de una cálculo manual o de un software de análisis estructural, puede omitir los apartados anteriores y escribir directamente este valor en la celda correspondiente a la deflexión máxima presente para cada caso, sin embargo las consideraciones que debe indicar en estos apartados de “propiedades modo panel viga” son necesarias para continuar con el análisis.

Caso III: Modo Panel Combinado

Los datos obtenidos en los casos I y II, son usados en el caso III, el cual como su nombre lo indica es una combinación de los dos casos anteriores, tomando principalmente los datos de deflexión máxima para de esta manera obtener la frecuencia natural del sistema combinado. En este caso el usuario no deberá modificar nada ya que las celdas ya contienen las fórmulas para el cálculo de los datos necesarios en este apartado.

CASO III: MODO PANEL COMBINADO				
Deflexión efectiva de la viga principal	Δ_g	0.14 cm	1.40 mm	0.05 in
Frecuencia natural del sistema combinado	f_n	11.14 Hz	11.14 Hz	11.48 Hz
Peso efectivo del panel combinado	W	24166.09 kg	235548.42 N	49.84 kips

Ilustración 13.-Modo Panel Combinado

Análisis por Actividades Rítmicas

Deflexiones de las columnas

La hoja pregunta al usuario si desea considerar el efecto de las deflexiones de las columnas para el análisis por actividades rítmicas, dicho efecto puede ser despreciado ya que es generalmente pequeña en comparación con las deflexiones de viguetas y vigas para edificios.

En caso de que se desee considerar el usuario deberá ingresar el esfuerzo axial de la columna debido al peso soportado y la longitud de la columna con el fin de obtener una aproximación de la deflexión de las columnas (Δ_c), de lo contrario si se conoce dicha deflexión puede ser reemplazado el valor numérico en la celda correspondiente a dicho dato.

Sección columnas

En este apartado el usuario deberá colocarse en la pestaña que lleva por nombre “COL” (específica para cuando se analizan columnas) y podrá seleccionar la sección que requiera, así mismo como el tipo de acero.

Análisis por Actividades Rítmicas				
Desea considerar las deflexiones de las columnas		No		
Esfuerzo axial de la columna debido al peso soportado	σ_c	150 kg/cm ²	36249.14 Mpa	2 ksi
Longitud de la columna	L_c	4.00 m	4000.00 mm	13.12 ft
Sección Columna		DESIGNACION AISC W14X26lb/ft		
Módulo de elasticidad del acero de la columna	E_{sc}	2038897 kg/cm ²	199934.26 Mpa	29000 ksi
Acortamiento axial de la columna debido al peso soportado	Δ_c	0.00 cm	0.00 mm	0.00 ft
Amortiguamiento	β	0.060	0.060	0.060
Peso total del sistema	W_t	318.90 kg/m ²	3127.12 N/m ²	65.32 psf

Ilustración 14.-Análisis por Actividades Rítmicas

Criterios de Evaluación Vibraciones por Actividades Rítmicas

En la hoja se emplean dos criterios para la evaluación de las vibraciones del sistema de piso, uno de ellos denominado “Criterio de la Rigidez (Frecuencia Natural del Sistema)” y el otro “Criterio de Aceleración”.

1. Criterio de Rigidez

El criterio afirma que un sistema de piso es satisfactorio si la frecuencia natural del sistema, f_n , es mayor o igual a la frecuencia natural mínima requerida, $f_{nreq'd}$, para prevenir vibraciones,

este criterio está basado en función de las cargas dinámicas por actividades rítmicas y la respuesta dinámica de la estructura del piso.

2. Criterio de Aceleración

El criterio afirma que un sistema de piso es satisfactorio si la relación de aceleración a_p/g , debida a actividades rítmicas, no excede la aceleración límite a_o/g de la ocupación apropiada para el sistema de piso.

Verificación del Sistema de Piso: Criterio de Rigidez

La hoja de Excel toma como la frecuencia natural del sistema aquella que es calculada para el Caso III: Modo Panel Combinado ya que este toma en consideración todo el sistema de piso trabajando en conjunto, la cual es comparada con la aceleración natural mínima requerida para prevenir vibraciones, en este apartado nuevamente el usuario no deberá modificar ninguna celda ya que éstas ya contienen las consideraciones para ambas frecuencias, al final se mostrará un párrafo donde se indica si el sistema de piso ante este criterio es satisfactorio así como se muestra en la Ilustración 15.

VERIFICACION DEL SISTEMA DE PISO: CRITERIO DE FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA				
Frecuencia natural del sistema combinado	f_n	11.14 Hz	11.14 Hz	11.14 Hz
Frecuencia natural mínima requerida	$(f_n)_{req'd}$	9.09 Hz	9.09 Hz	9.09 Hz
Como podemos observar la frecuencia natural del sistema de 11.14 Hz es mayor o igual a la frecuencia natural mínima requerida para prevenir vibraciones de 9.09 Hz por tanto consideramos adecuado el sistema propuesto.				

Ilustración 15.-Verificación del Sistema de Piso: Criterio de Frecuencia Natural del Sistema

Verificación del Sistema de Piso: Criterio de Aceleración

Con el fin de obtener la aceleración límite de la ocupación apropiada del sistema de piso se deberá seleccionar la ocupación que será afectada por la actividad rítmica, se podrá seleccionar: Desayuno o baile (Dancing or Dining), Concierto o solo actividades rítmicas (Lively Concert or Rhythmic Activity Only), Aerobics, Oficina o residencial (Office or Residential), Levantamiento de pesas (Weightlifting). Este criterio es el que expresa la guía 11 del AISC ya que se ha comprobado que la tolerancia a la aceleración proporciona la mejor predicción de la respuesta de los ocupantes.

Una vez seleccionada dicha ocupación se mostrará el valor de aceleración límite debido a la ocupación del edificio, cuyos valores son tomados de la guía 11 del AISC (American Institute of Steel Construction, 2016), al final se mostrará un párrafo donde se indica si el sistema de piso ante este criterio es satisfactorio, así como se muestra en la Ilustración 16.

VERIFICACION DEL SISTEMA DE PISO: CRITERIO DE ACELERACION				
Relación de aceleración debido a actividades rítmicas	a_p/g	2.42%	2.42%	2.42%
Ocupación afectada por vibración	Office or Residential			
Aceleración límite de la ocupación apropiada sistema de piso	a_o/g	0.50%	0.50%	0.50%
Como podemos observar la aceleración límite de 0.005 es menor a la máxima aceleración pico predecida de 0.024 por lo tanto el sistema de piso no es satisfactorio.				

Ilustración 16.-Verificación del Sistema de Piso: Criterio de Aceleración

Ejemplo de Uso Hoja de Cálculo en Excel para la Determinación de Vibraciones en Sistemas de Entrepiso debido a Actividades Rítmicas

Se ha considerado la posibilidad de ocupar como un salón de aerobics un segundo piso de un edificio de oficinas de dos niveles. El edificio para oficinas se muestra en la Ilustración 17 e Ilustración 18, el cual satisface todos los requisitos de resistencia.

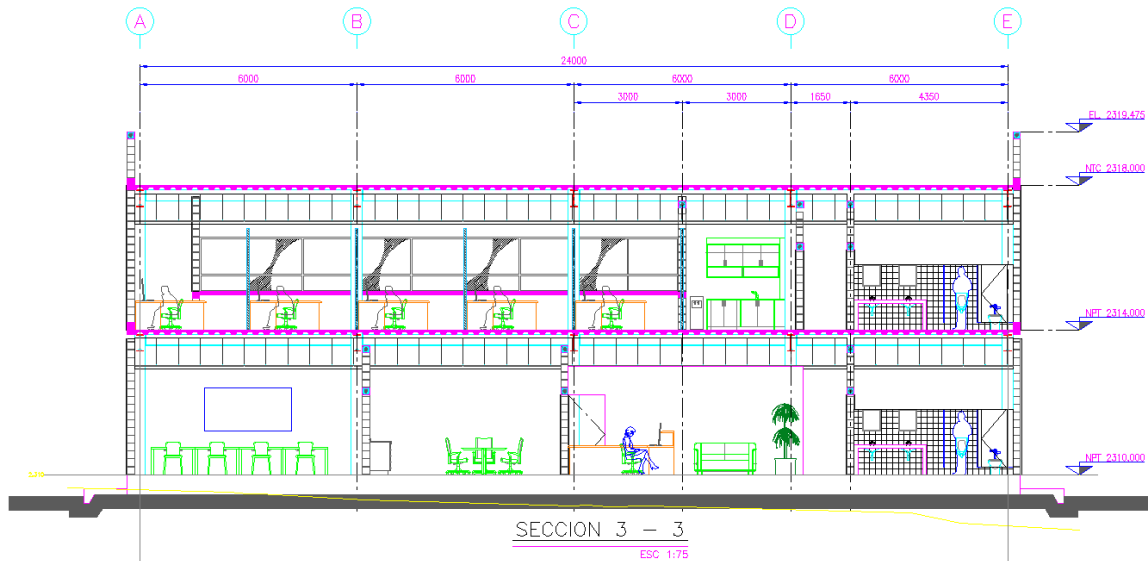
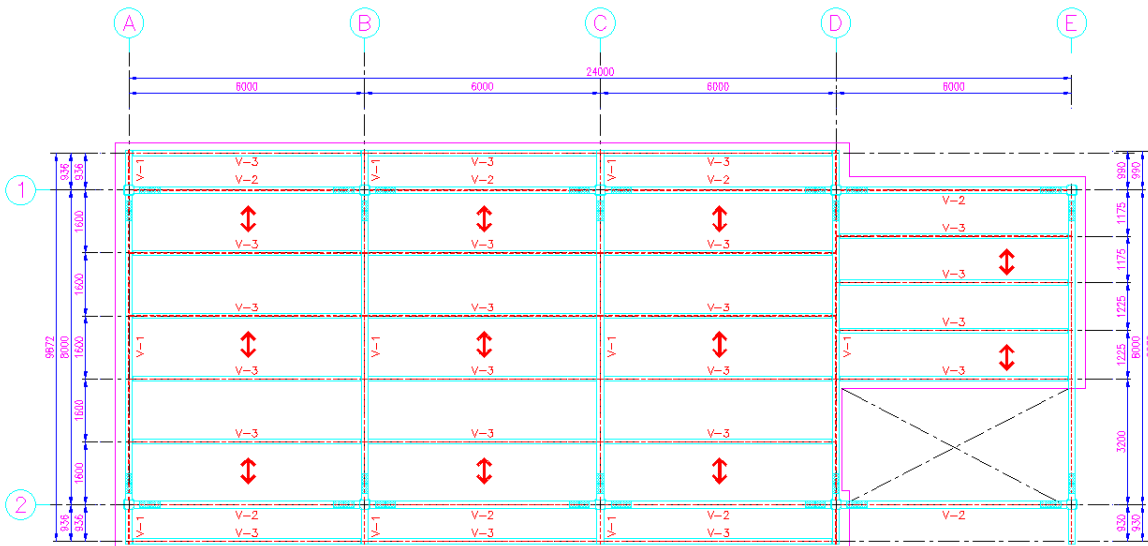


Ilustración 17.-Corte Edificio de Oficinas



PLANTA ALTA EDIFICIO OFICINAS NPT +2314.400
REF 0000-01-01 ESC 1:75

Ilustración 18.- Planta Alta Edificio de Oficinas

El sistema de piso consiste en una losacero Ternium 25 Cal. 20, con una capa de compresión de concreto de 6.00 cm, apoyada sobre vigas secundarias (V-2) que a su vez se encuentran

apoyadas sobre vigas principales (V-1 y V-3) y columnas de acero todos los perfiles son laminados en caliente, las secciones de los perfiles usados se muestran en la Ilustración 19.

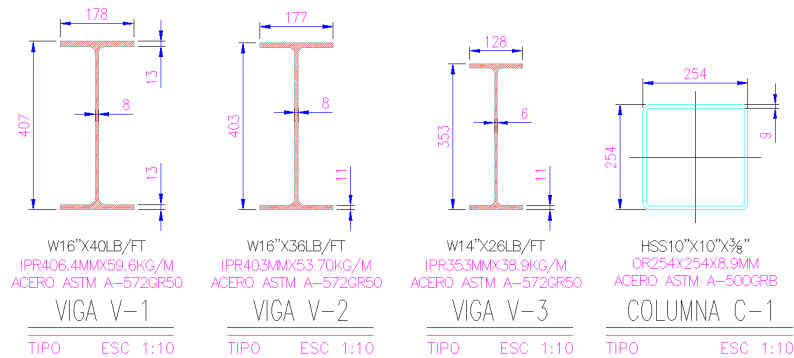


Ilustración 19.-Perfiles Vigas y Columnas

Considere un concreto con una resistencia a la compresión $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$ con un peso volumétrico de 2100 kg/m^3 . Para las cargas muertas considerar una capa de mortero de 2.00 cm, loseta de cerámica, y una capa de pegazulejo de 1.5 cm. Determine si el sistema de piso mostrado en la Ilustración 18, puede ser usado para esta actividad.

Solución

De acuerdo con la Ilustración 18, la planta del edificio se puede dividir en los Paneles A y B al ser las zonas delimitadas por columnas como se muestra en la Ilustración 20. Para este ejemplo nos centraremos en el Panel A, ya que el Panel B contiene una discontinuidad por lo que la carga que este soporta no se puede considerar uniformemente distribuida a lo largo de toda la viga que es la consideración con la que cuenta la hoja de cálculo en Excel para el cálculo de las deflexiones.

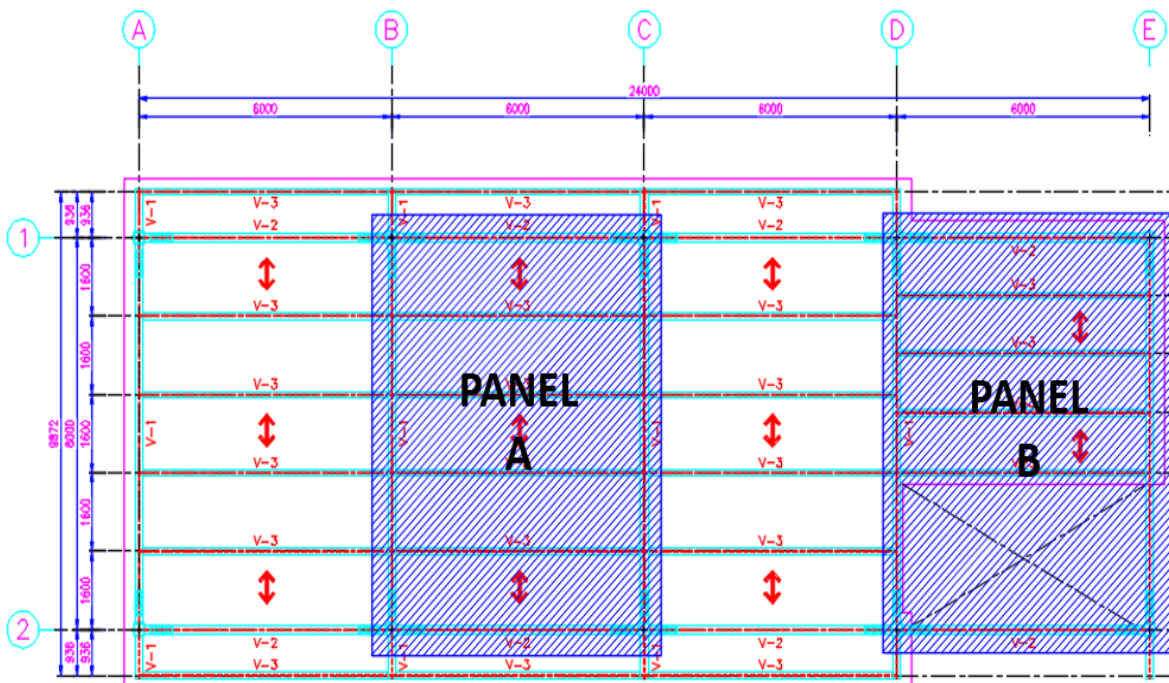


Ilustración 20.-Paneles del Sistema de Piso

Analizando el Panel A, de acuerdo con lo que se especificó en el apartado Características Geométricas del Sistema de Piso de esta guía, los datos a ingresar en la hoja de Excel considerando como vigas principales las marcadas como V-1 y como vigas secundarias las marcadas como V-3 mostradas en la Ilustración 21, se muestran en la Ilustración 22:

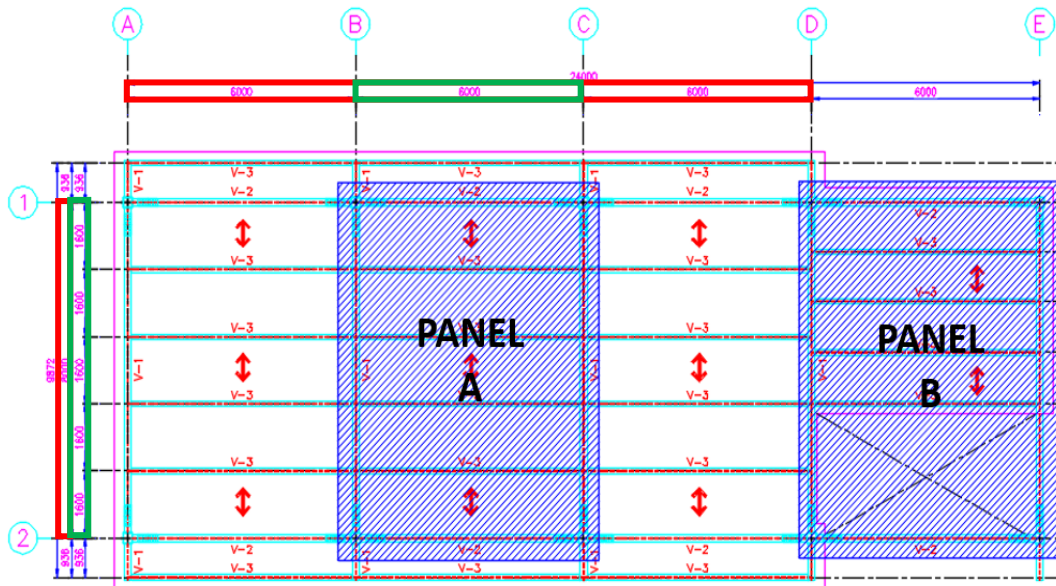


Ilustración 21.-Dimensiones Características Geométricas del Sistema de Piso

Aceleración de la gravedad	g	9.81 m/s²	9806.00 mm/s²	386.00 in/s²
Características geométricas del sistema de piso				
Ancho del sistema de piso (Floor Width)	A_{piso}	8.00 m	8000.00 mm	26.25 ft
Largo del sistema de piso (Floor Length)	L_{piso}	18.00 m	18000.00 mm	59.06 ft
Ancho del panel a analizar	A_{panel}	8.00 m	8000.00 mm	26.25 ft
Largo del panel a analizar	L_{panel}	6.00 m	6000.00 mm	19.69 ft
Separación de vigas	S	1.60 m	1600.00 mm	5.25 ft

Ilustración 22.-Ejemplo 1. Datos Características Geométricas del Sistema de Piso

Como se menciona en el enunciado la actividad rítmica a considerar en la ocupación del sistema de piso serán aerobics esto es importante ya que de esto depende una parte de la carga viva total a considerar; mientras que la carga muerta total a considerar se obtiene como se muestra en la Tabla 1, importante no se debe considerar el peso del concreto en este apartado:

Material	Espesor	Peso Volumétrico	Carga Muerta
	(m)	(kg/m ³)	(kg/m ²)
Mortero	0.020	1840.00	28.00
Loseta de Cerámica	0.015	1500.00	23.00
Pegazulejo	0.015	2100.00	42.00
Carga Muerta Total			93.00

Tabla 1.-Carga Muerta Sistema de Piso

De esta manera el apartado de Características Gravitacionales para el Análisis de Vibraciones debe ser llenado como se muestra en la Ilustración 23 y cuyos datos corresponden a lo indicado en el enunciado del ejemplo, así como la carga muerta total obtenida en la Tabla 1 anteriormente.

Características Gravitacionales para el analisis de vibraciones				
Ocupacion del sistema de piso		Aerobics		
Carga Viva para el analisis de vibraciones	LL	20.50 kg/m²	201.02 N/m²	4.20 psf
Carga Muerta (sin incluir peso del concreto)	DL	93.00 kg/m²	911.96 N/m²	19.05 psf

Ilustración 23.-Ejemplo 1. Datos Características Gravitacionales para el Análisis de Vibraciones

El sistema de piso está formado a base de losacero Ternium 25 Cal. 20, con una capa de compresión de concreto de 6.00 cm, el concreto a utilizarse tiene una resistencia a la compresión $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$, y un peso volumétrico de 2100 kg/m^3 . De esta manera los datos para el apartado Características y Propiedades de la Losa de Piso (Losacero) se muestran en la Ilustración 24.

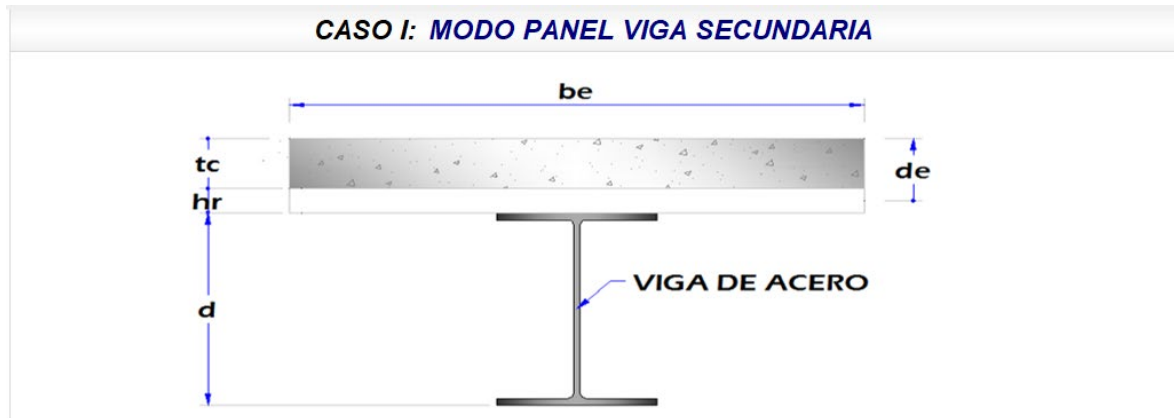
Características y propiedades de la losa de piso (Losacero)				
		LOSACERO Ternium 25 Cal.20		
		hr=6.35cm	hr=63.50mm	hr=2.50in
		Wr=12.50cm	Wr=125.00mm	Wr=4.92in
		9.54 kg/m²	93.55 N/m²	1.95 psf
Módulo de elasticidad del concreto	Ec	190533.8 kg/cm²	18683.74 Mpa	2710.04 ksi
Peso volumétrico del concreto	wc	2100.00 kg/m³	20592.60 N/m³	131.10 pcf
Resistencia del Concreto	f'c	200.00 kg/cm²	19.61 Mpa	2844.68 psi
Capa de compresion de concreto	tc	6.00 cm	60.00 mm	2.36 in
Peralte efectivo para el analisis de vibraciones	de	9.18 cm	91.75 mm	3.61 in
Peso efectivo de losa (Slab)	DL_{losa}	192.68 kg/m²	1889.37 N/m²	39.46 psf
Peso efectivo de losa+lamina(Slab+Deck Weigth)	DL_{losa+lam}	202.22 kg/m²	1982.92 N/m²	41.42 psf

Ilustración 24.-Ejemplo 1. Datos Características y Propiedades de la Losa de Piso (Losacero)

Continuando con el apartado de Caso I: Modo Panel Viga Secundaria, los datos a ingresar para la viga secundaria (V-3) corresponden a un perfil W14"x26 lb/ft como se muestra en la Ilustración 19, por otra parte el Panel A según la Ilustración 7 corresponde a un tablero interior, por lo que esto se deberá indicar para el valor de la constante C_j , así mismo las vigas secundarias en este tablero son consideradas de claro continuo.

Los datos mencionados anteriormente son las modificaciones que se deben hacer en este apartado, los datos que complementan dicho apartado se obtienen de manera automática como se muestra a continuación en la Ilustración 25.

Ilustración 25.-Ejemplo 1. Datos Caso I Modo Panel de Viga Secundaria



Propiedades geométricas de la viga		DESIGNACION AISC W14X26lb/ft		
Resistencia del acero empleada	F_y	3515.3 kg/cm ²	344.71 Mpa	50.00 ksi
Modulo de elasticidad del acero	E_s	2038897 kg/cm ²	199934.26 Mpa	29000.00 ksi
Longitud de la viga	L_j	6.00 m	6000.00 mm	19.69 ft
Peralte de la viga	d	35.31 cm	353.06 mm	13.90 in
Area de la sección transversal	A_a	49.61 cm ²	4961.29 mm ²	7.69 in ²
Peso por metro lineal	W_a	38.69 kg/m	379.43 N/m	26.00 lb/ft
Momento de inercia en X	I_a	10197.67 cm ⁴	1.02E+08 mm ⁴	245.00 in ⁴

Propiedades geométricas de la Sección Compuesta

Formulas empleadas:

$$E_c = 0.14 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'} \quad b_e = \text{Min}(0.40 L, S) \quad y = d + h_r + \frac{t_c}{2} - \bar{Y}$$

$$n = \frac{E_s}{1.35 E_c} \quad \bar{Y} = \frac{A_a Y_a + A_{ct} \left(d + h_r + \frac{t_c}{2} \right)}{A_a + A_{ct}}$$

$$A_{ct} = b_{eq} t_c = \left(\frac{b_e}{n} \right) t_c \quad I_{ct} = \frac{b_{eq} t_c^3}{12} = \frac{b_e t_c^3}{12 n}$$

$$I_j = I_t = I_a + A_a (\bar{Y} - Y_a)^2 + I_{ct} + A_{ct} y^2$$

Ancho efectivo para el analisis de vibraciones	b_e	1.60 m	1600.00 mm	5.25 ft
Relacion modular dinamica	n	7.927	7.927	7.927
Centro de gravedad de la sección de acero	Y_a	17.65 cm	176.53 mm	6.95 in
Area del concreto en tension	A_{ct}	121.11 cm ²	12111.0 mm ²	18.77 in ²
Momento de inercia del concreto en tension	I_{ct}	363.33 cm ⁴	3.63E+06 mm ⁴	8.73 in ⁴
La posición del eje neutro elástico ENE	\bar{Y}	36.81 cm	368.09 mm	14.49 in
Distancia del centroide del área efectiva de la losa al ENE, y	y	7.85 cm	78.47 mm	3.09 in
Momento de inercia de la sección transformada	I_j	36224.00 cm ⁴	3.62E+08 mm ⁴	870.28 in ⁴

PROPIEDADES: MODO PANEL VIGA SECUNDARIA

Formulas empleadas:

$$\Delta_j = \frac{5w_j L_j^4}{384 E_s I_j} \quad f_j = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j}}$$

$$D_s = \frac{d_e^3}{12 n} \quad D_j = \frac{I_j}{S}$$

$$B_j = C_j \left(\frac{D_s}{D_j} \right)^{\frac{1}{4}} \quad L_j \leq \frac{2}{3} \times \text{Ancho de piso}$$

$$W_j = (w_j / S) B_j L_j F_c$$

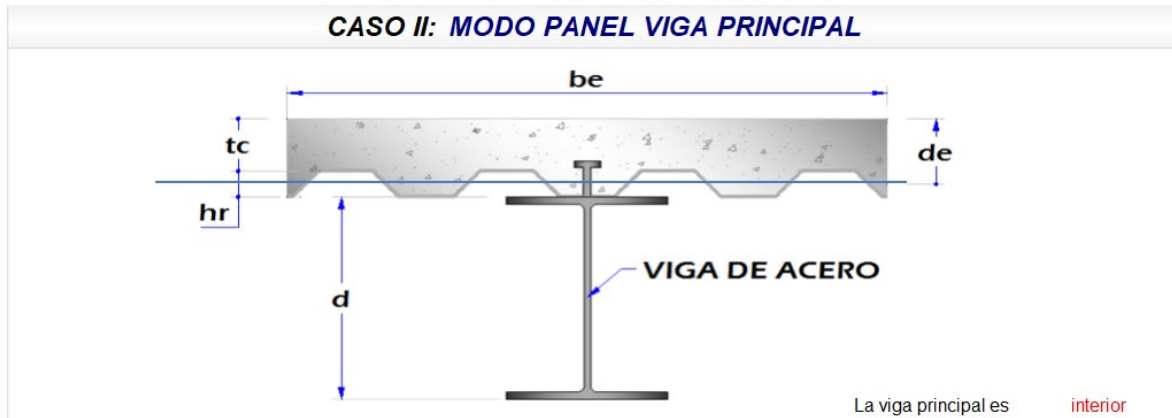
El peso soportado por unidad de longitud	w_j	543.84 kg/m	5332.87 N/m	344.69 lb/ft
Deflexión máxima presente (Viga ART-ART)	Δ_j	0.12 cm	1.24 mm	0.05 in
Frecuencia natural del sistema	f_j	15.99 Hz	15.99 Hz	16.46 Hz
Momento de inercia transformado de la losa por unidad de ancho	D_s	811.98 cm ⁴ /cm	8120 mm ⁴ /mm	5.95 in ⁴ /ft
Momento de Inercia transformado de la viga por unidad de ancho	D_j	226.40 cm ⁴ /cm	226400 mm ⁴ /mm	165.79 in ⁴ /ft
Constante Cj para tableros interiores	C_j	2.000	2.000	2.000
Ancho efectivo del panel viga	B_j	5.33 m	5222.15 mm	17.13 ft
Peso efectivo del panel viga con claro continuo	W_j	16315.12 kg	156650.69 N	33.22 kips

De este apartado los datos de mayor interés para el usuario será la deflexión presente en la viga, así como la frecuencia natural del sistema pues estos datos volverán a ser usados más adelante en la hoja de cálculo, así como también el peso soportado por unidad de longitud ya que este influye en el siguiente caso para la carga a soportar por la viga principal y son los que aportan el peso mayor al sistema de piso, y que a su vez el usuario puede ingresar manualmente evitando así tener que realizar el proceso de los apartados anteriores.

En el apartado Caso II: Modo Panel Viga Principal requieren ser ingresados datos similares al caso anterior para la viga secundaria, esta vez como se indica en el título enfocados a la viga principal (V-1) primeramente se debe indicar que se trata de una viga interior de acuerdo a la posición en la que se encuentra; el perfil corresponde a una designación W16"x40 lb/ft como se muestra en la Ilustración 19, se considera que la conexión a la columna será simple (a cortante) que afectara en el valor de la constante C_g , así mismo las vigas principales en este tablero son consideradas de claro continuo.

Los datos mencionados anteriormente son las modificaciones que se deben hacer en este apartado, los datos que complementan dicho apartado se obtienen de manera automática como se muestra a continuación en la Ilustración 26.

Ilustración 26.-Ejemplo 1. Datos Caso II Modo Panel de Viga Principal



Propiedades geométricas de la viga		DESIGNACION AISC W16X40lb/ft		
Resistencia del acero empleada	F_y	3515.3 kg/cm ²	344.71 Mpa	50.00 ksi
Modulo de elasticidad del acero	E_s	2038897 kg/cm ²	199934.26 Mpa	29000.00 ksi
Longitud de la viga	L_g	8.00 m	8000.00 mm	26.25 ft
Peralte de la viga	d	40.64 cm	406.40 mm	16.00 in
Area de la sección transversal	A_a	76.13 cm ²	7612.90 mm ²	11.80 in ²
Peso por metro lineal	W_a	59.53 kg/m	583.73 N/m	40.00 lb/ft
Momento de inercia en X	I_a	21560.79 cm ⁴	2.16E+08 mm ⁴	518.00 in ⁴

Propiedades geométricas de la Sección Compuesta

Formulas empleadas:

$$E_c = 0.14 w_c^{1.5} \sqrt{f_c}$$

$$b_e = \text{Min} (0.40 L_g, L_j)$$

$$n = \frac{E_s}{1.35 E_c}$$

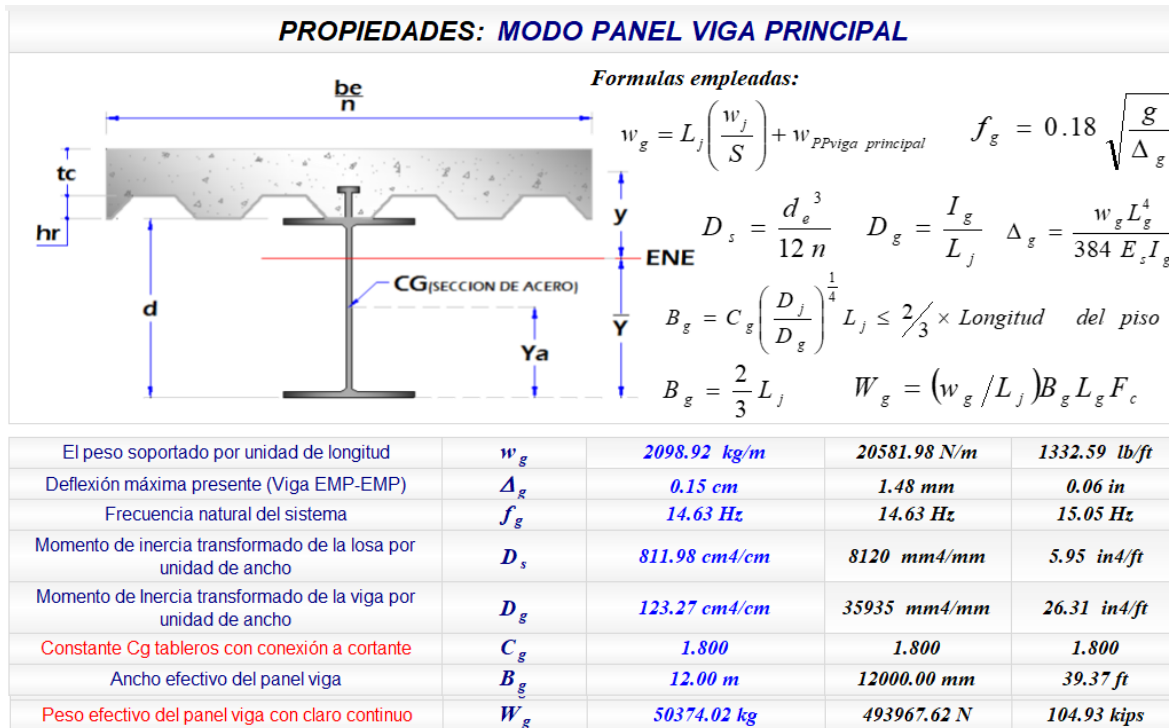
$$y = d + h_r + \frac{t_c}{2} - \bar{Y}$$

$$\bar{Y} = \frac{A_a Y_a + A_{ct} \left(d + h_r + \frac{t_c}{2} \right)}{A_a + A_{ct}}$$

$$A_{ct} = b_{eq} t_c = \left(\frac{b_e}{n} \right) t_c \quad I_{ct} = \frac{b_{eq} t_c^3}{12} = \frac{b_e t_c^3}{12 n}$$

$$I_g = I_t = I_a + A_a (\bar{Y} - Y_a)^2 + I_{ct} + A_{ct} y^2$$

Ancho efectivo para el analisis de vibraciones	b_e	3.20 m	3200.00 mm	10.50 ft
Relacion modular dinamica	n	7.927	7.927	7.927
Centro de gravedad de la sección de acero	Y_a	20.32 cm	203.20 mm	8.00 in
Area del concreto en tension	A_{ct}	370.40 cm ²	37039.6 mm ²	57.41 in ²
Momento de inercia del concreto en tension	I_{ct}	2598.35 cm ⁴	2.60E+07 mm ⁴	62.43 in ⁴
La posición del eje neutro elástico ENE	Y	43.61 cm	436.15 mm	17.17 in
Distancia del centroide del área efectiva de la losa al ENE, y	y	4.79 cm	47.88 mm	1.88 in
Momento de inercia de la sección transformada	I_g	73960.63 cm ⁴	7.40E+08 mm ⁴	1776.91 in ⁴



Nuevamente los datos de mayor interés para el usuario será la deflexión presente en la viga, así como la frecuencia natural del sistema que el usuario puede ingresar manualmente evitando así tener que realizar el proceso de los apartados anteriores.

El apartado referente al Caso III: Modo Panel Combinado realiza una combinación de las frecuencias obtenidas en el caso I y caso II, mostrando una frecuencia natural del sistema que toma en cuenta tanto la viga principal y la viga secundaria, dicha frecuencia es la que se usara para ser comparada con el criterio de frecuencia natural del sistema. En este apartado el usuario no deberá modificar algún dato ya que se calculan en automático en referencia a los datos ingresados hasta este momento en la hoja. Estos datos se muestran en la Ilustración 27

CASO III: MODO PANEL COMBINADO

Deflexión efectiva de la viga principal	Δ_g	0.15 cm	1.48 mm	0.06 in
Frecuencia natural del sistema combinado	f_n	10.79 Hz	10.79 Hz	11.11 Hz
Peso efectivo del panel combinado	W	34856.25 kg	340280.78 N	72.29 kips

Ilustración 27.-Ejemplo 1. Datos Caso II Modo Panel Combinado

Lo siguiente en la hoja de cálculo es el apartado de Análisis por Actividades Rítmicas, en este ejemplo se despreciara las deflexiones en las columnas por ser pequeñas comparada con las de las vigas, la sección correspondiente a las columnas se muestra en la Ilustración 19 correspondiente a un perfil HSS 10"x10"x3/8", sin embargo como se desprecia la deflexión en este ejemplo este dato no tiene gran importancia.

Posteriormente se muestra una tabla de aceleraciones pico, la cual es desarrollada en base a un coeficiente dinámico, una frecuencia de paso para hasta 3 diferentes armónicos, los datos mencionados anteriormente dependen del tipo de actividad rítmica y que en cada caso a analizar arrojará una tabla con valores, y armónicos diferentes; en esta ocasión correspondiente a aerobics, también se hace uso de la frecuencia natural del sistema y el peso total del sistema. Los datos mencionados anteriormente se muestran en la Ilustración 28.

Análisis por Actividades Rítmicas				
Desea considerar las deflexiones de las columnas	No			
Esfuerzo axial de la columna debido al peso soportado	σ_c	0 kg/cm²	0.00 Mpa	0 ksi
Longitud de la columna	L_c	0.00 m	0.00 mm	0.00 ft
Sección Columna	DESIGNACION AISC HP10X42lb/ft			
Módulo de elasticidad del acero de la columna	E_{sc}	2038897 kg/cm²	199934.26 Mpa	29000 ksi
Desplazamiento axial de la columna debido al peso soportado	Δ_c	0.00 cm	0.00 mm	0.00 ft
Amortiguamiento	β	0.060	0.060	0.060
Peso total del sistema	W_t	339.90 kg/m²	3333.04 N/m²	69.62 psf

Valor alfa	α_1	1.500	α_2	0.600	α_3	0.100	Combined Peak
Paso	1st Harmonic		2nd Harmonic		3rd Harmonic		
0.000	2.000	0.42%	4.000	0.75%	6.000	0.35%	1.08%
1.000	2.038	0.43%	4.075	0.78%	6.113	0.37%	1.13%
2.000	2.075	0.45%	4.150	0.81%	6.225	0.39%	1.18%
3.000	2.113	0.47%	4.225	0.85%	6.338	0.41%	1.23%
4.000	2.150	0.49%	4.300	0.89%	6.450	0.43%	1.29%
5.000	2.188	0.50%	4.375	0.92%	6.563	0.46%	1.34%
6.000	2.225	0.52%	4.450	0.96%	6.675	0.48%	1.40%
7.000	2.263	0.54%	4.525	1.00%	6.788	0.51%	1.46%
8.000	2.300	0.56%	4.600	1.04%	6.900	0.54%	1.52%
9.000	2.338	0.58%	4.675	1.08%	7.013	0.57%	1.59%
10.000	2.375	0.60%	4.750	1.13%	7.125	0.60%	1.65%
11.000	2.413	0.62%	4.825	1.17%	7.238	0.63%	1.72%
12.000	2.450	0.64%	4.900	1.22%	7.350	0.67%	1.79%
13.000	2.488	0.66%	4.975	1.27%	7.463	0.71%	1.87%
14.000	2.525	0.68%	5.050	1.32%	7.575	0.75%	1.95%
15.000	2.563	0.70%	5.125	1.37%	7.688	0.80%	2.03%
16.000	2.600	0.72%	5.200	1.42%	7.800	0.84%	2.12%
17.000	2.638	0.75%	5.275	1.47%	7.913	0.89%	2.21%
18.000	2.675	0.77%	5.350	1.53%	8.025	0.95%	2.30%
19.000	2.713	0.79%	5.425	1.59%	8.138	1.01%	2.40%
20.000	2.750	0.82%	5.500	1.64%	8.250	1.08%	2.50%

Ilustración 28.-Ejemplo 1. Datos Análisis por Actividades Rítmicas

La tabla mostrada en la Ilustración 28, servirá para la revisión por el criterio de aceleración para el sistema de piso, el cual se muestra más adelante.

Para la verificación del sistema de piso por vibraciones debidas a actividades rítmicas se cuentan con dos criterios, mismos que contiene la hoja y que en cada uno de ellos muestra un enunciado en el que se da una conclusión para saber si el sistema de piso es adecuado.

El primer criterio es el criterio de rigidez, se basa en una comparación entre la frecuencia natural del sistema y la frecuencia natural mínima requerida para prevenir vibraciones la cual es calcula en base a un coeficiente dinámico, el tipo de actividad, una constante k, límites de aceleración permitidos y una frecuencia de paso cuyos valores varían según la actividad rítmica para cada uno de estos datos. En este apartado el usuario no deberá modificar nada, y deberá prestar atención en el enunciado que se muestra, los resultados obtenidos para el caso analizado se muestran en la Ilustración 29.

VERIFICACION DEL SISTEMA DE PISO: CRITERIO DE FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA				
Frecuencia natural del sistema combinado	f_n	10.79 Hz	10.79 Hz	10.79 Hz
Frecuencia natural mínima requerida	$(f_n)_{req'd}$	9.04 Hz	9.04 Hz	9.04 Hz
Como podemos observar la frecuencia natural del sistema de 10.79 Hz es mayor o igual a la frecuencia natural mínima requerida para prevenir vibraciones de 9.04 Hz por tanto consideramos adecuado el sistema propuesto.				

Ilustración 29.-Ejemplo 1. Datos Verificación del Sistema de Piso: Criterio Frecuencia Natural del Sistema

De acuerdo con el enunciado el sistema de piso por este criterio es satisfactorio, sin embargo, aún falta corroborar el siguiente criterio el cual es el criterio de aceleración, el cual compara la aceleración pico máxima obtenida de la tabla de la Ilustración 28 con una aceleración límite permitida según el tipo de ocupación del edificio en este caso correspondiente a oficinas. Este criterio de acuerdo con la guía 11 del AISC (American Institute of Steel Construction, 2016) es el que mejor predice el comportamiento del sistema de piso y al cual sugiere es el único que se debería de usar. Los resultados obtenidos para el caso analizado se muestran en la Ilustración 30.

VERIFICACION DEL SISTEMA DE PISO: CRITERIO DE ACELERACION				
Relación de aceleración debido a actividades rítmicas	a_p/g	2.50%	2.50%	2.50%
Ocupación afectada por vibración		Office or Residential		
Aceleración límite de la ocupación apropiada sistema de piso	a_o/g	0.50%	0.50%	0.50%
Como podemos observar la aceleración límite de 0.005 es menor a la máxima aceleración pico predecida de 0.025 por lo tanto el sistema de piso no es satisfactorio.				

Ilustración 30.-Ejemplo 1. Datos Verificación del Sistema de Piso: Criterio de Aceleración

El enunciado para este criterio indica que el sistema de piso no es satisfactorio para la actividad de aerobics, esto debido a que de la tabla de aceleraciones pico de la Ilustración 28 la aceleración pico predecida debida a actividades rítmicas es del 2.50% ocurre cuando la frecuencia de paso es de 5.50 Hz para el segundo armónico, y dicha frecuencia excede la tolerancia límite recomendada donde las vibraciones son aceptables para los usuarios. Por lo que en conclusión y siguiendo el criterio de la guía 11 del AISC el sistema de piso, aunque por el criterio de rigidez del sistema es aceptable, por el criterio de aceleración no lo es, así que como no cumple con los dos criterios, se decide que no puede ser usado para actividades de aerobics.

Se podría optar por reforzar las vigas del sistema de piso para modificar la frecuencia del sistema y que pueda ser usado para dicha actividad, otra solución podría ser reducir la separación entre las vigas pudiendo colocar algún muro, sin embargo, esto reduciría el espacio para realizar la actividad requerida.

Bibliografía

American Institute of Steel Construction. (2016). Steel Design Guide 11 Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity. Estados Unidos de America: ---.

Montiel, A. L. (2007). Vibraciones en Sistemas de Piso Mediante los Criterios del AISC/CISC y del SCI. Mexico, DF.

Salazar Polanco, A. E., & Trujillo Figueredo, M. G. (n.d.). Evaluación de los Efectos de las Vibraciones en los Niveles de Servicio de Sistemas Estructurales de Acero sometidos a la Actividad Humana.

Valadez Ramirez, & Velez Hernandez. (n.d.). Miembros Compuestos Acero-Concreto. In Diseño de Estructuras de Acero.