

**PRÁCTICA EMPRESARIAL EN EL DESARROLLO DE UN INSTRUCTIVO PARA
EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ENTREPISOS DE ACERO POR LAS
VIBRACIONES DEBIDO A LAS ACTIVIDADES HUMANAS**

JUAN PABLO PERALTA HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

**PRÁCTICA EMPRESARIAL EN EL DESARROLLO DE UN INSTRUCTIVO PARA
EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ENTREPISOS DE ACERO POR LAS
VIBRACIONES DEBIDO A LAS ACTIVIDADES HUMANAS**

JUAN PABLO PERALTA HERNÁNDEZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director

**MIGUEL ANTONIO PERALTA HERNÁNDEZ
Ingeniero Civil Magíster UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A mi familia, con amor.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, la mujer que siempre confió en mí, sus consejos y su amor hacia mí, me impulsaron a alcanzar esta meta. A mi padre por la educación formal que me ofreció y por inculcarme lo importante que es estudiar y salir adelante. A mi director de este proyecto Miguel Peralta por dirigirme y compartir su conocimiento conmigo, aparte por ser mi segundo padre, mi hermano, mi amigo, una persona que admiro mucho y respeto por sus sabios consejos y todo lo que me ha enseñado para crecer como persona y profesional. A mis hermanos por apoyarme y estar conmigo en momentos malos y buenos durante mi formación académica. A mis profesores por el conocimiento que me compartieron y los consejos que me ofrecieron. A la Universidad Industrial de Santander por abrirme sus puertas para vivir una experiencia que siempre recordaré y lo más esencial que fue formarme como Ingeniero Civil. Y a todas las personas que me acompañaron en este camino.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA PERALTA INGENIERÍA S.A.S.....	14
2. METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL	15
2.1 INDUCCIÓN.....	15
2.2 CONSULTA MATERIAL BIBLIOGRÁFICO.....	15
2.3 DESARROLLO DE GUÍAS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO.....	16
3. CRITERIO DE DISEÑO APLICADO A LOS DOS PROYECTOS DESARROLLADOS POR LA EMPRESA, TOMADOS COMO CASO DE ESTUDIO.	17
4. INSTRUCTIVO PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ENTREPISOS DE ACERO POR LAS VIBRACIONES DEBIDO A LAS ACTIVIDADES HUMANAS	21
4.1 OBJETIVOS DEL INSTRUCTIVO	21
4.2 DISEÑO PARA EXCITACIÓN POR CAMINANTES.....	21
4.2.1 Criterio recomendado.....	21
4.2.2 Estimación de los parámetros requeridos.....	23
4.2.3 Peso efectivo del panel de viga o vigueta, W	24
4.2.4 Ancho efectivo del panel de vigueta.....	24
4.2.5 Ancho efectivo del panel de viga.....	26
4.2.6 Peso efectivo del modo combinado	27
4.2.7 Amortiguamiento	28
4.2.8 Procedimiento para evaluar los pisos típicos de construcción por las vibraciones de caminar.....	28
4.2.9 Ejemplo de cálculo 1.....	30
4.2.10 Ejemplo de cálculo 2.....	32
4.3 DISEÑO PARA LA EXCITACIÓN RÍTMICA	39
4.3.1 Criterio recomendado.....	39
4.3.2 Estimación de los parámetros.....	41
4.3.3 Frecuencia Natural Fundamental, f_n	41
4.3.4 Límite de aceleración: a_0/g	42
4.3.5 Parámetros de carga rítmica: w_p, a_i y f	43
4.3.6 Peso Efectivo, w_t	43

4.3.7 Relación de amortiguación, β	45
4.3.8 Aplicación del Criterio.....	45
4.3.9 Ejemplo.....	46
5. APLICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DESARROLLADAS A PROYECTOS DISEÑADOS POR LA EMPRESA PERALTA INGENIERÍA S.A.S.....	48
5.1 ESTRUCTURA PARA USO DE OFICINAS	48
5.1.1 Descripción general de la estructura.....	48
5.1.2 Panel de diseño.....	49
5.1.3 Análisis de cargas	50
5.1.4 Propiedades geométricas y de materiales de los elementos.....	51
5.1.5 Cálculo de la frecuencia natural del sistema	52
5.1.6 Criterio de aceptación o rechazo	52
5.1.7 Análisis de la aceleración vertical del panel de diseño en el programa ETABS.....	53
5.2 PASARELA EXTERIOR.....	56
5.2.1 Descripción general de la estructura.....	56
5.2.2 Análisis de cargas	58
5.2.3 Cálculo de la frecuencia natural.....	60
5.2.4 Criterio de aceptación o rechazo	60
6 CONCLUSIONES.....	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
BILIOGRAFÍA	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIG. 1 CARGA DINÁMICA DE UNA PERSONA CAMINANDO.	17
FIG. 2 GRÁFICA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DINÁMICO	19
FIG. 3 MODELO MATEMÁTICO	19
FIG. 4 ANCHO EFECTIVO DEL PANEL DE VIGUETA	24
FIG. 5 SISTEMA DE PLACA CON TABLERO METÁLICO	25
FIG. 6 ANCHO EFECTIVO DEL PANEL DE VIGA	26
FIG. 7 EJEMPLO CONEXIÓN A CORTANTE	27
FIG. 8 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PASARELA	30
FIG. 9 PLANTA ESTRUCTURAL DEL PANEL INTERIOR Y SU SECCIÓN.	33
FIG. 10 PLANTA ESTRUCTURAL CON EL ÁREA DE BAILE	46
FIG. 11 ETAPA FINAL DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA	49
FIG. 12 PLANTA ESTRUCTURAL DEL PISO 2.	50
FIG. 13 MODELO DE LA EDIFICACIÓN.	53
FIG. 14 PLANTA DEL SEGUNDO PISO DE LA ESTRUCTURA.	54
FIG. 15 DEFORMACIÓN A LO LARGO DEL RECORRIDO.	55
FIG. 16 VARIACIÓN DE LA ACELERACIÓN DE UN PUNTO EN EL TIEMPO DURANTE EL RECORRIDO	56
FIG. 17 ETAPA DE CONSTRUCCIÓN DE LA PASARELA PEATONAL	57
FIG. 18 UBICACIÓN DEL SITIO DONDE SE ENCUENTRA LA PASARELA PEATONAL.	57
FIG. 19 VISTA GENERAL PASARELA CATTLEYA.	58
FIG. 20 VISTA GENERAL PASARELA CATTLEYA	58
FIG. 21 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PASARELA.	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1 VALORES RECOMENDADOS PARA LOS PARÁMETROS P_o , β y a_{og}	22
TABLA 2 LÍMITES DE ACELERACIÓN RECOMENDADOS PARA VIBRACIONES DEBIDAS A ACTIVIDADES RÍTMICAS (NBC 1990).	40
TABLA 3 CARGA ESTIMADA DURANTE EVENTOS RÍTMICOS	41
TABLA 4 APLICACIÓN DEL CRITERIO DE DISEÑO, ECUACIÓN 13, PARA EVENTOS RÍTMICOS	44
TABLA 5 CARGA VIVA EN LA PLACA DE ENTREPISO	51
TABLA 6. PROPIEDADES DE LA PLACA DE ENTREPISO	51
TABLA 7. PROPIEDADES DE LA VIGA DEL PANEL DE DISEÑO.	51
TABLA 8 PROPIEDADES DE LAS VIGUETAS DEL PANEL DE DISEÑO.	52
TABLA 9. DATOS DEL CAMINANTE	53
TABLA 10. CARGA MUERTA	59
TABLA 11. CARGA VIVA	59

RESUMEN

TÍTULO: PRÁCTICA EMPRESARIAL EN EL DESARROLLO DE UN INSTRUCTIVO PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ENTREPISOS DE ACERO POR LAS VIBRACIONES DEBIDO A LAS ACTIVIDADES HUMANAS*

AUTOR: JUAN PABLO PERALTA HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVE: CARGAS DINÁMICAS, VIBRACIONES, FRECUENCIA NATURAL, RESONANCIA, AMORTIGUACIÓN.

DESCRIPCIÓN:

En el diseño estructural de edificaciones en acero, resulta de gran importancia evaluar las vibraciones que se producen debido a las actividades humanas porque este fenómeno puede provocar molestias en los ocupantes y daños posteriores que demandan sobrecostos debido a los reforzamientos requeridos.

La presente contribución académica comenta las actividades desarrolladas durante la práctica empresarial realizada en la empresa de Consultoría y Construcción PERALTA INGENIERÍA S.A.S, en convenio con la Universidad Industrial de Santander. En consecuencia, los resultados obtenidos se encuentran consignados en un documento que contiene procedimientos de análisis y diseño de entrepisos en acero, bajo las vibraciones que se producen debido a las actividades humanas, siguiendo los alineamientos de la guía 11 del American Institute of Steel Construction (AISC); asimismo está complementado con hojas de cálculo elaboradas en formato Excel para evaluar pasarelas exteriores e interiores, sistemas de entrepisos en acero sometidos a excitación por caminantes y excitación rítmica como es el caso de los aeróbicos. También se muestra la aplicación de las herramientas desarrolladas en virtud de dos proyectos diseñados por el equipo de Ingeniería de la empresa: el primero a una estructura de dos niveles para uso de oficinas y el segundo a una pasarela peatonal exterior.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Miguel Antonio Peralta Hernández, Ingeniero Civil, MSc.

ABSTRACT

TITLE: PRÁCTICA EMPRESARIAL EN EL DESARROLLO DE UN INSTRUCTIVO PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ENTREPISOS DE ACERO POR LAS VIBRACIONES DEBIDO A LAS ACTIVIDADES HUMANAS*

AUTHOR: JUAN PABLO PERALTA HERNÁNDEZ**

KEYWORDS: DYNAMIC LOADS, VIBRATIONS, NATURAL FREQUENCY, RESONANCE, DAMPING.

DESCRIPTION:

In the structural design of steel buildings, the results of great importance appreciate the vibrations that occur due to human activities because this phenomenon can cause discomfort in the occupants and damages that demand costs because of the required reinforcements.

The present academic contribution discusses the activities developed during the internship carried out at the Consulting and Construction Company PERALTA INGENIERÍA S.A.S, in agreement with the Industrial University of Santander's requirements for graduation. The document contains procedures for the analysis and design of steel mezzanines subjected to vibrations that occur due to human activities based on the guide 11 of the American Institute of Steel Construction (AISC). This manuscript includes calculations in spreadsheets elaborated in Excel format that evaluate exterior and interior walkways, steel mezzanine systems subject to walker excitation and rhythmic excitement such as aerobics. Finally, this work applies the tools developed under two projects designed by the company's engineering team: the first is a two-tier structure for office use and the second is an outside pedestrian walkway.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physic - Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: Miguel Antonio Peralta Hernández, Civil Engineer, MSc.

INTRODUCCIÓN

La escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander cuenta con la modalidad de práctica empresarial como requisito de grado. Este ejercicio le permite al estudiante ingresar al ámbito laboral y aplicar los fundamentos teóricos y prácticos aprendidos durante la formación académica, para la solución de problemas de Ingeniería, Así mismo, el estudiante adquiere experiencias y competencias que le ayudarán a adaptarse de manera más sencilla a nuevas reglas y condiciones de trabajo.

La empresa PERALTA INGENIERÍA S.A.S tiene un convenio con la Universidad Industrial de Santander, para que los estudiantes puedan desarrollar diversas actividades que contribuyan al crecimiento y las mejoras de la compañía como modalidad de trabajo de grado.

Durante el periodo de realización de la práctica se escribió un documento que contiene procedimientos para el análisis y diseño de entrepisos en acero bajo las vibraciones que se producen debido a las actividades humanas, con base en la guía 11 del American Institute of Steel Construction (AISC). Con el objeto de complementar este documento se desarrollaron hojas de cálculo en Excel para evaluar sistemas estructurales que soportan pasarelas, residencias, centros comerciales y oficinas.

También se consultó el Reglamento Colombiano para Construcción Sismo Resistente (NSR-10), material disponible en los archivos de la empresa y la asistencia a un congreso realizado en la Ciudad de Bogotá y organizado por el Instituto Colombiano para la Construcción en Acero (ICCA), donde se trataron temas esenciales relativos a la idea central de este proyecto.

1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA PERALTA INGENIERÍA S.A.S

Es una empresa constituida hace más de 6 años en Santander con el objeto de Construir estructuras de concreto y acero, y a la consultoría de proyectos de obras Civiles. Es una organización que integra la experiencia del recurso humano, el amplio conocimiento técnico en las áreas de desempeño y las herramientas de carácter tecnológico que permiten brindar un valor agregado a los clientes y ofrecerles la confianza y seguridad en todos los proyectos que se ejecutan. La compañía se ha fortalecido en el área de diseño de estructuras en acero para proporcionar alternativas viables de construcción y así mismo impulsar el desarrollo de la región.

2. METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL

2.1 INDUCCIÓN

Conforme a las políticas de la empresa, el personal que ingresa debe recibir una capacitación básica para lograr una integración rápida y efectiva con la misma. Esta capacitación consiste en dar a conocer la estructura general de la empresa referente a la misión, visión y los objetivos propuestos. También suministrar información general de la empresa que se considere relevante para el desarrollo de la práctica, la razón social y los sectores que atiende; su contribución en la sociedad y proyectos que están en etapa de desarrollo. Con respecto al reglamento interno se establece el régimen disciplinario, horario de trabajo, tiempos de alimentación, prestaciones y beneficios, días de descanso, etc. Y por último la seguridad interna, dotación general, ubicación de baños, salida de emergencia, asignación de puesto de trabajo e implementos básicos de oficina entre otros.

2.2 CONSULTA MATERIAL BIBLIOGRÁFICO

En primer lugar, se recopiló y organizó el material existente desarrollado por el equipo de ingeniería de la empresa para revisar y trabajar con los mismos formatos y especificaciones. De igual manera, se realizó una consulta de toda la información adicional con que cuenta la empresa relativa y pertinente para el desarrollo de la presente práctica empresarial.

En segundo lugar, se consultaron artículos científicos relacionados con el tema trabajado en este proyecto; este material se encontró en los recursos electrónicos disponibles en la plataforma virtual de la biblioteca UIS.

Adicionalmente, se hicieron las consultas pertinentes en libros de la empresa, internet, revistas, entre otros. Por último, se realizó la traducción de textos especializados que fueron fundamentales para la documentación y desarrollo de las herramientas de análisis y diseño, especialmente la guía 11 del American Institute of Steel Construction (AISC).

2.3 DESARROLLO DE GUÍAS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO

Los procedimientos de análisis y diseño se encuentran consignados en un documento elaborado en Word, junto con un libro en formato Excel. Este libro contiene una hoja de cálculo para evaluar las vibraciones en pasarelas interiores y exteriores, en la cual se ingresa como datos de entrada la longitud entre apoyos de las vigas principales, las cargas muertas y vivas recomendadas en el título B de la NSR-10. Esta hoja además cuenta con una base de datos con información de todas las propiedades de los perfiles laminados más comerciales en el campo de la Construcción con acero en Colombia, y las propiedades del sistema de placa.

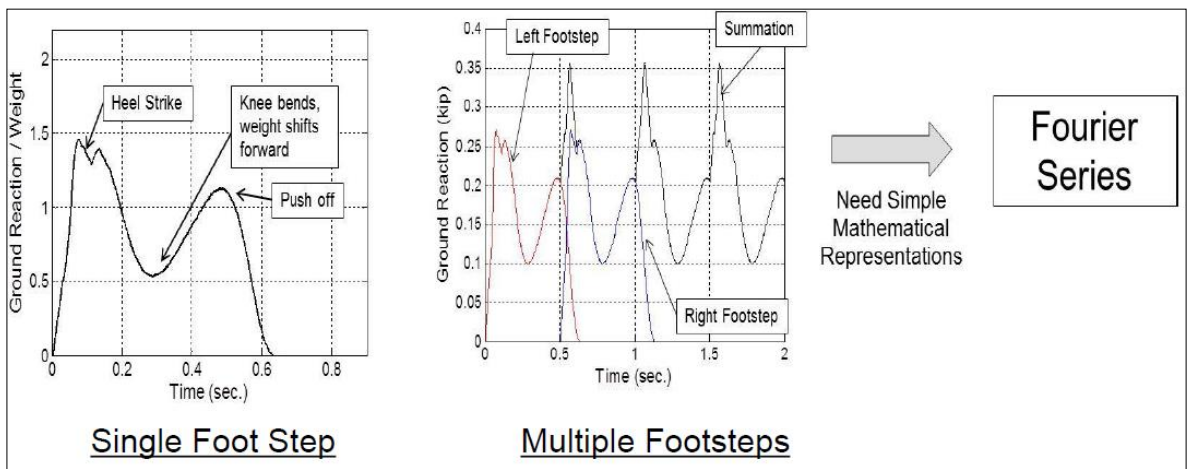
Así mismo, se desarrolló una hoja de cálculo para evaluar las vibraciones por excitación de caminantes en sistemas de entrepiso para uso de residencias, oficinas y centros comerciales. Los datos de entrada que se ingresan son: la longitud entre apoyos de las vigas que conforman el panel de diseño, la longitud y la separación de las viguetas, las cargas muertas y vivas recomendadas en el título B de la NSR-10 y las propiedades del sistema de placa.

Y por último se desarrolló una hoja de cálculo con el objetivo de evaluar las vibraciones que se producen bajo excitación rítmica como es el caso en salones de baile, aeróbicos, escenarios deportivos entre otros, que tienen un sistema de entrepiso en acero. Los datos que se ingresan son los mismos que en la hoja de cálculo para evaluar las vibraciones por excitación de caminantes, excepto que en esta hoja se ingresa la longitud sin arriostramiento de las columnas por encima del panel de diseño.

3. CRITERIO DE DISEÑO APLICADO A LOS DOS PROYECTOS DESARROLLADOS POR LA EMPRESA, TOMADOS COMO CASO DE ESTUDIO.

Cuando una persona camina, le induce una carga muy compleja al piso y como consecuencia la respuesta del mismo es complicada. En la gráfica de la parte izquierda de la fig.1 se muestra la respuesta del piso en el tiempo, cuando una persona da un paso. En el primer pico se puede observar cuando el talón del pie de la persona entra en contacto con el suelo, posteriormente en el valle la persona flexiona la rodilla y por último en el segundo pico el caminante empuja el pie para avanzar.

Fig. 1 Carga dinámica de una persona caminando.



Fuente. Memorias congreso ICCA/2017. Conferencista: Thomas Murray.

En la gráfica de la parte derecha de la fig. 1 vemos la reacción del piso cuando una persona camina dos pasos, junto con la suma de éstas dos funciones. Para representar esto con un modelo matemático acudimos a las series de Fourier.

La serie especializada de Fourier es la siguiente:

$$F(t) = \sum_{i=1}^4 Q * \alpha_i * \sin(2 * \pi * i * f_{\text{step}} * t) \quad (1)$$

Donde:

$F(t)$ = Carga de excitación del sistema con respecto al tiempo.

Q = Peso típico de una persona (157 lbs o 0.7 kN).

α_i = Coeficiente dinámico.

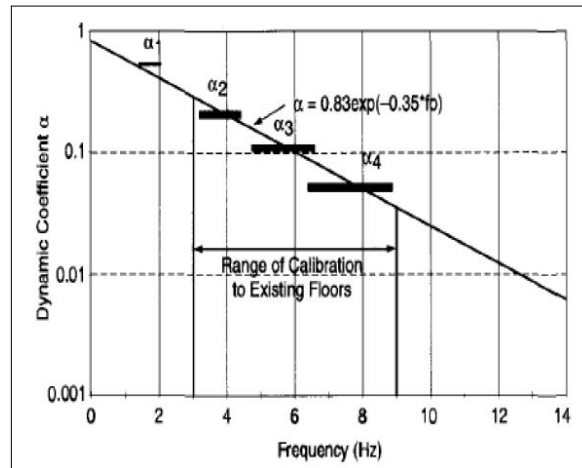
i = Número armónico

f_{step} = Frecuencia de paso.

t = Tiempo.

En la fig. 2 se muestra la expresión para determinar el coeficiente dinámico en función de la frecuencia natural comprendida entre 3 Hz y 9 Hz para los primeros 4 armónicos de marcha. En este rango deben encontrarse los sistemas de piso porque una frecuencia menor que 3 Hz puede provocar resonancia con el primer armónico de marcha y mayor que 9 Hz no se presenta una posible resonancia pero los ocupantes pueden sentir molestias y por tanto se debe aplicar un criterio de rigidez mínima.

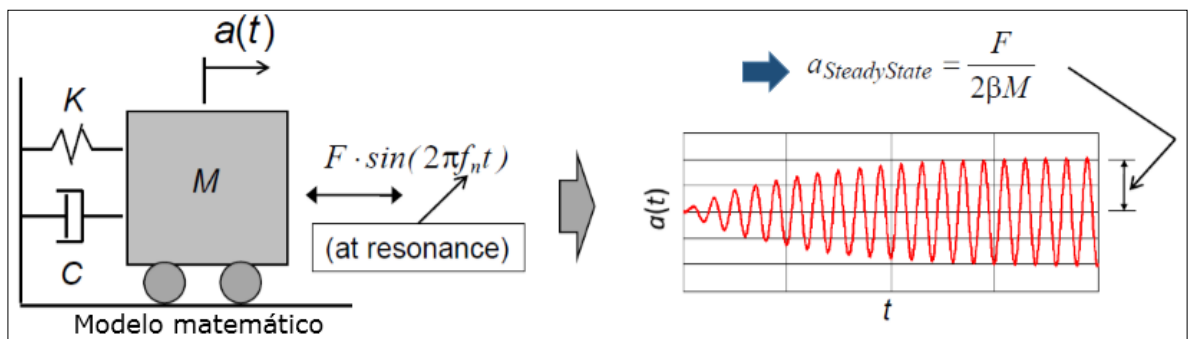
Fig. 2 Gráfica para determinar el coeficiente dinámico



Fuente. Memorias congreso ICCA/2017. Conferencista: Thomas Murray.

Cuando una persona excita el sistema caminando se producen múltiples modos de vibración entre los más importantes el vertical, longitudinal y transversal, pero el más significativo es el vertical porque tiene mayor magnitud. Para simplificar el análisis, la guía 11 del AISC sugiere el modelo matemático para un grado de libertad que se muestra en la fig 3.

Fig. 3 Modelo matemático



Fuente. Memorias congreso ICCA/2017. Conferencista: Thomas Murray.

Cuando se presenta la aceleración máxima el sistema entra en resonancia, es decir, que la frecuencia de excitación es igual a la frecuencia natural del sistema. Por consiguiente el número armónico en la ecuación 1 es igual a 1 porque la frecuencia

para este armónico de marcha se encuentra comprendida entre 1.6 Hz y 2.2 Hz, y como la frecuencia de paso de una persona oscila entre 1.9 Hz y 2.0 Hz aquí se puede presentar resonancia. Haciendo equilibrio de fuerzas llegamos a una ecuación diferencial de segundo orden:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P_0 \sin \omega t \quad (2)$$

Resolviendo esta ecuación para la condición de resonancia llegamos a la ecuación 3.

$$a_p = \frac{F}{2\beta M} \quad (3)$$

Donde:

β = Amortiguación modal del sistema.

M = Masa del piso.

F = Fuerza armónica que excita el sistema.

La fuerza armónica debe multiplicarse por un factor de 0.5 para pisos y 0.7 para pasarelas, debido a que en muchos casos el receptor no se encuentra en el mismo lugar que la fuente o caminante, asimismo para la masa del piso.

Finalmente llegamos al criterio de tolerancia que se basa en la respuesta dinámica de un sistema de piso en acero. Este criterio es posible aplicarlo para evaluar sistemas que soportan pasarelas, residencias, oficinas y centros comerciales.

El criterio establece que el sistema de entepiso es satisfactorio si la aceleración máxima a_p como porcentaje de la gravedad, calculada con la ecuación 4, no excede el límite de aceleración a_0/g recomendado en la escala International Standards Organization (ISO), para el confort humano por vibraciones debido a las actividades humanas. [1]

4. INSTRUCTIVO PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE ENTREPISOS DE ACERO POR LAS VIBRACIONES DEBIDO A LAS ACTIVIDADES HUMANAS

4.1 OBJETIVOS DEL INSTRUCTIVO

El objetivo principal de este instructivo es proporcionar procedimientos para evaluar las vibraciones que se producen durante las actividades humanas en puentes peatonales, pasarelas interiores, residencias, oficinas, centros comerciales y estructuras similares. Este documento busca evitar molestias en los ocupantes y prevenir daños posteriores que demandan reforzamientos y como consecuencia sobrecostos.

4.2 DISEÑO PARA EXCITACIÓN POR CAMINANTES

4.2.1 Criterio recomendado. El criterio recomendado se basa en la respuesta dinámica del piso cuando una persona camina sobre el mismo [1]. El criterio establece que el sistema de piso es satisfactorio si la aceleración máxima a_p , debido a la excitación por caminar, como un porcentaje de la aceleración de la gravedad, g , determinada a partir de

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 e^{(-0.35f_n)}}{\beta W} \quad (4)$$

No exceda el límite de aceleración $\frac{a_o}{g}$, para la ocupación adecuada. De la ecuación 4 tenemos:

P_0 = Una fuerza constante que provoca la excitación.

f_n = La frecuencia fundamental de un panel de viga o vigueta, o un panel combinado, según corresponda.

β = Amortiguación modal.

W = Peso efectivo soportado por el panel de viga o vigueta, o panel combinado, según corresponda.

Los parámetros P_o , β , $\frac{a_o}{g}$ de la ecuación 1, para diferentes ocupaciones se dan en la Tabla 1.

Tabla 1 Valores recomendados para los parámetros P_o , β y $\frac{a_o}{g}$

OCUPACIÓN	P_o [kN]	β	$\frac{a_o}{g}$ [%]
Iglesia	0.29	0.02	0.5
Residencia	0.29	0.05	0.5
Oficina con particiones pequeñas	0.29	0.03	0.5
Oficina con particiones de Altura completa	0.29	0.05	0.5
Centro comercial	0.29	0.02	1.5
Pasarela interior	0.41	0.01	1.5
Pasarela exterior	0.41	0.01	5

Fuente. Modificado de la guía 11 del AISC.

Si la frecuencia natural de un piso es superior a 9-10 Hz, no se produce una resonancia significativa con los armónicos de marcha, pero la vibración de marcha puede ser aún molesta. Por tanto, se requiere una rigidez mínima del piso para una carga concentrada de 1 KN por mm para oficinas y residencias. Para garantizar un rendimiento satisfactorio de los pisos de oficinas o residenciales con frecuencias superiores a 9-10 Hz, este criterio de rigidez debe utilizarse además del criterio de excitación de marcha. Los sistemas de piso con frecuencias fundamentales inferiores a 3 Hz deben ser generalmente evitados, ya que son susceptibles de ser sometidos a resonancia. [1]

La siguiente sección, basada en Allen y Murray (1993), proporciona una guía para

estimar las propiedades de piso requeridas para la aplicación del criterio recomendado. [1]

4.2.2 Estimación de los parámetros requeridos. Los parámetros de la ecuación 1 se obtienen o se estiman a partir de la tabla 1 ($P_o, \beta, y a_o/g$) y la frecuencia natural (f_n) se calcula utilizando la ecuación 2.

$$f_n = \frac{\pi}{2} \left[\frac{gE_s I_t}{wL^4} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Donde:

f_n = Frecuencia natural fundamental del elemento (Hz).

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

E_s = Módulo de elasticidad del acero.

I_t = Momento de inercia transformado.

w = Peso uniformemente distribuido por unidad de longitud, correspondiente a: peso propio + cargas vivas y muertas super impuestas.

L = Longitud entre apoyos del elemento.

Para un sistema de piso, se calcula la frecuencia natural fundamental f_n y el peso efectivo del panel W , para un modo crítico, considerando primero los modos de "viga o vigueta" y "panel de viga" por separado y luego combinándolos con la ecuación 6 podemos calcular la frecuencia natural para el modo combinado.

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} \quad (6)$$

Donde:

Δ_j = Deflexión máxima de la vigueta.

Δ_g = Deflexión máxima de la viga.

4.2.3 Peso efectivo del panel de viga o vigueta, W . El peso efectivo del panel de viga o vigueta, o modo combinado se calcula con la ecuación 7.

$$W = wBL \quad (7)$$

Donde:

w = Peso soportado por unidad de área del elemento.

L = Longitud entre apoyos del elemento

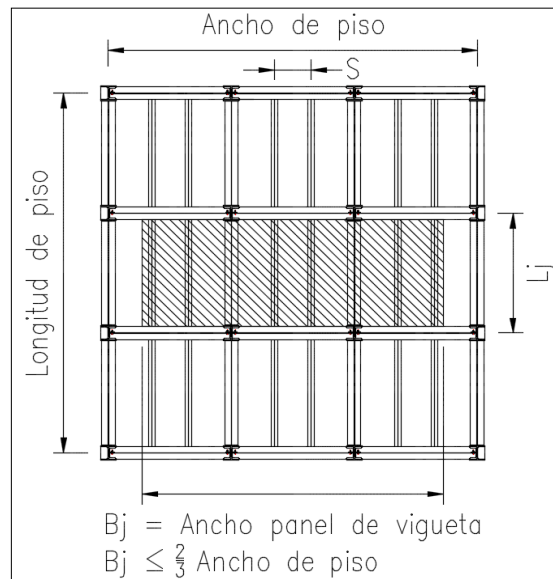
B = Ancho efectivo.

4.2.4 Ancho efectivo del panel de vigueta. En la ecuación 8 se muestra la expresión para calcular el ancho del panel de vigueta.

$$4.2.5 \quad B_j = C_j \left(\frac{D_s}{D_j} \right)^{1/4} L_j \quad (8)$$

Pero no mayor que $2/3$ del ancho del piso como se muestra en la fig. 4

Fig. 4 Ancho efectivo del panel de vigueta



$C_j = 2.0$ para viguetas en paneles interiores y 1.0 para viguetas en paneles de

borde.

D_s = Momento de inercia de la losa transformada por unidad de ancho

$$D_s = \frac{d_e^3}{12n} \text{ mm}^3 \quad (9)$$

d_e = Profundidad efectiva de la losa de concreto, usualmente la profundidad del concreto sobre la lámina colaborante más la mitad de la altura de la lámina (ver fig. 5)

Fig. 5 Sistema de placa con tablero metálico



Fuente. PERALTA INGENIERÍA S.A.S.

De las ecuaciones 8 y 9 tenemos:

Relación modular $n = E_s/1.35E_c$

E_s = Módulo de elasticidad del acero

E_c = Módulo de elasticidad del concreto

Momento de inercia transformado de la vigueta por unidad de ancho $D_j = \frac{I_t}{S} \text{ (mm}^3\text{)}$

I_t = Momento de inercia transformado de la vigueta

S = Separación de viguetas

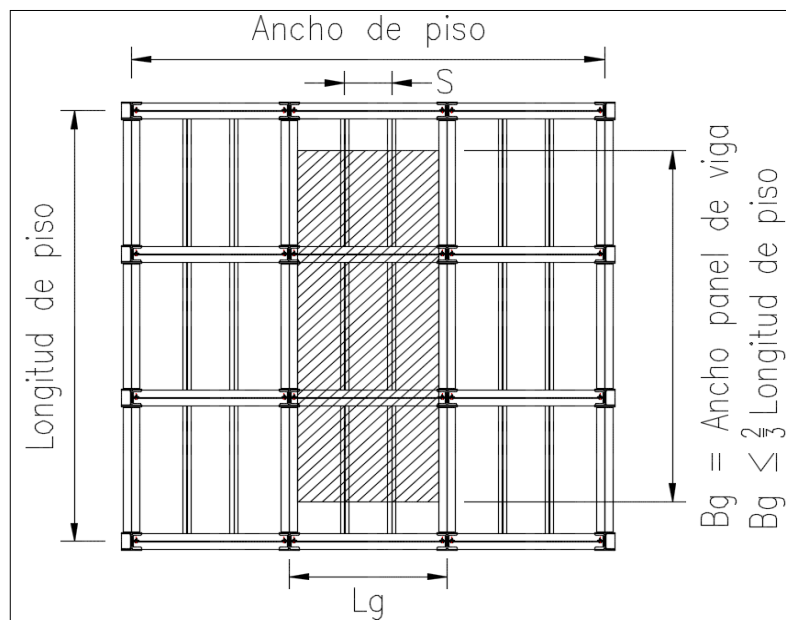
L_j = Longitud entre apoyos de la vigueta

4.2.5 Ancho efectivo del panel de viga. En la ecuación 10 se muestra la expresión para calcular el ancho del panel de viga.

$$B_g = C_g \left(\frac{D_l}{D_g} \right)^{1/4} L_g \quad (10)$$

Pero no mayor que $2/3$ de la longitud del piso como se muestra en la fig. 6.

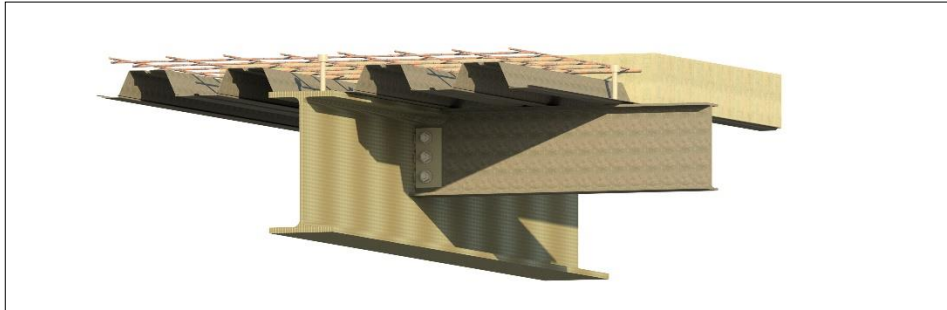
Fig. 6 Ancho efectivo del panel de viga



Donde:

$C_g = 1.6$ para vigas que soportan viguetas conectadas a momento y 1.8 para vigas que soportan viguetas conectadas a cortante como en la fig. 7.

Fig. 7 Ejemplo conexión a cortante



Fuente. PERALTA INGENIERÍA S.A.S

Momento de inercia transformado por unidad de ancho de la viga

$$D_g = \frac{I_g}{L_j} \text{ Para todas las vigas excepto las de borde.}$$

$$D_g = 2 \frac{I_g}{L_j} \text{ Para vigas de borde.}$$

L_g = Longitud entre apoyos de la viga.

4.2.6 Peso efectivo del modo combinado. Para el modo combinado, el peso equivalente del panel se aproxima usando la ecuación 11.

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} W_g \quad (11)$$

Donde:

Δ_j y Δ_g = Deflexiones máximas de la vigueta y viga, respectivamente, debido al peso soportado por el elemento.

W_j y W_g = Peso efectivo del panel de vigueta y panel de viga, respectivamente.

Si la longitud de la viga entre apoyos es menor que el ancho del panel de la vigueta, el modo combinado está restringido y el sistema se rigidiza eficazmente.

Esto se puede explicar reduciendo la deflexión, usada en la ecuación 11 a

$$\Delta'_g = \frac{L_g}{B_j} (\Delta_g) \quad (12)$$

Donde $\frac{L_g}{B_j}$ se toma entre el siguiente intervalo $0.5 \leq \frac{L_g}{B_j} \leq 1.0$

4.2.7 Amortiguamiento. El amortiguamiento asociado con los sistemas de piso depende principalmente de componentes no estructurales, mobiliarios y ocupantes. En la Tabla 1 se recomiendan valores de amortiguación modal que están comprendidos entre 0,01 y 0,05. El valor 0.01 es adecuado para pasarelas o pisos que no poseen elementos no estructurales o mobiliarios y pocos ocupantes. El valor 0,02 es adecuado para pisos con muy pocos componentes no estructurales o muebles, tales como pisos de centros comerciales, áreas de trabajo abiertas o iglesias. El valor 0.03 es apropiado para pisos con componentes no estructurales y mobiliarios, pero con sólo pequeñas divisiones desmontables, típicas de muchas áreas de oficina modulares. El valor 0.05 es adecuado para oficinas y residencias con particiones de altura completa entre pisos. [1]

4.2.8 Procedimiento para evaluar los pisos típicos de construcción por las vibraciones de caminar. En el siguiente instructivo se presenta la secuencia de cálculo que se debe seguir para evaluar un sistema de piso excitado cuando una persona camina.

PASO 1. Sistema de placa de piso

Determinar d_e = profundidad efectiva

Calcular $D_s = d_e^3 / 12n$

PASO 2. Modo panel de vigueta

Calcular I_j

Calcular w_j y $\Delta_j = \frac{5w_j L_j^4}{384E_s I_j}$

Calcular $f_j = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j}}$ y $D_j = \frac{I_j}{S}$

Calcular $B_j \approx C_j \left(\frac{D_s}{D_j}\right)^{\frac{1}{4}} L_j \leq \frac{2}{3} * \text{ancho del piso}$

$C_j = 2.0$ Para viguetas en paneles interiores; 1.0 para vigueta en paneles de borde

Calcular $W_j = w_j B_j L_j$ (x 1.5 si continua en los paneles adyacentes)

PASO 3. Modo panel de viga

Calcular I_g

$$\text{Calcular } w_g \text{ y } \Delta_g = \frac{5w_g L_g^4}{384E_s I_g}$$

$$\text{Calcular } f_g = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_g}} \text{ y } D_g = \frac{I_g}{L_j}$$

Utilice para L_j el promedio de longitudes de viguetas soportadas, si se tienen diferentes longitudes de las mismas.

$$\text{Calcular } B_g = C_g \left(\frac{D_j}{D_g}\right)^{1/4} L_j \leq \frac{2}{3} * \text{la longitud del piso}$$

$C_g = 1.6$ para vigas que soportan viguetas conectadas a momento y 1.8 para vigas que soportan viguetas conectadas a cortante.

Calcular $W_g = w_g B_g L_g$ (x 1.5 si continúa en los paneles adyacentes).

PASO 5. Modo panel combinado

Si $B_j > L_g$, reducir Δ_g por $\frac{L_g}{B_j} \geq 0.5$

$$\text{Calcular } f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{(\Delta_j + \Delta_g)}}$$

$$\text{Calcular } W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} W_g$$

Escoger β de la tabla 1 (0.02, 0.03, 0.05)

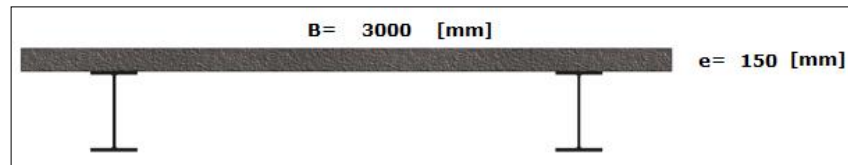
Calcular $\frac{a_p}{g} = \frac{P_o \exp(-0.35f_n)}{\beta W}$ donde $P_o \approx 0.29 \text{ kN (65 lb)}$ para sistemas de pisos.

Comparar con $\frac{a_o}{g}$ de la tabla 1 (0.5%, 1.5%)

PASO 6. Rediseñar si es necesario.

4.2.9 Ejemplo de cálculo 1. Se tiene una pasarela exterior de 12 m con soportes fijos y la sección mostrada en la figura 3. Evaluar las vibraciones que se genera a pie y determinar si el sistema es satisfactorio.

Fig. 8 Sección transversal de la pasarela



Propiedades de la placa

$$\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$f'c = 30 \text{ MPa}$$

$$E_c = 24000 \text{ MPa}$$

Cargas = 3.6 kPa (viva + muerta (super impuesta + peso propio))

Propiedades de las vigas

W530x66

$$A = 8370 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 350 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$d = 525 \text{ mm}$$

Debido a que la pasarela no está soportada por viguetas, solo se debe analizar el modo viga o panel de viga.

MOMENTO DE INERCIA TRANSFORMADO DE LAS VIGAS

Dado que $0.4L_j = 0.4 \times 12 \text{ m} = 4.8 \text{ m}$ es superior a 1.5 m, el ancho total de la placa es efectivo, es decir 3.0 m. Utilizando un módulo dinámico de elasticidad de $1.35E_c$ para el concreto, el momento de inercia transformado es calculado como sigue:

$$n = \text{relación modular} = \frac{E_s}{1.35E_c} = \frac{200000}{1.35 * 24000} = 6.17$$

$$\bar{y} = \frac{2 * 8370 * \frac{525}{2} - \frac{3000}{6.17} * 150 * \frac{150}{2}}{2 * 8370 + \frac{3000}{6.17} * 150} = -12$$

$\bar{y} = 12$ mm Por encima de la aleta superior de la viga.

$$I_g = 2 \left[350 * 10^6 + 8370 * \left(\frac{525}{2} + 12 \right)^2 \right] + \left[\frac{3000(150)^3}{12} + \frac{3000}{6.17} * 150 * \left(\frac{150}{2} - 12 \right)^2 \right]$$

$$I_g = 2388 * 10^6 \text{ mm}^4$$

PESO POR METRO LINEAL DE VIGA

$$w_g = 3.6 * 3 + 2 * 66 * 0.00981 = 12.1 \text{ kN/m}$$

DEFLEXIÓN MÁXIMA DE LAS VIGAS

$$\Delta_j = \frac{5w_g L_g^4}{384E_s I_g} = \frac{5 * 12.1 * 12000^4}{384 * 200000 * 2388 * 10^6} = 6.84 \text{ mm}$$

FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL MODO DE VIGA

$$f_g = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_g}} = 0.18 \sqrt{\frac{9.81 * 1000}{6.84}} = 6.81 \text{ Hz}$$

PESO DEL PANEL DE VIGA

$$W_g = w_g L_g = 12.1 * 12 = 145 \text{ kN}$$

EVALUACIÓN

De la Tabla 1, $\beta = 0.01$ para pasarelas exteriores, y

$$\beta W_g = 0.01 * 145 = 1.45 \text{ kN}$$

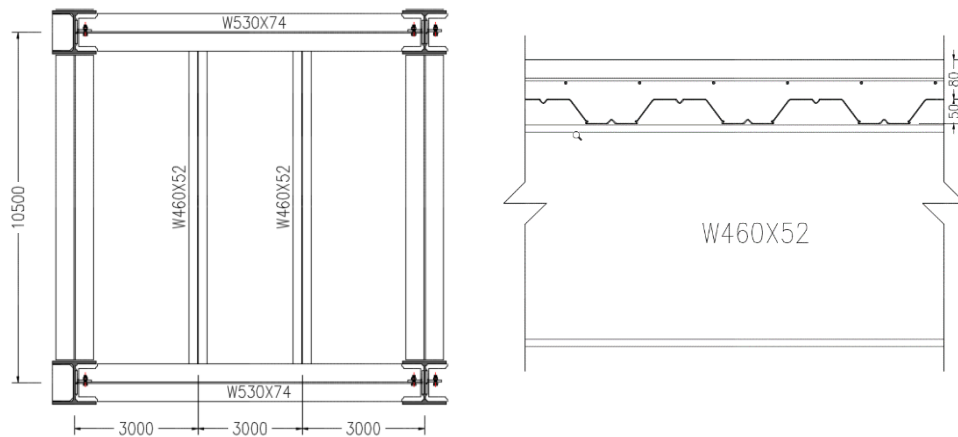
Para la ecuación 1, con $f_n = f_g = 6.81 \text{ Hz}$ y $P_o = 0.41 \text{ kN}$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o \exp(-0.35f_n)}{\beta W} = \frac{0.41 \exp(-0.35 * 6.81)}{1.45}$$
$$\frac{a_p}{g} = 0.026$$

Equivalente al 2.6% de la gravedad, que es menor que el límite de aceleración $\frac{a_o}{g}$ de 5 por ciento para pasarelas exteriores (Tabla 1). Por lo tanto, la pasarela es satisfactoria. Además, la frecuencia f_n 6.81 Hz es mayor que 3 Hz y por tanto se no ocurre resonancia en el primer armónico de marcha. Dado que la frecuencia fundamental del sistema es inferior a 9 Hz, no se aplica el requisito de rigidez mínima de 1 kN por mm. Si la misma pasarela se encontraba en el interior, por ejemplo, en un centro comercial, no sería satisfactoria, ya que el límite de aceleración para esta situación es de 1,5 por ciento g. [1]

4.2.10 Ejemplo de cálculo 2. Determine si el panel interior típico mostrado en la Fig. 8 satisface el criterio para la vibración de caminar. El sistema estructural es para uso de oficinas sin particiones de altura completa. Utilice 0,5 kPa para carga viva y 0,2 kPa para carga muerta.

Fig. 9 Planta estructural del panel interior y su sección.



Propiedades de la placa

$$\gamma = 1850 \text{ kg/m}^3$$

$$f'c = 30 \text{ MPa}$$

$$E_c = 16000 \text{ MPa}$$

$$\text{Espesor de la placa} = 80 \text{ mm} + 50 \text{ mm nervio} = 130 \text{ mm}$$

$$\text{Losa} + \text{ peso del piso} = 2 \text{ kPa}$$

Propiedades de las viguetas

W460x52

$$A = 6640 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 212 * 10^6 \text{ mm}^4$$

$$d = 450 \text{ mm}$$

Propiedades de las vigas

W530x74

$$A = 9490 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 410 * 10^6$$

$$d = 529 \text{ mm}$$

MOMENTO DE INERCIA TRANSFORMADO DE LA VIGUETA

Con un ancho efectivo de la placa de concreto de $3 \text{ m} < 0.4L_j = 0.4 * 10.5 = 4.2 \text{ m}$, considerando solamente el concreto sobre la lámina colaborante y utilizando un módulo de elasticidad dinámico de concreto de $1,35E_c$ el momento de inercia transformado es:

$$n = \frac{E_s}{1.35E_c} = \frac{200000}{1.35 * 16000} = 9.26$$

$$\bar{y} = \frac{6640 \left(50 + \frac{450}{2}\right) - \left(\frac{3000}{9.26}\right)(80)\left(\frac{80}{2}\right)}{6640 + \left(\frac{3000}{9.26}\right)(80)} = 24.2 \text{ mm}$$

$$I_j = 212 * 10^6 + 6640 \left(50 + \frac{450}{2} - 24.2\right)^2 + \frac{\left(\frac{3000}{9.26}\right)(80)^3}{12} + \left(\frac{3000}{9.26}\right)(80) \left(24.2 + \frac{80}{2}\right)^2$$

$$I_j = 750 * 10^6 \text{ mm}^4$$

CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA EN LA VIGUETA

$$w_j = 3 \left(0.5 + 2 + 0.2 + 52 * \frac{0.00981}{3}\right) = 8.61 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

DEFLEXIÓN MÁXIMA DE LA VIGUETA

$$\Delta_j = \frac{5W_j L_j^4}{384E_s I_j} = \frac{5 * 8.61 * (10500)^4}{384 * 200000 * 750 \times 10^6} = \mathbf{9.08 \text{ mm}}$$

FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL MODO VIGUETA

$$f_j = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j}} = 0.18 \sqrt{\frac{9.81 * 1000}{9.08}} = \mathbf{5.91 \text{ Hz}}$$

MOMENTO DE INERCIA TRANSFORMADO POR UNIDAD DE ANCHO EN LA DIRECCIÓN DE LA LOSA

Usando un espesor medio de concreto de 105 mm, tenemos:

$$D_s = \frac{d_e^3}{12n} = \frac{105^3}{12 * 9.26} = 10420 \text{ mm}^3$$

MOMENTO DE INERCIA TRANSFORMADO POR UNIDAD DE ANCHO EN LA DIRECCIÓN DE LAS VIGUETAS

La separación de las viguetas es de 3 m, por consiguiente:

$$D_j = \frac{I_j}{S} = \frac{750 * 10^6}{3000} = \mathbf{250000 \text{ mm}^3}$$

ANCHO EFECTIVO DEL PANEL DE VIGUETAS

Con $C_j = 2,0$, tenemos:

$$B_j = C_j \left(\frac{D_s}{D_j} \right)^{1/4} L_j$$

$$B_j = 2.0 \left(\frac{10420}{250000} \right)^{\frac{1}{4}} (10.5) = \mathbf{9.49 \text{ m}}$$

Que debe ser menor que 2/3 del ancho del piso. Dado que se trata de un panel interior típico, el ancho real del piso es al menos tres veces la longitud de la viga, 3 x 9 = 27 m. Y, ya que 2/3 x 27 = 18 m > 9,49 m, el ancho efectivo del panel de viguetas es de 9,49 m. El peso del panel de vigas se calcula a partir de la Ecuación 7, ajustada por un factor de 1,5 para dar cuenta de la continuidad:

$$W_j = 1.5 \left(\frac{W_j}{S} \right) B_j L_j = 1.5 \left(\frac{8.61}{3} \right) (9.49 * 10.5) = \mathbf{429 \text{ kN}}$$

MOMENTO DE INERCIA TRANSFORMADO DE LA VIGA

Con un ancho efectivo de la placa de:

$$0.4L_g = 0.4 * 9 = 3.6 \text{ m} < L_j = \mathbf{10.5 \text{ m}}$$

Y considerando la mitad del concreto en las nervaduras de la lámina colaborante más el concreto por encima de ésta, el momento de inercia transformado se encuentra como sigue:

$$\text{Promedio profundidad de concreto} = 80 + \frac{50}{2} = \mathbf{105 \text{ mm}}$$

$$\bar{y} = \frac{9490 \left(25 + \frac{529}{2} \right) - \left(\frac{3600}{9.26} \right) (105) \left(\frac{105}{2} \right)}{9490 + \left(\frac{3600}{9.26} \right) (105)}$$

$$\bar{y} = \mathbf{12 \text{ mm}} \text{ debajo de la placa efectiva}$$

$$I_g = 410 * 10^6 + 9490 \left(25 + \frac{529}{2} - 12 \right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{9.26} \right) (105)^3}{12} \\ + \left(\frac{3600}{9.26} \right) (105) \left(12 + \frac{105}{2} \right)^2$$

$$I_g = \mathbf{1348 * 10^6 \text{ mm}^4}$$

CARGA UNIFORME EQUIVALENTE PARA LA VIGA

$$w_g = L_j \left(\frac{w_j}{S} \right) + \text{peso de la viga por unidad de longitud}$$

$$w_g = 10.5 \left(\frac{8.61}{3} \right) + 74 * 0.00981 = \mathbf{30.9 \text{ kN/m}}$$

DEFLEXIÓN MÁXIMA DE LA VIGA

$$\Delta_g = \frac{5w_g L_g^4}{384E_s I_g} = \frac{5 * 30.9 * (9000)^4}{384 * 200000 * (1348 * 10^6)} = \mathbf{9.79 \text{ mm}}$$

FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL MODO VIGA

$$f_g = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_g}} = 0.18 \sqrt{\frac{9.806}{9.79}} = \mathbf{5.69 \text{ Hz}}$$

$$\text{Con } D_j = 250000 \text{ mm}^3 \text{ y } D_g = \frac{I_g}{L_j} = \frac{1348 * 10^6}{10500} = \mathbf{128380 \text{ mm}}$$

ANCHO EFECTIVO DEL PANEL DE LA VIGA

Con $C_g = 1.8$ es:

$$B_g = C_g \left(\frac{D_j}{D_g} \right)^{\frac{1}{4}} L_g = 1.8 \left(\frac{250000}{128380} \right)^{\frac{1}{4}} (9) = \mathbf{19.1 \text{ m}}$$

Que debe ser menor que 2/3 la longitud del piso. Dado que se trata de un panel interior típico, la longitud real del piso es al menos tres veces la longitud de la vigueta, $3 \times 10,5 = 31,5$ m. Y, se tiene que $2/3 \times 31,5 = 21$ m $>$ 19,1 m, el ancho del panel de la viga es de 19,1 m. De la Ecuación 7, el peso del panel de la viga es:

$$W_g = \left(\frac{W_g}{L_j} \right) B_g L_g = \left(\frac{30,9}{10,5} \right) (19,1 * 9) = \mathbf{506 \text{ kN}}$$

El peso del panel de la viga no se incrementó en un 50 por ciento como se hizo en el cálculo del peso del panel de viguetas ya que los efectos de continuidad generalmente no se realizan cuando las vigas llegan directamente a las columnas.

MODO COMBINADO

Dado que la longitud entre apoyos de la viga es 9 m menor que el ancho del panel de la vigueta (9,49 m), la desviación de la viga, Δ_g se reduce de acuerdo con la ecuación 9:

$$\Delta'_g = \frac{L_g}{B_j} \Delta_g = \frac{9}{9,49} (9,79) = \mathbf{9.28 \text{ mm}}$$

FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL PISO

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{(\Delta_j + \Delta'_g)}} = 0.18 \sqrt{\frac{9.81 * 1000}{(9.08 + 9.28)}} = \mathbf{4.15 \text{ Hz}}$$

Peso del panel de modo combinado equivalente es:

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta'_g} W_j + \frac{\Delta'_g}{\Delta_j + \Delta'_g} W_g = \frac{9.08}{9.08 + 9.28} (429) + \frac{9.28}{9.08 + 9.28} (506)$$

$$W = \mathbf{468 \text{ kN}}$$

Para la ocupación de oficinas sin particiones de altura completa, $\beta = 0.03$ de la Tabla 1, así:

$$\beta W = 0.03 * 468 = \mathbf{14.0 \text{ kN}}$$

EVALUACIÓN

Utilizando la ecuación 4 y de la tabla 1 para la ocupación de oficinas, $P_o = 0.29 \text{ kN}$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o \exp(-0.35f_n)}{\beta W} = \frac{0.29 \exp(-0.35 * 4.15)}{14.0} = \mathbf{0.0048} \rightarrow$$

Equivalente a 0,48 por ciento g

Que es menor que el límite de aceleración $\frac{a_0}{g}$ del 0,5 por ciento. Por lo tanto, el piso es considerado satisfactorio. Además, como $f_n = 4.15 \text{ Hz}$ es mayor que 3 Hz, se evita la resonancia con el primer armónico de marcha. Dado que la frecuencia fundamental del sistema es inferior a 9 Hz, no se aplica el requisito de rigidez mínima de 1 kN por mm. [1]

4.3 DISEÑO PARA LA EXCITACIÓN RÍTMICA

4.3.1 Criterio recomendado. La aplicación de este criterio no dará lugar a problemas de fatiga [1]. El siguiente criterio de diseño para la excitación rítmica se basa en la función de carga dinámica para las actividades rítmicas y la respuesta dinámica de la estructura del piso:

$$f_n \geq (f_n)_{req'd} = f \sqrt{1 + \frac{k}{a_0} \frac{\alpha_i w_p}{w_t}} \quad (13)$$

Donde:

f_n = Frecuencia natural fundamental del sistema estructural.

$(f_n)_{req'd}$ = Frecuencia mínima requerida para evitar vibraciones inaceptables en cada frecuencia de forzado, f .

f = Frecuencia de forzado = $i f_{step}$ (Véase la Tabla 3).

i = Número de armónicos = 1, 2 o 3 (véase la tabla 3)

f_{step} = Frecuencia de paso

k = Una constante (1,3 para bailar, 1,7 para un concierto animado o evento deportivo, 2,0 para aeróbicos)

α_i = Coeficiente dinámico (véase la tabla 3)

$\frac{a_0}{g}$ = Límite de aceleración como porcentaje de la gravedad (Véase la tabla 2)

w_p = Peso efectivo por unidad de área de participantes distribuido sobre el panel de piso.

w_t = Peso total efectivo por unidad de área distribuido sobre el panel de piso (peso de los participantes más peso del sistema de piso).

Tabla 2 Límites de aceleración recomendados para vibraciones debidas a actividades rítmicas (NBC 1990).

Ocupaciones afectadas por la vibración	Límite de aceleración, % gravedad
Oficina o residencia	0.4-0.7
Comedor o levantamiento de pesas	1.5-2.5
Sólo actividad rítmica	4-7

Fuente. Guía 11 del AISC

4.3.2 Estimación de los parámetros. El parámetro estructural más importante que debe tenerse en cuenta para evitar problemas de vibración de edificios debidos a actividades rítmicas es la frecuencia natural fundamental de la vibración vertical de la estructura, f_n . También es importante la función de carga de la actividad (Tabla 3). De menor importancia son el peso equivalente del piso y la relación de amortiguación. [1]

4.3.3 Frecuencia Natural Fundamental, f_n . La frecuencia natural fundamental del piso es mucho más importante en relación con la excitación rítmica que con la excitación del caminar, por lo que se requiere más cuidado para su estimación. Para determinar la frecuencia natural fundamental, es importante tener en cuenta que la estructura se extiende hasta el fondo de la cimentación, e incluso en el suelo [1]. La ecuación 11 se puede usar para estimar la frecuencia natural de la estructura:

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{(\Delta_j + \Delta_g + \Delta_c)}} \quad (14)$$

Donde:

Δ_j = La deflexión elástica de la vigueta

Δ_g = La deflexión elástica de la viga que soporta las viguetas debido a la flexión y al cortante.

Δ_c = El acortamiento elástico de la columna debido a la deformación axial.

Tabla 3 Carga estimada durante eventos rítmicos

Actividad	Frecuencia de forzado f , [Hz]	Peso de los participante $s^* w_p$, [kPa]	Coefficiente dinámico α_i	Carga dinámica $\alpha_i w_p$, [kPa]
Bailando:	1.5-3	0.6	0.5	0.3

Primer armónico				
Concierto animado o evento deportivo:				
Primer armónico	1.5-3	1.5	0.25	0.4
Segundo armónico	3-5	1.5	0.05	0.075
Ejercicios de salto:				
Primer armónico	2-2.75	0.2	1.5	0.3
Segundo armónico	4-5.5	0.2	0.6	0.12
Tercer armónico	6-8.25	0.2	0.1	0.020
*Basado en la densidad máxima de participantes en el área ocupada del piso para condiciones comúnmente encontradas. Para eventos especiales la densidad de participantes puede ser mayor.				

Fuente. Guía 11 del AISC

4.3.4 Límite de aceleración: a_o/g . Se recomienda, al aplicar la ecuación 13, que no se supere un límite de 0,05 (equivalente a 5 por ciento de la aceleración de la gravedad), aunque este valor es considerablemente inferior a Lo que los participantes en las actividades se sabe que aceptan. El límite de 0,05 está destinado a proteger las ocupaciones sensibles a las vibraciones del edificio. Las formas de modo se pueden determinar a partir del análisis por ordenador o estimadas a partir de los parámetros de deflexión Δ_j , Δ_g y Δ_c . [1]

4.3.5 Parámetros de carga rítmica: w_p , α_i y f . Para el área utilizada por la actividad rítmica, el peso distribuido de los participantes w_p , se puede estimar a partir de la Tabla 3. En los casos en que los participantes sólo ocupan una parte del tramo, el valor de w_p se reduce en función del efecto equivalente (momento o desviación) para un tramo completamente cargado. Los valores de α_i y f se recomiendan en la Tabla 3. [1]

4.3.6 Peso Efectivo, w_t . El peso efectivo es simplemente igual al peso distribuido del piso más participantes. Si el piso soporta un peso adicional (como un piso superior), esto se puede tener en cuenta aumentando el valor de w_t . De manera similar, si las columnas vibran significativamente, como sucede a veces en los pisos superiores, pasa porque se une más masa a las columnas que sólo el panel de piso que soporta la actividad rítmica [1]. El efecto de un peso concentrado adicional w_c , puede ser aproximado por un aumento en w_t de

$$\frac{2W_c y^2}{LB}$$

Donde:

y = Relación entre el desplazamiento modal en la ubicación del peso y el desplazamiento modal máximo.

L = Longitud del vano

B = Ancho efectivo del panel, que puede ser aproximado como el ancho ocupado por los participantes

La continuidad de los miembros sobre los soportes en paneles de piso adyacentes también puede aumentar la masa efectiva, pero es improbable que el aumento sea mayor del 50 por ciento [1]. Obsérvese que sólo se necesita un valor aproximado de w_t para la aplicación de la ecuación 13.

Tabla 4 Aplicación del Criterio de Diseño, Ecuación 13, para Eventos Rítmicos

Actividad Límite de aceleración Construcción	Frecuencia de forzado⁽¹⁾ f, Hz	Peso efectivo de Participantes w_p, kPa	Peso total w_t, kPa	Frecuencia Natural Fundamental Mínima Requerida⁽³⁾ f_n, Hz
Bailar y cenar $\frac{a_0}{g} = 0.02$				
Piso pesado 5 kPa	3	0.6	5.6	6.4
Piso ligero 2.5 kPa	3	0.6	3.1	8.1
Concierto animado o evento deportivo $\frac{a_0}{g} = 0.05$				
Piso pesado 5 kPa	5	1.5	6.5	5.9
Piso ligero 2.5 kPa	5	1.5	4.0	6.4
Solo aeróbicos $\frac{a_0}{g} = 0.06$				
Piso pesado 5 kPa	8.25	0.2	5.2	8.8
Piso ligero 2.5 kPa	8.25	0.2	2.7	9.2
Ejercicios de salto compartidos con levantamiento de pesas.	8.25 5.5	0.12 0.12	5.12 2.62	9.2 ⁽²⁾ 10.6 ⁽²⁾

$\frac{a_0}{g} = 0.02$				
Piso pesado 5 kPa				
Piso ligero 2.5 kPa				
<p>Notas a la Tabla 4:</p> <p>(¹)La Ecuación 13 se suministra a todos los armónicos enumerados en la Tabla 3 y se muestra la frecuencia de forzamiento que rige.</p> <p>(²)Puede reducirse si la masa de amortiguación es suficiente para reducir la resonancia de 2^a y 3^a armónico a un nivel aceptable.</p> <p>(³)De la Ecuación 13.</p>				

Fuente. Guía 11 del AISC.

4.3.7 Relación de amortiguación, β . Este parámetro no aparece en la ecuación 13. Debido a que los participantes contribuyen al amortiguamiento, se puede usar un valor de aproximadamente 0,06, que es más alto que el mostrado en la Tabla 1 para la vibración de caminar. [1]

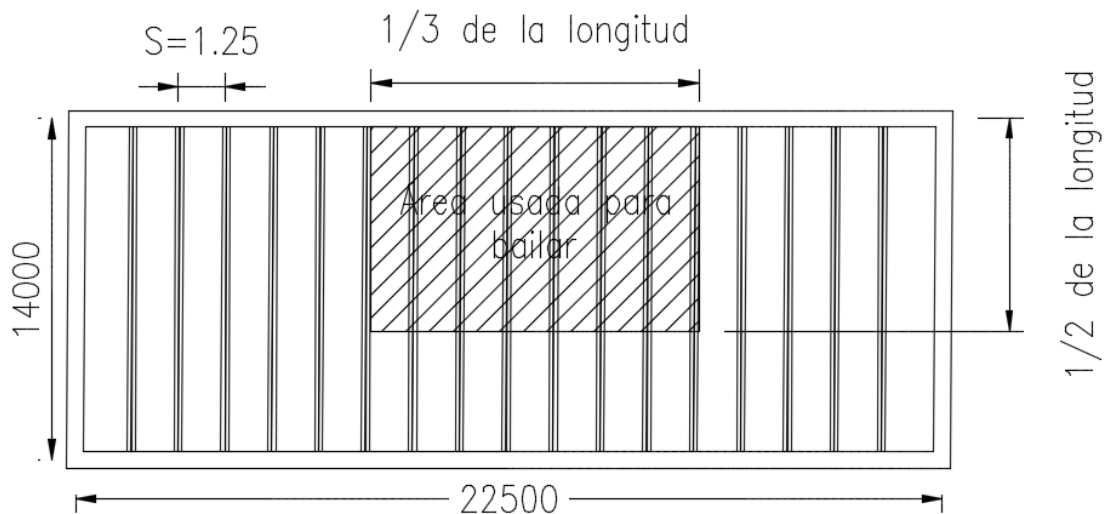
4.3.8 Aplicación del Criterio. El diseñador inicialmente debe determinar si las actividades rítmicas se contemplan en el edificio, y si es así, dónde. En una etapa temprana del proceso de diseño es posible localizar actividades rítmicas y ocupaciones sensibles para minimizar los posibles problemas de vibración y los costos requeridos para evitarlos. También es una buena idea en esta etapa considerar soluciones estructurales alternativas para prevenir problemas de vibración. Tales soluciones estructurales pueden incluir el diseño de la estructura para controlar las aceleraciones en el edificio y enfoques especiales, tales como el aislamiento del piso de actividad del resto del edificio o el uso de dispositivos de mitigación tales como amortiguadores de masa sintonizados. [1]

En resumen, los aspectos más importantes de la aplicación del criterio de diseño rítmico son la frecuencia natural fundamental del sistema estructural y las

aceleraciones de la vibración en las ocupaciones. La ubicación de la actividad dentro del edificio suele ser la decisión de diseño más importante. [1]

4.3.9 Ejemplo: Piso soportado con viguetas para bailar. El piso que se muestra en la Figura 5 se utiliza para comer junto al área de baile que se muestra. El sistema de piso consta de viguetas largas (14 m) apoyadas sobre muros de bloques de hormigón. Se estima que el peso efectivo del piso es de 3,6 kPa, incluyendo 0,6 kPa para las personas que bailan y cenan. El momento de inercia compuesto efectivo de las viguetas, que se seleccionaron en base a la resistencia, es de $1.100 \times 10^6 \text{ mm}^4$.

Fig. 10 Planta estructural con el área de baile



PRIMERA APROXIMACIÓN

Como primera comprobación para determinar si el sistema de piso es satisfactorio, la frecuencia natural fundamental mínima requerida se estima a partir de la Tabla 4 por interpolación entre pisos "ligeros" y "pesados". La frecuencia natural fundamental mínima requerida es de 7.3 Hz.

La deflexión de una vigueta compuesta debido a la carga soportada de 3,6 kPa es:

$$\Delta_j = \frac{5w_j L_j^4}{384E_s I_j} = \frac{5(3.6 * 1.25)(14000)^4}{384(200000)(1100 * 10^6)} = \mathbf{10.23 \text{ mm}}$$

Puesto que no hay vigas, $\Delta_g = 0$, y puesto que la deformación axial de la pared se puede despreciar, $\Delta_c = 0$. Así, la frecuencia natural fundamental del piso, de la ecuación 14, es aproximadamente

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{9.806(1000)}{10.23}} = \mathbf{5.6 \text{ Hz}}$$

Debido a que $f_n = 5,6 \text{ Hz}$ es menor que la frecuencia natural mínima requerida, 7,3 Hz, el sistema parece ser insatisfactorio.

SEGUNDA APROXIMACIÓN

Para investigar aún más el diseño del piso, se utiliza la ecuación 13. A partir de la Tabla 2, se selecciona un límite de aceleración de 2 por ciento g, es decir $\frac{a_0}{g} = 0,02$. La distribución del piso es tal que la mitad se utilizará para bailar y la otra mitad para cenar. Así, w_p se reduce de 0,6 kPa (de la Tabla 3) a 0,3 kPa. Utilizando la ecuación 13, con $f = 3 \text{ Hz}$ y $\alpha_1 = 0.5$ de la Tabla 3 y $k = 1.3$ para el baile, la frecuencia natural fundamental requerida es:

$$(f_n)_{req'd} = f \sqrt{1 + \frac{k}{\frac{a_0}{g}} \frac{\alpha_1 w_p}{w_t}} = 3.0 \sqrt{1 + \frac{1.3}{0.02} * \frac{0.5 * 0.3}{3.6}} = \mathbf{5.8 \text{ Hz}}$$

Dado que $f_n = 5,6 \text{ Hz}$, el piso es insatisfactorio y se requiere un análisis adicional. La aceleración máxima esperada es:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.3}{\left(\frac{f_n}{f}\right)^2 - 1} * \frac{\alpha w_p}{w_t} = \frac{1.3}{\left(\frac{5.6}{3.0}\right)^2 - 1} * \frac{0.5 * 0.3}{3.6}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.022$$

Equivalente al 2.2% de la gravedad. Dado que la aceleración máxima recomendada para el baile combinado con el comedor es de 2% de la gravedad y dado que la distribución del piso puede cambiar, las vigas más rígidas deben ser usadas. [1]

5. APLICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DESARROLLADAS A PROYECTOS DISEÑADOS POR LA EMPRESA PERALTA INGENIERÍA S.A.S.

5.1 ESTRUCTURA PARA USO DE OFICINAS

5.1.1 Descripción general de la estructura. Esta edificación de dos niveles con un área en planta de aproximadamente 490 m², está ubicada en el municipio de Tocancipá, Cundinamarca y pertenece a la planta de Bavaria. Su diseño fue realizado a inicios del año 2016 y actualmente se encuentra completamente construida, destinada para uso de oficinas. Está estructura consta de dos pórticos arriostrados concéntricos (PAC) en cada dirección, los cuales aportan la Resistencia sísmica del Sistema.

Fig. 11 Etapa final de construcción de la estructura

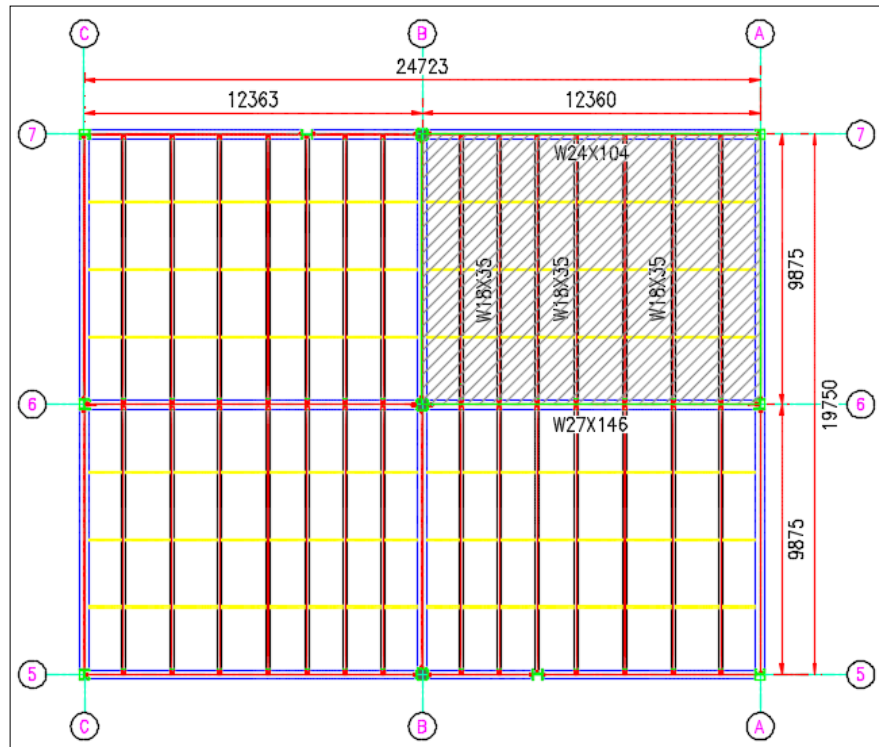


Fuente. Bavaria Tocancipá Cundinamarca

El Sistema de placa de entrepiso corresponde a una estructura mixta horizontal de Steel Deck, integrada por una lámina de acero colaborante y concreto, como se muestra en la figura 6.

5.1.2 Panel de diseño. Para evaluar las vibraciones que se producen durante las actividades humanas, el primer paso consistió en identificar el panel crítico de la planta estructural de la edificación, el cual contiene las vigas con mayor luz y menor inercia de la sección transversal. En la figura 7 se muestra la configuración estructural en planta del piso 2 de la edificación en estudio, para estos efectos, el área sombreada representa el panel de diseño.

Fig. 12 Planta estructural del piso 2.



5.1.3 Análisis de cargas. Las cargas fueron extraídas del título B del reglamento Colombiano Sismo Resistente NSR-10.

CARGA MUERTA SUPER IMPUESTA

De la tabla B.3.4.3-1 de la NSR-10 para una ocupación de Oficinas tenemos un valor de 3.8 kN/m² de carga muerta super impuesta por metro cuadrado de área en planta, que corresponde a 2.0 kN/m² de muros fijos de mampostería en fachada y particiones, más 1.8 kN/m² de Afinado de piso y cubierta.

CARGA VIVA

De la tabla B.4.2.1-1 de la NSR-10 para uso de oficinas, se utilizó el valor que

aparece en la Tabla 2.

Tabla 5 Carga viva en la placa de entrepiso

Componente	Carga (kN/m ²) m ² de área en planta
Para uso de oficinas	2

Fuente. NSR-10

5.1.4 Propiedades geométricas y de materiales de los elementos. En las tablas 6, 7 y 8 se muestran las propiedades de los elementos que conforman el panel de diseño.

Tabla 6. Propiedades de la placa de entrepiso

Propiedad	Valor	Unidad
γ	2400	kg/m ³
f'_c	21	MPa
E_c	21538	MPa
e	69.2	mm
d_{nervio}	50.8	mm
d_{efectivo}	94.6	mm

Fuente. PERALTA INGENIERÍA S.A.S

La profundidad efectiva de la placa (d_{efectivo}) se estimó como la suma entre la mitad de la lámina colaborante ($d_{\text{nervio}}/2$) y el espesor de concreto (e). Para entender mejor lo anteriormente explicado, la figura 4 nos proporciona la información gráfica.

Tabla 7. Propiedades de la viga del panel de diseño.

Propiedad	Valor	Unidad
f_y	345	MPa
f_u	450	MPa
E_s	200000	MPa
d	611	mm

A	19700	mm ²
w	155	kg/m
I_x	1290*10 ⁶	mm ⁴

Fuente. PERALTA INGENIERÍA S.A.S

Tabla 8 Propiedades de las viguetas del panel de diseño.

c	Valor	Unidad
f_y	250	MPa
f_u	410	MPa
E_s	200000	MPa
d	450	mm
A	6620	mm ²
w	52	kg/m
I_x	212*10 ⁶	mm ⁴

Fuente. PERALTA INGENIERÍA S.A.S

5.1.5 Cálculo de la frecuencia natural del sistema. La frecuencia natural del sistema se determinó considerando primero la viga por separado, como un miembro simplemente apoyado y sometido a una carga uniformemente distribuida, de igual forma la vigueta y luego el modo combinado usando el método simplificado descrito en el numeral 3.1 de este documento. Entonces, los valores calculados para la frecuencia natural son $f_j=7.17$ Hz, $f_g= 4.50$ Hz y $f_n= 3.81$ Hz para la vigueta, viga y modo combinado respectivamente. Estos valores son exportados de las hojas de cálculo desarrolladas.

5.1.6 Criterio de aceptación o rechazo. La ocupación de esta edificación es para oficinas con particiones pequeñas, por tanto $P_o=0.29$ kN, $\beta=0.03$ y $a_o/g=0.5$ tomados de la tabla 8. Con la hoja de cálculo se determinó el valor de a_p/g que es igual a 0.232% menor que 0.5%. En este orden de ideas, se concluye que el sistema de entrepiso es satisfactorio bajo las vibraciones producidas por caminar.

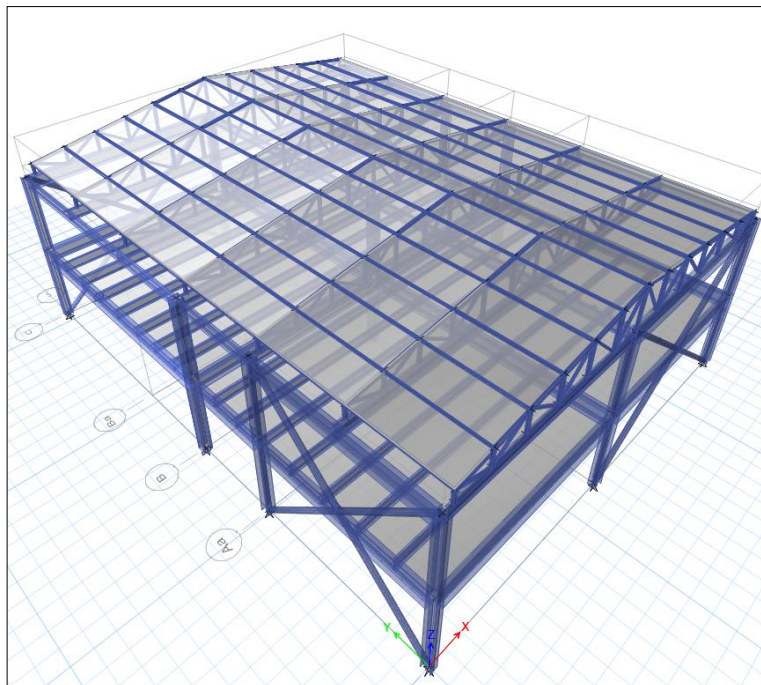
5.1.7 Análisis de la aceleración vertical del panel de diseño en el programa ETABS. Se realizó la simulación de una persona caminando sobre el panel de diseño con el objetivo de obtener la aceleración vertical de cada paso a lo largo del recorrido. Los datos de la persona que provoca la excitación del sistema se encuentran en la tabla 6.

Tabla 9. Datos del caminante

Peso (W)	734 N
Frecuencia de paso	2 Hz
Velocidad	1.5 m/s
Zancada	0.75 m
Duración del pulso	0.45 s
Carga	1.4W

Fuente. <https://www.youtube.com/watch?v=faUI-IJVqS4>

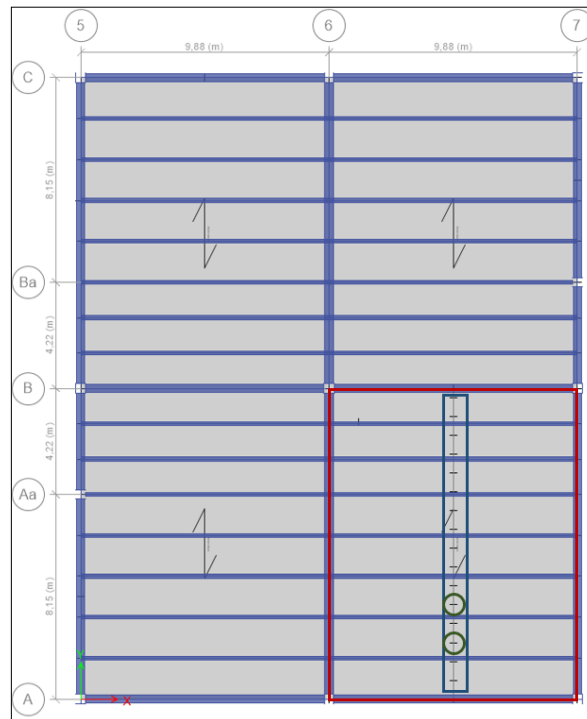
Fig. 13 Modelo de la edificación.



Fuente. ETABS 2016

En primer lugar, se definió una función para la aceleración vertical con respecto al tiempo como consecuencia de la excitación que provoca la persona cuando camina. Luego se insertaron puntos sobre la placa a lo largo de todo el recorrido hasta atravesar el panel de diseño, La separación entre estos puntos es de 0.75 m que corresponde a la zancada de la persona como se indica en la figura 9 la cual muestra la planta estructural del segundo piso de la edificación, indicando el panel de diseño con el contorno rojo, el recorrido de la persona con el contorno azul, y los pasos de la persona con el contorno circular verde.

Fig. 14 Planta del segundo piso de la estructura.



Fuente. ETABS 2016

En segundo lugar, se crearon los patrones de carga que son los pasos que da la persona en el recorrido. A cada paso se le asignó una carga de 1.4 veces el peso de la persona.

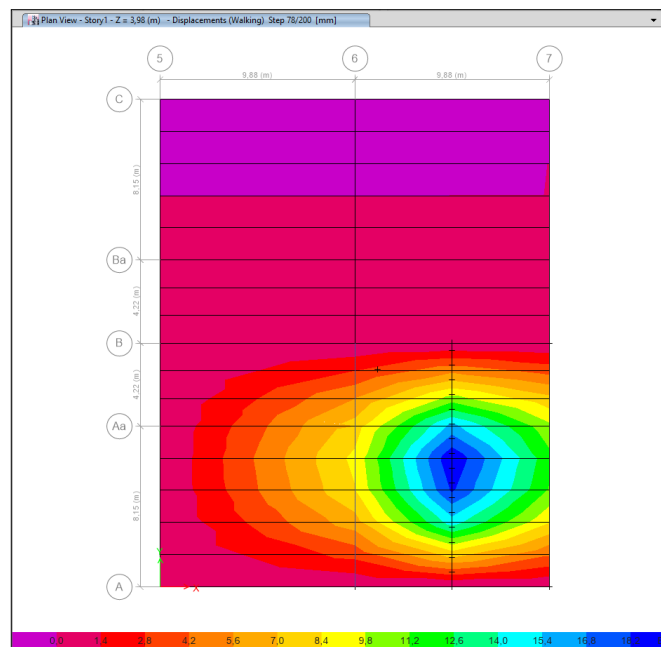
En tercer lugar, Se definió el caso de carga cuando la persona camina en todo el

recorrido con respecto al tiempo desde el arranque, asociado a la función definida y se ingresó el amortiguamiento modal que para este caso es de 0.03.

Por último, se corrió el programa y se le indicó que mostrara la variación de las deformaciones con respecto al tiempo a lo largo de todo el recorrido como se puede apreciar en la figura 10.

El procedimiento más explícito para este modelamiento se encuentra en el documento para análisis y diseño escrito en la presente práctica.

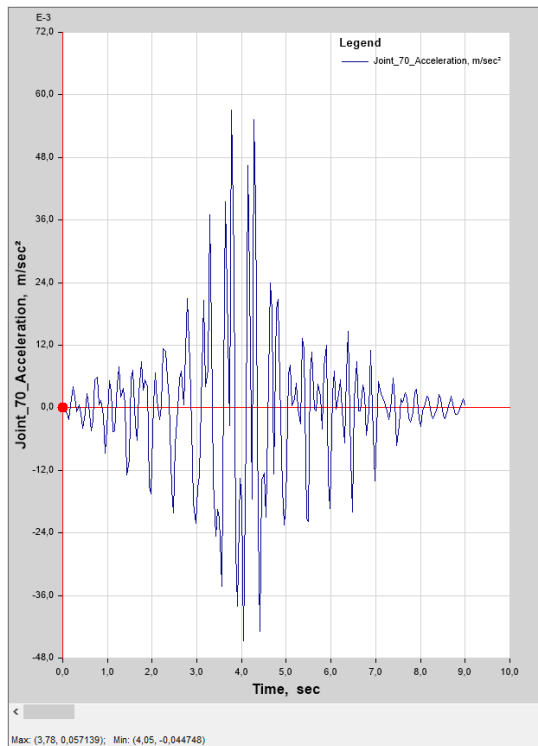
Fig. 15 Deformación a lo largo del recorrido.



Fuente. ETABS 2016

El programa le permite al usuario observar la aceleración de un punto a lo largo de todo el recorrido. Para este caso se hizo con un punto medio del recorrido como se muestra en la figura 11, donde en la parte inferior se muestra una aceleración pico satisfactoria de 0.057 porque es menor que 0.5 que corresponde al máximo permitido en la Escala ISO para el confort humano.

Fig. 16 Variación de la aceleración de un punto en el tiempo durante el recorrido



Fuente. ETABS 2016

5.2 PASARELA EXTERIOR

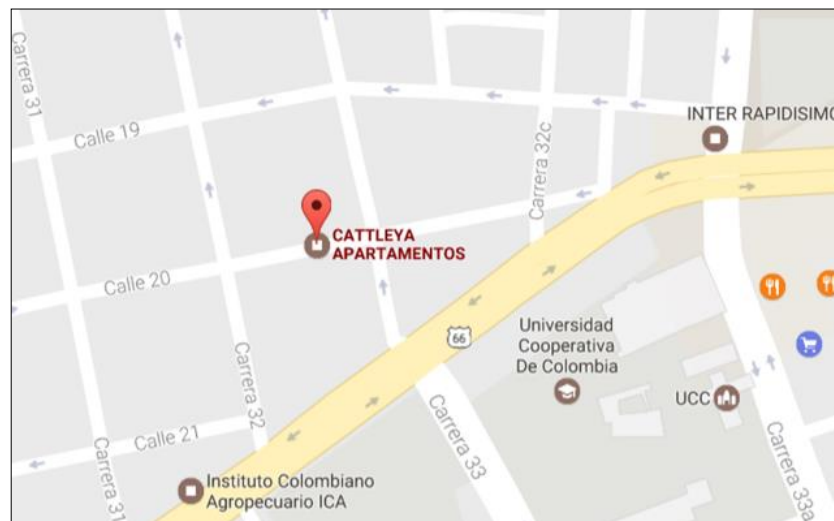
5.2.1 Descripción general de la estructura. La pasarela peatonal se localiza al costado noroccidental de la torre principal del proyecto Cattleya; este proyecto se ubica en el municipio de Bucaramanga Santander. La localización general del proyecto Cattleya y de la pasarela que contempla para dicho proyecto se muestra en la figura 10.

Fig. 17 Etapa de Construcción de la pasarela peatonal



Fuente. PERALTA INGENIERÍA S.A.S

Fig. 18 Ubicación del sitio donde se encuentra la pasarela peatonal.

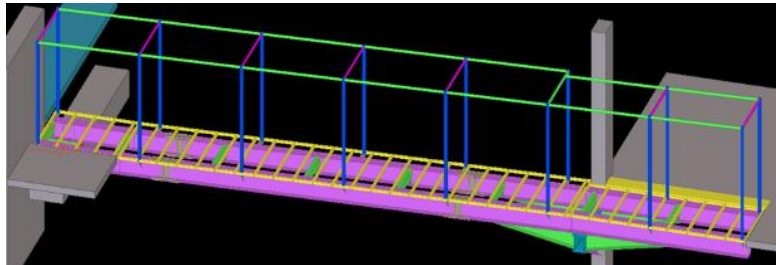


Fuente. GOOGLE MAPS

La estructura de la pasarela consta de un sistema de piso de placa mixta horizontal de Steel Deck, integrada por una lámina de acero colaborante y concreto que se

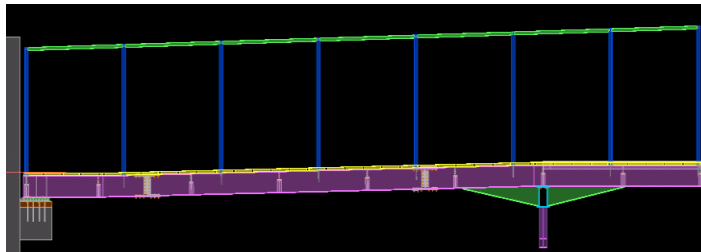
extiende en toda la longitud de la pasarela y se apoya sobre vigas de acero en el sentido de la pasarela. Las vigas de la pasarela se apoyan en el arranque sobre una viga de concreto existente (torre principal) y en el extremo lejano sobre una viga de acero conectada a la columna de concreto de la torre. En las figuras 11 y 12 se muestra la configuración geométrica general de la estructura de la pasarela.

Fig. 19 Vista general Pasarela Cattleya.



Fuente. PERALTA INGENIERÍA

Fig. 20 Vista general Pasarela Cattleya



Fuente. PERALTA INGENIERÍA

5.2.2 Análisis de cargas. Se tomaron las mismas cargas contempladas en el diseño inicial para hacer una evaluación más consistente a lo construido.

Tabla 10. Carga muerta

Componente	Carga (kN/m ²) m ² de área en planta	Carga total (kN/m ²) m ² de área en planta
Soportería de piso	0.5	3.8
Barandas	2.0	
Acabados	1.0	
Iluminación	0.1	
Arriostramientos	0.2	

Fuente. NSR-10.

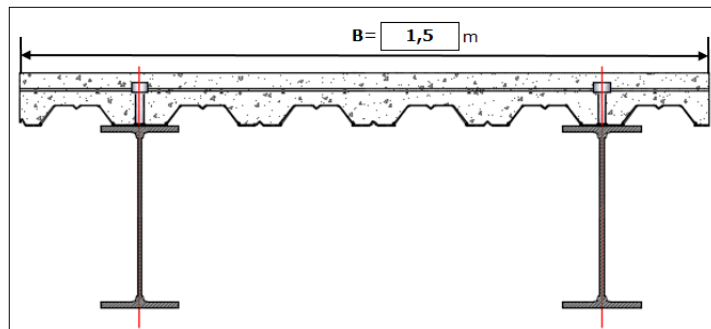
Tabla 11. Carga viva

Componente	Carga (kN/m ²) m ² de área en planta
Balcones residenciales	5

Fuente. NSR-10.

Los valores de las tablas 6 y 7 han sido tomados de la memoria de cálculo del diseño inicial de la pasarela, esto con el fin de obtener un resultado más preciso, sin embargo, se revisó el título B de la NSR-10 para comprobar las cargas.

Fig. 21 Sección transversal de la pasarela.



5.2.3 Cálculo de la frecuencia natural. Para determinar la frecuencia natural de las vigas principales o cargueras lo primero que se hizo fue calcular la relación modular como el cociente entre el módulo de elasticidad del acero y 1.35 veces el módulo de elasticidad del concreto, con este valor se determinó el momento de inercia transformado, esto obedece a que el sistema viga-placa se considera compuesta, porque, cuando se producen las vibraciones las deflexiones en la interfase son inferiores a 1 mm y por tanto se considera que trabajan en conjunto. Luego se estimó la deflexión máxima de las vigas con la ecuación 3, asumiendo que se encuentran simplemente apoyadas. Y, por último, con ayuda de las hojas de cálculo desarrolladas, se encontró que la frecuencia natural de las vigas es igual a 5 Hz, este valor es superior a 3 Hz, por tanto, no ocurrirá resonancia en el primer armónico.

5.2.4 Criterio de aceptación o rechazo. La ocupación de esta edificación es para pasarela peatonal exterior por tanto $P_o=0.41$ kN, $\beta=0.01$ y $a_o/g=5\%$ tomados de la tabla 8. Con las hojas de cálculo se determinó el valor de a_p/g que es igual a 3.633% menor que 5%, entonces se concluye que el sistema de entrepiso es satisfactorio bajo las vibraciones producidas por caminar.

6 CONCLUSIONES

- Las prácticas empresariales le brindan la oportunidad a los estudiantes de adquirir experiencias y competencias en el ámbito laboral, además le permite construir un perfil con capacidades de adaptarse de forma más sencilla a nuevas reglas en el ejercicio de la ingeniería.
- En el diseño estructural de edificaciones en acero, resulta de gran importancia evaluar las vibraciones que se producen debido a las actividades humanas porque este fenómeno puede provocar molestias en los ocupantes y daños posteriores que demandan sobrecostos debido a los reforzamientos requeridos.
- La estandarización de los procedimientos de diseño reduce de manera significativa el tiempo de nivelación de los profesionales que ingresan a una empresa y se convierte en una herramienta eficiente que genera una ventaja competitiva ya que permite ejecutar de forma segura, ágil y organizada los proyectos que se desarrollan en la misma.
- Con las herramientas desarrolladas en la práctica para la evaluación de vibraciones se logra prevenir desde la etapa de diseño, problemas a causa de este fenómeno, además de ofrecerle al usuario una explicación exhaustiva de forma secuencial, lógica y ordenada.
- El uso adecuado de los programas de análisis estructural nos proporciona resultados con alto grado de precisión con respecto a un análisis manual, Adicionalmente en caso de cometer errores el proceso de corrección en el software es más práctico y dinámico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] T. Murray, D. Allen & E. Ungar, Design Guide 11-Floor Vibrations due to Human Activity. Chicago: First Edition. Illinois, 2001. AISC.

BILIOGRAFÍA

J. MCCORMAC, DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO. México: 2a Edición. Alfaomega, 2002. Capítulo 19, p. 612.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente. NSR-10, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS, 2010.

T. Murray, D. Allen & E. Ungar, Design Guide 11-Floor Vibrations due to Human Activity. Chicago: First Edition. Illinois, 2001. AISC.

T. TSUDA & F. WOESTE. Controlling Floor Vibration. Journal of Light Construction. 2015, vol. 34, No.3. p. 19-21.

VI CONGRESO INTERNACIONAL DE LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO/2017. (22, Junio, 2017: Bogotá, Colombia) T. Murray, "The New and Improved Design Guide 11 2nd Ed. Vibrations of Steel-Framed Systems due to Human Activity".