



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN
LOS NIVELES DE SERVICIO DE SISTEMAS
ESTRUCTURALES DE ACERO SOMETIDOS A LA
ACTIVIDAD HUMANA

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar el título de

INGENIERO CIVIL

Realizado por:

Salazar Polanco, Alejandro Enrique

Trujillo Figueredo, María Gabriela

Profesor guía:

Ing. Eduardo López

Fecha:

Julio de 2017



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN
LOS NIVELES DE SERVICIO DE SISTEMAS
ESTRUCTURALES DE ACERO SOMETIDOS A LA
ACTIVIDAD HUMANA

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con
el resultado: _____

JURADO EXAMINADOR

Firma: _____ Firma: _____ Firma: _____

Nombre: _____ Nombre: _____ Nombre: _____

Realizado por: Salazar Polanco, Alejandro Enrique
Trujillo Figueredo, María Gabriela

Profesor guía: Ing. Eduardo López

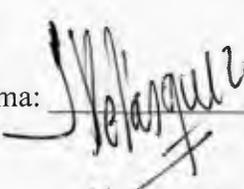
Fecha: Julio de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES EN
LOS NIVELES DE SERVICIO DE SISTEMAS
ESTRUCTURALES DE ACERO SOMETIDOS A LA
ACTIVIDAD HUMANA

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con
el resultado: veinte (20) puntos.

JURADO EXAMINADOR

Firma:  Firma:  Firma: 
Nombre: Eduardo López Nombre: Guillermo Bonilla Nombre: José M. Velázquez

Realizado por:

Salazar Polanco, Alejandro Enrique
Trujillo Figueredo, María Gabriela

Profesor guía:

Ing. Eduardo López

Fecha:

Julio de 2017

Agradecimientos

Agradezco a mi hermano, el Ing. Elio Salazar por su constante apoyo en todo el trayecto de mi vida y mi carrera.

A mi tutor, el Ing. Eduardo López por sus constantes enseñanzas y apoyo durante esta etapa.

A mi mamá y a mis abuelos, por su incondicional amor y cariño a lo largo de mi vida. También a mis amigos, por aportar un poco de su esencia para lograr ser lo que soy hoy en día.

A mi compañera del T.E. G. por siempre estar ahí para mí y ser un apoyo importante.

Alejandro Enrique.

A mis padres y hermanas.

Por ser el máximo apoyo en todo lo que me he planteado ya que con su ayuda he podido lograr grandes experiencias. Por respetar las decisiones que he tomado, además de tener siempre un consejo en el momento que lo ameritaba.

A mi abuela.

Por su inmenso amor y entusiasmo.

A nuestro tutor, el Ing. Eduardo López.

Por darnos el privilegio de estar bajo su tutela, por su apoyo y enseñanza en esta importante etapa.

A mis familiares y amigos.

Por sus ánimos y comprensión a lo largo de esta carrera.

A mi compañero de T.E.G.

Por su increíble paciencia, cariño y apoyo en todo momento.

María Gabriela.

SINOPSIS

Actividades como saltar, bailar, caminar, correr y actividades rítmicas, comúnmente causan problemas de vibraciones en estructuras. Este inconveniente se ha intensificado debido a la aparición de aceros modernos de alta resistencia que permiten el diseño de estructuras más delgadas y ligeras. Sin embargo, con el aumento de la esbeltez, la sensibilidad de las estructuras a las vibraciones aumenta.

Los análisis de vibraciones realizados para estos casos coinciden en afirmar que los problemas son debidos a frecuencias naturales de la estructura, las cuales se encuentran en el rango de las frecuencias producidas por las personas en movimiento y representa un caso típico de resonancia. Este efecto se ha detectado en losas tipo *steeldeck* (*Sofitos Metálicos*).

El estudio del efecto que tienen las personas sobre la estructura se basa en considerar a las personas no sólo como una fuerza externa sino como un sistema dinámico que altera las propiedades de la estructura.

Para disminuir las vibraciones en estructuras se puede modificar la respuesta al reforzar los elementos estructurales o al implementar un sistema de control. La implementación de sistemas de control mediante la adecuación del amortiguamiento del sistema o por el cambio en la frecuencia natural alejando la posibilidad de resonancia.

En los últimos años, los ingenieros de diseño estructural en América del Norte han reconocido ampliamente la vibración de sistemas de pisos debido a la actividad humana como un estado límite importante para los sistemas estructurales de acero. Mientras que en décadas pasadas, los ingenieros de diseño estructural enfocaron su atención exclusivamente en los estados límite de servicio de fuerza y flexibilidad, ahora es común evaluar las vibraciones del piso para la mayoría, si no todos, los proyectos construidos usando sistemas de sofitos metálicos. La publicación de la 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016, en adelante "DG11") proporciona criterios de evaluación para varias situaciones comunes y también sirvió para aumentar la conciencia de la importancia de considerar rutinariamente este estado límite.

Para casos especializados, se toma como otra fuente de investigación, siendo el más destacado el SCI británico Design of Floors for Vibration: A New Approach que contiene una "Evaluación General para Establecer Respuesta a las Vibraciones" usando el Análisis de Elemento Finitos (Smith et al., 2007, en adelante denominado "SCI DG"). Este método intenta cuantificar la respuesta considerando múltiples modos. El método depende de una formulación indirecta: determinar la respuesta al caminar en estado estacionario y luego reducir esta respuesta para tener en cuenta la acumulación de resonancia imperfecta.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es desarrollar un método de evaluación de vibraciones relativamente simple que sea directamente aplicable a una amplia gama de situaciones y que pueda ser prácticamente implementado en edificaciones irregulares para conocer las alteraciones que se pueden percibir por dichas actividades humanas.

Para este estudio, se hace uso del software ETABS v.16 y SAP2000 v.19 donde se aplicará una serie de métodos con la finalidad de predecir la respuesta que representa la actividad humana. Entre los métodos a utilizar se tiene: el Análisis de Elementos Finitos (FEA), el Análisis de Auto-valores y auto-vectores (Eigenvalue Analysis), la carga de la Serie de Fourier y el modelo FRF (Función de respuestas de frecuencia) que se calcula mediante el Análisis de estado estacionario (Steady-state Analysis).

Términos Claves: vibraciones, Análisis de Elementos Finitos, actividad humana, interacción dinámica humano-estructura, serviciabilidad.

ABSTRACT

Activities such as jumping, dancing, walking, running and rhythmic activities commonly cause vibration problems in structures. This drawback has been intensified due to the appearance of modern high strength steels that allow the design of thinner and lighter structures. However, with increased slenderness, the sensitivity of structures to vibrations increases.

The vibration analyzes performed for these cases coincide in affirming that the problems are due to the natural low frequencies of the structure, which are in the range of the frequencies produced by the people in movement and represents a typical case of resonance. This effect has been detected in steeldeck slabs.

The study of the effect that people have on the structure is based on considering people not only as an external force but as a dynamic system that alters the properties of the structure.

To reduce vibrations in structures, the response can be modified by reinforcing the structural elements or by implementing a control system. The implementation of control systems by adapting the damping of the system or by the change in the natural frequency away from the possibility of resonance.

In recent years, structural design engineers in North America have broadly recognized soil vibration due to human activity as an important limiting state for structural steel systems. While in past decades, structural design engineers have focused exclusively on service boundary states of strength and flexibility, it is now common to evaluate floor vibrations for most, if not all, projects built using steelframed systems. The publication of the 2nd Edition of AISC Design Guide No. 11, Floor Vibrations Due to Human Activity (Murray et al., 1997, hereinafter "DG11") provides evaluation criteria for several common situations and also served To raise awareness of the importance of routinely considering this border state.

For specialized cases, it is taken as another source of research, the most prominent being the British SCI Design of Floors for Vibration: A New Approach containing a "General Assessment for Setting Response to Vibrations" using Finite Element Analysis (Smith et al. Al., 2007, hereinafter referred to as "SCI DG"). This method attempts to quantify the response by considering multiple modes. The method depends on an indirect formulation: determining the steady-state walking response and then reducing this response to account for the accumulation of imperfect resonance.

Therefore, the objective of this study is to develop a relatively simple vibration evaluation method that is directly applicable to a wide range of situations and that can be practically implemented in irregular constructions to know the alterations that can be perceived by these human activities.

For this study, a software ETABS v.16 and SAP2000 v.19 are used where a series of methods will be applied in order to predict the response represented by human activity. Among the methods to be used are: Finite Element Analysis (FEA), Analysis of Response History (Time History), Fourier Series Load and FRF (Frequency Response Function) model that is calculated through steady state analysis.

Key Terms: vibrations, Finite Element Analysis, human activity, dynamic interaction human-structure, serviceability.

Índice General

Agradecimientos	I
SINOPSIS	II
ABSTRACT	IV
CAPÍTULO I: Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Alcance y Limitaciones	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
CAPÍTULO II: Marco Teórico	7
2.1 Terminología básica de Vibraciones Asociadas a la Actividad Humana.....	7
2.2 Principios de la respuesta estructural relacionados con la actividad humana.	12
2.2.1 Carga dinámica debido a movimientos humanos.	12
2.3 Criterio de Evaluación y Límites de tolerancia para el Bienestar y Comodidad Humana.	17
2.3.1 Criterios de evaluación recomendados la actividad de caminar.....	19
2.3.2 Criterios de Evaluación recomendados para correr.....	21
2.3.3 Criterios de Evaluación recomendados para actividades rítmicas.....	22
2.3.4 Amortiguamiento.....	24
2.4 Análisis De Elementos Finitos (FEA).....	25
2.4.1 Frecuencias y modos naturales	26
2.4.2 Evaluación del Confort Humano en FEA.....	27
2.4.2.1 Caminar en pisos de baja frecuencia.....	27
2.4.2.2 Caminar en pisos de alta frecuencia.....	29
2.4.2.3 Correr en pisos de nivel y pistas	31
2.4.2.4 Actividad rítmica en pisos y balcones.	33
CAPÍTULO III: Marco Metodológico	36
3.1 Obtención de información básica.....	36
3.2 Modelado de un sistema estructural de acero para interpretación de resultados	36
3.3 Interpretación y análisis de resultados	36

3.4 Recomendaciones y elaboración de tomo	36
CAPÍTULO IV: Desarrollo	37
4.1 Métodos de predicción analítica.....	37
4.2 Definición de la estructura.	37
4.2.1 Características geométricas de la estructura.....	37
4.2.2 Equivalencia entre Losa maciza (SAP2000) y Losacero (ETABS v.16).	39
4.2.3 Materiales	41
4.2.4 Cargas aplicadas	42
4.2.5 Amortiguamiento viscoso.....	42
4.3 Análisis de los efectos vibratorios debidos al caminar humano.....	43
4.3.1 Predicción de Frecuencias Naturales y Formas de Modo.....	43
4.3.2 Aplicación del método de Estado estacionario (Steady-state Analysis).....	46
4.3.3 Predicción de la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF).	47
4.3.4 Calculo de la Aceleración pico.....	49
4.4 Análisis de los efectos vibratorios debidos a correr.....	50
4.4.1 Predicción de Frecuencias Naturales y Formas de Modo.....	50
4.4.2 Aplicación del método de Estado estacionario (Steady-state Analysis).....	52
4.4.3 Predicción de la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF).	52
4.4.4 Calculo de la aceleración pico.	53
4.5 Análisis de los efectos vibratorios debidas a actividades rítmicas.....	54
4.5.2 Aplicación del método de Estado estacionario (Steady-state Analysis).....	56
4.5.3 Predicción de la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF).	57
4.5.4 Calculo de la Aceleración pico.....	59
CAPÍTULO V: Análisis de resultados	62
5.1 Serviciabilidad de sistemas estructurales de acero sometidos a actividad humana.	62
5.2 .Resonancia en sistemas estructurales de acero.....	63
CAPÍTULO VI: Conclusiones	64
CAPÍTULO VII: Recomendaciones	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

Índice de Figuras

Figura # 1: Tipos de cargas dinámicas	13
Figura # 2: Límites de tolerancia recomendados para la actividad humana.....	18
Figura # 3: Vista en planta de la estructura.	38
Figura # 4: Vista 3D de la estructura.....	38
Figura # 5: Propiedades de la losacero de calibre 1,5"	39
Figura # 6: Propiedades de la losa maciza de concreto de espesor 9cm	40
Figura # 7: Vista en planta de la distribución de las correas.	41
Figura # 8: Vista en 3D de la distribución de las correas en la estructura.....	42
Figura # 9: Carga puntual aplicada en el centro de un tramo para el Steady-state Analysis	44
Figura # 10: Junta N°1 seleccionada para el estudio FRF.	44
Figura # 11: Junta N°2 seleccionada para el estudio FRF.	44
Figura # 12: Representación de algunas formas de modo y frecuencias naturales de la estructura.	45
Figura # 13: Datos del caso de Análisis Steady-state.....	46
Figura # 14: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo central (Junta N°1)	47
Figura # 15: Predicción de aceleración FRF para el caso del volado (Junta N°2).	48
Figura # 16: Carga puntual aplicada en el centro de un tramo para el Steady-state Analysis	51
Figura # 17: Junta N°1 seleccionada para el estudio FRF.	51
Figura # 18: Junta N°2 seleccionada para el estudio FRF.	51
Figura # 19: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo central (Junta N°1)	52
Figura # 20: Predicción de aceleración FRF para el caso del volado (Junta N°2).	53
Figura # 21: Aplicación de la carga distribuida uniforme de 1Kgf/m ² en la parte central de la estructura.....	55
Figura # 22: Aplicación de la carga distribuida uniforme de 1Kgf/m ² en el tramo izquierdo de la estructura.....	55
Figura # 23: Aplicación de la carga distribuida uniforme de 1Kgf/m ² en el tramo derecho de la estructura.....	56
Figura # 24: Datos del caso de Análisis Steady-state.....	57
Figura # 25: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo central.	57
Figura # 26: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo izquierdo.	58
Figura # 27: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo derecho.....	58
Figura # 28: Poste con o sin elemento amortiguador	67
Figura # 29: Reforzamiento de acordes inferiores.....	68
Figura # 30: Endurecimiento del soporte	69

Índice de Tablas

Tabla # 1: Parámetros de la Serie de Fourier por actividad humana.	17
Tabla # 2: Parámetros de la Serie de Fourier para actividades rítmicas.	17
Tabla # 3: Coeficiente dinámicos y Frecuencias de fuerza para caminar.	19
Tabla # 4: Armónicos que coinciden con la frecuencia natural de pisos de alta frecuencia.	20
Tabla # 5: Cargas vivas sobrepuestas recomendadas para análisis vibratorios para caminar.	20
Tabla # 6: Límites de tolerancia recomendados para picos de edificaciones.	21
Tabla # 7: Coeficientes dinámicos y frecuencias debido a la fuerza ejercida por correr.	22
Tabla # 8: Coeficientes dinámicos y frecuencias debido a la fuerza ejercida por actividades rítmicas.	22
Tabla # 9: Límites de tolerancia recomendados para la aceleración en edificaciones sometidas a actividades rítmicas.	23
Tabla # 10: Parámetros de cargas dinámicas para eventos rítmicos.	24
Tabla # 11: Valores de amortiguación recomendados.	24
Tabla # 12: Frecuencias dominantes para pisos de alta frecuencia según el número de armónicos.	31
Tabla # 13: Parámetros de la Serie de Fourier para la actividad correr.	33
Tabla # 14: Parámetros de la Serie de Fourier para Cargas de grupo rítmicos.	35

Índice de ecuaciones

Ecuación # 1	13
Ecuación # 2	16
Ecuación # 3	16
Ecuación # 4	28
Ecuación # 5	28
Ecuación # 6	28
Ecuación # 7	29
Ecuación # 8	29
Ecuación # 9	30
Ecuación # 10	30
Ecuación # 11	30
Ecuación # 12	32
Ecuación # 13	34
Ecuación # 14	34

CAPÍTULO I: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Las vibraciones producidas por la actividad humana pueden causar deformaciones, así como pequeñas o grandes afectaciones a los edificios y a los elementos estructurales o no estructurales que los constituyen. Algunas de estas incidencias son: rotura, agrietamiento o fisuración de paredes, empeoramiento de patologías existentes, caídas de equipos o maquinaria de trabajo afectando a los mismos o a las personas.

Las vibraciones continuas, además de los efectos descritos anteriormente, pueden producir en las estructuras de los edificios problemas de fatiga, incremento de tensiones o sobreesfuerzos en los elementos resistentes principales de la estructura.

Los criterios de evaluación de servicio para vibraciones son inevitablemente más complicados y menos precisos que los criterios de evaluación de fuerza y rigidez, porque la dinámica inducida por el hombre genera cargas que varían ampliamente y las propiedades dinámicas de la estructura son más difíciles de predecir que sus propiedades estáticas.

La experiencia y los estudios experimentales han demostrado que el problema se puede simplificar suficientemente porque la respuesta es típicamente dominada por un único modo de vibración para proporcionar criterios de evaluación prácticos para sistemas estructurales sujetos a la actividad humana. Cada criterio de evaluación consta de una predicción de la respuesta estructural en términos de aceleración y un límite de tolerancia.

La marcha humana, baile y otros movimientos causan cargas dinámicas que deben aplicarse a las estructuras. Estas cargas son periódicas y son bastante complicadas. Los espectros indican contribuciones significativas en la frecuencia de paso y sus primeros armónicos.

Un método de predicción de la respuesta se inicia con una predicción de los modos de vibración natural, cada uno de los cuales se caracteriza por su frecuencia natural, el modo de forma, la amortiguación y masa modal.

En los últimos años han existido muchos avances tecnológicos, trayendo evoluciones de los diseños modales mediante la utilización de diferentes programas. Actualmente, diversos programas de elementos finitos pueden realizar cálculos dinámicos y ofrecen herramientas para la determinación de las frecuencias naturales, ya que son procedimientos de gran envergadura para la obtención de la masa modal y las amortiguaciones, dando una información general de la estructura a estudiar en relación con el Análisis de Elementos Finitos (AEF).

Esto hace que surjan las siguientes incógnitas:

¿Qué diferencia habrá entre colocar cargas estáticas por actividad humana recomendadas por la norma y diseñar con cargas dinámicas?

¿Existirá alguna diferencia entre la respuesta de la estructura analizada con modelaje estático o dinámico tomando en cuenta los efectos vibratorios producidos por la actividad humana?

¿Existirán factores de amplificación dinámica que permitan la equivalencia de los efectos vibratorios aplicando el modelaje estático?

1.2 Antecedentes

En los últimos años, los diseñadores de edificios se han enfrentado a vibraciones excesivas y molestas en el piso. Una de las principales causas de este problema son los diseños más arquitectónicos en respuesta a la tendencia de los propietarios de edificios para exigir largos espacios libres de columna. Se debe evaluar la susceptibilidad de los pisos de construcción a tales excitaciones, varias guías de diseño, estándares y referencias recomiendan estudios en términos de paso general de frecuencias.

La respuesta de aceleración del suelo suele ser en comparación con un límite aceptable para evaluar la vibración y el diseño de la estructura.

La capacidad de servicio de la vibración es una consideración dominante en el diseño del armazón de acero. Existen especificaciones de diseño moderno, junto con aceros y concretos más fuertes, para permitir secciones más ligeras cuando las consideraciones de resistencia gobiernan.

Los edificios de oficinas también han cambiado dramáticamente con el uso universal de equipos de computación con disminución de cargas de diseño, conduciendo a estructuras más susceptibles a efectos vibratorios.

Como resultado, la vibración debido a la actividad humana es una preocupación significativa para la capacidad de servicio. Un criterio de rigidez tradicional para pisos de acero limita la flecha de la carga viva de las vigas o correas de apoyo para controlar vibraciones pero se considera que no es suficiente para un diseño apropiado.

Un número de procedimientos analíticos se han desarrollado en varios países que permiten a un ingeniero estructural evaluar un diseño para la comodidad de los ocupantes para una actividad específica. Generalmente, estos análisis requieren el cálculo de la primera frecuencia natural y la amplitud máxima de aceleración o la velocidad debido a una excitación de referencia.

Las herramientas de análisis representan años de investigación y se han demostrado que el rendimiento es útil bajo las predicciones de la aceptabilidad de respuesta de vibración de estructuras de armazón de acero sujetas a la actividad humana.

Este efecto vibratorio se ha estado estudiando desde hace 60 años aproximadamente, pero gracias al avance tecnológico existente se ha podido trabajar a detalle las consecuencias del mismo en la serviciabilidad de las estructuras.

Cabe destacar, que la investigación está enfocada en la nueva edición impartida por la AISC (American Institute of Steel Construction) Guía de Diseño N°11: “Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity” que intenta controlar el problema de las vibraciones para lograr el confort de las personas hacia las edificaciones, ya que este es una de los criterios principales de la serviciabilidad de las estructuras.

1.3 Alcance y Limitaciones

Para el estudio a desarrollar se utilizaran modelos de estructuras de acero de pórticos a momento con losas de secciones mixtas o compuestas y sistemas de piso con correas, su modelaje se hará utilizando los programas SAP2000 v19 y ETABS v16. Los resultados obtenidos no serán verificados mediante el uso de ensayos de laboratorio. Por otra parte, se verá limitado por la capacidad del programa de modelar la estructura propuesta.

Se limitara el estudio de las aceleraciones verticales producidas por los efectos vibratorios en las estructuras causadas por actividad humana.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

- Evaluar la serviciabilidad de las vibraciones en sistemas estructurales de acero sujetos a la actividad humana con predicción de la respuesta vibratoria aplicando el método de los elementos finitos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluación de las respuestas dinámicas de la edificación inducidas por el paso al caminar, al correr y por actividades rítmicas como: baile, aeróbicos o movimiento de público en multitudes con la aplicación del análisis del estado estacionario (Steady-state Analysis) característico de cada actividad humana

CAPÍTULO II: Marco Teórico

El fundamento teórico que a continuación se muestra tuvo como base la 2da Edición de la Guía de Diseño N° 11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016).

2.1 Terminología básica de Vibraciones Asociadas a la Actividad Humana

Amortiguación y amortiguamiento crítico.

Se refiere a la pérdida de energía mecánica en un sistema de vibración con el tiempo. El amortiguamiento se asocia con una fuerza de retardo que es proporcional a la velocidad.

Es la cantidad más pequeña de amortiguamiento viscosa para que un sistema de vibración libre que es desplazado del equilibrio y puesto en libertad llegue a descansar sin oscilación.

Amortiguamiento histerético.

Amortiguamiento proporcional al desplazamiento, y que está en fase con la velocidad.

Impulso efectivo.

Es una representación matemática de una pisada humana. Se utiliza para escalar la respuesta de impulso por unidad de un solo grado de libertad del sistema a la respuesta del sistema de un paso humano.

Equivalente pico de aceleración sinusoidal (ESPA).

Es la amplitud de la aceleración sinusoidal que tendría aproximadamente el mismo efecto sobre los ocupantes del evento caminar. La aceleración debida a pie suele ser transitoria, por lo que es no directamente comparable a los límites de tolerancia que son típicos expresados como aceleraciones sinusoidales. El ESPA es el producto de la máxima circulación de la raíz cuadrada media (RMS) de la forma de onda de la aceleración al caminar y la raíz de 2, que es la relación de pico de aceleración RMS de una senoide.

Análisis modal experimental (EMA).

Es el proceso de la aplicación de una fuerza medida a la estructura, midiendo las aceleraciones resultantes y el post-procesamiento de los datos para determinar las propiedades modales del sistema estructural.

Criterio de evaluación.

Una desigualdad utilizada para predecir si será o no la vibración objetable. Cada criterio se compone de una respuesta de vibración estructural y pronosticando un límite de tolerancia.

Series de Fourier.

Una serie de sinusoides; usados para representar las fuerzas inducidas por el hombre. Cada plazo sinusoidal se conoce como armónico y se caracteriza por su amplitud, frecuencia y fase de retardo.

Función de respuesta de frecuencia (FRF).

Una función de respuesta de frecuencia es un gráfico de respuesta sinusoidal (relación de amplitud de la aceleración a la fuerza amplitud (%g/kgf) frente a la frecuencia. Altas magnitudes de FRF indican que las frecuencias naturales dominan.

Masa modal fundamental y masa efectiva.

La masa modal fundamental, también llamado masa efectiva del sistema estructural, es la masa de un sistema de un solo grado de libertad cuya respuesta estacionaria de fuerza sinusoidal es igual a la respuesta del sistema estructural que está siendo evaluado.

Frecuencia armónica y sub-armónicos.

Una frecuencia armónica es un número entero múltiplo de la frecuencia paso. Por ejemplo, el armónico las frecuencias de una frecuencia de paso de 2 Hz son 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, etc. Una frecuencia de sub-armónico es una subdivisión de un número entero frecuencia. Por ejemplo, el cuarto de frecuencia sub-armónicos de una frecuencia natural de 8 Hz es de 2 Hz.

Impulso, impulso unitario y la respuesta de impulso unitario.

Un impulso es una fuerza máxima que actúa por un tiempo extremadamente corto de duración. Los impulsos se expresan utilizando unidades de fuerza-tiempo tales como kgf-s. Cuando un sistema de un solo grado de libertad se somete a un impulso unitario, la respuesta de impulso unidad resultante se caracteriza por un pico de velocidad proporcional a la inicial y es recíproco de la masa seguida del decaimiento sinusoidal a la frecuencia natural.

Los sistemas de baja y alta frecuencia.

Un sistema de baja frecuencia es el que puede someterse a una acumulación de resonancia debido a la carga dinámica aplicable por actividad humana. Una acumulación de resonancia puede ocurrir si al menos una respuesta de modo natural, tiene una frecuencia menor que la considerada frecuencia armónica máxima. Un sistema de alta frecuencia es aquel que no puede someterse a una acumulación de resonancia debido a la carga dinámica aplicada porque todas las frecuencias de respuesta son mayores que el máximo considerado frecuencia armónica. La respuesta de un sistema de alta frecuencia se asemeja a una serie de respuestas de impulsos individuales a pasos individuales.

Análisis modal.

Un método analítico o experimental para la determinación de las frecuencias naturales y las formas de los modos de una estructura, así como las respuestas estructurales del individuo modos a una excitación dada.

Modalidad de forma

Cuando una estructura vibra libremente en un modo particular, se mueve con una determinada configuración de deflexión y hace referencia como una forma del modo. Cada frecuencia natural tiene una forma del modo asociado con él.

Frecuencia natural, libre de vibraciones, frecuencias modales, frecuencia natural fundamental y la frecuencia dominante.

La frecuencia natural es una frecuencia a la que un cuerpo o estructura vibrará cuando es desplazada y luego puesto en libertad limpiamente. Este estado de vibración se refiere a la

vibración libre. Todas las estructuras tienen un gran número de frecuencias naturales que también son reflejadas como frecuencias modales; la frecuencia más baja se hace referencia como la frecuencia natural fundamental y generalmente es de mayor preocupación. La frecuencia dominante es la frecuencia con la mayor cantidad de energía o la respuesta más alta en comparación a todas las demás frecuencias.

Periodos y frecuencias.

Período es el tiempo, entre las excursiones máximas sucesivas en uniformemente repetitivas o de estado estacionario. Período se asocia con funciones de tiempo de armónicos (o sinusoidales) y periódicas (repetitivas). La frecuencia es el recíproco de tiempo y por lo general se expresa en hercios (ciclos por segundo).

Resonancia.

Es el aumento en la amplitud del movimiento de la estructura debido a la aplicación de una fuerza pequeña en fase con el movimiento. Si la frecuencia armónica de una fuerza de excitación es igual a la frecuencia natural de la estructura, la resonancia va a ocurrir.

Acumulación de resonancia.

Si una frecuencia armónica de una fuerza de excitación es igual a la frecuencia natural de la estructura que inicialmente está en reposo, la vibración se incrementará. Si se aplica la fuerza para una corta duración, como con la mayoría de las cargas inducidas por el hombre, ocurrirá una acumulación de resonancia parcial. Si se aplica la fuerza para una larga duración, de estado estacionario se consigue el movimiento.

Espectros y aceleraciones espectrales

Un espectro muestra la variación de amplitud relativa, por frecuencia, de los componentes de vibración de un tiempo de la historia de formas de onda, tales como cargas o movimientos. Cualquier historial de tiempo de forma de onda, tales como la fuerza o aceleración puede ser equivalente representada por una serie infinita de sinusoides con diferentes frecuencias, magnitudes y fases.

Un espectro, es un gráfico de estas magnitudes frente a la frecuencia. Magnitudes en un espectro tienen las mismas unidades que la forma de onda (%g), y por lo general representan amplitudes (pico) o los valores de la raíz cuadrada media (RMS).

El movimiento en estado estacionario y la respuesta de impulso transitoria.

Si un sistema estructural se somete a una continua carga de armónicos, la respuesta de vibración será sinusoidal.

Si un sistema estructural se somete a una carga transitoria tal como una serie de pasos, la respuesta de vibración será una combinación de componentes de frecuencia. Tal vibración se denomina como movimiento transitorio. Si un sistema estructural se somete a una carga impulsiva, el impulso respuesta consistirá en una respuesta de pico inicial seguida de una descomposición de vibración.

Frecuencia de paso.

Frecuencia con la que un paso o varios pasos de impacto la estructura de soporte, por ejemplo, caminar, correr, bailar o hacer ejercicios aeróbicos.

Forma de onda.

Es un gráfico de una función, que representa una carga dinámica o una aceleración en función del tiempo. También se conoce como una historia de tiempo o una representación de dominio de tiempo.

2.2 Principios de la respuesta estructural relacionados con la actividad humana.

En un número creciente de casos, las estructuras responden indebidamente al movimiento humano, lo que resulta en vibraciones perturbadoras o incluso perjudiciales. Las estructuras destinadas a cargas vivas moderadas de una naturaleza estática se diseñan a menudo con dimensiones más delgadas, la posibilidad de que la carga dinámica pueda gobernar el diseño se pasa por alto o subestima. Otro factor es la llegada de nuevos tipos de actividades para los usuarios, tales como clases de aeróbicos al acompañamiento de música fuertemente rítmica en gimnasios, lo que puede traer una carga dinámica considerable. Aunque la sobrecarga de la propia estructura no es la principal preocupación, los elementos de construcción secundarios (por ejemplo, los revestimientos, las ventanas) pueden dañarse y la comodidad de las personas se puede ver afectada. Uno es generalmente más sensible a las vibraciones inducidas por alguien más que aquellos que son en parte debido a la propia actividad. Por lo tanto, las vibraciones inducidas por el hombre son básicamente un problema de serviciabilidad.

2.2.1 Carga dinámica debido a movimientos humanos.

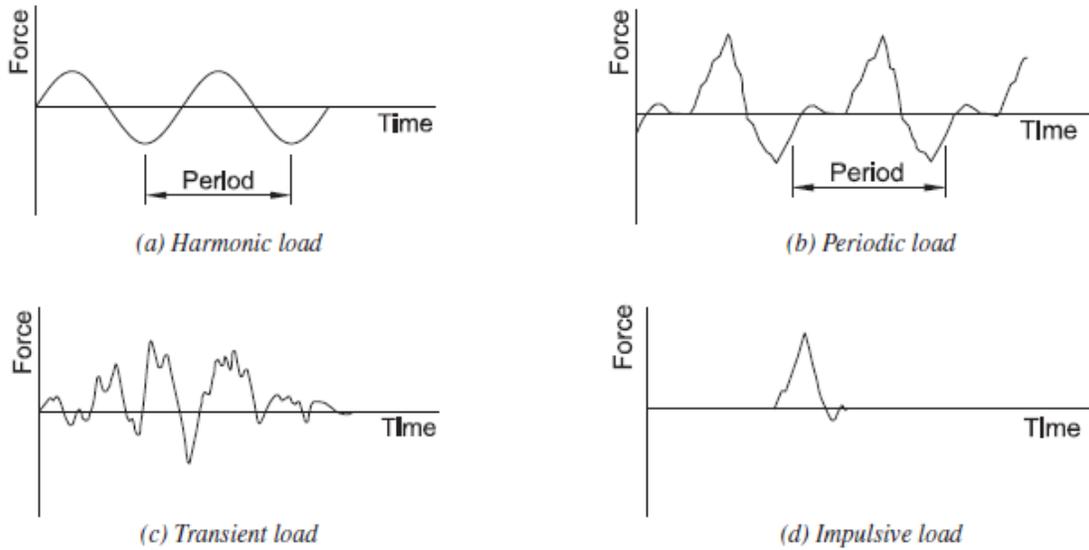
Las personas pueden generar varios tipos de cargas dinámicas por su actividad física. Las cargas dinámicas se pueden clasificar como armónica, periódica, transitoria e impulsiva. Las cargas armónicas o sinusoidales, se asocian por lo general con maquinaria rotativa pero este no es el caso a estudiar.

Las cargas periódicas pueden ser causadas por las actividades humanas rítmicas como la danza y movimientos aeróbicos ya que suelen generar impactos repetitivos. Por supuesto, hay otras formas de movimiento tales como saltos rítmicos durante clases de aptitud, sesiones de diversos tipos de bailes, el balanceo del cuerpo en un concierto, etc., se incluyen o pueden ser una combinación de esas formas.

Las cargas transitorias se producen a partir del movimiento de las personas, incluyen caminar y correr. Resultan principalmente de un movimiento de sacudida que imparte un solo impulso a un miembro estructural (por ejemplo, aterrizaje en un piso después de saltar desde una posición elevada, etc.)

Las cargas periódicas dependen de su función de tiempo, así como de su frecuencia en el ritmo y el tipo de movimiento. La función de tiempo de la carga periódica revela que las fuerzas considerables no sólo se transmiten en la frecuencia real del ritmo de andar, saltar o bailar, sino también en las frecuencias de armónicos superiores e inferiores.

Figura # 1: Tipos de cargas dinámicas



Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

Las formas de onda de fuerza y los espectros indican contribuciones significativas en la frecuencia de paso y sus primeros armónicos, donde las magnitudes de fuerza disminuyen con aumento del número de armónicos y son insignificantes allá el tercero o cuarto armónico.

De este modo, las fuerzas inducidas por el hombre están convenientemente representadas por la serie de Fourier:

$$F(t) = Q + \sum_{i=1}^N \alpha_i Q \sin(2\pi f_{step} * t - \phi_i)$$

Ecuación # 1

Donde,

N = número de armónicos considerados, es decir, el número de armónicos con amplitudes significativas.

Q = peso corporal, kgf

f_{step} = frecuencia de paso, Hz

i = número armónico

t = tiempo, s.

α_i = coeficiente dinámico (relación de la magnitud de la fuerza armónica al peso corporal) para el i -ésimo armónico

ϕ_i = retardo de fase para el i -ésimo armónico, rad

Un método de predicción de la respuesta se inicia con una estimación de los modos de vibración natural, cada uno de los cuales se caracteriza por su frecuencia natural, el modo de forma, la amortiguación y masa modal. La teoría de la vibración se adapta para ser utilizada junto con el análisis de elementos finitos (FEA) para predecir las frecuencias naturales y el modo de formas.

Cuando la estructura se ve obligada a una frecuencia natural, su capacidad de respuesta es inversamente proporcional para la amortiguación modal. También es inversamente proporcional a la masa modal correspondiente, que depende de la masa uniforme y el grado en que las acciones de movimiento de la masa total. Por último, la respuesta es directamente proporcional a los valores de formas modales en la fuerza y la respuesta dinámica.

La frecuencia natural fundamental determina el tipo de respuesta de vibración a las actividades humanas. Si la frecuencia fundamental es suficientemente baja como para ser igualada por una frecuencia armónica, entonces la respuesta máxima será una resonante de acumulación. Se conoce un sistema que permite una respuesta tal como un sistema de baja frecuencia, típicamente de menos de 9 Hz.

Si la frecuencia fundamental es mayor que el máximo considerado como frecuencia armónica, la resonancia no es posible, y la respuesta será similar a una serie de respuestas de impulso, cada uno con un pico inicial seguido del decaimiento hasta que se aplique el siguiente paso.

Una serie de respuestas de impulso de pasos individuales, es un sistema con una frecuencia fundamental lo suficientemente alta para impedir respuestas resonantes y por lo tanto sólo permiten respuestas de impulsos individuales, lo que se conoce como un sistema de alta frecuencia. Las respuestas de alta frecuencia son casi siempre relativamente pequeñas, pero todavía pueden causar problemas cuando el límite de tolerancia es estricto.

El espectro de un caso típico de resonancia acumulada debido a una persona caminando sobre una estructura indica pequeñas respuestas a la primera, segunda, tercera y cuarta armónicas. La gran mayoría de la respuesta se debe a la resonancia provocada por el tercer armónico. Es típico que una fuerza armónica coincida con una frecuencia natural y a menudo con la frecuencia fundamental para contribuir con casi la totalidad de la respuesta. Así, la respuesta de resonancia se puede aproximar por la respuesta del modo fundamental, que se calcula utilizando la teoría de las vibraciones.

2.2.2 Funciones de Fuerza

Han existido estudios experimentales, donde en la mayoría los sujetos caminaron a través estructuras o plataformas instrumentadas que midieron la fuerza en formas de onda. Las mismas formas de onda medidas no son de utilidad para el desarrollo de las ecuaciones de predicción de respuesta, ya que son funciones del tiempo que poseen complicadas soluciones. Además, las formas de onda de fuerza no se pueden usar en un análisis de historia de respuestas para predecir la respuesta estructural porque pequeños cambios en la forma de onda a menudo resultan en grandes cambios en el espectro de la fuerza y por lo tanto grandes cambios en la respuesta predicha de la vibración.

Por estas razones, las formas de onda deben ser convertidas a las representaciones matemáticas útiles hacia la predicción de la respuesta de vibración. La serie de Fourier es una suma de sinusoides y es la representación para este estudio de una fuerza para una predicción de respuesta de resonancia.

Un impulso eficaz es la representación de las predicciones de respuesta pico de un solo paso. Las formas de onda medidas por las Series de Fourier para diversas actividades individuales han sido transformadas en espectros correspondientes. Los valores en las frecuencias armónicas son estimaciones del coeficiente dinámico para cada fuerza armónica

significativa. Los experimentos realizados para este estudio de vibraciones también proporcionaron estimaciones del rango esperado de las frecuencias de paso. En algunos casos, se determinaron los retardos.

La serie de Fourier de la Ecuación #1 está formado a partir de los coeficientes dinámicos obtenidos experimentalmente, los rangos de frecuencia de pasos y de fase de retardos.

La frecuencia de paso, causa la máxima respuesta seleccionada dentro del rango de modo que una frecuencia armónica coincide con una frecuencia natural y causen resonancia. La Ecuación #2 es similar a la Ecuación #1, pero sin el término constante, lo que representa la fuerza estática y no se utiliza durante este estudio en la predicción de vibración estructural respuesta.

$$F(t) = Q + \sum_{i=1}^4 Q \propto i \sin(2\pi i f_{step} * t - \phi_i)$$

Ecuación # 2

Para las actividades rítmicas, la serie de Fourier se especializa para grupo uniformes de cargas dinámicas, $P(t)$, en unidades MKS, como sigue:

$$P(t) = \sum_{i=1}^N wp \propto i \sin(2\pi i f_{step} * t - \phi_i)$$

Ecuación # 3

Donde, wp es la mejor estimación del peso unitario ejercida por la actividad rítmica de los participantes distribuidos sobre la estructura en libras por pie cuadrado, determinado según el peso corporal y el espaciamiento entre participantes.

La Tabla #1 muestra el resumen de los parámetros de las series de Fourier por Rainer (1988), por Willford (2007) y Smith (2007). Criterios que predicen con mucha precisión la aceptabilidad. Para el caso de actividad rítmica, los parámetros recomendados para su uso según la Ecuación #3 se muestran en la Tabla #2.

Tabla # 1: Parámetros de la Serie de Fourier por actividad humana.

Table 1-1. Fourier Series Parameters for Individuals					
Activity	Source	Q, lb	f_{stop} Range, Hz	Dynamic Coefficients, α_i	Phase Lag, ϕ_i , radians
Walking	Rainer et al. (1988) Allen and Murray (1993)	157	1.6–2.2	0.5, 0.2, 0.1, 0.05	—
	Willford et al. (2007) Smith et al. (2007) Davis and Murray (2010)	168	1.6–2.2	0.4, 0.07, 0.06, 0.05	0, $-\pi/2$, π , $\pi/2$
Running	Rainer et al. (1988)	*	1.6–4.0	1.4, 0.4, 0.2, 0.1	—
	Bachmann et al. (1995)	*	2.0–3.0	1.6, 0.7, 0.2	—
	ISO (2007)	*	2.0–4.0	1.4, 0.4, 0.1	—
Stair descent	Kerr and Bishop (2001) Davis and Murray (2009) Davis and Avci (2015)	168	1.6–4.0	1.1, 0.2, 0.09, 0.06	—

*Depends on running event: 150 to 175 lb for recreational runners; 250+ lb for American football or rugby players.

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

Tabla # 2: Parámetros de la Serie de Fourier para actividades rítmicas.

Table 1-2. Fourier Series Parameters for Groups					
Activity	Source	w_p^a , psf	f_{stop} Range, Hz	Dynamic Coefficients, α_i	Phase Lag, ϕ_i , rad
Group dancing	NRCC (2010a)	12.5	1.5–2.5	0.5, 0.05	—
Lively concert or sports event	NRCC (2010a)	31.0	1.5–3.0	0.25, 0.05	—
Aerobics	NRCC (2010a)	4.2	2.0–2.75	1.5, 0.6, 0.1	
Normal jumping	Smith et al. (2007)	3.9 ^b	1.5–2.8	1.8, 1.3, 0.7, 0.2	$\pi/6$, $-\pi/6$, $-\pi/2$, $-5\pi/6$

a See Table 5-2 for assumed area per person or couple.
b Because of lack of coordination of large groups, reduction factors ($\alpha_1 = 1.61p^{-0.082}$, $\alpha_2 = 0.94p^{-0.24}$, $\alpha_3 = 0.44p^{-0.31}$), where p is the number of participants in the activity ($2 \leq p \leq 64$), may be applied to w_p .

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

2.3 Criterio de Evaluación y Límites de tolerancia para el Bienestar y Comodidad Humana.

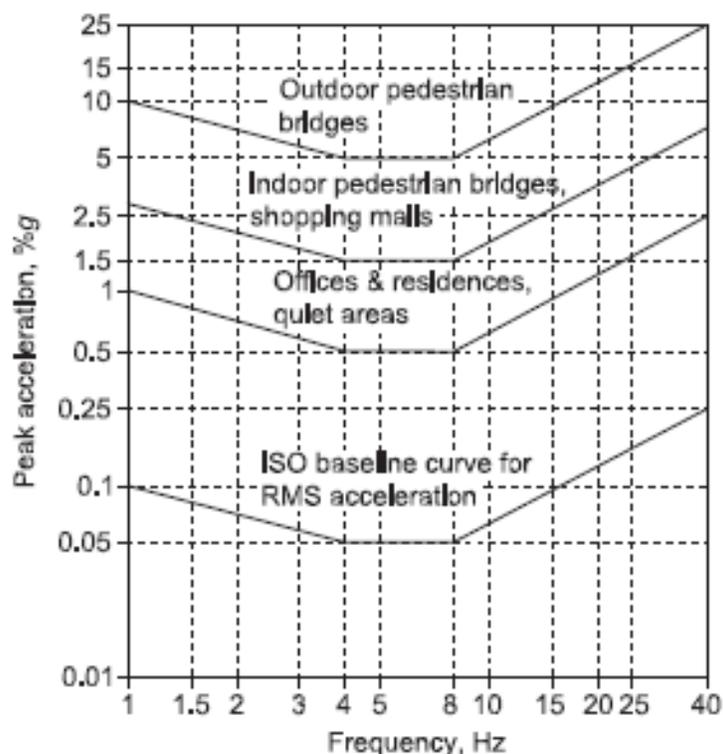
La respuesta humana al movimiento estructural es un fenómeno muy complejo que implica la magnitud del movimiento y la sensación que causa al ocupante. Un movimiento continuo (estado estacionario) puede ser más objetable que el movimiento causado por un impacto poco frecuente (transitorio).

La reacción de las personas que sienten vibración depende de lo que están haciendo. Las personas en oficinas o residencias no les gusta la vibración "claramente perceptible" (la aceleración pico por encima del 0,05 de la aceleración de la gravedad, 0,5% g), mientras que las personas que participan en una actividad aceptarán vibraciones 10 a 30 veces mayores (5% a 15% g o más).

Las personas que cenar al lado de una pista de baile, levantando pesas al lado de un gimnasio de aeróbic, o de pie en un centro comercial o cercano a una pista de correr aceptará algo entre (aproximadamente 1,5% g). La sensibilidad dentro de cada ocupación también varía con la duración de la vibración y la lejanía de la fuente. Se observa que estos límites son para frecuencias de vibración entre 4 Hz y 8 Hz, que es el rango de frecuencias de resonancia de los órganos internos humanos. Fuera de este rango de frecuencia, la gente acepta aceleraciones más altas.

La aceleración máxima de pisos, pasarelas y vías debe ser comparada con los límites mostrados en la Figura #2.

Figura # 2: Límites de tolerancia recomendados para la actividad humana.



Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

2.3.1 Criterios de evaluación recomendados la actividad de caminar

El criterio de diseño para excitaciones debidas al caminar de las personas se basa en la respuesta dinámica correspondiente a la estructura de acero.

El criterio puede ser usado para evaluar la relación concreto/acero enmarcados en los sistemas estructurales de soporte de oficinas, residencias, iglesias, escuelas, gimnasios y otros espacios, así como centros comerciales.

Las frecuencias de paso al caminar oscilan entre 1,6 Hz y 2,2 Hz y el rango promedio es de aproximadamente 1,9 Hz a 2,0 Hz. Como se muestra en la tabla #3, la frecuencia armónica máxima es cercana a 9 Hz. Por lo tanto, la resonancia debida a caminar no es posible si la frecuencia natural del piso está por encima de esta frecuencia.

Tabla # 3: Coeficiente dinámicos y Frecuencias de fuerza para caminar.

Table 2-1. Walking Forcing Frequencies and Dynamic Coefficients		
Harmonic i	Person Walking	
	f_{step}, Hz	α_i
1	1.6–2.2	0.5
2	3.2–4.4	0.2
3	4.8–6.6	0.1
4	6.4–8.8	0.05

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

El criterio de bienestar y comodidad humana recomendado para la evaluación de la vibración del piso debido a caminar en pisos de baja frecuencia ($f_n \leq 9$ Hz) es el caso más estudiado, ya que estos suelos están sujetos a acumulación de resonancia.

Los pisos de alta frecuencia no experimentan resonancia debida a la acción caminar; por lo que las quejas de los ocupantes debido a vibraciones objetables de pisos de alta frecuencia ($f_n > 9$ Hz) son raras. En cambio, la respuesta al caminar se parece a una serie de respuestas de impulso a pasos individuales. A continuación se presenta una estimación de la vibración tomando como referencia los armónicos que coinciden con las frecuencias naturales.

Tabla # 4: Armónicos que coinciden con la frecuencia natural de pisos de alta frecuencia.

Table 2-2. Harmonic Matching the Natural Frequency of High-Frequency Floors	
f_n, Hz	h
9–11	5
11–13.2	6
13.2–15.4	7

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

La respuesta de un piso debido a la actividad humana suele ser mayor cuando el suelo está ligeramente cargado. Por lo tanto, deben utilizarse estimaciones de cargas muertas y vivas reales o esperadas del día a día.

Las cargas variables recomendadas para el análisis de vibraciones se muestran en la Tabla #5, donde una oficina con pesados escritorios, grandes cantidades de papel, archivadores y librerías es más pesada. Una oficina electrónica con estaciones de trabajo ampliamente espaciadas, pocos escritorios son mucho menos pesadas. Un "área de ensamblaje" es una sala de reuniones o un espacio similar con pocos muebles que no sean sillas.

Las quejas por vibraciones en áreas de reunión, incluyendo escuelas e iglesias, usualmente ocurren cuando hay pocas personas en el piso, por ejemplo, un maestro y uno o dos estudiantes, no la clase entera. Lo mismo es cierto para los centros comerciales. Por lo tanto, para estas situaciones, se recomienda una carga de 0 psf para la predicción de la respuesta de vibración, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla # 5: Cargas variables sobrepuestas recomendadas para análisis vibratorios para caminar.

Table 3-1. Recommended Superimposed Live Loads for Walking Vibration Analyses	
Occupancy	Recommended Live Load, psf
Paper office	11
Electronic office	6–8
Residence	6
Assembly area	0
Shopping mall	0

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

Los límites de tolerancia de aceleración recomendados, A_o / g , se encuentran en la Tabla #6. Estos límites son ligeramente conservadores para las frecuencias naturales entre 3 Hz y 4 Hz y 8 Hz y 9 Hz en comparación con los valores de la Figura #2, pero se recomiendan para simplificar el diseño. Los sistemas de piso con frecuencias fundamentales inferiores a 3 Hz deben evitarse en general, ya que son susceptibles de ser sometidos a "saltos fuertes de cierta cantidad de personas". Si $f_n < 3$ Hz, el sistema debe ser evaluado usando los criterios de una estructura sometida a actividades rítmicas.

Tabla # 6: Límites de tolerancia recomendados para picos de edificaciones.

Table 4-1. Recommended Tolerance Limits for Building Floors	
Occupancy	Acceleration Limit $a_o/g \times 100\%$
Offices, residences, churches, schools and quiet areas	0.5%
Shopping malls	1.5%

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016).

2.3.2 Criterios de Evaluación recomendados para correr

Para actividades humanas como correr se ha realizado menos investigaciones sobre la respuesta de pisos que para la actividad de caminar. No se recomiendan límites de la aceleración en la literatura para sistemas de piso sometidos a esta actividad humana. Sin embargo, es razonable recomendar los límites mostrados en la Figura #2, donde para esta actividad toman como aceptable hasta 1,5%g se seleccionó una categoría dependiendo de la ubicación de la actividad y de la ocupación afectada.

Existen investigaciones que indican coeficientes dinámicos para correr con rangos de frecuencia de pasos recomendados y coeficientes dinámicos, estos se muestran en la Tabla #1. Los primeros coeficientes armónicos dados están en el rango de 1.4 a 1.6, para los rangos de frecuencia de 1.6 Hz a 4 Hz. Las pistas de correr con frecuencias naturales en este rango no deberían suceder, por lo tanto, tendrán que ser más grandes para prevenir altas aceleraciones. Es recomendable que las estructuras de soporte para esta actividad tengan todas las frecuencias naturales de 4Hz o más.

Con esta limitación se tiene en cuenta que puede ocurrir acumulación de resonancia con una frecuencia estructural tan alta como 16 Hz.

La fuerza ejercida por correr está representada por la serie de Fourier en la Tabla siguiente:

Tabla # 7: Coeficientes dinámicos y frecuencias debido a la fuerza ejercida por correr.

Table 2-3. Running Forcing Frequencies and Dynamic Coefficients		
Harmonic, i	if_{stop}, Hz	α_i
1	1.6–4	1.4
2	4–8	0.4
3	8–12	0.2
4	12–16	0.1

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016).

2.3.3 Criterios de Evaluación recomendados para actividades rítmicas.

Los criterios establecidos para el diseño de estructuras sometidas a actividades rítmicas se basan en el Código Nacional de Construcción de Canadá (NRCC, 2010a; NRCC, 2010b), pero modificado debido a las experiencias e investigaciones.

Los criterios se pueden utilizar para evaluar los sistemas estructurales de soporte como gimnasia, baile, la participación del público y eventos similares durante la totalidad o parte del lapso en los pisos, siempre que la función de carga sea conocida. La Tabla #8 proporciona frecuencias de fuerzas comunes y los coeficientes dinámicos para actividades rítmicas.

Tabla # 8: Coeficientes dinámicos y frecuencias debido a la fuerza ejercida por actividades rítmicas.

Table 2-4. Rhythmic Forcing Frequencies and Dynamic Coefficients						
Harmonic, i	Group Dancing		Lively Concert		Aerobics	
	if_{stop}, Hz	α_i	if_{stop}, Hz	α_i	if_{stop}, Hz	α_i
1	1.5–2.7	0.5	1.5–2.7	1.25	2.0–2.75	1.5
2	3.0–5.4	0.05	3.0–5.4	0.026	4.0–5.5	0.6
3	—	—	—	—	6.0–8.25	0.1

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

Los límites de tolerancia de aceleración en la Tabla #9 son para las ocupaciones afectadas en el piso debido a la actividad. La forma de modo fundamental se puede utilizar para estimar las aceleraciones en otros lugares sensibles del edificio y esas aceleraciones estimadas se comparan con los límites de tolerancia en la Tabla #9.

Tabla # 9: Límites de tolerancia recomendados para la aceleración en edificaciones sometidas a actividades rítmicas.

Table 5-1. Recommended Tolerance Acceleration Limits for Rhythmic Activities in Buildings	
Affected Occupancy	Tolerance Acceleration Limit, a_d, %g
Office or residential	0.5
Dining	1.5-2.5
Weightlifting	1.5-2.5
Rhythmic activity only	4-7

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

El parámetro estructural más importante que debe tenerse en cuenta en la prevención de los problemas de vibración del edificio debido a las 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 #10) y la transmisión de vibración a las ocupaciones sensibles del edificio. De menor importancia son el peso soportado, el peso y la relación de amortiguación, β .

Para el área utilizada por la actividad rítmica, el peso distribuido de los participantes, w_p , se puede estimar a partir de la Tabla #10. En los casos en que los participantes ocupan sólo una parte del tramo, el valor de w_p se reduce en base a un efecto equivalente (momento o deflexión) para un período de carga completa. Los valores de α_i e $ifstep$ se recomiendan en la Tabla #10.

Tabla # 10: Parámetros de cargas dinámicas para eventos rítmicos.

Table 5-2. Dynamic Loading Parameters for Rhythmic Events			
Activity	Harmonic Frequency, f_{step} , Hz	Distributed Weight of Participants, w_p , psf	Dynamic Coefficient, α_i
Dancing:			
First harmonic	1.5-2.7	12.5	0.50
Second harmonic	3.0-5.4	(25 ft ² per couple)	0.05
Lively concert (fixed seating):			
First harmonic	1.5-2.7	31.0	0.25
Second harmonic	3.0-5.4	(5 ft ² per person)	0.05
Aerobics:			
First harmonic	2.0-2.75	4.20	1.5
Second harmonic	4.0-5.50	(35 ft ² per person)	0.8
Third harmonic	6.0-8.25		0.1

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016).

2.3.4 Amortiguamiento

El coeficiente de amortiguamiento, β , se puede estimar usando los valores que se muestran en la Tabla #11, el amortiguamiento es acumulativo. Por ejemplo, una planta con techo y los conductos de soporte en un área de oficina electrónica tiene $\beta = \sum \beta_i = 0,01 + 0,01 + 0,005 = 0,025$, o 2,5% de amortiguamiento crítico.

DG11 y el SCI DG recomiendan coeficientes de amortiguamiento viscoso crítico de la losa desnuda de 1,0% y 1,1%, respectivamente. Se encontró que los valores de amortiguación medidos para las losas desnudas variaban entre 0,17% del crítico y el 1.5% del crítico a pesar de que eran todas losas desnudas.

Tabla # 11: Valores de amortiguación recomendados.

Table 4-2. Recommended Component Damping Values for Use in Equation 4-1	
Component	Ratio of Actual Damping-to-Critical Damping, β_i
Structural system	0.01
Ceiling and ductwork	0.01
Electronic office fit-out	0.005
Paper office fit-out	0.01
Churches, schools and malls	0.0
Full-height dry wall partitions in bay	0.02 to 0.05*
*Depending on the number of partitions in the bay and their location; nearer the center of the bay provides more damping.	

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

2.4 Análisis De Elementos Finitos (FEA)

La predicción de respuesta de la vibración por el análisis de elementos finitos es necesario cuando el sistema estructural o cargas dinámicas caen fuera de las limitaciones de los métodos de cálculo manuales.

Los métodos de cálculos manuales son aplicables para estructuras regulares de distribución uniforme de masas. El Análisis de Elementos Finitos (FEA) se puede utilizar para predecir la respuesta de vibración para sistemas fuera del alcance de estos cálculos como por ejemplo los pisos en voladizo, pisos soportados por vigas de transferencia, puentes peatonales con soportes flexibles, en escaleras en zigzag sin apoyos intermedios, etc.

La evaluación de las vibraciones en estructuras utilizando FEA requiere en primer lugar, definir la parte de la estructura que se está evaluando en términos de su geometría, masa, rigidez y amortiguación. En segundo lugar, las propiedades dinámicas de frecuencias naturales y formas de los modos, que se logran predecir mediante el método de los auto-vectores y auto-valores (Eigenvalue Analysis). En tercer lugar, las cargas inducidas por el hombre están representadas por una serie de Fourier o impulso eficaz ya anteriormente descrito. En cuarto lugar, la respuesta se calcula y se compara con el límite de tolerancia para predecir si la vibración es o no objetable.

Para todas las cargas, la mayor respuesta se produce si una carga de frecuencia armónica (es decir, un múltiplo entero del paso de frecuencia) es igual a una frecuencia natural. Sin embargo, la frecuencia de carga debe estar en el rango de frecuencia de paso prevista para la actividad que fue evaluada. Por ejemplo, el rango de paso frecuencias para caminar es de 1.6 a 2.2 Hz, y por lo tanto, la frecuencia de carga debe estar en este rango.

FEA usualmente predice numerosos modos de vibración y a veces es difícil identificar visualmente los modos de respuesta, por lo que se limita utilizando la función de respuesta de frecuencia (FRF), que es un gráfico de capacidad de respuesta, en unidades %g/kgf, versus la frecuencia. Las respuestas de resonancia se predicen a partir del rápido y eficiente método FRF donde la aceleración es el producto de la máxima magnitud de la

carga inducida por el hombre. El análisis del tiempo se puede utilizar en su lugar, pero a menudo no es práctico, ya que es mucho más lento.

Una función de respuesta de frecuencia (FRF), en el análisis modal experimental, se entiende como una función de medición basada en frecuencia, utilizado para identificar las frecuencias de resonancia, amortiguación y formas de modo de una estructura.

2.4.1 Frecuencias y modos naturales

Las frecuencias naturales y las formas de los modos deben ser computadas resolviendo los múltiples grados de libertad de la no amortiguación de la vibración libre del método de auto-valores y auto-vectores (Eigenvalue Analysis).

El número de modos que se calcula por el programa debe ser tal que se incluyan los modos con frecuencia natural hasta aproximadamente el doble de la frecuencia fundamental.

Se seleccionará el número de modos para que la frecuencia modal más alta sea aproximadamente 9 Hz, generalmente razonable para pisos de baja frecuencia (las frecuencias naturales son aproximadamente inferiores a 10 Hz) y 20 Hz para pisos de alta frecuencia.

Además, es importante resaltar que el modelado de elementos finitos puede predecir las formas de modo a un grado moderado de precisión. Es muy improbable que el procedimiento de análisis prediga con claridad los modos de frecuencia más alta, por lo que el análisis a 20 Hz es razonable para su total precisión.

Las frecuencias naturales y las formas de modo son sólo el primer paso hacia el principal objetivo el cual se entiende como la predicción de la respuesta de aceleración al caminar humano. Por lo tanto se preverán numerosos modos. Generalmente es algo difícil, y a veces imposible, para determinar qué modo o modos serán sensibles en una estructura dada, observando simplemente las formas del modo.

La observación de las frecuencias naturales y el modo de predicción de formas es a menudo insuficiente para determinar las frecuencias que, si se hace corresponder con una frecuencia de carga dinámica, resultan respuestas altas.

Es difícil juzgar únicamente a través de la observación visual de las formas, cuál de estos modos proporcionará alta respuesta si es excitada la estructura. También, múltiples modos proporcionan contribuciones significativas en algunos casos, por lo tanto, la respuesta computarizada más alta puede ocurrir a una frecuencia distinta de una frecuencia natural.

Una función de respuesta de frecuencia (FRF) es la respuesta de un rango de estudio en estado estacionario debido a la carga sinusoidal con una unidad de amplitud frente a la frecuencia, se utiliza para determinar cuál o cuáles modos proporcionan la respuesta más alta, resolviendo así el problema. El gráfico FRF puede ser trazado mediante la realización del análisis de estado estacionario de aceleraciones.

2.4.2 Evaluación del Confort Humano en FEA

La respuesta máxima de una plataforma de baja frecuencia debe tener por lo menos una frecuencia natural por debajo de 9 Hz, esto se debe a múltiples pasos de cierta cantidad de personas lo que conlleva a una acumulación de resonancia, mientras que la máxima respuesta de un suelo de alta frecuencia se debe a pasos de un sólo individuo como un impulso respuesta.

2.4.2.1 Caminar en pisos de baja frecuencia

La respuesta resonante puede predecirse utilizando el método FRF en el que la aceleración sinusoidal máxima prevista es el producto de la magnitud FRF máxima, la amplitud armónica de la fuerza y un factor de acumulación resonante parcial.

La magnitud del FRF se calcula para la carga unitaria vertical en la ubicación de la carga de marcha y la aceleración vertical en la localización de los ocupantes afectados. Una acumulación de resonancia media es de aproximadamente seis pasos y la longitud media de la zancada es de aproximadamente 75 cm, por lo que la acumulación de resonancia media se debe a pasos a lo largo de una trayectoria de aproximadamente 5m de largo. Para evaluar la vibración más probable, el juicio de ingeniería debe ser usado para identificar un camino sin obstáculos lo más cerca posible del valor de forma de modo máximo. La ubicación de la carga para caminar debe establecerse cerca de la longitud media de la

trayectoria porque esta ubicación tiene el valor de la forma del modo promedio a lo largo de la trayectoria al caminar.

Si no se conoce la ubicación del ocupante afectado, debe ubicarse lo más cerca posible del valor de forma de modo máximo.

La frecuencia por debajo de 9 Hz, con magnitud FRF máxima, se conoce como la frecuencia dominante. Sin embargo, esto no siempre es una frecuencia natural, debido a las contribuciones de múltiples modos, especialmente cuando el amortiguamiento es alto y hay numerosos modos estrechamente espaciados.

El pico de aceleración sinusoidal pronosticado debido al caminar es:

$$ap = FRF_{Max} \alpha Q \rho$$

Ecuación # 4

Dónde,

FRF_{Max} = magnitud máxima de FRF a frecuencias inferiores a 9 Hz, % g / kgf

Q = peso corporal = 75,6 kgf

α = coeficiente dinámico

ρ = resonancia factor de acumulación

El coeficiente dinámico se calcula utilizando la siguiente ecuación, que se aproxima a la Willford et al. (2007) segundo a cuarto coeficientes dinámicos armónicos

$$\alpha = 0.09e^{-0.075fn}$$

Ecuación # 5

Dónde,

fn = frecuencia dominante, Hz

El siguiente factor de acumulación de resonancia es para seis pisadas acumuladas y se deriva de la función envolvente para una amortiguación viscosa de un solo grado de libertad del sistema sometido a la carga sinusoidal.

$$\rho = 50\beta + 0,25 \quad si \beta < 0,01$$

Ecuación # 6

$$\rho = 12.5\beta + 0,625 \quad \text{si } 0,01 \leq \beta < 0,03$$

Ecuación # 7

$$\rho = 1.0 \quad \text{si } \beta \geq 0,03$$

Ecuación # 8

Dónde,

β es el coeficiente de amortiguamiento viscoso.

Si la frecuencia dominante es inferior a 3 Hz, el suelo será vulnerable a saltos considerando a un grupo de personas que lo provoquen intencionalmente; debido a esto, la estructura debe ser evaluada también para grupos de cargas rítmicas.

2.4.2.2 Caminar en pisos de alta frecuencia

La aceleración máxima debida a un paso individual se calcula usando el método de impulso efectivo. Este método predice la aceleración pico inmediatamente después de un paso, una cantidad que no es directamente comparable a los límites sinusoidales de aceleración de pico de la Figura #2. Por lo tanto, debe convertirse a una aceleración pico sinusoidal equivalente (Davis l., 2014).

La magnitud del FRF se calcula para la carga unitaria en la posición de carga del tramo donde comienza a caminar la persona. Para determinar la vibración probable más severa, se requiere un juicio de ingeniería para identificar una ruta de caminar sin obstáculos de 1,5 a 3 metros de largo lo más cerca posible del valor de forma de modo máximo.

La ubicación de la carga para caminar, en el comienzo de la trayectoria, debe colocarse cerca de la longitud media de la trayectoria de caminata, ya que esta ubicación tiene el valor de forma de modo medio a lo largo de la trayectoria al caminar. Si no se conoce la ubicación del ocupante afectado, debe situarse lo más cerca posible del valor de forma de modo máximo. La frecuencia mínima FRF debe ser de aproximadamente 1 Hz por debajo de la frecuencia natural fundamental y la frecuencia máxima debe ser de aproximadamente 20 Hz.

La frecuencia de máxima magnitud FRF se conoce como la frecuencia dominante.

La aceleración máxima debida al modo m se predice utilizando:

$$A_{p,m} = 2\pi f_{n,m} * \varphi_{i,m} * \varphi_{j,m} * I_{eff,m}$$

Ecuación # 9

Dónde,

$f_{n,m}$ = frecuencia natural del modo m, Hz

$I_{eff,m}$ = impulso efectivo calculado para el modo m

$\varphi_{i,m}$ = modo matemático de valor de forma de la masa normalizada debido al paso

$\varphi_{j,m}$ = modo matemático de valor de forma de la masa normalizada debido ocupante afectado

El impulso efectivo es una función de la frecuencia de paso, f_{step} , tomada como la frecuencia dominante dividida por el número armónico, h. (observar valores en la Tabla #12). El impulso efectivo también requiere una estimación del peso corporal; Se recomienda $Q = 75,6$ kgf.

La respuesta total entre la aplicación de un paso y el siguiente se predice utilizando la Ecuación #16, que es una superposición de las respuestas de todos los modos con frecuencias no superiores a 20 Hz.

$$a(t) = \sum_{m=1}^{N \text{ MODES}} a_{p,m} * e^{-2\pi * f_{n,m} * \beta t} * \sin(2\pi f_{n,m} t)$$

Ecuación # 10

El valor pico de la Ecuación #10, no es directamente comparable con los límites de tolerancia de aceleración pico de sinusoidales en la Figura #2. Por lo tanto, la aceleración de pico sinusoidal equivalente se calcula usando la Ecuación #11, que es el producto del cuadrado medio de la raíz (RMS) de a (t) entre la aplicación de dos pasos y la relación de aceleración de pico a RMS para una senoide.

$$a_{ESPA} = \sqrt{2} * \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a(t)]^2 dt} \approx \sqrt{2} * \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{k=1}^N a_k^2}$$

Ecuación # 11

Dónde,

N = número de puntos de datos de aceleración discreta entre un paso y el siguiente

T = periodo de pasos, $s = 1 / f_{step}$

a_k = enésimo punto de datos de aceleración

Si el equivalente pico de aceleración sinusoidal predicho no supere el límite de tolerancia aplicable a partir de la Figura #2, la plataforma o lapso se prevé que sea satisfactoria.

Tabla # 12: Frecuencias dominantes para pisos de alta frecuencia según el número de armónicos.

Table 7-1. Harmonic Selection for High-Frequency Floors	
Dominant Frequency, Hz	<i>h</i>
9–11	5
11–13.2	6
13.2–15.4	7
15.4–17.6	8
17.6–20	9

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

2.4.2.3 Correr en pisos de nivel y pistas

Esta sección proporciona un método de evaluación para superficies niveladas, como pisos y pistas sujetas a actividades como correr.

Es posible que una frecuencia armónica de fuerza coincida con una frecuencia natural sensible y provoque una acumulación de resonancia. La evaluación es insatisfactoria si la aceleración máxima sinusoidal pronosticada excede el límite de tolerancia de confort humano.

La magnitud FRF se calcula para la carga unitaria en el lugar de carga en ejecución y la aceleración se calcula en la ubicación del ocupante afectado. Las superficies sujetas a correr normalmente tienen pocas obstrucciones, y los ocupantes no participantes pueden estar en cualquier lugar; Por lo tanto, la carga generada por correr y las ubicaciones de los

ocupantes afectados deben situarse de forma conservadora en la amplitud de los modos de forma máximo.

La frecuencia mínima FRF debe ser de aproximadamente 1 Hz por debajo de la frecuencia natural fundamental y la frecuencia máxima debe ser de al menos 17 Hz, lo que es 1 Hz por encima de la frecuencia máxima de forzamiento del cuarto armónico asociada con la ejecución. La magnitud FRF debe calcularse en todas las frecuencias naturales, más de 20 a 30 otras frecuencias entre las frecuencias mínima y máxima.

La frecuencia por debajo de 17 Hz, con magnitud FRF máxima, se conoce como la frecuencia dominante.

Si la frecuencia dominante es inferior a 3 Hz, el piso será vulnerable a saltos de personas (Grupos de personas intencionalmente excitando la estructura saltando); Por lo tanto, la estructura también debe evaluarse para las cargas rítmicas de grupo. La fuerza de carrera humana está representada por la serie de Fourier donde las Funciones de Fuerza, con frecuencia de paso, f_{step} , igual a la frecuencia dominante dividida por el número armónico, h , de la Tabla #13.

El coeficiente dinámico, α , también aparece en la Tabla #13. Para aplicaciones típicas, se recomienda un peso corporal, Q , de 75.6 kilos. Para otros grupos, por ejemplo, jugadores de fútbol, se debe considerar el peso corporal medio o máximo.

La aceleración máxima debida a la correr es:

$$a_p = FRF_{Max} * \alpha h * Q [1 - e^{-2\pi\beta h NSteps}]$$

Ecuación # 12

Dónde,

FRF_{Max} = magnitud máxima de FRF, % g / kgf

N_{steps} = número de pasos requeridos para cruzar la plataforma ≤ 10

Q = peso corporal

h = número del armónico que causa resonancia (Tabla #7)

αh = coeficiente dinámico (Tabla #7)

β = coeficiente de amortiguamiento viscoso.

Basado en la investigación de Pernica (1990) y Bachmann y Amman (1987), la aceleración debida a un grupo de corredores es el producto de la aceleración debida a un individuo y el mínimo de 2 o \sqrt{n} , donde n es el número previsto de corredores.

Si la aceleración pico pronosticada no excede el límite de tolerancia aplicable (Figura #2), se prevé que la plataforma o tramo sea satisfactoria.

Tabla # 13: Parámetros de la Serie de Fourier para la actividad correr.

Table 7-3. Fourier Series Parameter Selection for Running		
Dominant Frequency, Hz	<i>h</i>	α_n
1.6-4	1	1.4
4-8	2	0.4
8-12	3	0.2
12-16	4	0.1

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

2.4.2.4 Actividad rítmica en pisos y balcones.

Esta sección proporciona un método de evaluación para pisos y balcones sujetos a cargas rítmicas de grupos tales como aeróbicos, diferentes tipos de bailes, etc.

La respuesta resonante se predice utilizando el método FRF, en el que la aceleración sinusoidal máxima pronosticada es el producto de la magnitud FRF y la amplitud armónica de la fuerza. La evaluación es satisfactoria si la aceleración pico sinusoidal pronosticada no excede el límite de tolerancia de confort humano aplicable de la Figura #2

Se recomienda calcular la magnitud del FRF para la unidad de carga uniforme que cubra el área de carga prevista del grupo y la aceleración vertical en la ubicación del ocupante afectado. La frecuencia mínima FRF debe ser 1 Hz y la frecuencia máxima 12 Hz, que supera la función de fuerza de la frecuencia armónica máxima. La magnitud FRF debe calcularse en todas las frecuencias naturales, más 20 a 30 otras frecuencias entre las

frecuencias mínima y máxima. La frecuencia de la máxima magnitud FRF es la frecuencia dominante.

Las fuerzas dinámicas durante las cargas de grupos rítmicos son representadas por la serie de Fourier, con la frecuencia de paso seleccionada de modo que su armónico mínimo posible tenga una frecuencia que coincida con la frecuencia dominante.

Los parámetros de la serie de Fourier requeridos para el método FRF se dan en la Tabla #14.

El peso del participante, w_p , es una estimación para cada actividad y debe ajustarse si el peso anticipado del participante es significativamente diferente del valor listado. Las frecuencias armónicas se determinan mediante (1) la selección del armónico, h , para que coincida con la frecuencia dominante; (2) calcular la frecuencia del paso, f_{step} (tomado como la frecuencia dominante dividida por h); Y (3) calcular cada frecuencia armónica, if_{step} , donde i es el número armónico. Las amplitudes de la fuerza armónica son $w_p * a_i$. Si la frecuencia dominante excede la frecuencia armónica máxima, f_{step} se selecciona de tal manera que la respuesta predicha es maximizada. La aceleración pico pronosticada debido a cada fuerza armónica es el producto de la magnitud del FRF (% g / Kg/m²), a la frecuencia armónica, if_{step} , y la amplitud de la carga armónica:

$$A_{p,i} = FRF(if_{step})a_i * w_p$$

Ecuación # 13

Para predecir la aceleración pico, las aceleraciones pico debido a todos las fuerzas armónicas se combinan usando la regla de potencia de 1,5:

$$a_p = [\sum_i (a_{p,i})^{1.5}]^{1/1.5}$$

Ecuación # 14

Tabla # 14: Parámetros de la Serie de Fourier para Cargas de grupo rítmicos.

Table 7-4. Fourier Series Parameters for Rhythmic Group Loads		
Group Dancing, $w_p = 12.5$ psf		
Dominant Frequency, Hz	<i>h</i>	α
1.5–2.5	1	0.50
2.5–5	2	0.05
Lively Concert or Sports Event, $w_p = 31$ psf		
Dominant Frequency, Hz	<i>h</i>	α
1.5–3	1	0.25
3–6	2	0.05
Aerobics, $w_p = 4.2$ psf		
Dominant Frequency, Hz	<i>h</i>	α
2.0–2.75	1	1.5
2.75–5.5	2	0.6
5.5–8.25	3	0.1
Jumping Exercises, $w_p = 4.2$ psf		
Dominant Frequency, Hz	<i>h</i>	α
2.0–2.75	1	1.8
2.75–5.5	2	1.3
5.5–8.25	3	0.7
8.25–11	4	0.2

Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

CAPÍTULO III: Marco Metodológico

La metodología empleada para la realización del presente Trabajo Especial de Grado se puede desglosar en 4 etapas:

3.1 Obtención de información básica

Se realizó el estudio del software de análisis estructural, el cual permite a su vez el estudio mediante el Análisis de Elementos Finitos (FEM) de una estructura de acero con pórticos sometidos a momentos, losas de secciones mixtas o compuestas y sistemas de piso con correas con el correspondiente soporte técnico en normativas extranjeras ante la falta de documentación en las normativas vigentes venezolanas para la fecha.

3.2 Modelado de un sistema estructural de acero para interpretación de resultados

Con el uso del software de análisis estructural, se hizo un estudio de una estructura de acero para conocer el efecto de las vibraciones inducidas por el paso al caminar, al correr y por actividades rítmicas para conocer una predicción de la respuesta vibratoria y compararla con los límites de tolerancia establecidos por la normativa extranjera vigente.

A su vez, mediante el método de los elementos finitos conocer las respuestas dinámicas como frecuencias, aceleraciones y formas de modo con la interpretación de funciones de respuestas de frecuencias características de cada actividad humana.

3.3 Interpretación y análisis de resultados

Una vez realizada la simulación, se realizó un análisis de los elementos de la estructura, con el fin de garantizar que la edificación cumpla con los niveles de serviciabilidad para satisfacer el confort en los usuarios.

3.4 Recomendaciones y elaboración de tomo

Una vez comparados todos los resultados obtenidos, se emitieron recomendaciones para el diseño de edificaciones como gimnasios, centros comerciales, entre otros. Y las consideraciones que deberían ser tomadas en cuenta en nuevas normativas venezolanas sobre la serviciabilidad de las vibraciones en sistemas estructurales de acero. Posteriormente, se realizó el tomo correspondiente al Trabajo Especial de Grado.

CAPÍTULO IV: Desarrollo

4.1 Métodos de predicción analítica

Las predicciones analíticas de las propiedades modales y la respuesta de aceleración a las actividades humanas se realizaron para el modelo estructural presentado a continuación. El objetivo fue obtener predicciones que pudieran compararse con las mediciones para juzgar la exactitud de los métodos analíticos.

Las propiedades modales, las frecuencias naturales y las formas de los modos fueron predichas mediante el análisis de auto-valores y auto-vectores (Eigenvalue Analyses) con el uso del programa ETABS v.16 y las magnitudes de FRF de aceleración se pronosticaron utilizando el análisis de estado estacionario (Steady-state Analyses) mediante el uso del programa SAP2000 ya que es el software que facilita la realización de este estudio.

Cabe destacar, que el programa SAP2000 no trabaja con sistemas de piso losacero (steeldeck), por lo que se hizo un análisis previo para lograr la equivalencia entre modelar una losacero en ETABS v.16 y una losa maciza de concreto en SAP2000 el cual se demostrara más adelante.

Posteriormente se procedió al cálculo de las aceleraciones pico mediante el uso de ecuaciones establecidas por la 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016).

Todos los cálculos se realizaron utilizando el sistema MKS: Kgf, m, seg. y °C

4.2 Definición de la estructura.

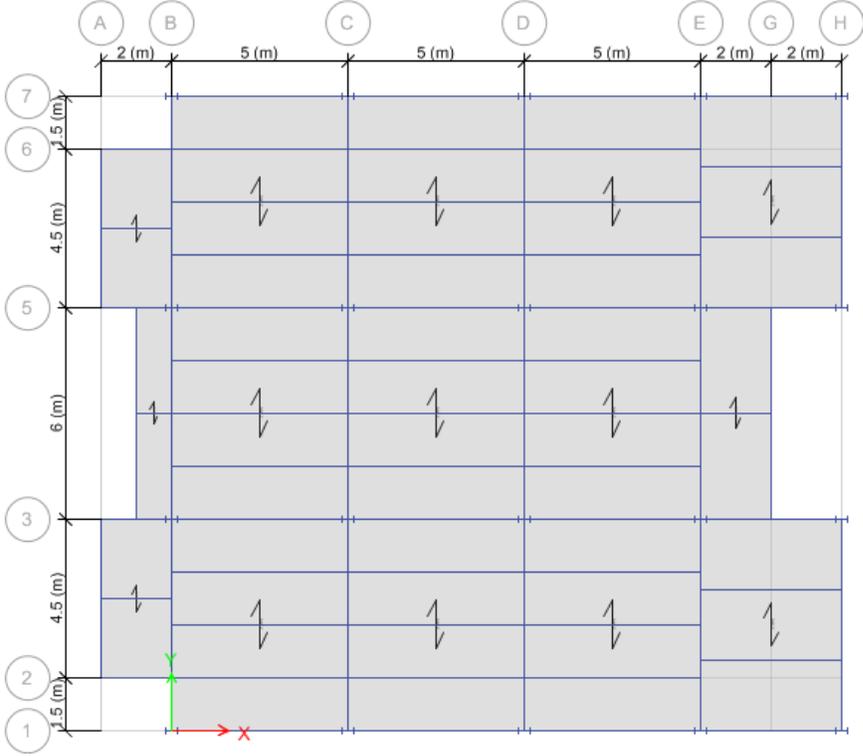
El sistema estructural que se va a estudiar será evaluado en cuanto a vibraciones debidas a actividades humanas como caminar, correr y a actividades rítmicas para objeto de estudio de las respuestas y su comparación.

4.2.1 Características geométricas de la estructura

El piso soporta un espacio designado a un gimnasio de una planta de altura igual a 2,88m. Se define como una estructura de acero de pórticos a momento con losas de secciones mixtas y sistemas de piso con correas. Debido a que la estructura es irregular se

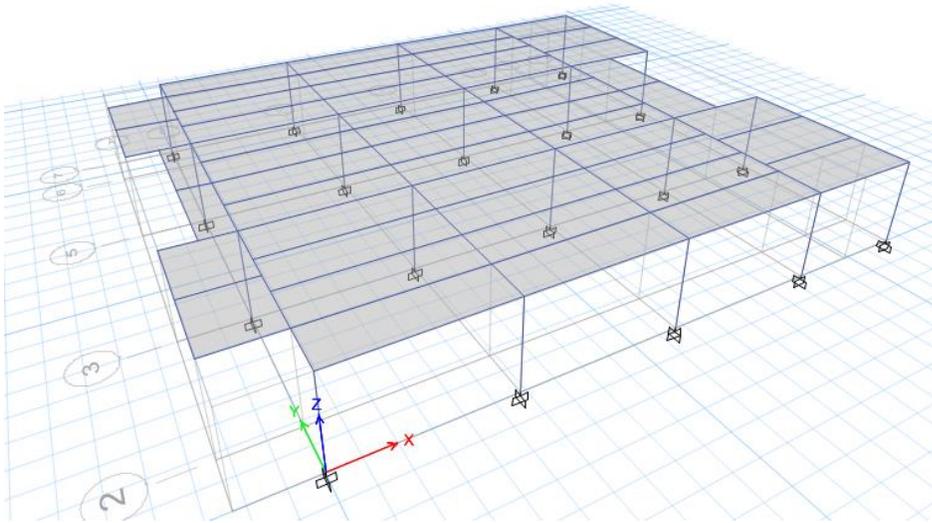
evalúa mediante el análisis de elementos finitos. La geometría de la edificación se muestra a continuación.

Figura # 3: Vista en planta de la estructura.



Fuente: Realizado por los autores en ETABS.

Figura # 4: Vista 3D de la estructura.



Fuente: Realizado por los autores en ETABS.

4.2.2 Equivalencia entre Losa maciza (SAP2000) y Losacero (ETABS v.16).

Ya que el objetivo de utilizar el programa SAP2000 es evaluar la estructura con el método de Análisis del Steady-state y el software no trabaja con sistemas de piso losacero se realizó un estudio previo del comportamiento de la estructura para corroborar que las respuestas estructurales de la losacero de calibre 1,5" modelada en ETABS v.16 fuesen las mismas que la losa maciza de concreto modelada en el SAP2000.

Las propiedades de la losacero se presentan a continuación:

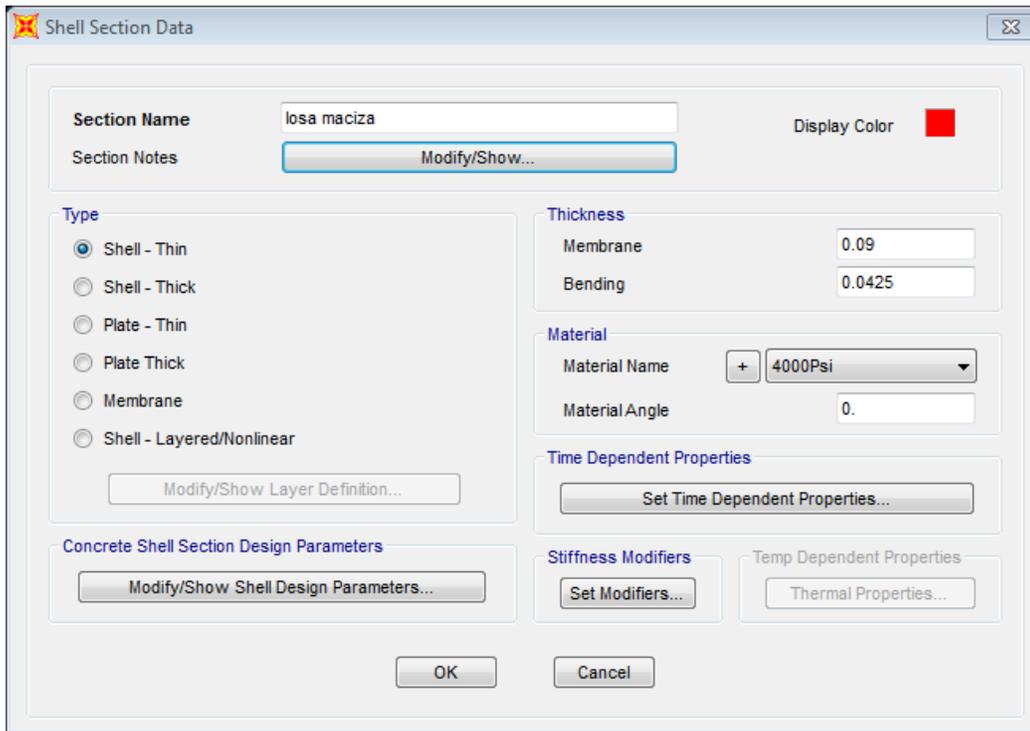
Figura # 5: Propiedades de la losacero de calibre 1,5"

General Data	
Property Name	Losacero1.5
Type	Filled
Slab Material	4000Psi
Deck Material	A992Fy50
Modeling Type	Membrane
Modifiers (Currently Default)	Modify/Show...
Display Color	Change...
Property Notes	Modify/Show...

Property Data	
Slab Depth, tc	0.0819 m
Rib Depth, hr	0.0381 m
Rib Width Top, wrt	0.07 m
Rib Width Bottom, wrb	0.025 m
Rib Spacing, sr	0.19 m
Deck Shear Thickness	0.001 m
Deck Unit Weight	11.23 kgf/m ²
Shear Stud Diameter	0.019 m
Shear Stud Height, hs	0.15 m
Shear Stud Tensile Strength, Fu	40788647.69 kgf/m ²

Fuente: Realizado por los autores en ETABS.

Figura # 6: Propiedades de la losa maciza de concreto de espesor 9cm



Fuente: Realizado por los autores en SAP2000.

Se hizo una iteración de los espesores en la losa maciza de concreto para hallar la equivalencia entre ambos modelos en cada programa o software, asegurando que las deflexiones en los elementos estructurales como vigas principales y correas fuesen las mismas, ya que con esto, se ratifica que la rigidez de ambas losas es la misma y por lo tanto las frecuencias naturales en ambas estructuras coincidan.

4.3 Análisis de los efectos vibratorios debidos al caminar humano.

4.3.1 Predicción de Frecuencias Naturales y Formas de Modo.

Se predijeron frecuencias naturales y formas de modo mediante el método antes mencionado (Eigenvalue Analysis). Se establecieron 20 modos para hacer más preciso el estudio y con ello utilizar el análisis de estado estacionario (Steady-state Analysis) para determinar cuál modo causará la respuesta máxima. Los últimos cinco modos están en el ancho de banda de la frecuencia que puede ser excitado por caminar humano. Por supuesto, el modelo puede calcular muchos más modos, pero sus frecuencias son demasiado altas para ser de interés. En la figura #12, se muestran algunas de las formas de modos arrojados por el programa.

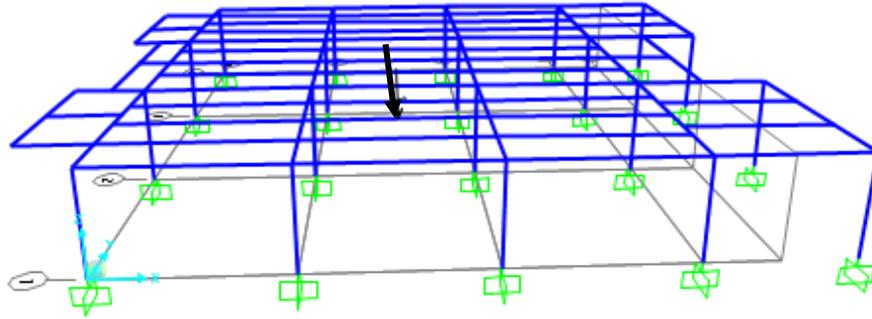
El ancho de banda de análisis resultante será de (1Hz -15 Hz) es razonable en general para identificar el comportamiento del sistema de piso. Se seleccionó el número de modos para que la frecuencia modal más alta fuera de aproximadamente 9 Hz.

Con el uso del programa SAP2000, se colocó una carga unitaria de 1Kgf en ubicación de la fuerza del recorrido. En este caso, se supone que la persona que camina cruza un tramo establecido para el estudio, siendo este el tramo más susceptible a generar vibraciones, ubicación que se determinó después de varias pruebas.

Previamente chequeando las frecuencias naturales de la estructura, la carga puntual se aplica en la mitad del tramo, como se muestra en la Figura #9, con el objetivo de simular la vibración que produce el participante mediante el uso de una función unitaria.

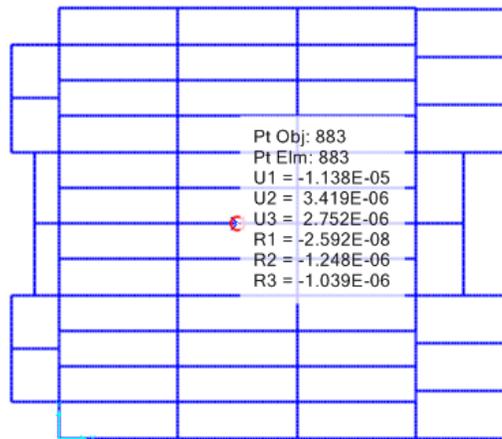
Luego, ya colocada la carga puntual en este tramo se efectuaran dos estudios para verificación del comportamiento de la estructura, hallando las predicciones de aceleración mediante el grafico FRF para conocer la aceleración pico en dos juntas, la N°1 ubicada en el centro de la estructura y la N°2 ubicada en la mitad del volado ya que son las dos ubicaciones que muestran respuesta de aceleraciones picos más susceptibles a generar resonancia. Las juntas a estudiar se muestran en las Figuras #10 y #11 a continuación.

Figura # 9: Carga puntual aplicada en el centro de un tramo para el Steady-state Analysis



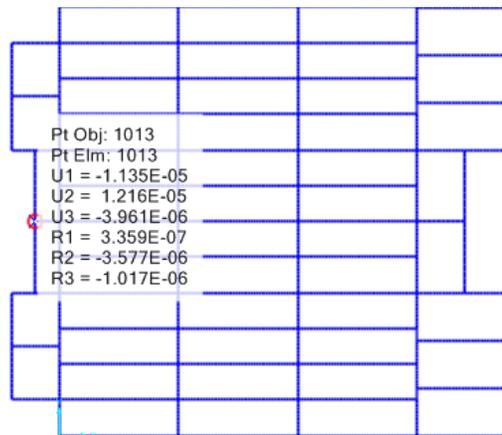
Fuente: Realizado por los autores en SAP2000.

Figura # 10: Junta N°1 seleccionada para el estudio FRF.



Fuente: Realizado por los autores en SAP2000.

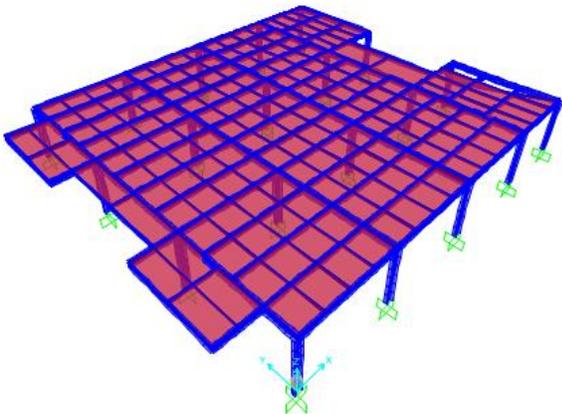
Figura # 11: Junta N°2 seleccionada para el estudio FRF.



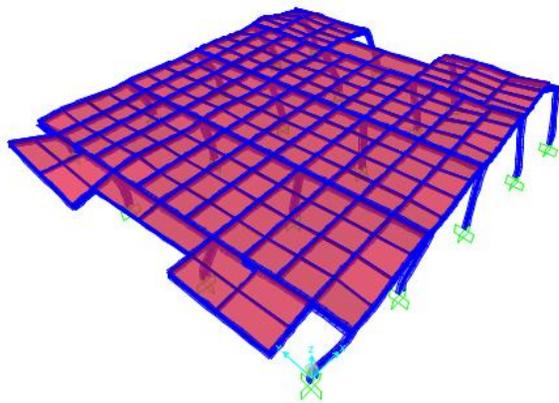
Fuente: Realizado por los autores en SAP2000.

Figura # 12: Representación de algunas formas de modo y frecuencias naturales de la estructura.

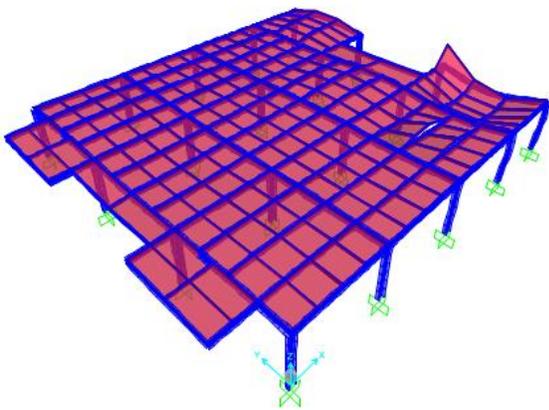
Deformed Shape (MODAL) - Mode 4; T = 0.36437; f = 2.74449



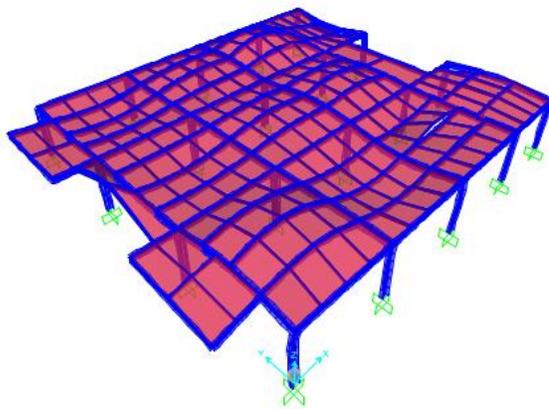
Deformed Shape (MODAL) - Mode 7; T = 0.27912; f = 3.58274



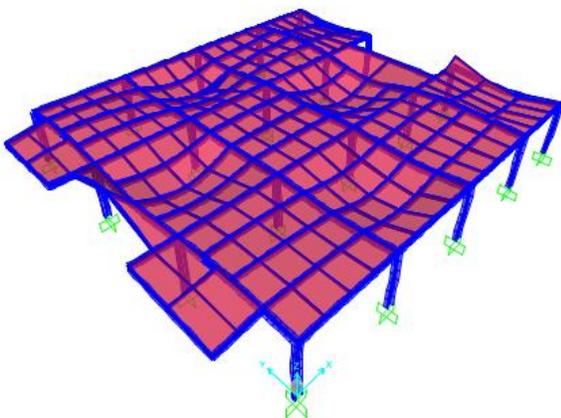
Deformed Shape (MODAL) - Mode 12; T = 0.20569; f = 4.86163



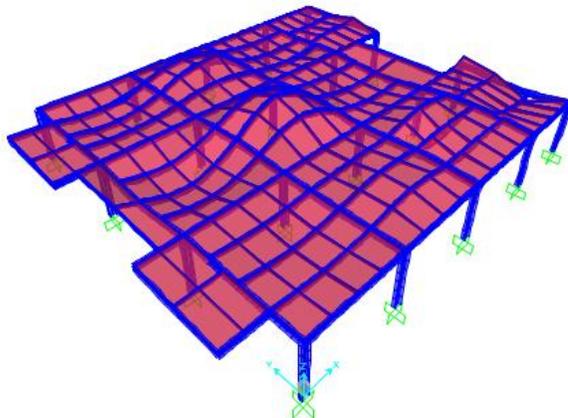
Deformed Shape (MODAL) - Mode 16; T = 0.1803; f = 5.54632



Deformed Shape (MODAL) - Mode 17; T = 0.17499; f = 5.71467



Deformed Shape (MODAL) - Mode 20; T = 0.15981; f = 6.25736



Fuente: Realizado por los autores en SAP2000.

4.3.2 Aplicación del método de Estado estacionario (Steady-state Analysis)

El caso de análisis de estado estacionario se crea usando los formatos mostrados en la Figura #13. El % g es la unidad más intuitiva, por lo que el resultado se escala usando el factor de escala de 10.1937 que es igual a $100\%g / 9,81 \text{ m. /seg}^2$. Como una fuerza de 1 Kgf es la carga, la magnitud de FRF resultante está en % g / kgf. En este caso, SAP2000 toma valores de amortiguamiento histerético, el cual se fija en 4%, lo que corresponde al 2% de amortiguamiento viscoso crítico. Por lo que el amortiguamiento para SAP2000 será el amortiguamiento histerético igual a 0,04. La aceleración se monitorea en el lugar de interés, en este caso se evaluaron los dos escenarios más críticos (Juntas N°1 y N°2). De los 20 modos predichos, los modos 16 y 17 proporcionan la respuesta máxima si se excita.

Figura # 13: Datos del caso de Análisis Steady-state

Load Case Data - Steady State

Load Case Name: ACASE1 [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Steady State [Design...]

Stiffness to Use:
 Zero Initial Conditions - Unstressed State
 Stiffness at End of Nonlinear Case [Dropdown]
Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Solution Type:
 Modal Direct

Mass Source: masavertical

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Load Pattern	unit1	UNIFSS	10.1937
Load Pattern	unit1	UNIFSS	10.1937

[Add] [Modify] [Delete]

Show Advanced Load Parameters

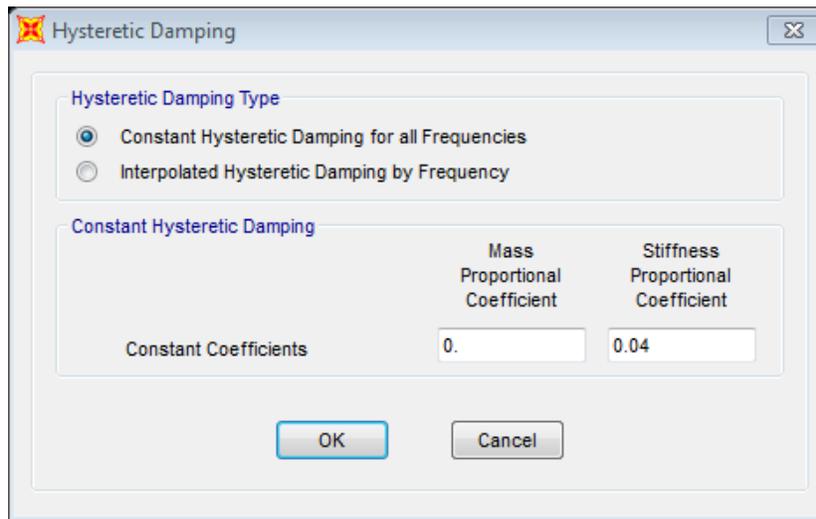
Frequency Step Data

First Frequency: 1 [Set Additional Frequencies]
Last Frequency: 15
Number of Increments: 20
Modal Case: MODAL
Add Modal Frequencies? Yes
Num Modal Freq Deviations: 0
Num Specified Frequencies: 0

Other Parameters

Hysteretic Damping: Constant [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

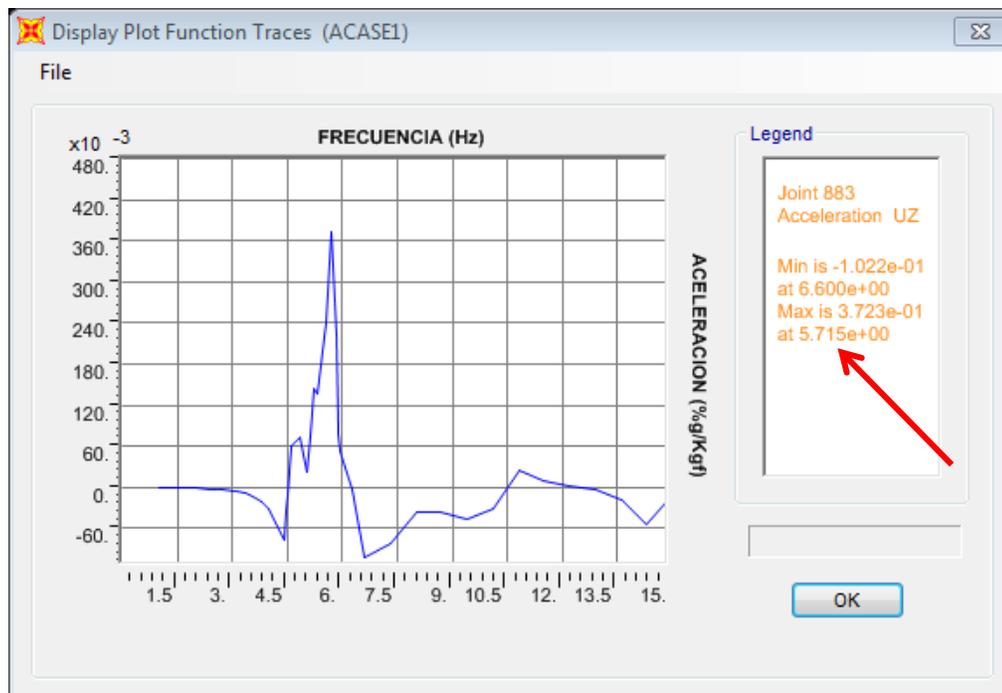


Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

4.3.3 Predicción de la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF).

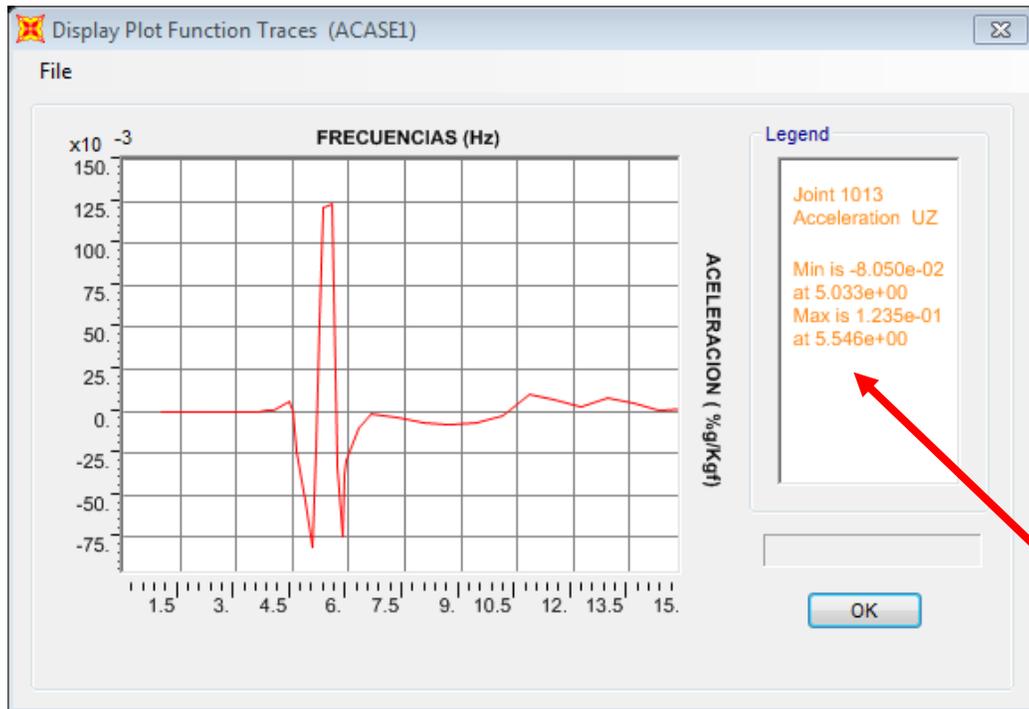
Usando el juicio de la ingeniería y la inspección de las formas del modo arrojadas, los lugares del análisis fueron fijados dando valores de aceleración pico con su respectiva frecuencia, mostrados a continuación:

Figura # 14: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo central (Junta N°1)



Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

Figura # 15: Predicción de aceleración FRF para el caso del volado (Junta N°2).



Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

La frecuencia del paso se elige de modo que uno de los cuatro primeros armónicos de la fuerza de marcha coincidirá con la frecuencia natural dominante, para el caso del volado 5,54 Hz y del tramo central 5,71 Hz, son las frecuencias dominantes los cuales coinciden con los modos 16 y 17 respectivamente como es señalado. El rango de frecuencia de paso razonable para caminar es de 1,6 Hz a 2,2 Hz. El primer armónico es la frecuencia de paso, por lo que está muy por debajo de 5,54 Hz o de 5,71 Hz. Para que el segundo armónico coincida con la frecuencia natural, la frecuencia de paso tendría que ser de $5,54 \text{ Hz} / 2 = 2,77 \text{ Hz}$ (volado) y $5,71 \text{ Hz} / 2 = 2,86 \text{ Hz}$ (tramo central) donde ambos valores están fuera del rango de frecuencia de paso razonable. Para que el tercer armónico coincida con la frecuencia natural, la frecuencia de paso debería ser de $5,54 \text{ Hz} / 3 = 1,85 \text{ Hz}$ (volado) y $5,71 \text{ Hz} / 3 = 1,90 \text{ Hz}$ (tramo central), que está dentro del rango de frecuencias de paso razonable.

Por lo tanto, el caso de análisis se desarrolla utilizando una frecuencia de pasos de 1,85 Hz y 1,90 Hz. Para causar resonancia, los pasos deben ser aplicados a $1 / 1,85 \text{ Hz} =$

0,541 seg (volado) y a $1 / 1,90 \text{ Hz} = 0,526 \text{ seg}$ (tramo central). Medido desde el principio de un paso hasta el comienzo del siguiente.

4.3.4 Calculo de la Aceleración pico.

- Para la Junta N°1:

Con los datos obtenidos de la Figura # 14, se procede a hallar la aceleración pico debido a la excitación al caminar, la cual se da en el modo 17 con una frecuencia dominante de 5,71 Hz y se conoce el FRF_{Max} siendo este igual a $0,1135\%g / \text{kgf}$. El valor Q se toma como 75,6 Kgf lo cual corresponde al peso promedio de una persona.

De la Ecuación #5 se tiene:

$$\alpha = 0.09e^{-0.075fn}$$

$$\alpha = 0.09e^{-0.075(5,71)}$$

$$\alpha = 0.05863$$

De la Ecuación #7, se tiene:

Sabiendo que $0,01 \leq \beta < 0,03$ y $\beta = 0,02$

$$\rho = 12.5\beta + 0,625$$

$$\rho = 12.5(0,02) + 0,625$$

$$\rho = 0,875$$

De la Ecuación #4, se tiene:

$$ap = FRF_{Max} \alpha Q \rho$$

$$ap = (0,1135)(0,05863)(75,6)(0,875)$$

$$ap = 0,4402 \%g < 0,5\%g \quad \text{No excede el límite de tolerancia.}$$

- Para la Junta N°2:

Con los datos obtenidos de la Figura # 15, se procede a hallar la aceleración pico debido a la excitación al caminar, la cual se da en el modo 16 con una frecuencia dominante de 5,54 Hz y se conoce el FRF_{Max} siendo este igual a $0,1235\%g / \text{kgf}$. El valor Q se toma como 75,6 Kgf lo cual corresponde al peso promedio de una persona.

De la Ecuación #5 se tiene:

$$\alpha = 0.09e^{-0.075fn}$$

$$\alpha = 0.09e^{-0.075(5,54)}$$

$$\alpha = 0.05937$$

De la Ecuación #4, se tiene:

$$ap = FRFMax \alpha Q\rho$$

$$ap = (0,1235)(0,05937)(75,6)(0,875)$$

$$ap = 0,485 \%g < 0,5\%g \quad \text{Se encuentra en el límite de tolerancia.}$$

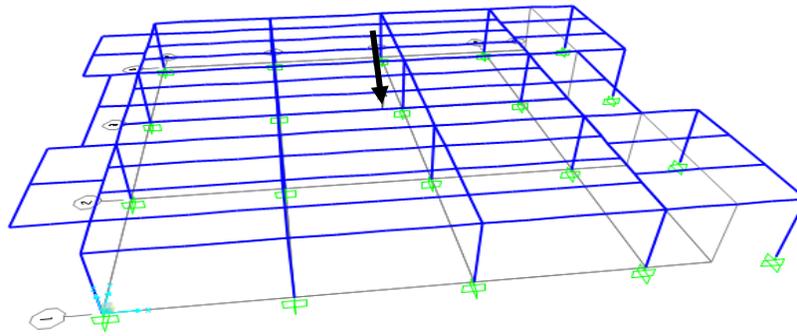
4.4 Análisis de los efectos vibratorios debidos a correr.

4.4.1 Predicción de Frecuencias Naturales y Formas de Modo.

Para este estudio se realiza el mismo procedimiento anteriormente descrito, se predijeron las frecuencias naturales y las formas de modo mediante el método antes mencionado (Eigenvalue Analysis). De igual forma, en la Figura #12 se muestran algunos de los resultados de las formas de modos arrojados por el programa con su modo respectivo. Se hizo el estudio para 20 modos y se estudia con un ancho de banda de análisis resultante de (1Hz -17 Hz) lo cual es razonable en general para identificar el comportamiento del suelo para esta actividad.

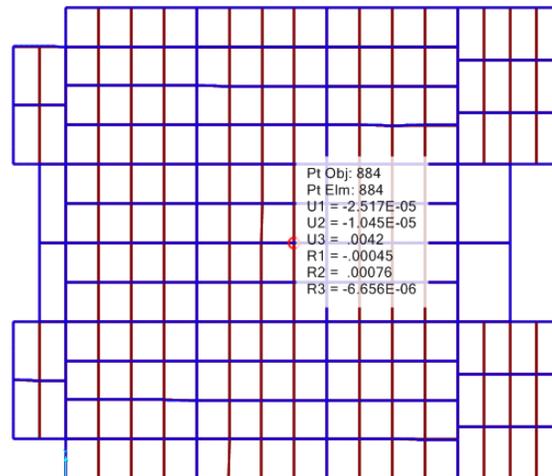
Luego de colocar la carga puntual unitaria (Figura #16) en el centro de la estructura ya que es la ubicación del tramo más susceptible a generar vibraciones, se hallan las predicciones de aceleración mediante el grafico FRF para conocer la aceleración pico en dos juntas, la N°1 ubicada en el centro de la estructura y la N°2 ubicada en la mitad del volado ya que son las dos ubicaciones que muestran respuesta de aceleraciones picos que garantizan generar resonancia. Las juntas a estudiar se muestran en las Figuras #17 y #18 a continuación.

Figura # 16: Carga puntual aplicada en el centro de un tramo para el Steady-state Analysis



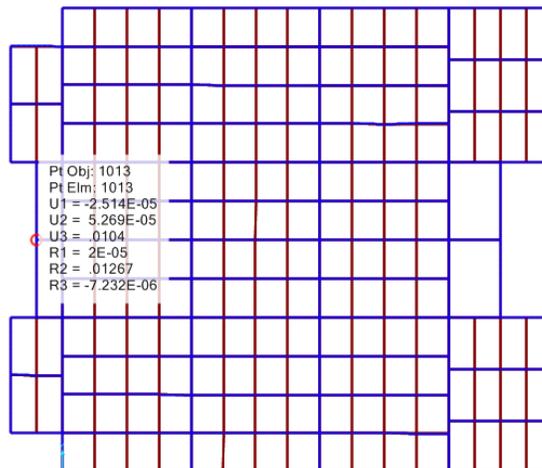
Fuente: Realizado por los autores en SAP2000.

Figura # 17: Junta N°1 seleccionada para el estudio FRF.



Fuente: Realizado por los autores en SAP2000.

Figura # 18: Junta N°2 seleccionada para el estudio FRF.



Fuente: Realizado por los autores en SAP2000.

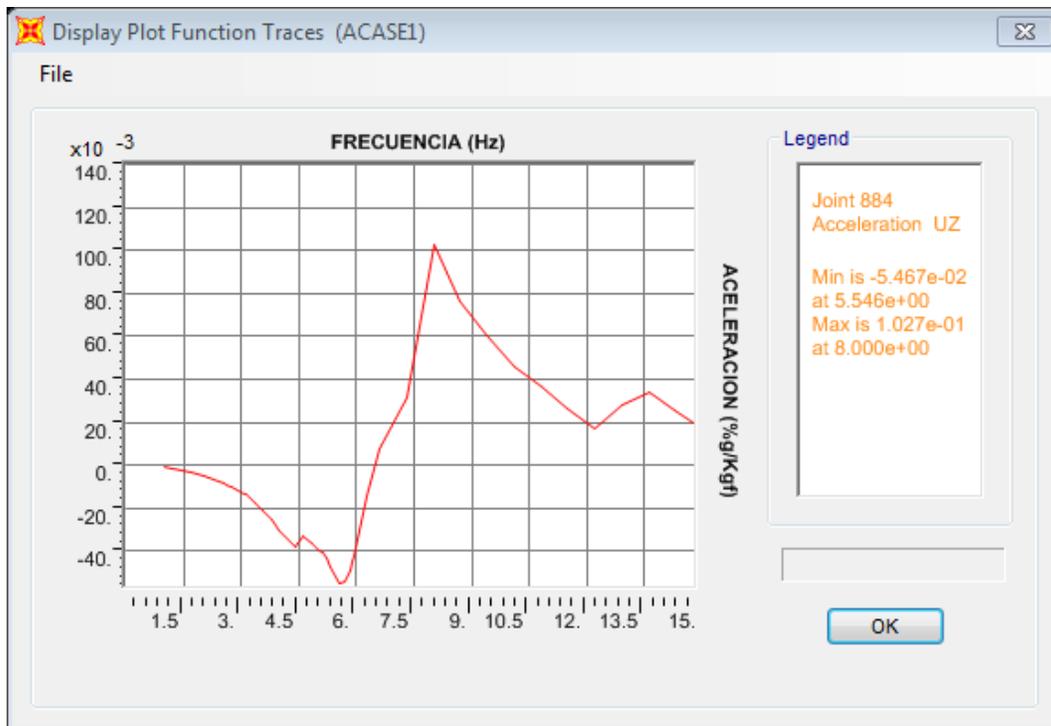
4.4.2 Aplicación del método de Estado estacionario (Steady-state Analysis)

El caso de análisis de estado estacionario presenta el mismo procedimiento anterior, el valor de amortiguamiento histerético, el cual se fija en 4%, lo que corresponde al 2% de amortiguamiento viscoso crítico. Por lo que el amortiguamiento para SAP2000 será el amortiguamiento histerético igual a 0,04. La aceleración se monitorea en el lugar de interés, en este caso se evaluaron los dos escenarios más críticos (Juntas N°1 y N°2). De los 20 modos predichos, el modo 16 proporciona la respuesta propensa a generar acumulación de resonancia ya que coincide la frecuencia del pico de aceleración con la frecuencia natural en el volado. Para el caso de la junta en el centro (Junta N°1) se toma porque arrojó el valor de pico máximo en la estructura.

4.4.3 Predicción de la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF).

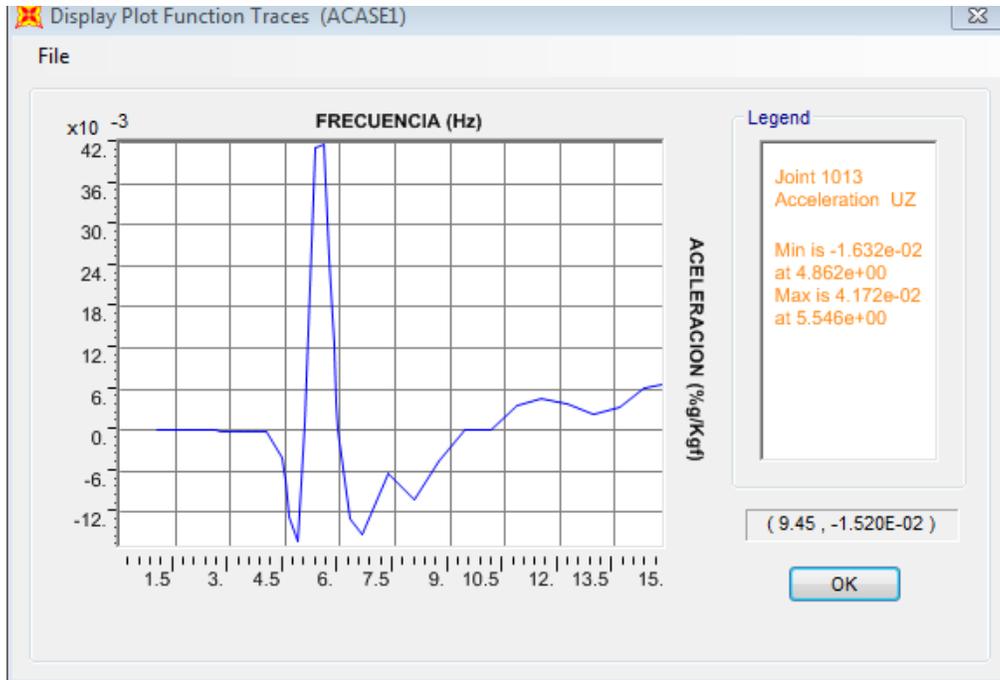
Usando el juicio de la ingeniería y la inspección de las formas del modo, los lugares del análisis fueron fijados dando valores de aceleración pico con su respectiva frecuencia, mostrados a continuación:

Figura # 19: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo central (Junta N°1)



Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

Figura # 20: Predicción de aceleración FRF para el caso del volado (Junta N°2).



Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

4.4.4 Calculo de la aceleración pico.

- Para la Junta N°1:

Con los datos obtenidos de la Figura # 19, se procede a hallar la aceleración pico debido a la excitación al correr, la cual se da para una frecuencia de 8 Hz y se conoce el FRF_{Max} siendo este igual a $0,1027\%g / kgf$. El valor Q se toma como 75,6 Kgf lo cual corresponde al peso promedio de una persona. El valor de αh y h viene dado en la tabla #13 siendo αh igual a 0,2 y h igual a 3 valores que se toman debido a que la frecuencia dominante está en el rango de 8 -12 Hz. El $Nsteps$ se iguala a 10 para tomar el mayor número de pasos.

De la Ecuación #12, se tiene:

$$ap = FRF_{Max} * \alpha h * Q [1 - e^{-2\pi\beta h NSteps}]$$

$$ap = (0,1027) * (0,2) * (76,5) [1 - e^{-2\pi(0,02)(3)(10)}]$$

$$ap = 1,53 \%g \sim 1,5\%g \quad \text{Se encuentra en el límite de tolerancia.}$$

- Para la Junta N°2:

Con los datos obtenidos de la Figura # 20, se procede a hallar la aceleración pico debido a la excitación al correr, la cual se da en el modo 16 con 5,54 Hz y se conoce el FRF_{Max} siendo este igual a 0,04172%g / kgf. El valor Q se toma como 75,6 Kgf lo cual corresponde al peso promedio de una persona. El valor de αh y h viene dado en la tabla # 13 siendo αh igual a 0,4 y h igual a 2 valores que se toman debido a que la frecuencia dominante está en el rango de 4 -8 Hz. El $Nsteps$ se iguala a 10 para tomar el mayor número de pasos.

De la Ecuación #12, se tiene:

$$ap = FRF_{Max} * \alpha h * Q [1 - e^{-2\pi\beta h NSteps}]$$

$$ap = (0,04172) * (0,4) * (76,5) [1 - e^{-2\pi(0,02)(2)(10)}]$$

$$ap = 1,17\%g < 1,5\%g \quad \text{No excede el límite de tolerancia.}$$

4.5 Análisis de los efectos vibratorios debidas a actividades rítmicas.

4.5.1 Predicción de Frecuencias Naturales y Formas de Modo

Se predijeron frecuencias naturales y formas de modo mediante el método antes mencionado (Eigenvalue Analysis). Debido a que se usa la misma estructura para el análisis las formas de modos son las mismas mostradas en la Figura #12.

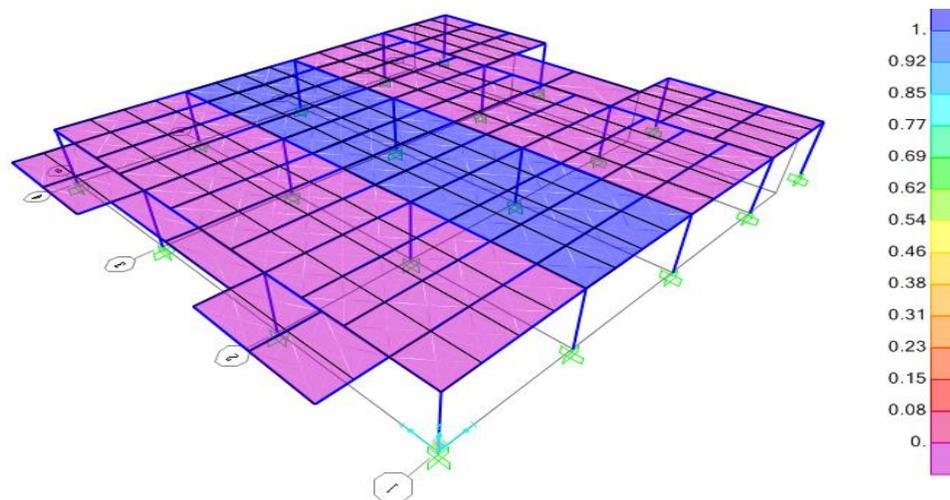
De igual forma, se establecieron 20 modos para hacer más preciso el estudio y con ello utilizar el análisis de estado estable (Steady-state Analysis) para determinar cuál causará la respuesta máxima, el ancho de banda de análisis resultante también será de (1-15 Hz).

Para este análisis, se colocará una carga distribuida uniforme de 1Kgf/m² en la ubicación de la fuerza ejercida por movimientos aeróbicos. El primer caso a estudiar, es colocando la carga distribuida en el tramo central como indica la Figura #21, se supone que las personas que ejercen este tipo de actividad afectan el tramo establecido. El segundo caso es aplicar esta carga distribuida unitaria uniforme en el tramo izquierdo de la

estructura como muestra la Figura #22 y por último colocarla en el tramo derecho como muestra la Figura #23.

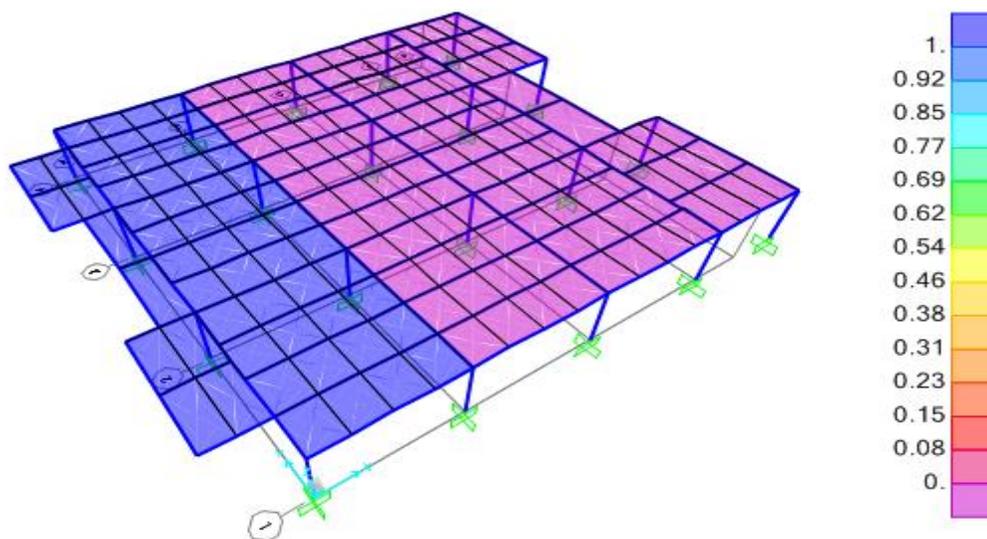
Luego, ya colocada la carga distribuida en los tres casos se procede a la predicción de las aceleraciones mediante los gráficos FRF, para conocer la aceleración pico.

Figura # 21: Aplicación de la carga distribuida uniforme de 1Kgf/m2 en la parte central de la estructura.



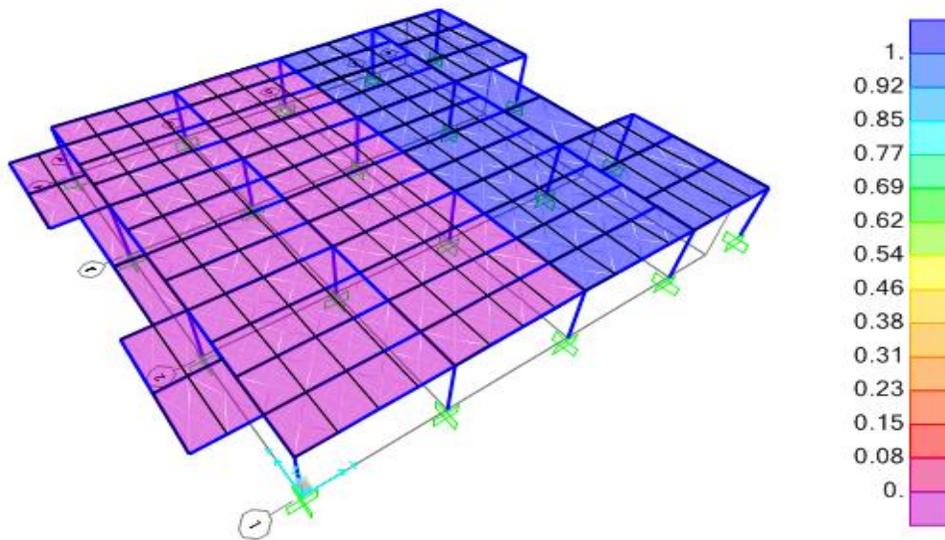
Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

Figura # 22: Aplicación de la carga distribuida uniforme de 1Kgf/m2 en el tramo izquierdo de la estructura.



Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

Figura # 23: Aplicación de la carga distribuida uniforme de 1Kg/m² en el tramo derecho de la estructura.

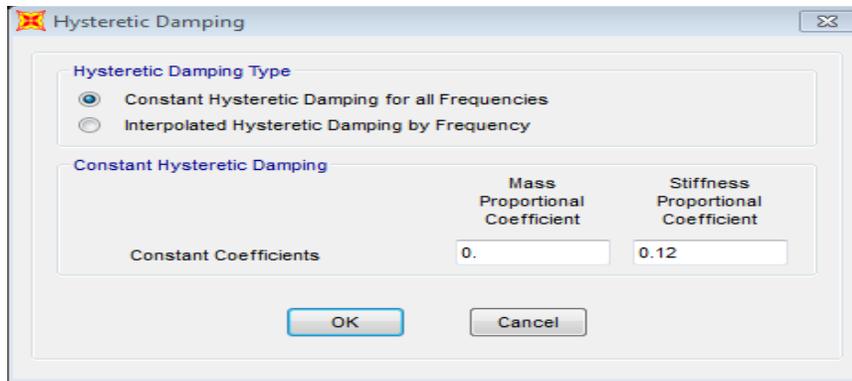


Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

4.5.2 Aplicación del método de Estado estacionario (Steady-state Analysis)

El caso de análisis de estado estacionario presenta el mismo procedimiento anterior exceptuando el valor de amortiguamiento histerético, el cual se fija en 12%, lo que corresponde al 6% de amortiguamiento viscoso crítico debido a que para el caso de aeróbicos las personas que ocupan esta actividad aportan amortiguamiento a la estructura. Por lo que el amortiguamiento para SAP2000 será el amortiguamiento histerético igual a 0,12. La aceleración se monitorea en el lugar de interés, en este caso se evaluaron los tres escenarios más críticos ya antes mencionados tomando el tramo central como el caso más susceptible a generar vibraciones. De los 20 modos predichos, el modo 16 (Figura #12) proporciona la respuesta máxima si se excita.

Figura # 24: Datos del caso de Análisis Steady-state

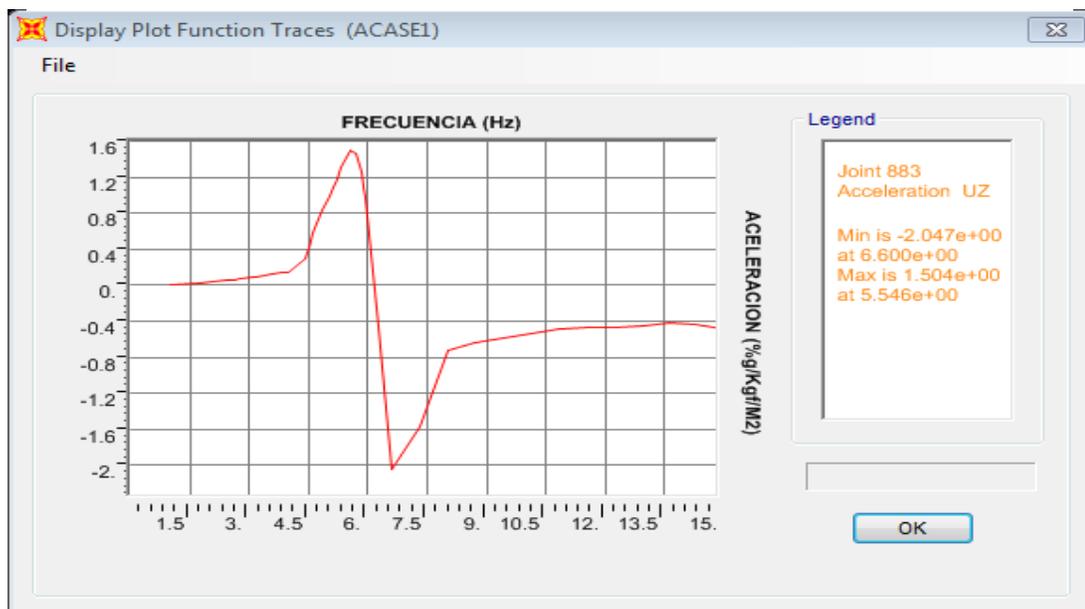


Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

4.5.3 Predicción de la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF).

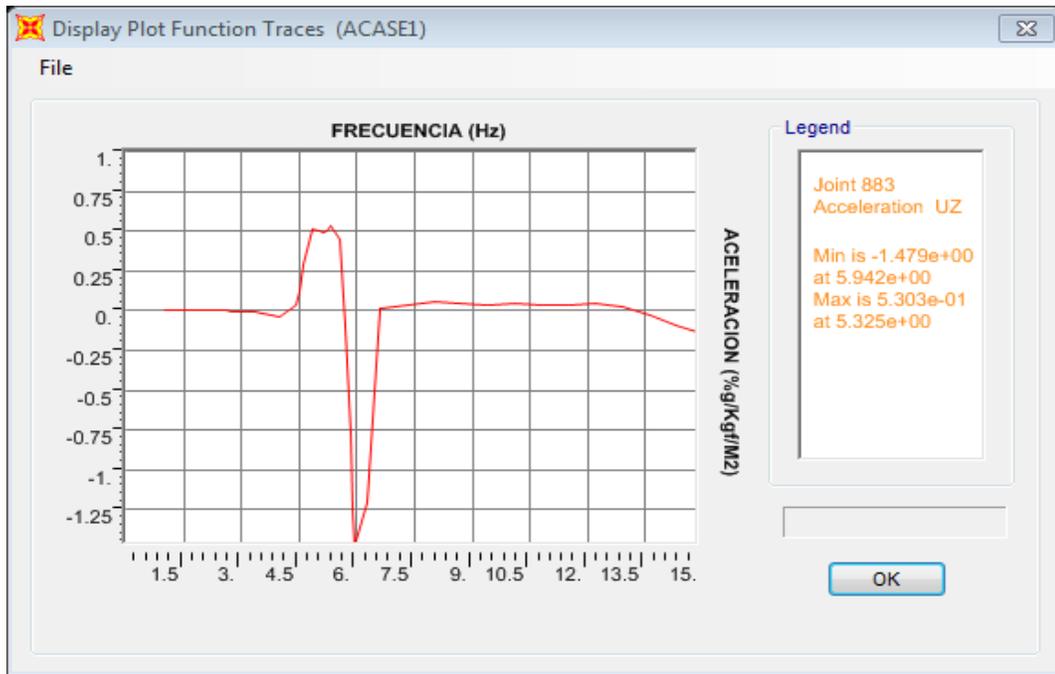
Las funciones de respuesta de frecuencia se calcularon para tres casos potencialmente críticos. En el caso de carga del tramo central, el grupo de personas aplica excitación rítmica más significativa que en los otros dos casos, ya que arroja el mayor pico de aceleración lo cual afecta la serviciabilidad de la estructura y a su vez uno de los picos de aceleración coincide en una de las frecuencias naturales (5,546 Hz, modo 16) lo cual puede generar resonancia en la estructura. Por lo tanto, el estudio se desarrolla en función de este caso en particular.

Figura # 25: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo central.



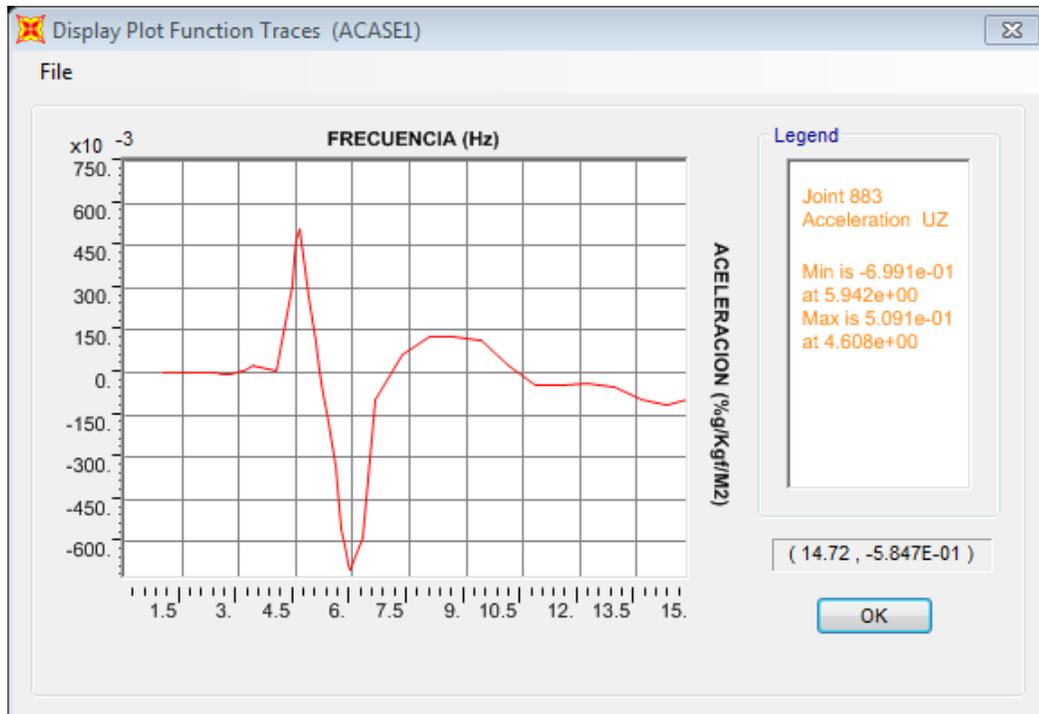
Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

Figura # 26: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo izquierdo.



Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

Figura # 27: Predicción de aceleración FRF para el caso del tramo derecho.



Fuente: Realizado por los autores de SAP2000.

La frecuencia de paso se elige haciendo uso del pico de aceleración anteriormente encontrado en el FRF del tramo central, de modo que este sea parte de uno de los tres armónicos. Para el caso de la junta central, el pico máximo cae en la frecuencia de 6.6 Hz; haciendo uso de la tabla #14 se realiza un proceso iterativo para hallar en cual armónico se encuentra dicha frecuencia. En la tabla # 14 se encuentra el rango de frecuencias para cada armónico.

El primer armónico es la frecuencia de paso, por lo que se toma el $6.6\text{Hz} / 3 = 2.2$ Hz el cual entra dentro del rango (2.0 - 2.75 Hz) correspondiente al primer armónico y lo que nos arroja como resultado la frecuencia de paso. Para el estudio del comportamiento de la estructura se tomaron los valores correspondientes para el segundo armónico y tercer armónico entre los rangos (2.75 – 5.5 Hz) y (5.5 – 8.25 Hz) respectivamente y se hallaron los valores FRF para cada caso. La magnitud FRF indica que la respuesta máxima se producirá cuando la frecuencia de paso esté en su valor máximo, 6,6 Hz; Por lo tanto, las magnitudes del FRF se estudian para los valores 2,2 Hz siendo este el primer armónico, 4,4 Hz el segundo armónico y 6,6 Hz para el tercer armónico.

4.5.4 Calculo de la Aceleración pico.

A continuación, se muestra el cálculo de la aceleración pico total debido a la excitación dinámica del tramo central de la estructura por actividad rítmica de aeróbicos. El peso estimado de los participantes, w_p , es de 4,2 psf lo que equivale a $20,51\text{Kgf/m}^2$, el valor del FRFMax es de $2.047\% \text{g/Kgf/m}^2$ para la frecuencia de 6.6 Hz, $0.2965\% \text{g/Kgf/m}^2$ para 4.4Hz y $0.0427\% \text{g/Kgf/m}^2$ para 2.2Hz; $\alpha_1 = 1.5$; $\alpha_2 = 0.6$; $\alpha_3 = 0.1$ (valores obtenidos de la tabla # 14).

De la ecuación # 13 se tiene:

- 1er armónico:

$$A_{p1} = FRF(2.2\text{Hz})\alpha_1 * w_p$$

$$A_{p1} = (0.0427) * (1.5) * (20.51)$$

$$A_{p1} = 1.31\% \text{g}$$

- 2do armónico:

$$Ap2 = FRF(4.4Hz)\alpha2 * wp$$

$$Ap2 = (0.2965) * (0.6) * (20.51)$$

$$Ap2 = 3.65\%g$$

- 3er armónico:

$$Ap3 = FRF(6.6Hz)\alpha3 * wp$$

$$Ap3 = (2.047) * (0.1) * (20.51)$$

$$Ap3 = 4.20\%g$$

Luego se procede a calcular la aceleración pico total combinando todas las respuestas dinámicas producidas por los tres harmónicos ya antes mencionados, la cual es la siguiente:

Haciendo uso de la ecuación #14, se tiene:

$$Apt = [\sum_3(Ap, 3)^{1.5}]^{1/1.5}$$

$$Apt = [(1.31^{1.5}) + (3.65^{1.5}) + (4.20^{1.5})]^{1/1.5}$$

$$Apt = 6.63\%g$$

Este valor se encuentra dentro de los límites de tolerancia para actividades puramente rítmicas, el cual es entre (4%g - 7%g) (Tabla #9).

También se procederá a calcular la aceleración pico para la frecuencia de 5.546 Hz ya que esta coincide con una frecuencia natural de la estructura y podría existir el peligro de entrar en resonancia.

El primer armónico es la frecuencia de paso, por lo que está muy por debajo de 5,54 Hz. Para que el segundo armónico coincida con la frecuencia natural, la frecuencia de paso tendría que ser de $5,54 \text{ Hz} / 2 = 2,77 \text{ Hz}$ valor que se encuentra dentro del rango del segundo armónico (2,0 – 2,75 Hz), mostrados en la Tabla #14. Los valores de FRFMáx para 5.546 Hz y 2.77 Hz son $1.504\%g/Kgf/m^2$ y $0.06538\%g/Kgf/m^2$ respectivamente; los valores de $\alpha1 = 1.5$ y $\alpha2 = 0.6$; $wp = 20.51Kgf/m^2$.

De la ecuación # 13 se tiene:

$$Ap1 = FRF(2.77Hz)\alpha1 * wp$$

$$Ap1 = (0.06538) * (1.5) * (20.51)$$

$$Ap1 = 0.81\%g$$

De nuevo, se aplica la ecuación # 13:

$$Ap2 = FRF(5.546Hz)\alpha2 * wp$$

$$Ap2 = (1.504) * (0.6) * (20.51)$$

$$Ap2 = 3.09\%g$$

Y se vuelve a hacer uso de la ecuación # 14 para unificar ambos efectos dinámicos:

$$Apt = [\sum_2(Ap, 2)^{1.5}]^{1/1.5}$$

$$Apt = [(0.81^{1.5}) + (3.09^{1.5})]^{1/1.5}$$

$$Apt = 3.36\%g \quad \text{Este valor se encuentra fuera de peligro para entrar en resonancia.}$$

CAPÍTULO V: Análisis de resultados

5.1 Serviciabilidad de sistemas estructurales de acero sometidos a actividad humana.

Previamente a la evaluación de la serviciabilidad, se propuso una estructura irregular y a su vez asimétrica en uno de sus ejes principales; esto es importante ya que para realizar el análisis de elementos finitos se necesitaban dichas características en la estructura. Para la equivalencia entre la losa de acero y la losa maciza de concreto se utilizó el criterio de las deflexiones, asegurando que las inercias de ambos modelos realizados en ETABS v.16 y SAP2000 v.19 son similares desde el punto de vista de análisis vibratorio.

Luego, se hizo el análisis de los efectos vibratorios en la estructura a causa de las actividades humanas de caminar, correr y rítmicas de manera individual. Esto se logró mediante la excitación dinámica, y utilizando el método de los estados estacionarios se consiguieron las funciones de respuesta de frecuencia correspondientes para cada actividad.

Para caminar, se escogió por medio del criterio de la ingeniería el camino a seguir de la persona y se colocó la carga en el centro del mismo conservadoramente por ser el punto más susceptible a excitación dinámica. El límite de tolerancia de las aceleraciones producidas por actividad humana es de $0.5\%g$ y al comparar ese límite con la aceleración pico hallada se encontraba por debajo del mismo, comprobando de esta manera que la estructura no sufría problemas por serviciabilidad.

Para correr, se utilizó de nuevo el criterio de la ingeniería para escoger el camino más crítico de una persona corriendo y se aplicó la carga en la mitad de ese camino por ser más propenso a la excitación dinámica. El límite de tolerancia para aceleraciones es de $1.5\%g$, al realizar la comparación con la aceleración obtenida por los métodos antes descritos también se comprueba que la estructura no sufre problemas de serviciabilidad por esta actividad.

Para actividades rítmicas, se estudió únicamente para aeróbicos; la carga distribuida del grupo de persona se aplicó en los sectores más propensos a excitación dinámica y se escogió la excitación dinámica que diera como resultado la mayor aceleración pico para tratar con el caso más crítico. Al ser una actividad puramente rítmica los límites de tolerancia están entre el $4\%g$ y el $7\%g$, y nuevamente al comparar esto con los resultados

obtenidos se comprueba que la estructura tampoco sufre problemas de serviciabilidad por dicha actividad.

5.2 .Resonancia en sistemas estructurales de acero.

Adicionalmente, se evaluó el problema de la coincidencia de los armónicos de las frecuencias de paso con alguna frecuencia natural de la estructura. En las actividades de caminar y correr las aceleraciones pico se encontraron ubicadas en alguna frecuencia natural, pero en ningún caso se excedieron los límites de tolerancia de las aceleraciones pico y por lo tanto la estructura se encuentra fuera de peligro de entrar en resonancia en cualquiera de las actividades humanas antes descritas.

Para la actividad rítmica de aeróbicos, se hizo una comprobación de aceleración pico extra para chequear el problema de la resonancia y al hacerlo se aseveró que la estructura tampoco se encuentra en peligro de entrar en resonancia.

CAPÍTULO VI: Conclusiones

- Esta investigación proporciona orientación sobre la evaluación de los efectos de las vibraciones y sobre las medidas correctivas para resolver los problemas de vibración que pueden surgir en cualquier sistema estructural de acero irregular existente o por construir.
- La falta de comprobación de la tolerancia a la vibración o la sobreestimación de la amortiguación por parte del Ingeniero estructural son causas típicas de un problema en un sistema estructural. Por lo tanto, el estudio de la amortiguación y la verificación del límite de tolerancia de aceleraciones que acepta cada estructura debe ser evaluado para cada caso que se desee estudiar en particular, ya que las respuestas varían dependiendo de la geometría de la estructura.
- En la actualidad existen varios métodos para evaluar este estado límite de serviciabilidad; algunos se basan en aproximaciones simples y algunos son muy complejos. Los métodos de análisis propuestos en esta investigación se desarrollaron de manera tal que pueden ser aplicables en general para cualquier tipo de edificación, considerando la capacidad actual para predecir propiedades modales usando análisis de elementos finitos.
- El método de análisis de elementos finitos puede predecir frecuencias naturales de manera precisa, lo cual facilita el estudio.
- Con este estudio, se puede establecer el comportamiento de los sistemas de piso y de los elementos estructurales para aseverar el confort de las personas en la estructura propuesta.
- Los métodos aplicados en los sistemas de piso, determinan el grado de serviciabilidad en las edificaciones mediante excitaciones dinámicas dependiendo de cada actividad con el objeto de comprobar los distintos límites de tolerancia de aceleraciones pico que acepta la edificación.
- Esta investigación, se basa primordialmente en el estudio del comportamiento de una estructura con piso de baja frecuencia para comprobación de susceptibilidad a acumulación de resonancia.

- Se comprueba que existe una diferencia entre modelar la estructura mediante un análisis estático y un análisis dinámico. El diseño de la estructura fue previamente verificada mediante el análisis estático, cumpliendo por resistencia, deflexión e interacción de todos los elementos estructurales que la conforman. En cambio, al evaluarla con el análisis dinámico mediante aceleraciones verticales la estructura se encuentra muy cercana a los límites de tolerancia de aceleraciones pico aceptables, por lo que se considera que no cumple su diseño.
- No se pueden establecer factores de amplificación dinámica que permitan la equivalencia de los efectos vibratorios, debido a que el comportamiento y las respuestas de cada estructura serán distintas dependiendo de las propiedades, geometría, amortiguamientos y tipo de actividad humana que se apliquen en cada estructura.
- A partir de la revisión bibliográfica, también puede concluirse que el uso de la normatividad internacional (basadas en muchas observaciones), es el estándar de trabajo para la evaluación de los efectos de las vibraciones causadas por actividad humana sobre las estructuras.

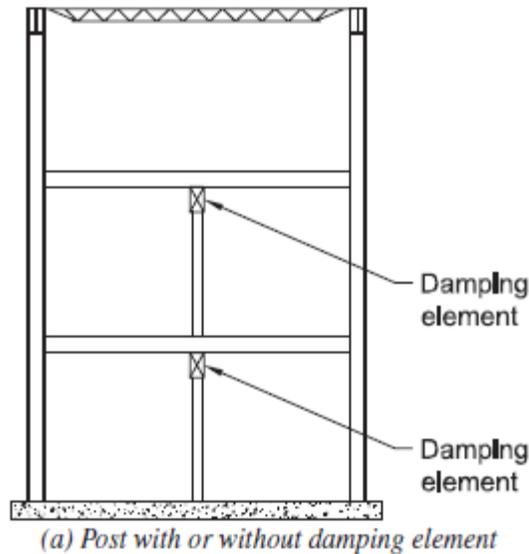
CAPÍTULO VII: Recomendaciones

- Es importante, en primer lugar, determinar la fuente de vibración, ya sea caminando, corriendo, actividades rítmicas, o fuentes externas al edificio que transmiten vibraciones a través del suelo. Se debe hacer una respectiva prueba de rendimiento y mediciones de vibraciones en la estructura ya que el comportamiento es diferente dependiendo de las propiedades de cada edificación.
- Una medida correctiva es la reducción de la masa. Esta no suele ser muy eficaz debido a la resistencia inercial reducida resultante al impacto o a la vibración resonante. Ocasionalmente, sin embargo, la reducción de la masa puede aumentar la frecuencia natural lo suficiente para evitar la resonancia.
- Las vibraciones debidas a caminar, correr o a actividades rítmicas pueden reducirse aumentando la frecuencia natural del suelo. Esto se hace mejor aumentando la rigidez estructural. La adaptación con pruebas adecuadas, elevación, soldadura y estabilización del movimiento fuera del plano es absolutamente necesaria para lograr aumentos significativos de rigidez.
- Los componentes estructurales con las frecuencias fundamentales más bajas suelen ser los que deben ser reforzados. Para cargas dinámicas bajas, como caminar, una evaluación del sistema estructural del suelo considerando solamente las vigas suele ser suficiente. Para la carga dinámica severa (por ejemplo, ejercicios rítmicos o equipo pesado), la evaluación debe considerar la estructura del edificio como un todo, incluyendo las columnas y posiblemente las cimentaciones, no sólo la estructura del piso.

Algunos ejemplos de rigidización se muestran a continuación:

- Los nuevos apoyos de columna hasta los cimientos entre los existentes son los más eficaces para las estructuras flexibles del suelo. Un elemento amortiguador, tal como un dispositivo de fricción o uno que usa material viscoelástico, puede absorber cierta energía vibratoria. El beneficio de los postes de amortiguación está limitado, como máximo, a la anchura efectiva del panel de vigas normalmente, se requiere una columna o poste por losa.

Figura # 28: Poste con o sin elemento amortiguador

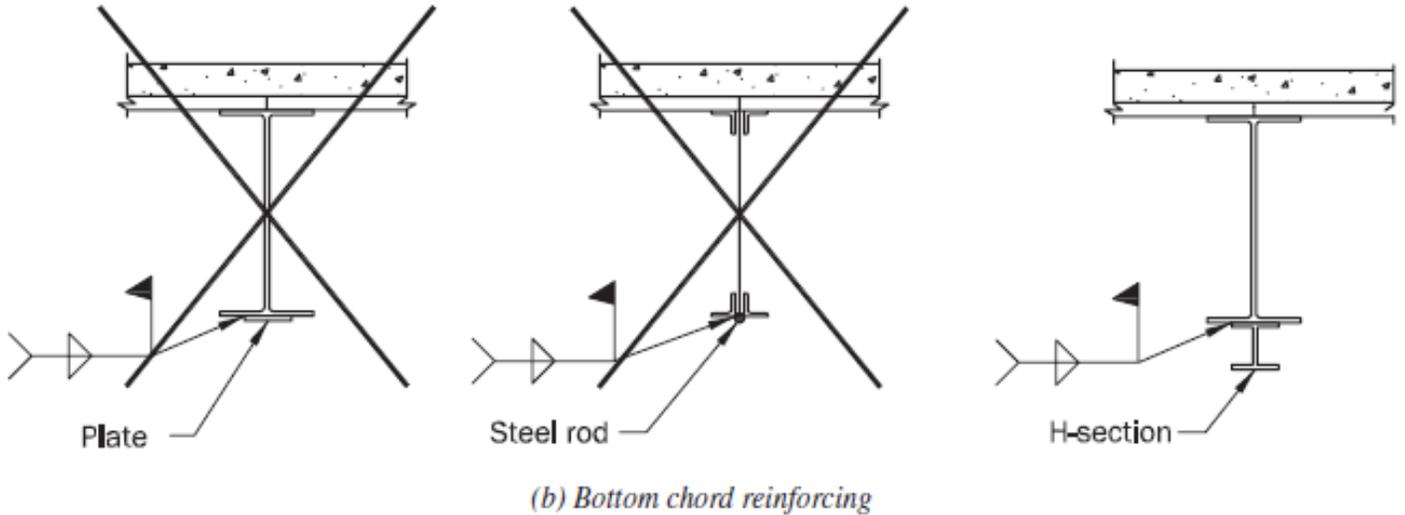


Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

- El reforzamiento de las vigas principales y correas de soporte mediante la adición de placas de cubierta o barras de acero como se muestra en la figura a continuación, no es particularmente eficaz, incluso si el sistema de suelo se levanta antes de la soldadura. La adición de barras de acero al extremo inferior de las vigas no es eficaz tampoco. Incluso con elevación, el aumento esperado de la frecuencia generalmente no ocurre porque sólo la rigidez a la flexión de la viga aumenta, mientras que el efecto de deformación debido a la tensión cortante y la excentricidad en las articulaciones puede ser aumentado. La adición de una sección laminada en caliente como se muestra en la Figura puede ser efectiva si el suelo se eleva, elevando a su vez, la soldadura antes de soldar la sección. Si se usa este tipo de rigidización para vigas, los efectos sobre la tensión cortante y la excentricidad sobre la rigidez deben evaluarse utilizando el método de elementos finitos.

La instalación de una pared de una Unidad de mampostería de concreto ligero (CMU) en lugar de las típicas particiones de paneles de yeso sin carga ha sido usada para reforzar con éxito las vigas.

Figura # 29: Reforzamiento de acordes inferiores

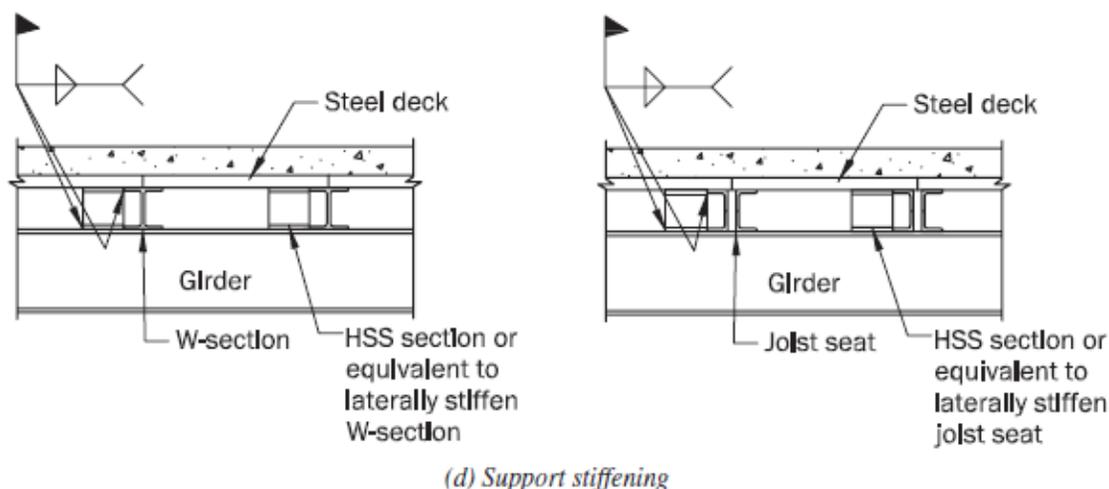


Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

- Si el elemento de soporte está separado de la losa, por ejemplo, en el caso de vigas colgantes que pasan sobre una viga de soporte o asientos de viguetas soportados sobre la pestaña superior de una viga, la viga puede endurecerse como se muestra en la a continuación. Generalmente, dos a cuatro piezas de la sección de viga colgante o una sección de profundidades equivalentes, colocadas con sus nervios en el plano de la banda de la viga y unidas a la losa la viga, proporcionan una conexión de tensión cortante suficiente para la acción compuesta entre la losa y la viga. De manera similar, se puede lograr una acción compuesta para vigas que soportan asientos de viguetas instalando secciones cortas del perfil de asiento de la vigueta, un HSS o sección similar como se muestra en la Figura. En ambos casos, la viga de soporte debe estar enganchada antes de la instalación de los conectores de tensión cortante de la viga o de la vigueta. No se ha comprobado que la adición de puente a sistemas con placas de concreto en un intento de mejorar el rendimiento de las vibraciones sea exitosa. Sin embargo, el puente se ha utilizado con éxito para reducir la vibración de un área de patio exterior con un sistema de cubierta y cubierta de azotea muy flexible. A veces, el modo de vibración problemático implica la flexión de elementos verticales (por

ejemplo, enmarcado estructural con voladizos de columnas o paredes), en cuyo caso, tanto el endurecimiento horizontal como el vertical se requerirán. En estas situaciones, es importante conocer la forma del modo problemático.

Figura # 30: Endurecimiento del soporte



Fuente: 2da Edición de la Guía de Diseño N°11 de AISC, Vibraciones de Piso Debidas a la Actividad Humana (Murray et al., 2016)

- Las vibraciones del piso se pueden mejorar aumentando el amortiguamiento del sistema de suelo. Cuanto menor sea el amortiguamiento en el sistema de suelo existente, más eficaz será la adición de amortiguación. El amortiguamiento en los suelos existentes depende principalmente de la presencia de elementos no estructurales, tales como tabiques, techos, líneas de servicio mecánico, mobiliario y el número de personas en el piso.
- El control pasivo de pisos en forma de un amortiguador de masa sintonizado (TMD) se ha utilizado con diversos grados de éxito. Un TMD es una masa unida a la estructura del piso a través de un muelle y dispositivo de amortiguación. El TMD impide la acumulación de la vibración de resonancia de un piso mediante la transferencia de energía cinética del suelo en la masa TMD y disipando parte de esta energía cinética a través de los dispositivos de amortiguación. Sin embargo, un TMD es efectivo sólo si la frecuencia natural del TMD coincide casi con la del modo problemático de vibración del piso.

Las TMD son más eficaces si sólo hay un modo significativo de vibración. Son mucho menos eficaces si hay dos o más modos molestos de vibración cuyas frecuencias naturales están cercanas entre sí. Son ineficaces para vibraciones fuera de resonancia, que pueden ocurrir durante actividades rítmicas. Por último, las TMDs que están inicialmente sintonizadas con los modos de vibración en el suelo pueden llegar a ser descontroladas debido a cambios en las frecuencias naturales del piso que resultan de la adición o remoción de materiales en áreas locales.

Para ser eficaz para las vibraciones de los aeróbicos, la masa de un TMD debe ser generalmente mucho mayor que para la vibración del caminar. Esto se debe a que la relación de amortiguación del sistema, generalmente debe ser mucho mayor para reducir las vibraciones aeróbicas en el edificio a niveles aceptables en ocupaciones sensibles. La gente en el piso, incluyendo a los participantes, ya proporcionan un amortiguamiento significativo al sistema de piso.

Las TMD han demostrado a veces éxito cuando la masa eficaz del suelo es grande en relación con el número de participantes y si la aceleración en las vibraciones resonantes es menos de aproximadamente el 10% de gravedad.

- Otro método eficaz para reducir la vibración del edificio es la inserción de una masa de "piso flotante" sobre muelles muy suaves entre los participantes y el piso del edificio que apoya la actividad. Esta idea es atractiva para las actividades rítmicas en los pisos superiores de los edificios, ya que evita la necesidad de reforzar en gran medida la estructura del edificio, ya que el suelo flotante se puede introducir cuando se necesita en una superficie existente y se retira cuando ya no es necesario. La mayor carga debida al suelo flotante está compensada, al menos en parte, por la carga viva reducida transmitida al suelo del edificio. Sin embargo, los elementos de resorte que son lo suficientemente suaves para aislar las actividades rítmicas considerablemente son a menudo poco prácticos.
- Incluir los métodos de análisis estudiados en la investigación y la evaluación de los efectos de las vibraciones de una edificación en la normativa venezolana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, D.E., and Murray, T.M. (1993). “Design Criterion for Vibrations Due to Walking.” *AISC Engineering Journal*, 4th Qtr, 117-129.

Alvis, S.R. (2001). “An Experimental and Analytical Investigation of Floor Vibrations.” M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Avci, O. (2005). “Effects of Bottom Chord Extensions on the Static and Dynamic Performance of Steel Joist Supported Floors.” Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Bachmann, H. and Ammann, W. (1987). *Vibrations in Structures Induced by Man and Machines*. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland.

Bachmann, H. et al. (1995). *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Birkhauser, Verlag, Basel.

Barrett, A.R. (2006). “Dynamic Testing of In-Situ Composite Floors and Evaluation of Vibration Serviceability Using the Finite Element Method.” Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

CSI (2004). *SAP2000—Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures—User’s Manual, Version 9*. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.

CSI (2005). *SAP2000—Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures—User’s Manuals, Version 10*. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.

Davis, D.B. and Murray, T.M. (2007a). “Vibration Tests of Consolidated Systems, Inc. 30 ft Deep-Dek® Composite Slab Floor,” Report No. CEE/VPI-ST07/01, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Davis, D.B. and Murray, T.M. (2007b). “Comparisons of Measured Natural Frequencies and Walking Accelerations to Design Guide Predictions.” *Proceedings of the Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, Porto, Portugal.

Davis, D.B., Barrett, A.R., and Murray, T.M. (2007). “Use of a Force Plate versus Armature Accelerometer for Measuring Accelerance Frequency Response Functions in Low Frequency Civil Structures.” *Proceedings of the 18th Engineering Mechanics Division Conference*, ASCE, Reston, Virginia.

Ellis, B.R. (2000). “On the Response of Long-Span Floors to Walking Loads Generated by Individuals and Crowds.” *The Structural Engineer*, 78 (10), 17–25.

Ellis, B.R. (2001). “Serviceability Evaluation of Floor Vibration Induced by Walking Loads.” *The Structural Engineer*, 79(21), 30-36.

Murray, T.M., Allen, D.E., and Ungar, E.E. (1997). “Steel Design Guide Series 11: *Floor Vibrations Due to Human Activity*.” American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois.

Murray, T.M. and Boice, M.D. (2006) "How Accurate are Current Floor Vibration Procedures?" *North American Steel Conference Proceedings*, AISC, Chicago, Illinois..

Smith, A.L., Hicks, S.J., and Devine, P.J. (2007). *Design of Floors for Vibration: A New Approach*, The Steel Construction Institute (SCI), Silwood Park, Ascot, Berkshire.

Young, P. (2001) “Improved Floor Vibration Prediction Methodologies.” *Proceedings of Arup Vibration Seminar on Engineering for Structural Vibration—Current Developments in Research and Practice*, Institution of Mechanical Engineers, London, U.K.