



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

FACULTAD DE INGENIERÍA

*ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL*

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

---

**VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS: CASO DE ESTUDIO  
GRADERÍO DE ESTADIO DE FÚTBOL DE LA UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**

---

AUTOR:

Cristhian Andrés Escalante Guevara

DIRECTOR:

Ing. Oscar Jaramillo

QUITO, 2021

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por haber sido el apoyo incondicional en lo personal, estudiantil, económico, emocional durante la carrera y por ser los pilares fundamentales que me han llevado a ser la persona que soy.

A una persona muy especial para mí la cual siempre ha sido mi soporte, la persona que me ha ayudado siempre y me impulsa a ser mejor cada día y a superarme sin importar el obstáculo.

A la Pontificia Universidad Católica la cual me dio la oportunidad de formarme como profesional dentro de ella y poder defenderla y respetarla siempre, y un agradecimiento a los integrantes del ACI Student Chapter Puce por ser unos grandes colegas y amigos.

A los ingenieros y docentes Patricio Torres, Marcos Jacome, Julio Penaherrera, Oscar Jaramillo, Pablo Daza, Mauricio Cely, Carlos Celi y Patricio Castro por ser quienes a lo largo de este camino me guiaron y demostraron que aunque sea difícil el camino no es imposible. Especialmente a los ingenieros Oscar Jaramillo, Carlos Celi y Patricio Castro quienes me brindaron su tiempo conocimientos y su guía durante la elaboración del presente trabajo.

## **DEDICATORIA**

A Dios. Ya que el me dio los medios, la capacidad y habilidad para no rendirme bajo ningun concepto y poder lograr los objetivos .

A mi padre, Alex. A mi madre, Tatiana. A Patricio. Y a mis hermanos Maria Jose y Sebastian. Quienes siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas y quienes fueron la columna que me apoyo a lo largo de la carrera y el proceso de elaboracion de esta tesis. Y a Maria Belen quien es una persona muy importante en mi vida la cual a sido la persona que me hace querer ser mejor dia a dia.

A mis amistades Byron C., Felipe E., Bryan M., July M., Alex V., Fernanda A., Ivett S., Israel C., Sebastian C., Mario C., Stefany C., amistados que atesoro y valoro mucho.

## RESUMEN

La presente tesis de disertación tiene por objeto, el analizar las vibraciones que se generan en una estructura tipo de estadio desde sus orígenes, modelación matemática y los efectos como momentos, cortantes y cargas axiales sobre los elementos estructurales, tomando como caso de estudio una sección de graderíos.

Por lo cual, se investigó acerca de las cargas dinámicas que produce un ser humano, las propiedades dinámicas de una estructura, los procesos de modelación para el software estructural Robot, el efecto de amplificación dinámica o resonancia. También se definió una densidad de personas por metro cuadrado y la carga que estas van a representar estática y dinámicamente acorde a la bibliografía presentada.

Finalmente, se determinó los valores de aceleración, desplazamiento, momentos, cortantes y cargas axiales en los elementos que conforman la estructura ante las vibraciones de 1.5 y 2.8 Hz de frecuencia y combinaciones de carga que ayuden al diseño mediante el método LRFD (o método de última resistencia).

## **ABSTRACT**

The purpose of this dissertation thesis is to analyze the vibrations that are generated in a type of stadium structure from its origins, mathematical modeling, and the effects such as moments, shears, and axial loads on the structural elements, taking as a case study a section of bleachers.

Therefore, it was investigated about the dynamic loads that a human being produces, the dynamic properties of a structure, the modeling processes for the Robot structural software, the effect of dynamic amplification or resonance. Also defined a density of people per square meter and the load that these are going to represent statically and dynamically according to the bibliography presented.

Finally, the values of acceleration, displacement, moments, shear, and axial loads in the elements that make up the structure were determined in the face of vibrations of 1.5 and 2.8 Hz frequency and load combinations that help design by LRFD method.

# Índice de Contenidos

---

<b>1. Capítulo 1: Generalidades.</b> .....	<b>12</b>
1.1. Planteamiento del problema. ....	12
1.2. Justificación. ....	16
1.3. Objetivos. ....	17
1.3.1 Objetivo general .....	17
1.3.2 Objetivos específicos . ....	17
1.4. Antecedentes. ....	17
1.5. Introducción.....	19
1.6. Alcance. ....	21
<b>2. Capítulo 2: Marco Teórico.....</b>	<b>22</b>
2.1 Vibraciones.....	22
2.1.1 Vibraciones en los sistemas de pisos. ....	23
2.2 Cargas dinámicas.....	24
• Cargas de impacto. ....	24
2.3 Impacto producido por el salto de las multitudes. ....	25
2.3.1 Por carga de pulso.....	25
2.3.2 Por carga rítmica.....	25
2.3.3 Monitoreo de las vibraciones.....	27
2.4 Normativa aplicada. ....	28
2.4.1 Normativa para el control de vibraciones. ....	29
<b>3. Capítulo 3: Análisis de la Estructura.....</b>	<b>31</b>
3.1 Tipo de Estructura. ....	31
3.2 Características. ....	34
3.2.1 Características Generales.....	34
3.2.2 Características del estadio.....	35
3.3 Consideraciones de diseño. ....	53
1. Ubicación y Orientación.....	54
2. Capacidad .....	54
3. Acceso y evacuación de espectadores.....	55
4. Zona de juego.....	56
5. Banco de jugadores.....	57
6. El espectador.....	57
7. Estacionamientos.....	58
8. Criterios constructivos - estructurales.....	58
3.4 Normativa utilizada en el diseño. ....	60

<b>4. Capítulo 4: Modelación.....</b>	<b>61</b>
4.1 Modelación de la vibración.....	61
4.1.1 Acciones de bajo impacto.....	62
4.1.2 Acciones de alto impacto.....	85
4.2 Modelación de la estructura.....	102
4.2.1 Normas y unidades.....	102
4.3 Ejes y plantas en el espacio.....	105
4.3.1 Definición de columnas, vigas, losas y apoyos.....	108
4.3.2 Propuesta de estructura nueva.....	113
<b>5. Capítulo: Resultado de los análisis.....</b>	<b>117</b>
5.1 Análisis Footfall, rango de frecuencias 1.5-2.5 Hz realizando 43 pasos.....	119
5.1.1 Aceleración en el nudo 12.....	119
5.1.2 Coeficiente de Respuesta nudo 12.....	121
5.2 Máximo aforo de personas que soporta el graderío, dentro de todos los valores del rango (1.5-2.8 Hz), realizando la actividad de salto con una duración de 30 segundos con intervalo de 0.4 s entre cada salto.....	122
5.3 Valores de Diseño para vigas y columnas.....	141
<b>6. Capítulo : Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>153</b>
6.1 Conclusiones.....	153
6.2 Recomendaciones.....	156
<b>7. Bibliografía.....</b>	<b>157</b>

# Índice de Ilustraciones

---

<i>Ilustración 1: Sistema de ejes utilizado para definir las direcciones de vibración (ISO 2631, BS 6472 y BS 6481).</i>	13
<i>Ilustración 2: Relación de aceleración y frecuencia de piso en diferentes actividades humanas según la ISO (ISO 2631-2, 1989).</i>	14
<i>Ilustración 3: Comparación entre aceleración máxima y aceleración rms para diferentes curvas (SCI_P354, 2012)</i>	16
<i>Ilustración 4: Vista en planta del Estadio de la Universidad Católica.</i>	31
<i>Ilustración 5: Esquema sistema de cubiertas lado Este y Oeste del estadio.</i>	32
<i>Ilustración 6: Sistema estructural de graderíos tribuna este.</i>	32
<i>Ilustración 7: Sistema estructural graderíos ingreso lateral.</i>	33
<i>Ilustración 8: Estructura tipo pórtico o marco rígido (Jaramillo, 2004).</i>	34
<i>Ilustración 9: Localización del campus de Nayon de la PUCE (Google maps, 2021).</i>	35
<i>Ilustración 10: Configuración de los graderíos.</i>	36
<i>Ilustración 11: Esquema de dimensiones de gradas para transporte (ESTEYCO, S.A, 1982).</i>	37
<i>Ilustración 12: Esquema de dimensiones de gradas para los asientos de los espectadores</i>	37
<i>Ilustración 13: Altura máxima de los asientos en las gradas (ESTEYCO, S.A, 1982).</i>	38
<i>Ilustración 14: Componentes de la fórmula de calidad de visibilidad (UEFA, 2013).</i>	39
<i>Ilustración 15: Componentes de la fórmula de calidad de visibilidad (UEFA, 2013).</i>	40
<i>Ilustración 16: Viga de los pórticos del estadio (Elaboración propia).</i>	41
<i>Ilustración 17: Pórtico porta-gradas (Elaboración propia).</i>	41
<i>Ilustración 18: Localización de los pórticos porta-gradas (Elaboración propia).</i>	42
<i>Ilustración 19: Pórtico de Entrada (Elaboración propia).</i>	43
<i>Ilustración 20: Localización de los pórticos de entradas (Elaboración propia).</i>	44
<i>Ilustración 21: Grada tipo recto (Elaboración propia).</i>	45
<i>Ilustración 22: Gradas tipo curva (Elaboración propia).</i>	46
<i>Ilustración 23: Localización de las gradas tipo curvo (Elaboración propia).</i>	47
<i>Ilustración 24: Dimensiones y localización de antepecho (Elaboración propia).</i>	48
<i>Ilustración 25: Dimensiones de los accesos (Elaboración propia).</i>	49
<i>Ilustración 26: Distribución de accesos (Elaboración propia).</i>	50
<i>Ilustración 27: Localización de zapatas aisladas (Elaboración propia).</i>	51
<i>Ilustración 28: Vista en corte de la cubierta (Elaboración propia).</i>	52
<i>Ilustración 29: Vista en planta de la cubierta (Elaboración propia).</i>	53
<i>Ilustración 30: Dimensiones de la zona de juego del estadio de la Universidad Católica.</i>	56
<i>Ilustración 31: Banco de jugadores (FIFA, 2013).</i>	57
<i>Ilustración 32: Ejemplos de historiales de caminatas para 4 casos diferentes (M R Willford, P Young, 2007).</i>	63
<i>Ilustración 33: Deformación y frecuencia de la viga simplemente apoyada respecto a sus tres primeros modos (M R Willford, P Young, 2007).</i>	65
<i>Ilustración 34: Viga simplemente apoyada con una excitación en la mitad del vano (M R Willford, P Young, 2007).</i>	66
<i>Ilustración 35: Comparación de respuesta de la estructura respecto a velocidad entre una estructura de frecuencia natural de 3 Hz con una estructura de frecuencia natural de 4 Hz (M R Willford, P Young, 2007).</i>	70
<i>Ilustración 36 : Gráfico de Factor de respuesta vs Frecuencia de estimulación por numero armónico.</i>	74
<i>Ilustración 37: Gráfica de Velocidades medidas y pronosticadas a una velocidad de marcha de 100 pasos por minuto (M.R. Willford, P. Young, 2007).</i>	75
<i>Ilustración 38: Modelamiento de la estructura de ejemplo para análisis.</i>	77
<i>Ilustración 39: Cuadro de opciones para dividir elemento.</i>	78
<i>Ilustración 40: Cuadro de tipo de análisis.</i>	79
<i>Ilustración 41: Cuadro para definir un nuevo caso de análisis.</i>	79
<i>Ilustración 42: Cuadro de parámetros para análisis modal.</i>	79
<i>Ilustración 43: Modos de vibración de la estructura de ejemplo</i>	81

<b>Ilustración 44:</b> Cuadro de resultados dinámicos análisis modales.	82
<b>Ilustración 45:</b> Cuadro de parámetros de análisis para Footfall.	82
<b>Ilustración 46:</b> Cuadro de opciones para casos de carga.	94
<b>Ilustración 47:</b> Caso de carga "Carga Dinámica" definido en el cuadro de casos de carga.	95
<b>Ilustración 48:</b> Cuadro de opciones para aplicar una carga.	95
<b>Ilustración 49:</b> Cuadro para definir parámetros de la carga uniforme rectangular.	96
<b>Ilustración 50:</b> Áreas designadas para análisis.	97
<b>Ilustración 51:</b> Cuadro de parámetros de análisis temporal.	98
<b>Ilustración 52:</b> Cuadro para definir la función de tiempo.	100
<b>Ilustración 53:</b> Cuadro para definir la función a utilizar para el análisis tiempo-historia.	101
<b>Ilustración 54:</b> Función 2.8 Hz para representar la vibración creada por el salto de un grupo.	101
<b>Ilustración 55:</b> Función 1.5 Hz para representar la vibración creada po el salto de un grupo.	102
<b>Ilustración 56:</b> Preferencias para el Proyecto.	103
<b>Ilustración 57:</b> Preferencias Regionales.	104
<b>Ilustración 58:</b> Normas y catálogos utilizados.	104
<b>Ilustración 59:</b> Definición de las plantas del pórtico.	105
<b>Ilustración 60:</b> Sistema de ejes globales del software.	106
<b>Ilustración 61:</b> Ejes o líneas de construcción para X.	106
<b>Ilustración 62:</b> Ejes o líneas de construcción para Z.	107
<b>Ilustración 63:</b> Ejes o líneas de construcción para Y.	107
<b>Ilustración 64:</b> Barra de herramientas.	108
<b>Ilustración 65:</b> Definición de vigas.	109
<b>Ilustración 66:</b> Menú de relajación.	109
<b>Ilustración 67:</b> Definición de Columnas.	110
<b>Ilustración 68:</b> Definición de Losas.	110
<b>Ilustración 69:</b> Demostración de los ejes de cada elemento de la estructura.	111
<b>Ilustración 70:</b> Menú de las opciones de mallado.	112
<b>Ilustración 71:</b> Menú de selección.	112
<b>Ilustración 72:</b> Menú de apoyos.	113
<b>Ilustración 73:</b> Configuración de estructura pasada.	114
<b>Ilustración 74:</b> Vista en planta de los ejes de columnas (Elaboración propia).	115
<b>Ilustración 75:</b> Propuesta de nueva configuración de la estructura (Elaboración propia).	116
<b>Ilustración 76:</b> Modelamiento final de la estructura en Robot Structural Analysis.	117
<b>Ilustración 77:</b> Localización del nudo a analizar.	118
<b>Ilustración 78:</b> Frecuencia vs Aceleración Nudo 12 en Análisis Footfall.	119
<b>Ilustración 79:</b> Mapa de aceleración por análisis Footfall.	120
<b>Ilustración 80:</b> Mapa de coeficiente de respuesta.	121
<b>Ilustración 81:</b> Gráficas aceleración vs tiempo de los valores extremos del rango de frecuencias en el nudo 12 (1.5 y 2.8 Hz).	126
<b>Ilustración 82:</b> Localización elementos 26 y 27.	127
<b>Ilustración 83:</b> Deflexión en los elementos 26 y 27 zona 5 cargada.	128
<b>Ilustración 84:</b> Deflexion en elementos 26 y 27 por vibraciones en la zona 5 a 2.8 Hz.	128
<b>Ilustración 85:</b> Deflexión máxima admisible calculada. (ACI 318-14, 2014).	129
<b>Ilustración 86:</b> Momento Flector máximo para elementos 26 y 27 con la zona 5 cargada.	130
<b>Ilustración 87:</b> Momento Flector máximo para elementos 26 y 27 por vibraciones en zona 5 cargada a 2.8 Hz.	131
<b>Ilustración 88:</b> Esfuerzo Cortante máximo para elementos 26 y 27 con la zona 5 cargada	132
<b>Ilustración 89:</b> Esfuerzo Cortante máximo para elementos 26 y 27 por vibraciones en zona 5 cargada a 2.8 Hz.	133
<b>Ilustración 90:</b> Localización de elementos 9 y 8.	134
<b>Ilustración 91:</b> Carga puntual sobre las columnas por zona de carga 5 en los elementos 9 y 8.	134
<b>Ilustración 92:</b> Carga puntual sobre las columnas por zona 5 de carga con una actividad 2.8 Hz de frecuencia en los elementos 9 y 8.	135

<b>Ilustración 93:</b> Diferentes respuestas a varias frecuencias de estimulación (Elaboración Propia).	140
<b>Ilustración 94:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 1.	142
<b>Ilustración 95:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 1.	142
<b>Ilustración 96:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 2.	143
<b>Ilustración 97:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 2.	143
<b>Ilustración 98:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 3.	144
<b>Ilustración 99:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 3.	144
<b>Ilustración 100:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 4.	145
<b>Ilustración 101:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 4.	145
<b>Ilustración 102:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 5.	146
<b>Ilustración 103:</b> Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 5.	146
<b>Ilustración 104:</b> Valores máximos y mínimos generados por el carga de 0.24 ton/m <sup>2</sup> en la zona 5.	147
<b>Ilustración 105:</b> Valores máximos y mínimos generados por el peso propio.	147
<b>Ilustración 106:</b> Valores máximos y mínimos generados por la combinación de carga 1.2 CM+1.2 CV+1.0 CS	149
<b>Ilustración 107:</b> Deflexión generados por la zona 5 cargada con la combinación de carga para los elementos 26 y 27.	150
<b>Ilustración 108:</b> Momentos flectores generados por la zona 5 cargada con la combinación de carga para los elementos 26 y 27.	150
<b>Ilustración 109:</b> Esfuerzos cortantes generados por la zona 5 cargada con la combinación de carga para los elementos 26 y 27.	151
<b>Ilustración 110:</b> Cargas puntuales generadas por la zona 5 cargada con la combinación de carga para los elementos 9 y 8.	152

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Reacción a varios niveles de aceleración en tribunas en términos de la aceleración debido a la gravedad (SCI_P354, 2012).	15
<b>Tabla 2:</b> Frecuencias típicas provocadas por un ser humano. (Barrios et al, 2000).	26
<b>Tabla 3:</b> Percepción y magnitud de vibraciones (ISO 2631-1(1997) (Ramos Romero, 2014).	30
<b>Tabla 4:</b> Aceleración máxima para rangos de frecuencia en análisis Footfall (M.R. Willford, P. Young, 2007).	73
<b>Tabla 5:</b> Coeficientes de Fourier y de desfase respecto al número armónico de diferentes radios de contacto para grupos pequeños de personas (The Steel Construction Institute, 2009).	88
<b>Tabla 6:</b> Coeficientes de Fourier y de desfase respecto al número armónico de diferentes radios de contacto para grupos grandes de personas.	89
<b>Tabla 7:</b> Aceleraciones máxima para cada frecuencia de estimulación (Elaboración propia).	126
<b>Tabla 8:</b> Valores de Momento Máximo respecto a cada frecuencia de estimulación (Elaboración propia).	130
<b>Tabla 9:</b> Valores de Esfuerzo para cada frecuencia de estimulación. (Elaboración propia).	132
<b>Tabla 10:</b> Valores de Fuerza axial para cada frecuencia de estimulación. (Elaboración propia).	136
<b>Tabla 11:</b> Factores de amplificación para las fuerzas generadas en los elementos (Elaboración propia).	148

## Índice de Ecuaciones

---

<i>Ecuación 1: Calidad de Visibilidad para graderíos (UEFA, 2013)</i> .....	39
<i>Ecuación 2: Ancho de Escalares (BR. Augusto Alvarado, br. Piero Ramírez, 2015)</i> . ....	55
<i>Ecuación 3: Rango promedio de frecuencia de estimulación</i> . ....	64
<i>Ecuación 4 : Relación entre frecuencia natural y frecuencia de estimulación (M R Willford, P Young, 2007)</i> . ....	68
<i>Ecuación 5: Formula factor de respuesta para análisis Footfall (M.R. Willford, P. Young, 2007)</i> .....	73
<i>Ecuación 6: Factor de respuesta total del modo (M.R. Willford, P. Young, 2007)</i> .....	73
<i>Ecuación 7: Velocidad media (M R Willford, P Young, 2007)</i> .....	76
<i>Ecuación 8: Respuesta para análisis transitorio (M R Willford, P Young, 2007)</i> . ....	76
<i>Ecuación 9: Función tiempo-historia para representar la carga de salto individual (The Steel Construction Institute, 2009)</i> . ....	87
<i>Ecuación 10: Función tiempo-historia para representar la carga de salto considerando parámetros de multitud (Ji. T, Ellis. B. R, 1993)</i> . ....	90
<i>Ecuación 11: Función tiempo-historia para representar la carga de salto para casos especiales (The Steel Construction Institute, 2009)</i> . ....	91
<i>Ecuación 12: Factor de amplificación dinámica (The Steel Construction Institute, 2009)</i> . ....	92
<i>Ecuación 13: Función simplificada tiempo-historia para representar la carga de salto (The Steel Construction Institute, 2009)</i> . ....	93
<i>Ecuación 14: Frecuencia que produzca la fuerza máxima</i> . ....	93

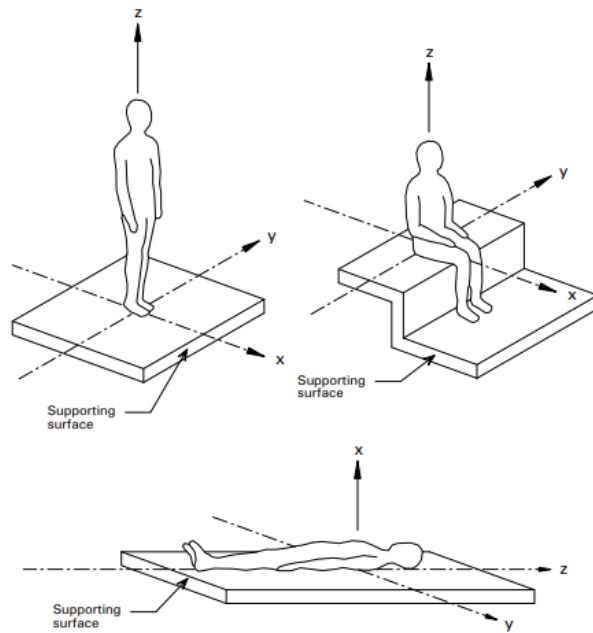
# **1. Capítulo 1: Generalidades.**

## **1.1. Planteamiento del problema.**

---

Un estadio al ser una estructura diseñada y pensada para el entretenimiento de un número amplio de personas, lo convierte en una estructura en la que se hace necesario realizar estudios y análisis de los efectos que pueden producir las excitaciones de una masa considerable de personas que al entrar en sincronización y provocar una vibración que posea una frecuencia que llegue a igualarse con la frecuencia natural del elemento estructural, de esta manera provocando el fenómeno de resonancia y por ende llegando a sobrepasar los límites tanto constructivos como límites de confort y seguridad por las normativas de construcción establecidas por cada país, guías de diseño como la establecida por la AISC y las normas ISO, SCI y BS en las cuales se realiza el análisis a detalle de las vibraciones en pisos, haciendo que la estructuras llegue una un estado límite. La estructura por ser muy sensible al estado límite de vibraciones, se hace fundamental el control de las vibraciones que se pueden generar en la misma lo cual hace que la modelación de los estadios sea de gran importancia para el estudio en los casos más extremos que se pudiesen generar.

La percepción humana de las vibraciones es la combinación de movimientos, percepción física y la reacción psicológica. El valor base de la aceleración es el parámetro que ayuda a que la vibración o las vibraciones sean perceptibles para el ser humano, la aceleración puede ser percibida dependiendo de la dirección de orientación del cuerpo humano y para ello se utiliza el sistema de coordenadas céntrico básico en el cual el eje Z está alineado con la columna vertebral de la persona, el eje X se encuentra de manera perpendicular al eje Z y orientada hacia adelante o detrás de la persona, el eje Y se encuentra orientado de izquierda a derecha o viceversa del individuo, como se muestra en la imagen.



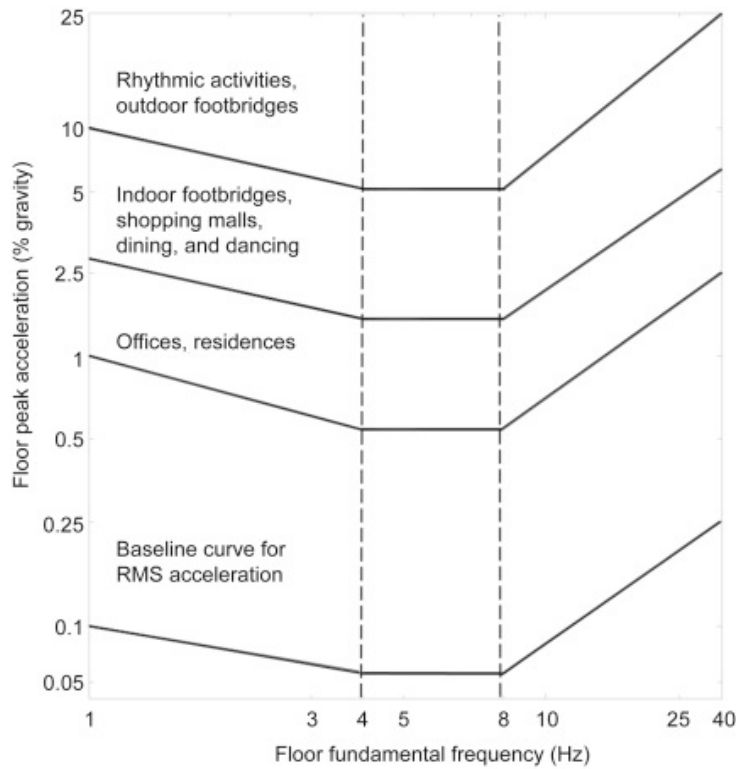
**Ilustración 1:** Sistema de ejes utilizado para definir las direcciones de vibración (ISO 2631, BS 6472 y BS 6481).

La sensibilidad o detección del caso será variable dependiendo de cada individuo que se encuentre en el mismo lugar y sujeto a la misma vibración, dependiendo de la frecuencia de ocurrencia y duración. Dado que la percepción cambia entre humanos, el establecer un límite exacto que garantice que la respuesta que brindará el sistema de pisos o graderíos no dé lugar a sensaciones adversas para los ocupantes a lo largo de su estancia en la estructura. El malestar personal puede hacerse presente en diferentes grados para una persona que se encuentre sentada en un escritorio de oficina, que para una persona que se encuentra manejando una máquina o para un fanático en un estadio, para resolver este problema las normas incluyen factores multiplicadores.

Aunque no se puedan establecer límites para las respuestas de los pisos ante las vibraciones, si se pueden establecer criterios limitantes de vibración enfocados en que las aceleraciones sean tolerables para el ser humano en cuanto a comodidad de usuario.

La ISO (Organización Internacional de Estandarización) estableció un criterio limitante para la vibración, en la cual por la forma de la curva nos podemos ir referenciando acerca de los

niveles de aceleración más bajos que son 4–8 Hz lo cual los convierte tolerable. Estos rangos se deben a dos razones: la fisiología humana contiene el rango de 4–8 Hz (Grether, 1971), y las excitaciones normales para caminar contienen armónicos de 4, 6 y 8 Hz, lo que conducirá a eventos resonantes más frecuentes en este rango (Allen et al., 1999).



**Ilustración 2:** Relación de aceleración y frecuencia de piso en diferentes actividades humanas según la ISO (ISO 2631-2, 1989).

De igual manera la guía de diseño de la AISC nos recomienda que un límite de aceleración para vibraciones causadas por actividades rítmicas es del 4 al 7 % del valor de la gravedad es decir valores entre  $0.3924 \frac{m}{s^2}$  y  $0.6867 \frac{m}{s^2}$ ; esto es equivalente a un factor de multiplicación de 55 a 97. Pruebas recientes sugieren que un factor de respuesta de 120 es aceptable para pistas de baile en clubes nocturnos, donde la música alta y la iluminación tenue reducirán la percepción y la visión. De las pruebas realizadas en las tribunas, este nivel de respuesta se ha

descrito como "perturbador". Sin embargo, cabe señalar que los valores de la tabla se derivaron de pruebas en las que se impusieron a la multitud niveles menos extremos de luz y sonido.



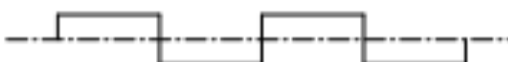
<b>Aceleración RMS (raíz media cuadrada) % g</b>	<b>Equivalencia del factor de respuesta, R</b>	<b>Reacción</b>
< 3.5	< 69.4	Limite razonable para una persona pasiva
< 12.7	< 249.7	Molestoso
< 24.7	< 342.7	Inaceptable
>24.7	>342.7	Probable causante de pánico

**Tabla 1:** Reacción a varios niveles de aceleración en tribunas en términos de la aceleración debido a la gravedad (SCI\_P354, 2012).

En el estudio de vibraciones como las generadas por unas personas al caminar se utiliza una aceleración RMS en lugar de una aceleración máxima debido a que la aceleración RMS brinda resultados más claros y reales de la vibración a lo largo del tiempo, y los picos agudos en una respuesta que de otro modo sería baja son menos significativos. Sin embargo, para poder realizar el análisis y comparación entre las vibraciones generadas por una persona al caminar con las vibraciones generadas por grupos al saltar de manera sincronizada se va a utilizar la aceleración máxima ya que podemos obtener estos datos de ambos análisis.

Existen muchas formas de mostrar la aceleración que posee un sistema en movimiento. La más notoria es la aceleración máxima, o aceleración pico. El problema de la aceleración máxima no muestra la cantidad de tiempo que el cuerpo va a seguir moviéndose con ese nivel de aceleración, como se explicó anteriormente. Al contrario, la aceleración RMS (Root-Mean-Square O Raíz Cuadrada Media) le muestra la media de la magnitud de la aceleración.

A continuación, en la **Ilustración 3** acerca de la comparación entre la aceleración máxima y la aceleración RMS aplicada en curvas ya sea sinodales, triangulares o cuadradas.

<b>Waveform</b>		$a_{peak}$	$a_{rms}$
	Sine	1	$1/\sqrt{2}$
	Triangular	1	$1/\sqrt{3}$
	Square	1	1

*Ilustración 3:* Comparación entre aceleración máxima y aceleración rms para diferentes curvas (SCI\_P354, 2012)

## **1.2. Justificación.**

A lo largo del tiempo el ser humano siempre ha buscado la manera de asentarse y desarrollar su vida en un lugar específico y seguro, gracias a estas necesidades nacen las obras civiles ya sean obras para mejorar la calidad de vida de una población, como para brindar comunicación entre poblaciones, y unas de las más importantes de brindar un lugar seguro el cual pueda proteger y proveer de calor, allí es donde comienza a nacer la ingeniería estructural la misma que a lo largo de la historia ha ido mejorando y evolucionando, haciendo que cada vez se estudie más a detalles cualquier efecto que se pueda producir en una estructura para poder garantizar la seguridad de las personas que se pueden encontraren su interior. Por estas razones, la motivación de esta investigación es el estudio de efectos que pueden provocar las vibraciones en los estadios, ya que al ser una obra estructural de una gran dificultad como importancia se debe considerar cada efecto que se pueda provocar sobre esta y la manera de poder controlarlo de la misma manera para poder proveer la seguridad a los espectadores.

### **1.3. Objetivos.**

---

#### **1.3.1 Objetivo general**

---

Estudiar los efectos que se producen al momento de generarse vibraciones de frecuencias variables en estructuras de ingeniería de gran capacidad e importancia como son los estadios.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

---

- Modelamiento en el Software Estructural Robot, de una porción o sección de un graderío tipo estadio, similar al que se va a construir para el equipo de la Universidad Católica; en los cuales se simularán diferentes estados de vibraciones y se observarán si la estructura diseñada soportaría estos fenómenos.
- Verificar el cumplimiento de las diferentes normativas estructurales; específicamente en los apartados que traten acerca de los fenómenos creados por las vibraciones.
- Ofrecer soluciones para poder distribuir de mejor manera las vibraciones sobre los graderíos en un estadio.
- Determinar que parámetros se utilizan para brindar un mejor confort al usuario con respecto a las vibraciones en los estadios y estructuras similares.

### **1.4. Antecedentes.**

---

En la ingeniería estructural nace la preocupación de los efectos múltiples y dañinos que puede realizar la dinámica o el movimiento actuante sobre ellas, al comenzar el estudio de la dinámica que puede ocurrir sobre las estructuras surge la idea o la preocupación de las vibraciones, las cuales se pueden generar de muchas maneras ya sea por la naturaleza, el ser humano u ocasiones de diferente índole, en ciertos casos el diseño estructural resulta ser vulnerable a los

efectos producidos por cargas dinámicas como sismos, vientos, maquinarias, personas o aquellas cargas que se aplican súbitamente causando un impacto sobre la estructura.

La mayoría de las estructuras se encuentran sometidas a cargas dinámicas, unas más que otras. En nuestro caso las más expuestas a excitaciones por las vibraciones son los puentes y estructuras con una gran capacidad de contener a personas ya que al poseer una alta concentración de estas en momentos claves, esta cantidad de personas sincronizadas pueden ocasionar vibraciones considerables sobre el elemento.

En el caso de llegar al peor de los escenarios el cual es que se llegue a un límite de frecuencia que produzca vibraciones que puedan sincronizarse con la frecuencia natural de la estructura generando resonancia y provocando un colapso o inhabilitación de la estructura.

A lo largo de la historia se ha presenciado el colapso o fallo de muchas estructuras debido a la afectación de sus propiedades de rigidez y resistencia, y gracias a esto la pérdida de muchas vidas y daños a la sociedad, casos como el del Puente-T (Japón, 1989) y el Puente del Milenio (Londres, 2000), Puente de Broughton (1831), El puente Tacoma Narrows (1940) y en nuestro caso de interés el caso del estadio Ibrox ubicado en Glasgow.

En el año 1902 el estadio Ibrox ocurrió la primera gran tragedia del mundo fútbol cuando una de sus tribunas de madera colapsó y 25 personas murieron al caer al vacío. Años posteriores en 1971 el 2 de enero el estadio sufrió otro acontecimiento al finalizar un partido y el momento de retirarse los espectadores ya sea por mal diseño o visibilidad en una colina alguien cayó. Más tropiezos sucedieron hasta que la gente empezó a aplastarse. Para no alejarnos mucho en el tiempo y observar los verdaderos efectos que se producen en un estadio debido a las vibraciones nos dirigimos al año 2019 el 19 de mayo en la ciudad de Frankfurt am Mein en Alemania se produjo un fenómeno documentado en el cual en un momento clave del evento deportivo la mayoría de los aficionados saltaron o celebraron al mismo tiempo lo cual hizo que

la estructura entre en un estado de frecuencia tal en el cual a simple vista se podía observar cómo se producían las deflexiones momentáneas.

Después de haber sido presentes tantos casos de tragedia se crean las Normas y Códigos Internacionales como el EUROCÓDIGO, la Norma Británica BS 5400, BRO 2004 y la ISO 10137 los cuales son más generalizadas para los eventos de vibraciones en las estructuras, las normas establecidas para estadios o palacios del deporte son EHE, IAP, CTE y EAE, aunque del mismo modo la FIFA establece que se debe utilizar las normas constructivas del país donde se va a localizar el estadio o palacio del deporte.

A pesar del establecimiento de las diferentes medidas de control siempre van a existir casos no previstos como el último ejemplo dado que a pesar de no tener tragedias humanas siempre se debería controlar los efectos que puedan atentar contra ellas.

Basándose en lo escrito y planteado anteriormente, en este trabajo de disertación se presentará el análisis o estudio de las vibraciones en los estadios y los efectos perjudiciales sobre los mismos relacionándonos tanto con normas ecuatorianas como con normas extranjeras, y basándonos en modelos matemáticos y modelos a escala hechos en Software.

## **1.5. Introducción.**

---

En el presente trabajo se va a presentar el estudio de las vibraciones en estructuras específicamente en los estadios de deportes, basándonos en el esquema real y unidad de análisis los graderíos tentativos del estadio de la Universidad Católica y el cual se realizará en la ciudad de Quito, cuya fecha programada de construcción está agendada para el año 2021, el cual será diseñado para aproximadamente 10000 espectadores. Este estadio será construido en el sector de Nayón y se prevé que esté terminado en el año 2022.

La presente tesis, está dividida en capítulos, en los cuales se irán desarrollando el problema de la investigación, la realidad de esta, la formulación del problema, la justificación, los objetivos y posibles soluciones que se puedan dar al caso. Al igual que el marco teórico donde se mostrarán los antecedentes y la base teórica en la cual se va a fundamentar el análisis del problema.

La vibración mecánica de un cuerpo sólido se puede describir como el movimiento del mismo alrededor de su posición de equilibrio sin que se produzca un desplazamiento, si el objeto en cuestión entra en contacto con algún otro cuerpo la energía que se produjo por la vibración podrá ser transmitida al nuevo cuerpo en mención. Esta energía al ser transmitida podrá generar diversos efectos sobre el cuerpo, los cuales pueden ser perjudiciales y no perjudiciales, esto dependiendo de las características de la vibración. Las personas en movimiento durante conciertos o eventos deportivos pueden saltar (generando fuerzas impulsivas) o bailar. Estos movimientos son continuos y rítmicos, y sus máximos puntos se pueden por los grupos ya sea en celebraciones por victorias deportivas o canciones durante conciertos que hagan excitar a las masas. En ocasiones, dependiendo del tipo de evento y momento, parte del público puede saltar coordinadamente.

La investigación se enfocará a los efectos que producen las grandes multitudes al crear vibraciones en la estructura y evaluar si las mismas pudiesen exceder los límites establecidos en las normas estructurales, es decir calificar si la estructura diseñada soportará los efectos que producen las vibraciones.

## **1.6. Alcance.**

---

En el presente trabajo de investigación se pretende estudiar e identificar los principales efectos negativos que se producen en una estructura tipo estadio, enfocados en una sección de esta como los graderíos, al momento de la presencia de grandes vibraciones producidas por los seres humanos. Para el desarrollo de esta propuesta de investigación, se desarrollará un estudio acerca de las vibraciones mecánicas en estructuras y el grado de aceptación de estas antes del momento de falla.

En esta investigación se pretende desarrollar un modelo en el software Robot Structural Analysis, en el cual se irán aplicando diferentes estados de vibraciones, para de esta manera lograr definir rangos en los cuales podría trabajar la estructura y brindar pautas de diseño de estas.

Procedimiento de análisis:

- Obtención de análisis pasados de estructuras.
- Definición de la estructura.
- Definición de las cargas que puedan producir vibraciones.
- Definición de unidad de análisis.
- Experimentación: Simulación de las cargas sobre la estructura en el Software Robot.
- Análisis de resultados.

## 2. Capítulo 2: Marco Teórico.

### 2.1 Vibraciones.

---

En la mecánica se define a la vibración como el fenómeno de movimiento que se repite varias veces en un tiempo o intervalo de tiempo determinado alrededor de un punto de equilibrio. Como ejemplo se puede establecer un resorte después de ser aplicado una fuerza ya que este se mueve desde su posición inicial hasta la final de manera repetida.

Para que se pueda definir a un sistema como vibratorio este debe poseer los componentes básicos los cuales son: el resorte, la masa y el amortiguador, dependiendo el caso en este estudio se definirá que componente es en comparación a los elementos básicos.

Es en el fenómeno de vibración donde se observa la transición entre energía potencial y cinética de manera alternada, en esta transición es donde se disipa la energía y si se requiere que este fenómeno continúe se deberá aplicar una fuerza externa (Rao, 2012), si es el caso contrario y se requiere la disipación de energía la solución sería la aplicación de un amortiguamiento.

A la vibración se la puede clasificar de la siguiente manera:

- Vibración libre.

Es aquella vibración en la cual después de una perturbación inicial, esta vibra sin ninguna influencia externa esto quiere decir que es la vibración restante después de la provocación de la vibración.

- Vibración forzada.

Al contrario de la vibración libre, la vibración forzada es la que, después de la perturbación inicial existe una fuerza externa que provoca que el sistema siga vibrando de una misma manera. Sí la frecuencia que alcanza el sistema provocado por la fuerza

externa coincide con la frecuencia natural del sistema se determina que el sistema se encuentra en resonancia.

- Vibración Amortiguada.

Esta se presenta cuando existe un cuerpo o elemento que ayuda a la disipación de energía mientras el sistema está vibrando.

- Vibración no amortiguada.

Al contrario de la anterior, esta se presenta cuando el sistema puede vibrar libremente y disipar la energía de manera constante sin ningún elemento que limite su vibración.

### **2.1.1 Vibraciones en los sistemas de pisos.**

Ya que la sección de los graderíos se diseñará y construirá con los criterios de una losa de hormigón inclinada, nos permitirá realizar el análisis de las vibraciones de la misma manera en la que se realiza para los sistemas de pisos.

Las vibraciones en los pisos o sistemas de pisos generalmente son producidas por fuentes intermitentes mecánicas, como el tráfico rodado y ferroviario, cuando se presenta este tipo de excitaciones es preferible que se trate a toda la estructura como un todo. De la misma manera un sistema de piso puede sufrir de vibraciones causadas por fuentes intermitentes por humano, una de las fuentes internas de excitación dinámica más habitual e importante es el tráfico de peatones.

Cuando una persona camina a un ritmo regular, se va aplicando una fuerza de manera periódica sobre el piso o sistema de piso sobre el que se encuentre. De manera general cuando se está realizando el diseño de estructura se deben prever este tipo de actividades para que la estructura no sea solamente fuerte y rígida, sino que también cumpla con los criterios de comodidad,

facilidad y seguridad de servicio. De la misma manera es importante realizar el análisis cuando existe la presencia de vibraciones causadas por fuentes internas como las actividades rítmicas realizadas por un grupo ya sea pequeño o grande de personas, esto para estructuras destinadas a gimnasios, palacios de deportes o estadios.

Una vez construido, el modificar un piso para reducir su susceptibilidad a las vibraciones no es una de las soluciones más adecuadas, ya que solo los cambios de gran significancia en la masa, rigidez o amortiguación del sistema de piso producirán una reducción importante en las amplitudes de vibración. Por lo tanto, es importante que los niveles de vibración aceptables se establezcan en la etapa conceptual, prestando especial atención al uso previsto del suelo.

## **2.2 Cargas dinámicas.**

---

Las cargas dinámicas son aquellas que varían su magnitud desde cero hasta los valores definitivos de manera rápida, se puede decir que son cargas que se aplican a un sistema en un periodo corto (R, 2007).

Se han definido dos tipos de cargas dinámicas:

- **Cargas de impacto.**

Son aquellas cargas que su efecto es repentino y rápido es decir estas se aplican y suprimen de una manera rápida lo que puede producir efectos vibratorios fugaces en los elementos de la estructura o la estructura completa.

- **Cargas Fluctuantes.**

Son las cargas que actúan y se desarrollan por períodos más alargados de tiempo, lo cual provoca variación en su intensidad. Este tipo de cargas generalmente son

provocadas por equipos mecánicos o fuerzas naturales como vientos, sismos, cargas pedestres, etc.

Estas cargas se pueden diferenciar de las estáticas por la presencia de modificaciones tanto en magnitud como en deformaciones, afectando la forma y el límite de rotura del elemento o sistema sobre el cual se esté aplicando la fuerza.

### **2.3 Impacto producido por el salto de las multitudes.**

En las estructuras que poseen la presencia de cargas dinámicas, se produce el fenómeno de vibración el cual puede afectar tanto a toda la estructura como a sus componentes, en este caso al ser un estadio de fútbol las cargas dinámicas que producen vibración van a ser de dos principales fuentes del ser humano (Rosales, 2001), las cuales son:

- Por carga de pulso.
- Por carga rítmica.

#### **2.3.1 Por carga de pulso**

Una vibración por carga de pulso se define como aquella carga que es aplicada instantáneamente. Un ejemplo de una carga de pulso en un estadio sería la de un aficionado al momento que realiza un salto, el cual causará vibraciones aun cuando el sistema intente volver a equilibrio estático.

#### **2.3.2 Por carga rítmica.**

Las causas típicas de la carga rítmica son: caminar, bailar, hacer ejercicio, clases o multitudes emocionadas. La carga rítmica de una multitud generalmente está coordinada por una señal musical cuando se utiliza una señal para establecer el tempo, la carga tiene dos componentes: un componente sincronizado y un componente estocástico (Parkhouse & Ewins, 2006).

Sí se produce una carga rítmica sobre un área determinada es posible que estas se puedan propagar a otros lugares, sí el sistema estructural no es lo suficientemente rígido o posee la amortiguación necesaria, al propagarse esta vibración puede ser detectada por otros usuarios si es lo suficientemente fuerte y si es un espacio cercano a donde se originó la vibración.

Los estadios y las salas de conciertos que en nuestro caso suelen ser en el mismo lugar, son lugares donde se produce la concentración de grandes cantidades de gente, las cuales debido a la excitación del evento que se estén presentando pueden causar grandes cantidades de energía de manera colectiva, lo cual se puede observar en los niveles de vibración, además que estas cargas pueden ser extremadamente densas, excitadas y lo suficientemente coordinadas que pueden ir más allá de la capacidad de servicio problemas y se convierten en problemas estructurales.

Tipo de Actividad	Intensidad de la Actividad	Frecuencia Hz
Saltar	Normal	2,0 - 3,0
	Altos	2,0 - 3,0
Bailar		2,0 a 3,0
Aplaudir de pie con saltos		1,6 a 2,4
Aplaudir	Normal	1,6 a 2,4
	Intenso	2,0
Oscilación lateral del cuerpo	Sentado	0,6
	Parado	0,6

**Tabla 2:** Frecuencias típicas provocadas por un ser humano. (Barrios et al, 2000).

Las vibraciones inducidas por humanos basadas en el ritmo son las más comunes de las dos fuentes principales.

### 2.3.3 Monitoreo de las vibraciones.

---

Las vibraciones inducidas en estructuras por una carga de impacto pueden ser estudiadas a partir del momento en que se termina la excitación, como la respuesta de la estructura a dicha carga (p. ej. Mejía, 1991). Las vibraciones provocadas por humanos en un estadio (saltar, aplaudir de manera armónica, bailar, etc.) deben ser analizadas en lapsos donde se realice dicha acción.

Para poder realizar el análisis de las vibraciones es necesario tener la información del monitoreo de estas, estos datos son obtenidos por el campo de monitoreo de salud estructural, el cual utiliza técnicas para extraer propiedades dinámicas tales como la frecuencia natural, los modos de vibración, las estimaciones de amortiguamientos.

Para aplicaciones que involucran vibraciones inducidas por humanos, un sistema de monitoreo debe ser capaz de recolectar lo siguiente información:

- Información de la condición de ocupación del sistema, lleno u ocupado.
- El tamaño y distribución de la multitud que se encuentra en la estructura.
- El nivel de actividad de la multitud presente.
- Datos ambientales, incluida la velocidad / dirección del viento y la temperatura del aire.

Para poder realizar una recopilación y análisis de datos se necesitarán aplicar diferentes técnicas para el caso del estadio ocupado y para el caso del estadio vacío. Para el caso del estadio ocupado se deberá realizar un monitoreo en tiempo real, para esto es posible que solo se necesite de acelerómetros en ubicaciones estratégicas que puedan alertar acerca de una superación en lugar de utilizar una matriz completa en muchos lugares. Los datos son procesados y monitoreados no necesitan registrarse ni se necesita de un acceso remoto. Antes del inicio de cada ocupación, el sistema debe habilitarse y desactivarse después de la multitud se ha dispersado (Marulanda, Thomson, & Marulanda, 2000).

Para poder realizar el análisis en el estadio vacío se pueden utilizar cualquiera de los dos tipos de identificación:

- Sistema de entrada-salida.
- Sistema de sólo salida.

El sistema de entrada-salida, comúnmente llamada vibración forzada, utiliza una fuente de excitación para producir una función de forzamiento conocida.

El sistema de identificación de sólo salida no utiliza medios artificiales de excitación, en lugar de eso, se registran las vibraciones naturales causadas por el viento, el tráfico o los ocupantes. La respuesta típica de estos tipos de estructuras a la excitación ambiental es grande, notable y fácil de medir.

#### **2.4 Normativa aplicada.**

En el Ecuador actualmente no existe una normativa que regule la construcción, diseño y análisis de los estadios, por lo cual se utilizarán normativas y códigos nacionales de construcción, sin embargo, existe una guía o normativa implementada por la UEFA con el nombre de “GUÍA UEFA DE ESTADIOS DE CALIDAD” documento en el cual se establecen parámetros de visibilidad, de seguridad, de arquitectura, estructural, etc. También se establece que la construcción y diseño serán regidos por las normas constructivas de cada país.

De igual manera existen documentos reglamentarios que están enfocados mayormente a la operación dentro de los estadios y el uso de las instalaciones; documentos como el “Reglamento FIFA de seguridad en los estadios “y de manera más regional se encuentra el documento “Reglamento de Seguridad para competición entre clubes” establecido por la Conmebol. También se encuentran documentos o normativas que establecen las dimensiones y elementos de los terrenos de juego, aunque no se encuentren regulaciones estructurales o de

seguridad en ellos, como el documento publicado por la Universidad Complutense de Madrid “NORMATIVA SOBRE INSTALACIONES DEPORTIVAS Y PARA EL ESPARCIMIENTO (NIDE)”.

#### **2.4.1 Normativa para el control de vibraciones.**

Para el estudio y control de las vibraciones en los estadios enfocados al confort y seguridad del ser humano existen las normativas:

- La Norma Serie ISO 2631 (Organización Internacional de Normalización).
- ONORM S 9012:2010 (Austria).
- DIN 4150-2:1999 (Alemania).
- UNI 9614:1990 (Italia).
- Vibration Regulation Law (Japón).
- SBR Richtlijn- Deel B (2002) (Holanda).
- NS 8176:2005 (Noruega).
- Real Decreto 1307/2007 (España).
- SS460 48 61:1992 (Suecia).
- BS6472-1:2008 (Reino Unido).

Existen casos particulares en los que en lugar de normativas establecidas se puede utilizar guías de diseño como:

- A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures.
- SCI\_P354.

En la siguiente ilustración se mostrarán los límites de percepción del ser humano al ser expuesto a vibraciones.

<b>Tipo de confort y percepción</b>	<b>Magnitud (m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>No molesto</b>	>0.315
<b>Ligeramente molesto</b>	0.315 a 0.63
<b>Molesto</b>	0.5 a 1
<b>Bastante molesto</b>	0.8 a 1.6
<b>Muy molesto</b>	1.25 a 2.5
<b>Extremadamente molesto</b>	>2

*Tabla 3:* Percepción y magnitud de vibraciones (ISO 2631-1(1997) (Ramos Romero, 2014).

La documentación existente para el control de las vibraciones y los daños que provocan en las estructuras se encuentra en las siguientes normativas:

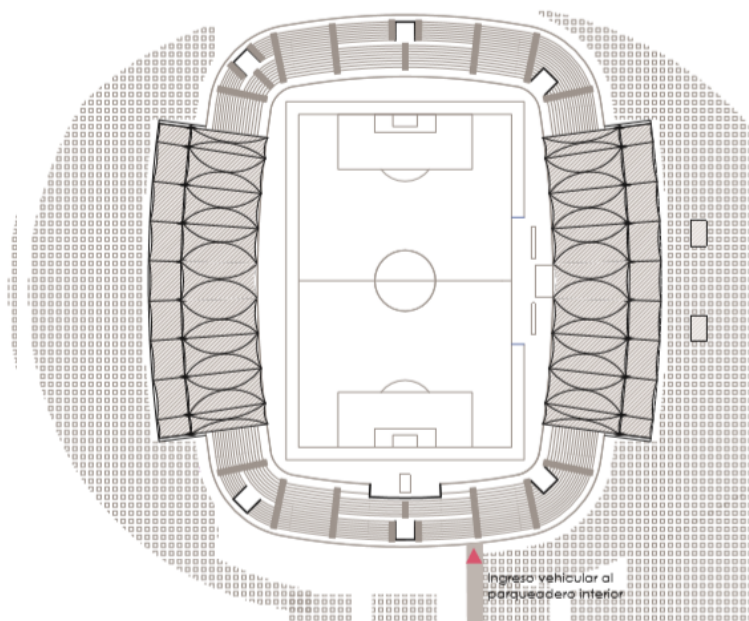
- EHE-08 (“Instrucción de Hormigón estructural”) (España)
- CTE (“CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN. DOCUMENTO BÁSICO SE-ASEGURIDAD ESTRUCTURAL: ACERO”) (España).
- EAE (“Instrucción de acero estructural) (España).
- Norma técnica para el control de vibraciones transmitidas a edificaciones (Quito-Ecuador).

### 3. Capítulo 3: Análisis de la Estructura.

#### 3.1 Tipo de Estructura.

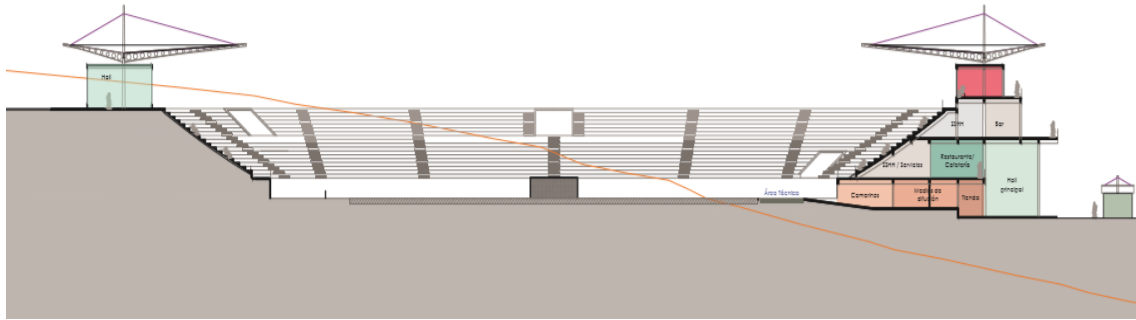
---

El estadio está diseñado para ser construido como una estructura mixta la cual está compuesta de acero y hormigón en su totalidad, con cubiertas de sistemas postensados en el lado este y oeste del estadio.



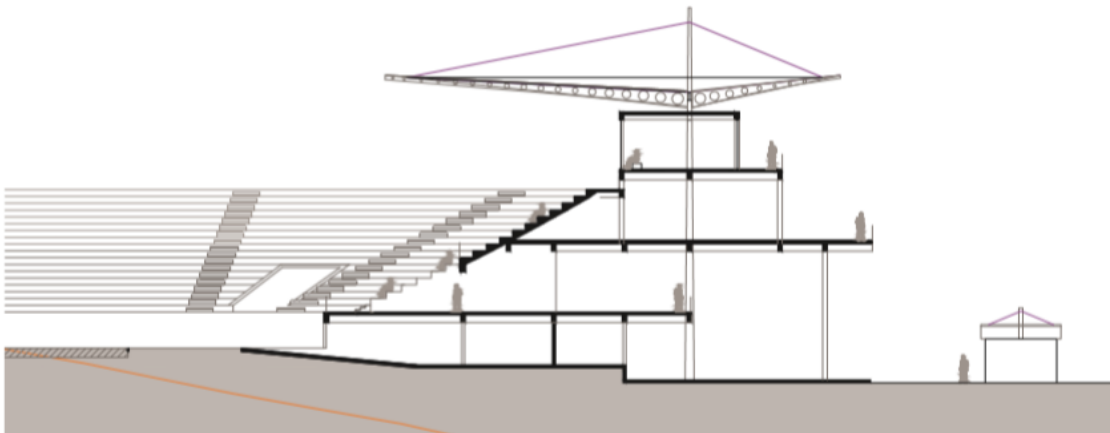
*Ilustración 4:* Vista en planta del Estadio de la Universidad Católica.

El sistema de graderíos que componen al estadio es diferente en la tribuna este y en la tribuna oeste, en el lado oeste se observa cómo se utiliza al suelo como sistema de soporte de carga para el graderío, mientras que en el lado este se utiliza un sistema combinado de vigas y columnas para soportar el peso del graderío, los comercios y de las personas que se encuentren ocupando el mismo como se muestra en la figura (Ilustración 5).



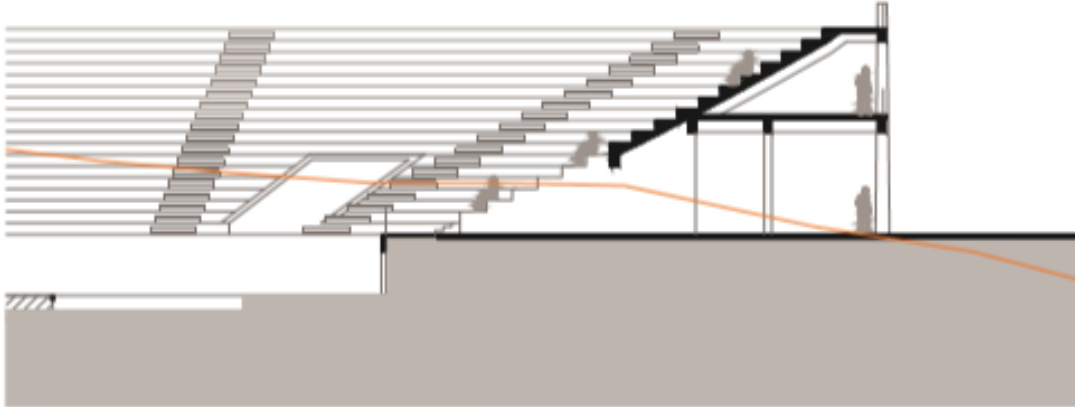
**Ilustración 5:** Esquema sistema de cubiertas lado Este y Oeste del estadio.

En el ingreso a la tribuna este, el cual sería el punto más bajo del estadio; los graderíos están conformados por un sistema de siete columnas de hormigón, de las cuales cuatro son utilizadas para el soporte del graderío mientras que las otras tres se utilizan para la cubierta y para los locales comerciales que se encuentran en el estadio, en la parte interior del graderío se encuentran dos sistemas de losa que dividirán al espacio del graderío en tres sectores interiores.



**Ilustración 6:** Sistema estructural de graderíos tribuna este.

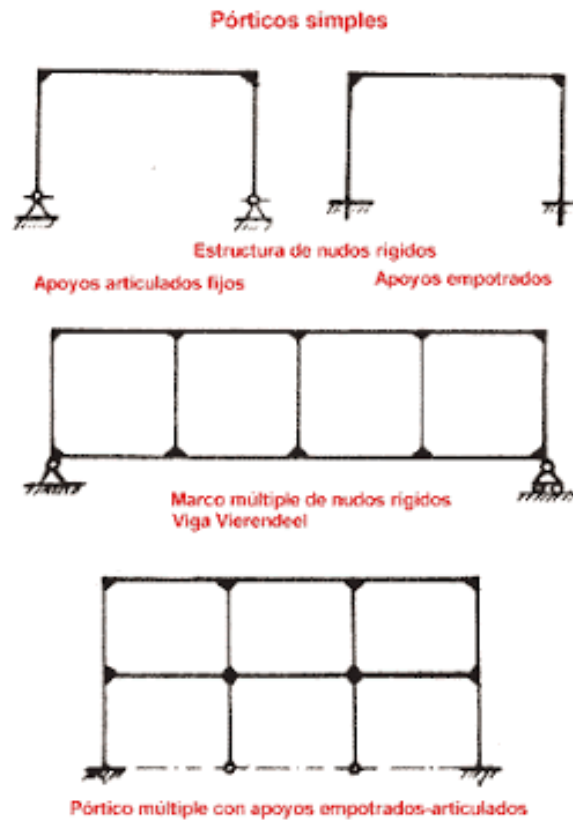
A medida que los graderíos se dirigen desde la zona central hasta la zona norte o sur se observa que influencia de la topografía del lugar ayuda a tener un sistema estructural más pequeño y compacto como se muestra en la figura, que muestra como en uno de los ingresos laterales el sistema pasa de tener cuatro columnas para el soporte de los graderíos a poseer tres columnas y una losa interior.



*Ilustración 7:* Sistema estructural gradieros ingreso lateral.

Como se puede observar por la configuración estructural que poseen los gradieros, se puede definir que el tipo de estructura al que nos estamos refiriendo es un marco rígido o pórtico, por las siguientes razones:

1. Al diseñar y construir utilizando las normas de construcción de edificios se utiliza el mismo tipo de estructura que es un pórtico.
2. Las cargas se distribuirán de manera axial en los elementos.
3. El sistema está compuesto por vigas y columnas que pueden estar conectadas rigidamente o mediante articulaciones.
4. Las cargas producidas por el gradieró pueden producir flexión en los elementos que componen el sistema estructural, al igual que el efecto de flexión que producen las cargas sobre el marco o pórtico.
5. Disipan grandes cantidades de energía gracias a la ductilidad que poseen en los elementos y su hiperestaticidad.



*Ilustración 8:* Estructura tipo pórtico o marco rígido (Jaramillo, 2004).

## 3.2 Características.

### 3.2.1 Características Generales.

El estadio de equipo de la Universidad Católica del Ecuador se encuentra en el campus Nayón de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, el cual se encuentra en las afueras de la ciudad de Quito, en el sector de Nayón, entre la quebrada Anita Huaycu y la quebrada Uraurucu, a una cota de 2424 msnm.



*Ilustración 9:* Localización del campus de Nayón de la PUCE (Google maps, 2021).

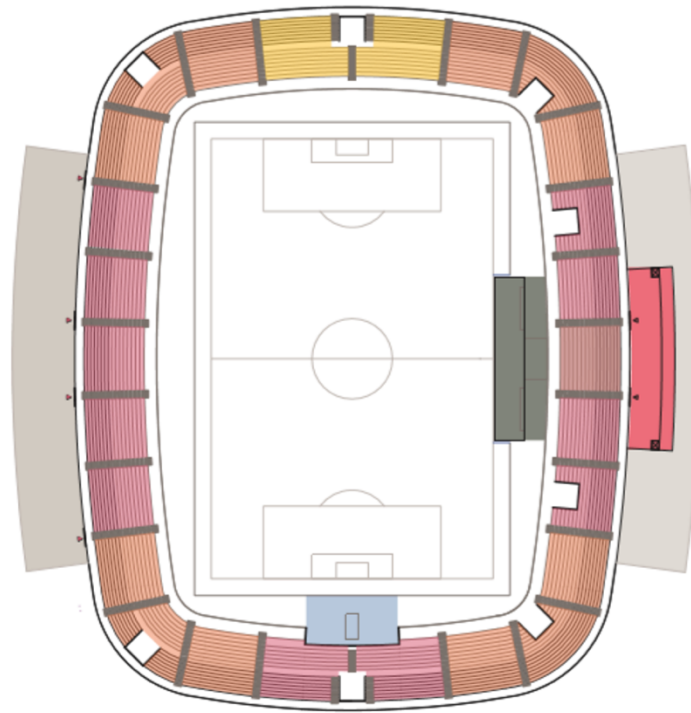
La fecha programada de construcción está agendada para el año 2021, el estadio posee un diseño para aproximadamente 10000 espectadores, el cual se prevé que esté listo en 2022.

### **3.2.2 Características del estadio.**

---

#### **Configuración de graderíos.**

En el estadio de fútbol de la Universidad Católica el diseño nos muestra que se optó por un sistema de gradas rectas que se van adaptando a la forma del estadio a medida que este va cambiando. La unión entre los graderíos en los cambios de dirección se realizó mediante graderíos de curvatura de 90°, el sistema de gradas también cuenta con ocho entradas establecidas en todo el sistema de graderíos como se puede observar en la Ilustración 10.



*Ilustración 10:* Configuración de los graderíos.

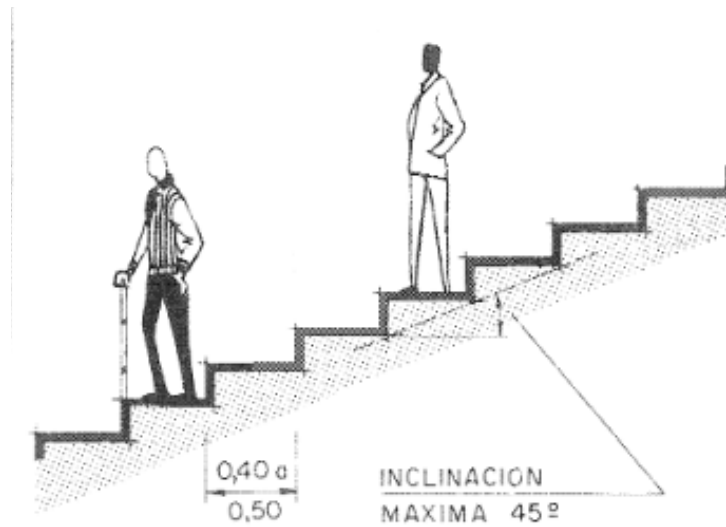
Se optó por este sistema de graderíos para poder obtener una continuidad en los mismos, y también porque son una cantidad de asientos que se les puede obtener beneficio económico.

### **Tipo de graderíos.**

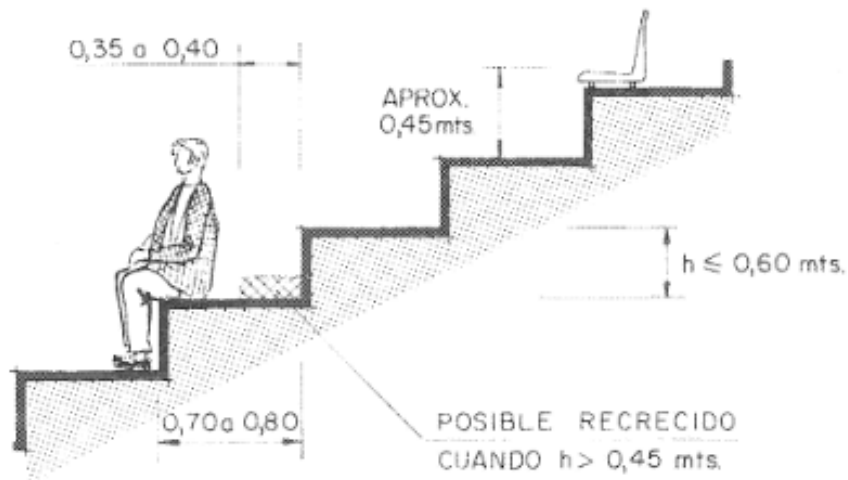
En el nuevo estadio del equipo de fútbol de la Universidad Católica se ha optado por el uso de pórticos espaciales de hormigón, como sistema de soporte y distribución del peso y de las excitaciones que sufrirán los graderíos, estos pórticos poseen conexiones rígidas y están separados cada 15 metros, divididos a lo largo de todo el contorno de la cancha lo que nos da un total de 26 secciones de graderíos de 15 metros de largo y de ancho.

Las dimensiones establecidas para los gradas donde será establecido el lugar de cada espectador será de entre 0.9 m de manera horizontal y de verticalmente cada grada será de  $h < 0.6\text{m}$ , las dimensiones de las gradas establecidas para la movilización de los espectadores son de

horizontalmente 0.4 a 0.5m y de manera vertical será de 0.4 a 0.5m, la inclinación de la losa para los graderíos será de máximo 45°, (Rui-Wamba, 1981).

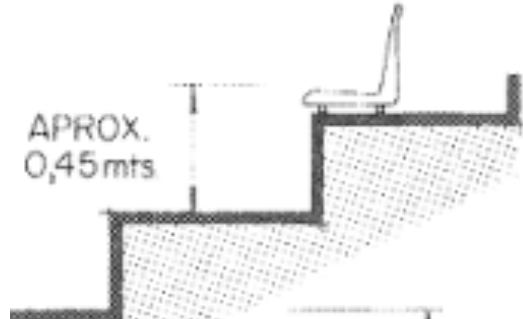


**Ilustración 11:** Esquema de dimensiones de gradas para transporte (ESTEYCO, S.A, 1982).



**Ilustración 12:** Esquema de dimensiones de gradas para los asientos de los espectadores (ESTEYCO, S.A, 1982).

Los asientos serán establecidos a una altura máxima de 0.45 m desde la base de la grada.



*Ilustración 13:* Altura máxima de los asientos en las gradas (ESTEYCO, S.A, 1982).

La guía de la UEFA de estadios de calidad nos dice que respecto a la visibilidad todos los espectadores deberán tener una visibilidad amplia y completa del terreno de juego, por lo tanto, es de alta importancia el ángulo de visión desde cada asiento ya que de esta manera podemos reducir la distancia que existe entre el aficionado y la acción en la cancha, de igual manera nos informa que se debe crear un efecto caldero en el estadio, el cual se explica con el objetivo de lograr que la distancia establecida entre el usuario que se encuentra más cercano campo de juego y la distancia entre usuarios más alejados del campo del juego produzca una visibilidad equitativa para poder brindar el mejor servicio.

Para poder lograr la UEFA ha definido una variable C la cual representa la calidad de la línea de visibilidad que poseen los aficionados por encima de los aficionados que se encuentren frente a ellos, el valor de C siempre más alto. Significa que el aficionado tendrá una visibilidad de gran calidad, sin embargo, también se debe controlar el valor de C, ya que si no se lo hace el estadio puede crecer en alto y ancho de maneras no óptimas.

Es por esto por lo que la UEFA estableció la fórmula de C.

$$C = \frac{D(N + R)}{D + T} - R$$

*Ecuación 1:* Calidad de Visibilidad para graderíos (UEFA, 2013)

Donde:

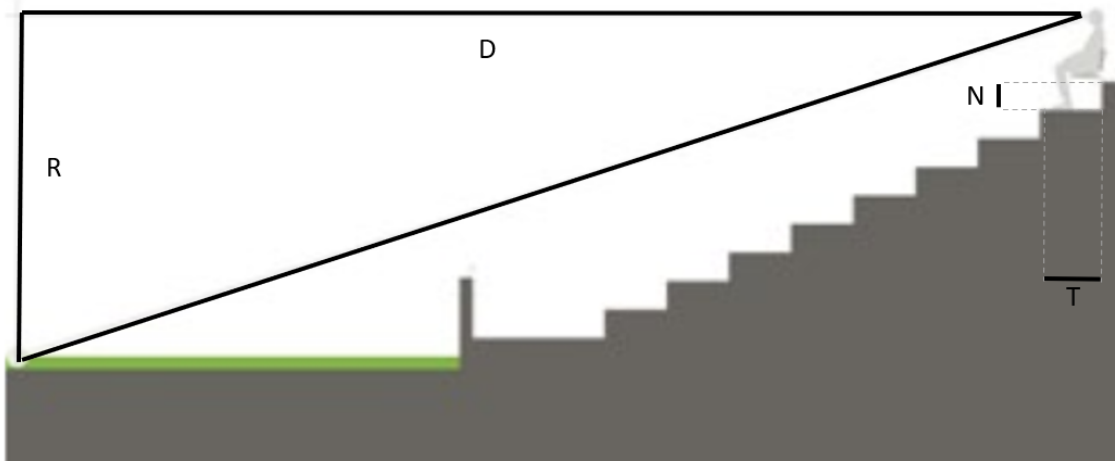
C= Calidad de visibilidad

D= la distancia horizontal desde cada posición individual hasta el punto de enfoque (el borde del terreno de juego)

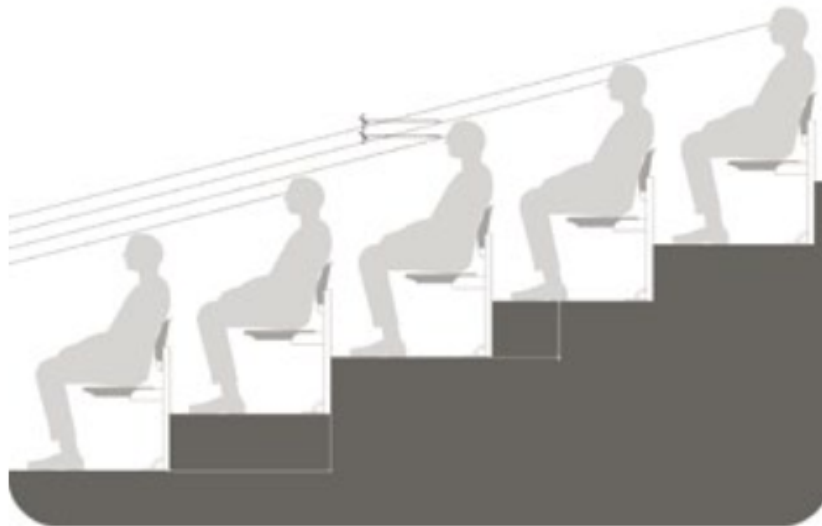
N= la altura de la contrahuella de cada fila individual de asientos

R= la altura vertical entre el nivel de los ojos de las personas y el punto de enfoque (el nivel del terreno de juego)

T= la profundidad de cada fila individual de



*Ilustración 14:* Componentes de la fórmula de calidad de visibilidad (UEFA, 2013).



*Ilustración 15:* Componentes de la fórmula de calidad de visibilidad (UEFA, 2013).

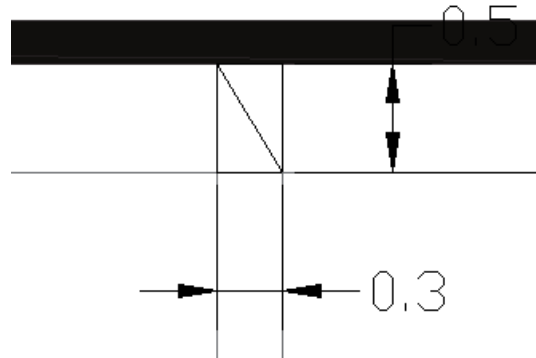
### **Tipos de pórticos.**

En el diseño del estadio se han presentado dos tipos de pórticos que se van desarrollando a lo largo del estadio a medida que este va de norte a sur, la tendencia que se optó en el diseño del estadio fue la de minimizar la cantidad de pórticos distintos, se logró de manera exitosa logrando obtener solamente dos tipos de pórticos espaciales; como se mencionó anteriormente en la zona oeste del estadio no se utilizan pórticos ya que se utiliza el suelo mismo para el soporte de los graderíos.

Los dos pórticos utilizados son el pórtico de entrada, cuyo objetivo es para la entrada de los espectadores y para los comercios y locales que se encuentran en las entradas, el segundo tipo es el pórtico porta-gradas el cual se diseñó para las uniones entre vigas, columnas y graderíos.

Los pórticos están formados por vigas de 50 x 30cm, columnas de 30 x 40cm las cuales todas estarán cimentadas sobre zapatas aisladas de 3x2x1m, 3m de largo, 2m de ancho y 1m de altura; losas de 30cm de espesor y por los graderíos que se diseñaron como losas inclinadas a 35°, todos los pórticos están formados por estos elementos lo único que cambia entre pórticos es la

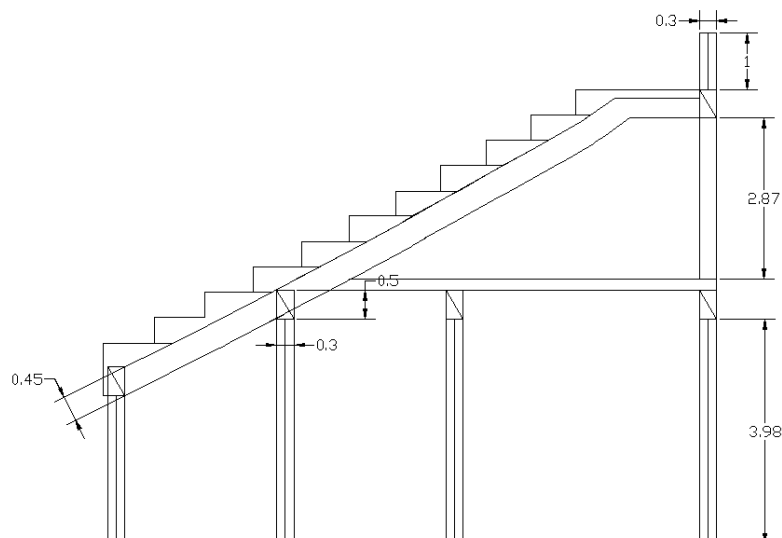
configuración que se tienen de los elementos a expresión de los graderíos eso son similar en todo el estadio.



**Ilustración 16:** Viga de los pódicos del estadio (*Elaboración propia*).

A continuación, se mostrará el pórtico porta-gradas, su configuración geométrica y en qué zonas del estadio se localiza.

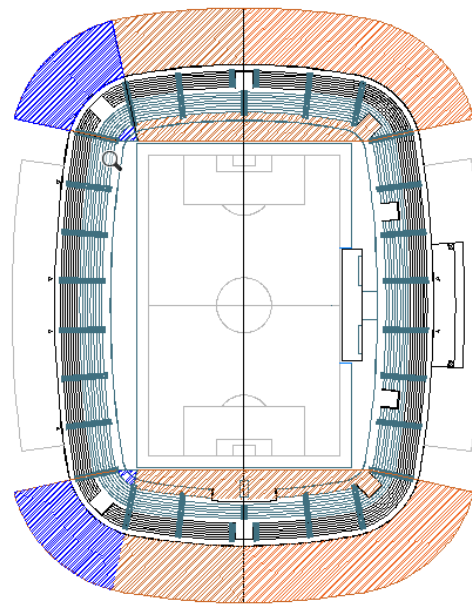
En el pórtico porta-gradas podemos observar que posee un menor número de elementos y cuyo único trabajo es el de soportar los graderíos y las cargas que se produzcan sobre ellos, en este tipo de pórtico tanto el número de vigas como el número de columnas se reducen, pero las dimensiones siguen siendo las mismas, ya que no aprovecha tanto el espacio y es un Pórtico destinado al soporte y distribución del peso.



**Ilustración 17:** Pórtico porta-gradas (*Elaboración propia*).

En la ilustración podemos observar la configuración del Pórtico porta-gradas, el cual posee cuatro columnas en la base separadas 3m y 4.5m, el graderío que es una losa inclinada posee un espesor de 45cm, este tipo de pórtico es usado después de los pórticos de entrada y van cambiando a medida que se necesiten entradas auxiliares y cuando la geometría del estadio cambia de igual manera.

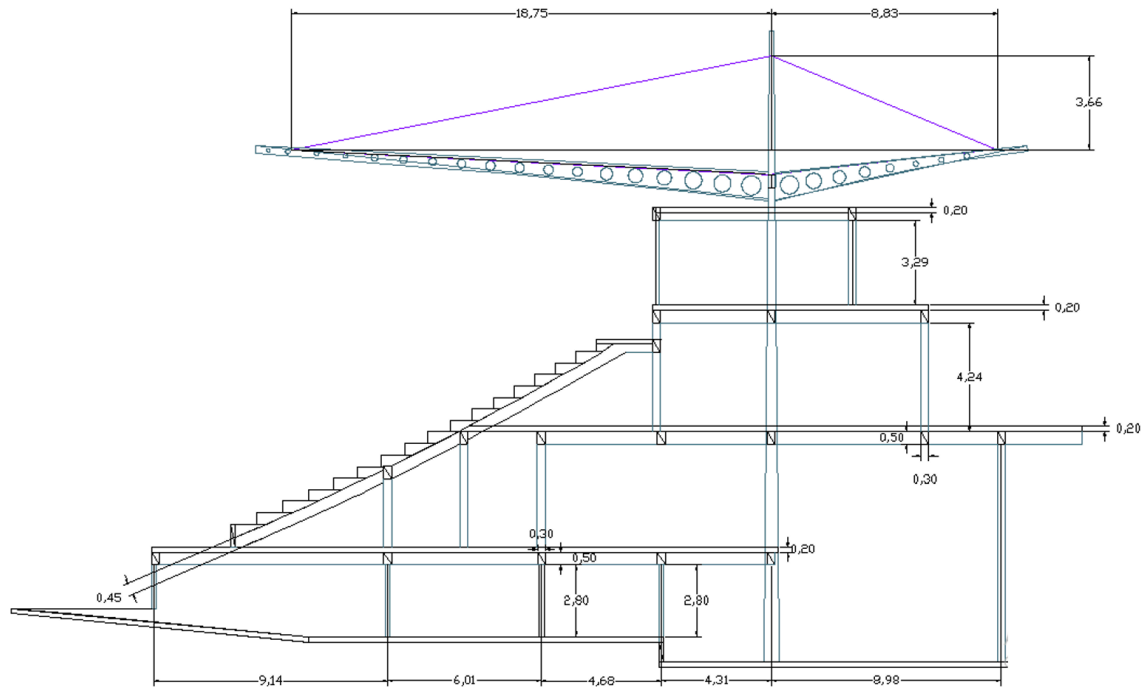
La localización de este tipo de pórtico se muestra en la siguiente ilustración.



- Zona donde se utilizaran porticos porta-gradas
- Zona donde no se utilizara porticos se utilizara el suelo soporte del graderio

**Ilustración 18:** Localización de los pórticos porta-gradas (*Elaboración propia*).

A continuación, se mostrará el tipo de pórtico de entrada, su geometría y las diferencias que posee con el pórtico porta-gradas.



**Ilustración 19:** Pórtico de Entrada (Elaboración propia).

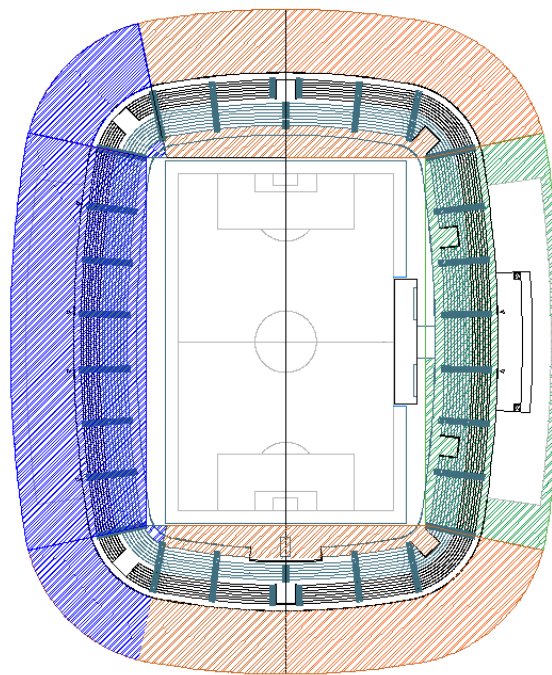
Se puede observar que este pórtico posee una mayor cantidad de elementos estructurales, posee una mayor altura, y está destinado a cumplir más objetivos que el pórtico porta-gradas; se siguen respetando las dimensiones de las vigas y las conexiones rígidas que poseen con las columnas, los graderíos, y las losas donde se asentarán diferentes servicios; de igual manera se observa que en este tipo de pórticos se encuentra una estructura de acero con cables postensados que servirá como cubierta en los graderíos.




Cabe recalcar que en este tipo de pórtico las dimensiones de las columnas van cambiando, dependiendo en qué lugar del pórtico se encuentren, esto para distribuir de mejor manera el peso hacia el suelo; cada columna de la planta más baja al igual que en el pórtico porta-gradas posee una zapata aislada.

A pesar de tener muchas diferencias entre los pórticos de entrada y porta-gradas, se puede observar que el pórtico de entrada posee la misma configuración en la zona del graderío, por

lo tanto, para el estudio y la modelación de los graderíos en el software Robot Structural Analysis se utilizara cualquiera de los modelos ya que la zona necesaria para estudio es la zona del graderío.

La localización de los pórticos de entrada será en la zona derecha del estadio ya que la zona izquierda como se mencionó anteriormente utilizará un sistema en el cual el suelo será la estructura del graderío.



-  Zona donde se utilizaran porticos porta-gradas
-  Zona donde no se utilizara porticos se utilizara el suelo soporte del graderio
-  Zona donde se utilizaran pórtico entrada

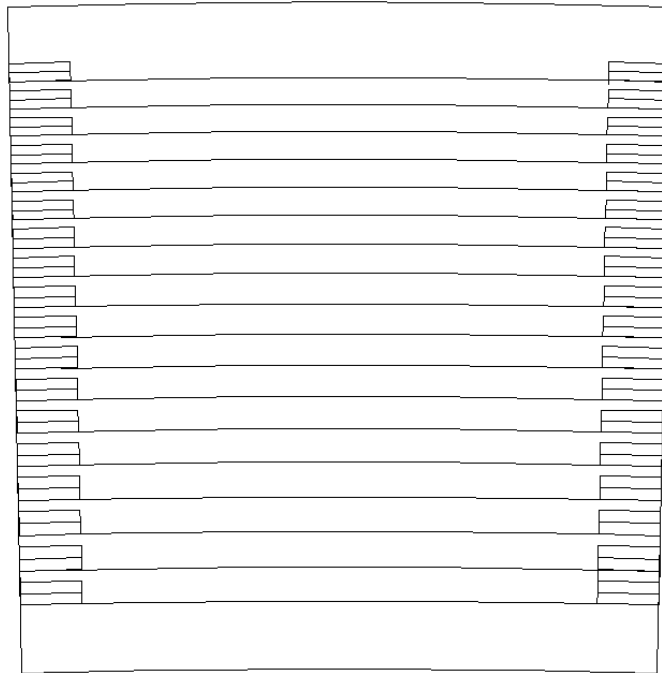
**Ilustración 20:** Localización de los pórticos de entradas (*Elaboración propia*).

### **Tipo de gradas.**

En el estadio se pueden encontrar tres tipos de gradas, dos de ellas son para los asientos de los aficionados y son de tipo recto y de tipo curvo, el tercer tipo de grada que se puede encontrar son las gradas de acceso. Todos estos tipos de gradas se encuentran soportadas por el mismo sistema estructural, la única diferencia entre ellas son su geometría y sus dimensiones.

A continuación, se muestran los tipos de gradas que se utilizarán.

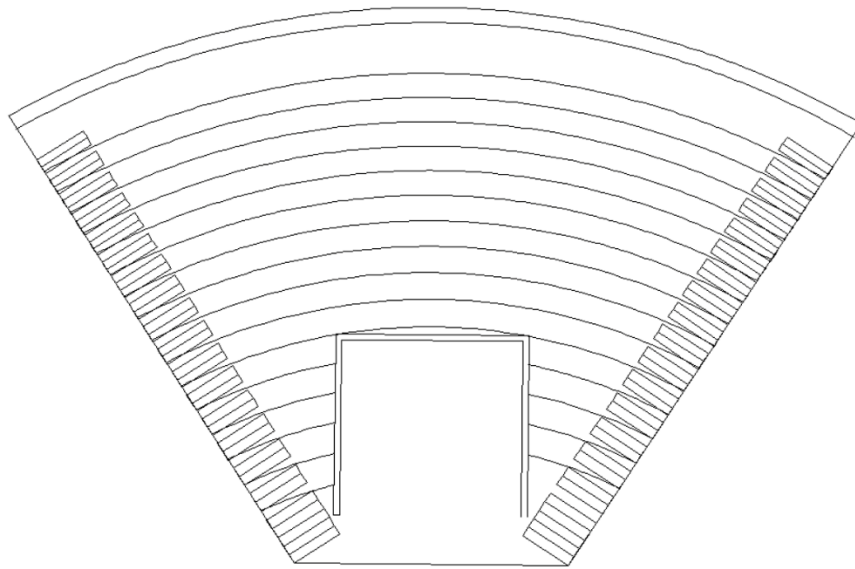
***Gradas tipo recta.***



***Ilustración 21:*** Grada tipo recto (*Elaboración propia*).

En la ilustración se puede observar una sección de graderío del estadio donde poseemos las gradas de tipo recto y a sus extremos las gradas de acceso a los asientos para los espectadores.

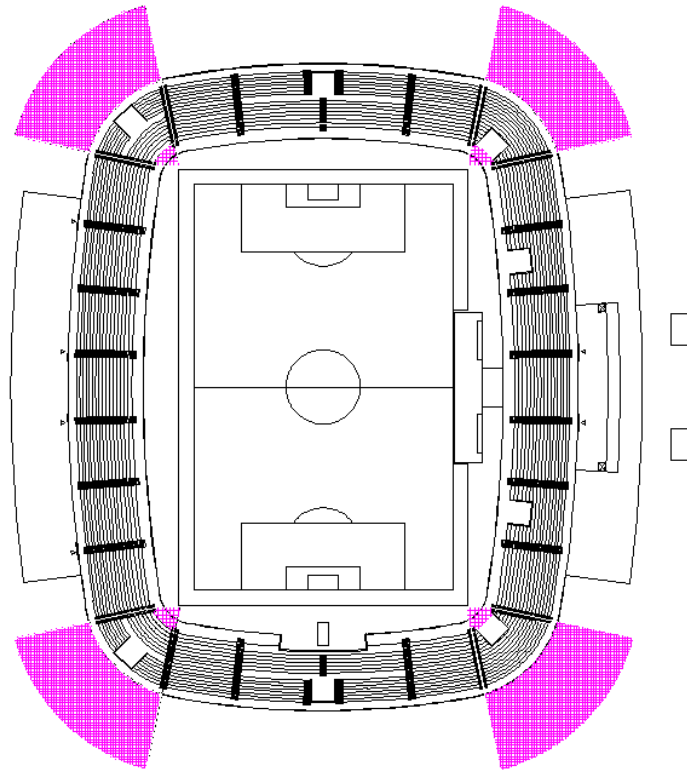
### ***Gradas tipo curva.***



***Ilustración 22:*** Gradas tipo curva (*Elaboración propia*).

En la Ilustración 22 podemos observar una sección del graderío donde las gradas son de tipo curva, y que al igual que las rectas estas poseen las gradas de acceso a los asientos de los espectadores, incluso en la ilustración podemos observar una puerta de acceso.

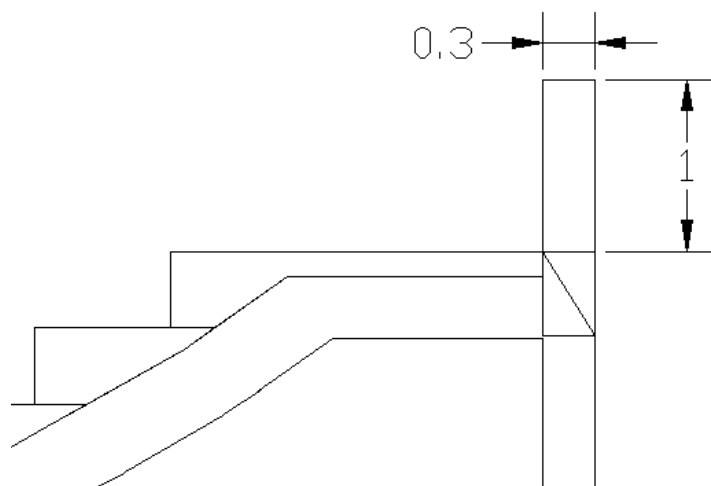
Las gradas rectas se encuentran en la mayoría del estadio, de igual manera las gradas de acceso para los asientos se encuentran en gran cantidad, aunque mucho menor que las gradas rectas, las gradas de tipo curvo son las que se encuentran en menor número en el estadio esto debido a la forma del estadio, en el estadio se encuentran cuatro zonas donde se ubicaran las gradas tipo curva, estas zonas son las esquinas del estadio como se muestra en la imagen.



*Ilustración 23:* Localización de las gradas tipo curvo (*Elaboración propia*).

En las gradas que se encuentran apoyadas sobre los pórticos porta-gradas podemos encontrar un antepecho en la última fila de gradas, esto con el objetivo de obtener un objeto de seguridad para los espectadores, en el caso de las gradas de la última fila que se encuentran sobre los pórticos de entrada no es necesario el antepecho ya que existe un piso más el cual ya funcionaría como seguridad para los espectadores.

Las dimensiones del antepecho serán de 1 metro de altura, 0.3m de espesor.



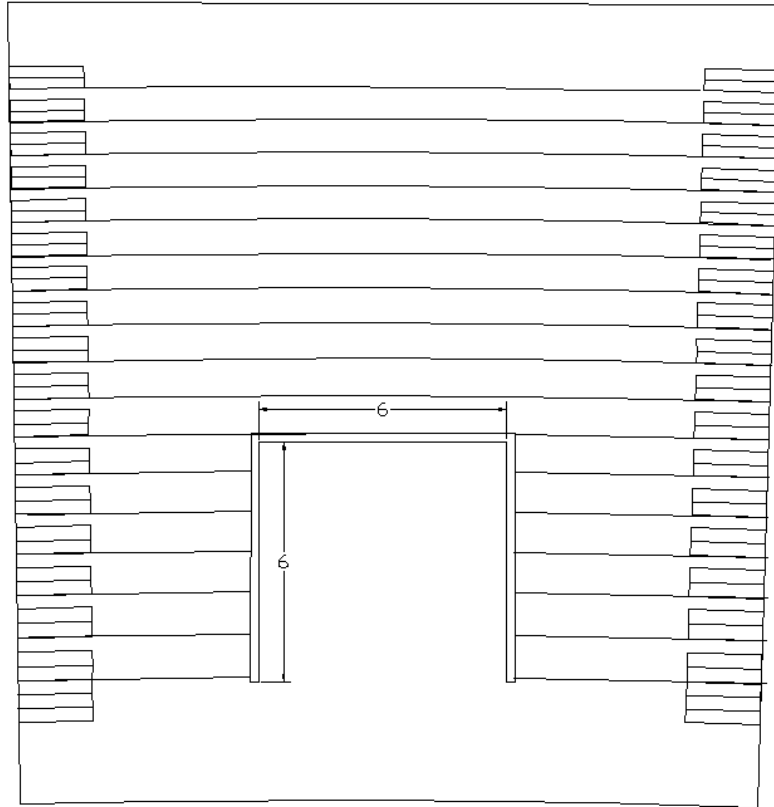
*Ilustración 24:* Dimensiones y localización de antepecho (*Elaboración propia*).

### **Distribución de accesos.**

Ya que no existe una norma que rijas el número, localización, o dimensiones de los accesos con los que, de contar un estadio, se colocaron los accesos de manera que el espectador pueda aprovecharlos de la mejor manera posible.

Los accesos en el estadio están conformados por aperturas en los graderíos tanto en los graderíos rectos como en los curvos. Estas aperturas se encontrarán todas al nivel del suelo para poder simplificar tanto la construcción como el diseño.

Todos los accesos van a ser iguales esto quiere decir que llevarán la misma geometría y dimensiones las cuales 6m de ancho, 6m de profundidad y 3m de altura.

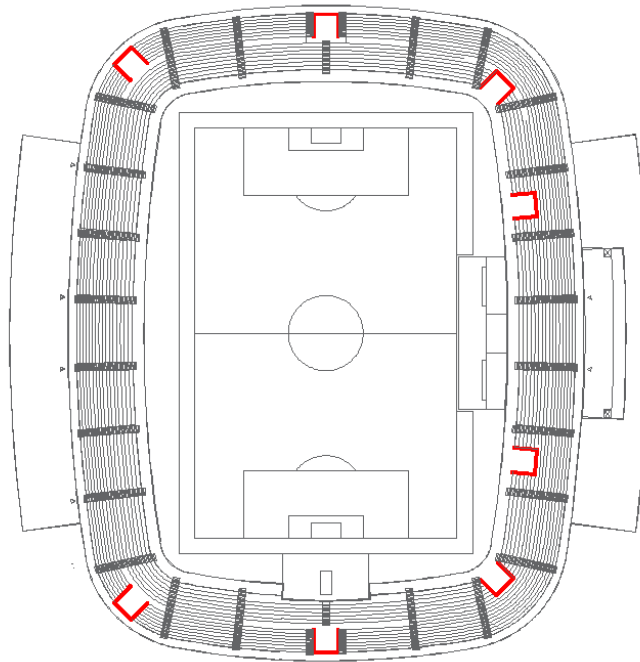


**Ilustración 25:** Dimensiones de los accesos (*Elaboración propia*).

La distribución de los accesos no se encuentra de manera simétrica en la zona derecha e izquierda ya que como se mencionó anteriormente el estadio en la zona izquierda no posee ninguna clase de pórtico ya que utiliza el suelo directamente como medio de soporte. Al no poseer pórticos en esas zonas no es posible la implementación de accesos con gran facilidad como el lado derecho, al igual que en la zona del graderío tipo curvo donde la diferencia que se encuentra es en la localización de los accesos, sin embargo, todo graderío tipo curvo poseen accesos.

Aunque no se cumpla la simetría entre el lado derecho e izquierdo del estadio en cuanto a la distribución, esta si se cumple si comparamos la zona norte con la zona sur del estadio.

En la Ilustración 26 se muestran todos los accesos del estadio, para poder observar todos los accesos mencionados se mostrará una vista de planta del estadio.

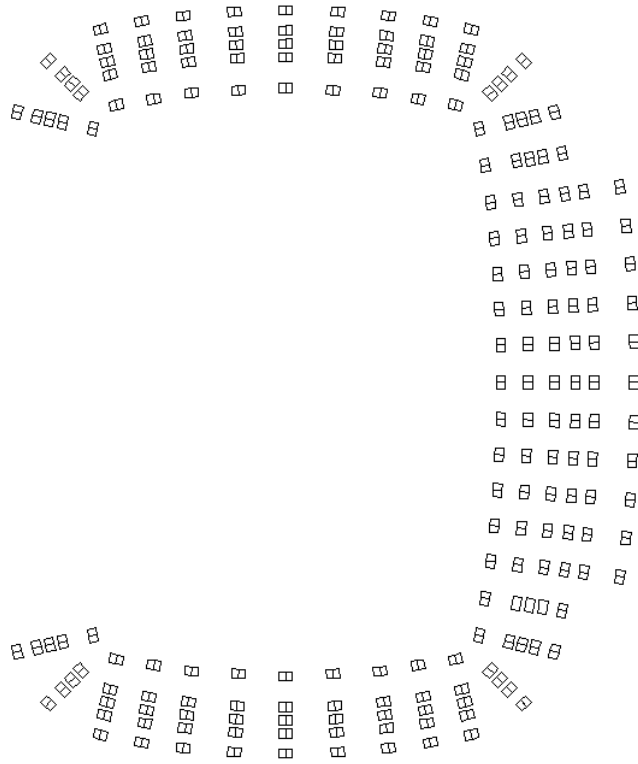


*Ilustración 26:* Distribución de accesos (*Elaboración propia*).

### **Cimentación.**

Como se comentó anteriormente cada pilar o columna que son parte de los pórticos ya sea de entrada o el porta-gradas, se verán soportados por zapatas rectangulares de 3m de largo por 2m de ancho y 1m de espesor de aisladas de hormigón armado, cada zapata será centrada y no poseerá excentricidades, al igual que se mantendrá una distancia de 2m entre zapatas para evitar bulbos de presiones.

En la Ilustración 27 se muestra la ubicación de las zapatas para cada columna o pilar.



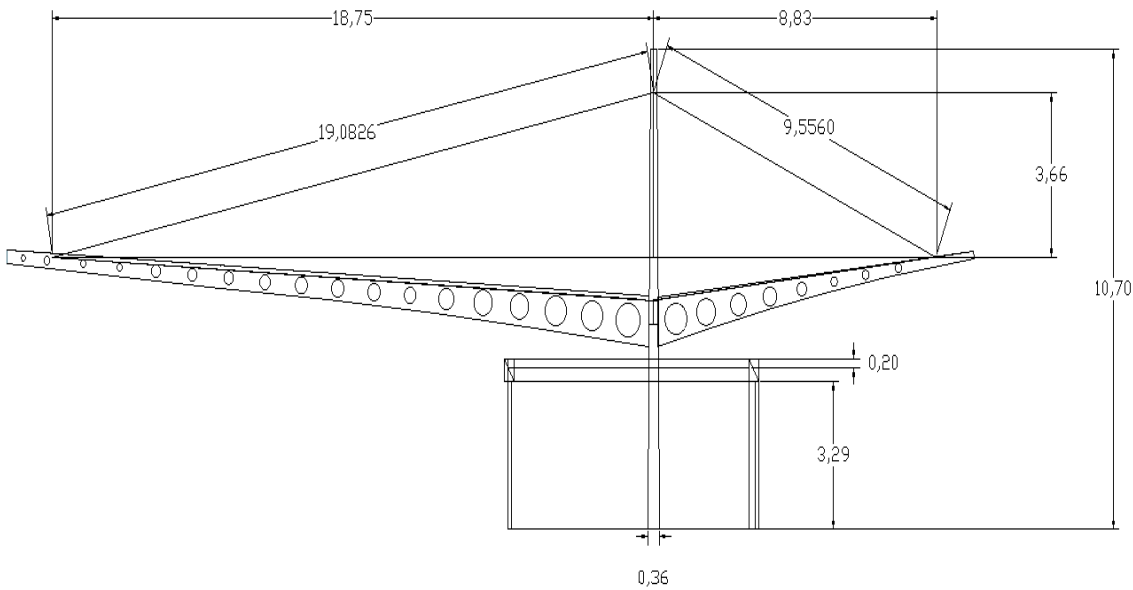
**Ilustración 27:** Localización de zapatas aisladas (*Elaboración propia*).

Se puede observar que el lado izquierdo no posee zapatas, esto porque en ese lado no se utiliza los pódicos mencionados para el soporte. La manera en la que se unirán los pódicos con la sección donde el soporte es el suelo es mediante juntas.

### **Características de la cubierta.**

En el sector de pódicos de entrada se optaron en colocar un sistema de cubierta para proteger de vientos y lluvias a los espectadores que se encuentren en esas localidades, el sistema de esta cubierta es un sistema que consiste de cables los cuales transmiten la carga que produce el peso de la cubierta metálica y de los efectos climáticos que podrían ocurrir, hacia las vigas que están conectadas de manera rígida hacia la columna, y finalmente la columna central se encuentra soportada por el pódico de entrada.

En la Ilustración 28 se muestra la cubierta en vista de corte en una sección del graderío.

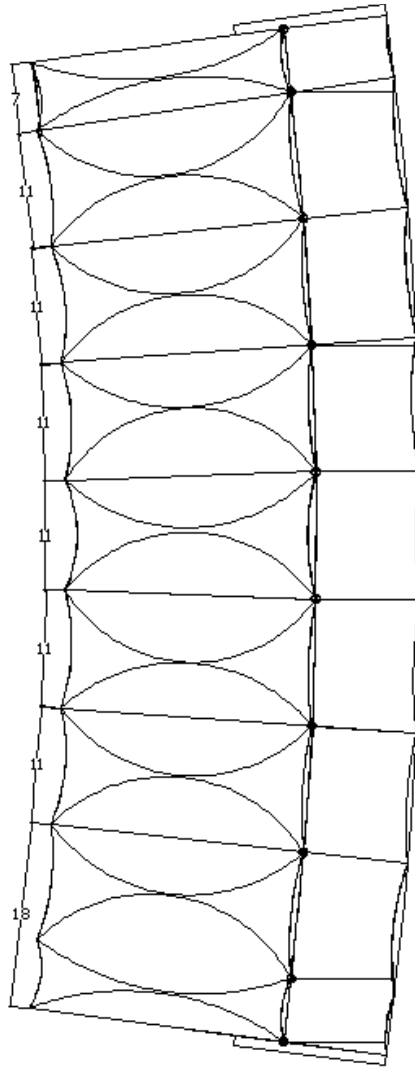


**Ilustración 28:** Vista en corte de la cubierta (*Elaboración propia*).

Como se puede apreciar en la imagen el sistema posee una columna central de sección variable y de acero sobre la cual se conectarán dos cables de 19m y 9.5m respectivamente, de igual manera se puede observar que las vigas que soportarán las planchas poseen agujeros de manera transversal sobre ellas, esto se realizó con el objetivo de disminuir el peso de las vigas y poder aprovechar de manera eficiente el sistema estructural.

Las dimensiones del sistema son una viga delantera de 19m y una viga de 9m, una columna de sección variable de 10.70m de altura hasta la base de la columna en la losa del último piso, el ancho de la columna varía desde los 20cm desde la punta hasta 36cm en la base de la columna en la losa del último piso.

Cada sistema de vigas y columnas se encuentran separadas por espacios de 11m, a excepción de los extremos los cuales miden 7m y 18m, y se encuentran conectados mediante rigidizados en forma de arco como se muestra en la imagen.



*Ilustración 29:* Vista en planta de la cubierta (*Elaboración propia*).

### **3.3 Consideraciones de diseño.**

---

Durante el diseño del estadio se mantuvieron y respetaron muchas consideraciones de diseño, las cuales fueron:

1. Ubicación y orientación.
2. Capacidad.
3. Acceso y evacuación de los espectadores.
4. Zona de juego.
5. Banco de Jugadores.

6. El espectador.
7. Estacionamientos.
8. Criterios constructivos- estructurales.

### **1. Ubicación y Orientación**

En el momento de diseñar un estadio es primordial definir la ubicación de los estadios, ya que al ser una estructura de un gran tamaño se necesita un lugar amplio en el cual pueda construirse e instalarse de manera eficiente, esto para poder diseñar los espacios para los espectadores con lugares espaciosos y seguros.

Al tener la posibilidad de diseñar en espacios amplios se puede asignar áreas de estacionamiento, se puede brindar un mejor servicio al espectador con respecto a la visibilidad ya que podría poseer un ángulo de visibilidad correcto y se podría cumplir de manera más fácil el criterio de diseño para los graderíos.

Después de definir un espacio amplio para el diseño y construcción del estadio, se deberá también poner mucha atención con respecto al ángulo de ubicación del terreno de juego en relación con el sol y el clima de la zona, esto para poder brindar tanto a los espectadores como a la gente que se encuentra en la cancha una protección adecuada ante todos estos factores.

### **2. Capacidad**

Para definir la capacidad de un estadio se debe estudiar las exigencias locales con respecto a las competiciones que se pueden producir en el mismo, sin embargo, al diseñar un estadio también se debe tomar en cuenta si en este se puede desarrollar un evento internacional y asignar un aforo mínimo.

Cabe recalcar que no existe una fórmula para definir la capacidad para el estadio, ya que estas decisiones son hechas por quienes planifican y financian el proyecto.

### 3. Acceso y evacuación de espectadores.

En el diseño del estadio se debe tomar en cuenta la localización y distribución de los accesos, salidas, escaleras o rampas, ya que estos son los medios que los espectadores utilizarán en caso de que exista un motivo de evacuación.

Según Neufert, cada 5000 espectadores necesitan alrededor de 7 minutos o 420 segundos y un ancho de escaleras de 9.5 metros para poder evacuar un estadio de las proporciones del estadio de Ámsterdam, 12 minutos para evacuar el estadio de los Ángeles. Con estos ejemplos y parámetros se pudo determinar una fórmula que ayude a determinar el ancho de las escaleras para un número de espectadores y un tiempo de evacuación.

La fórmula es la siguiente.

$$A = \frac{E}{(t * 1.25)}$$

*Ecuación 2:* Ancho de Escalares (BR. Augusto Alvarado, br. Piero Ramírez, 2015).

Donde:

A: Ancho de las escalares

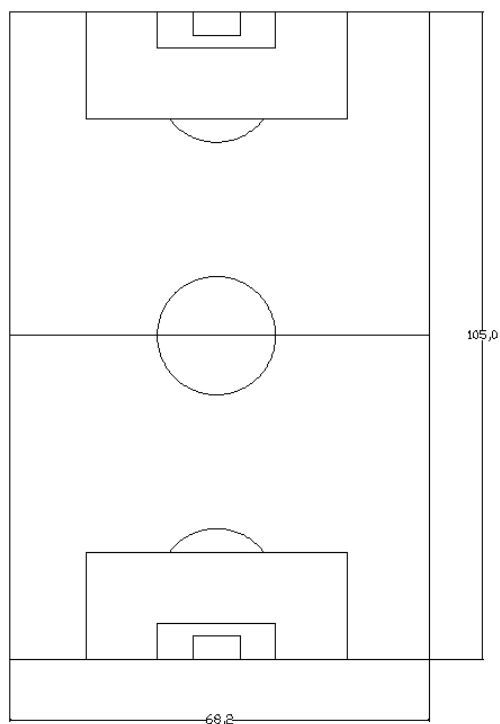
t: Tiempo de salida en segundos

E: Número de espectadores

#### 4. Zona de juego.

Las consideraciones de diseño que se deben tomar en cuenta cuando está en desarrollo el diseño son las medidas establecidas por la FIFA para estadios en los cuales se vayan a desarrollar tanto partidos o eventos nacionales e internacionales, las medidas mínimas establecidas por la FIFA para la zona de juego son 105x68 metros, de igual manera es importante tomar en cuenta las dimensiones de las zonas dentro de la cancha como las líneas de la portería, la línea de partida, etc.

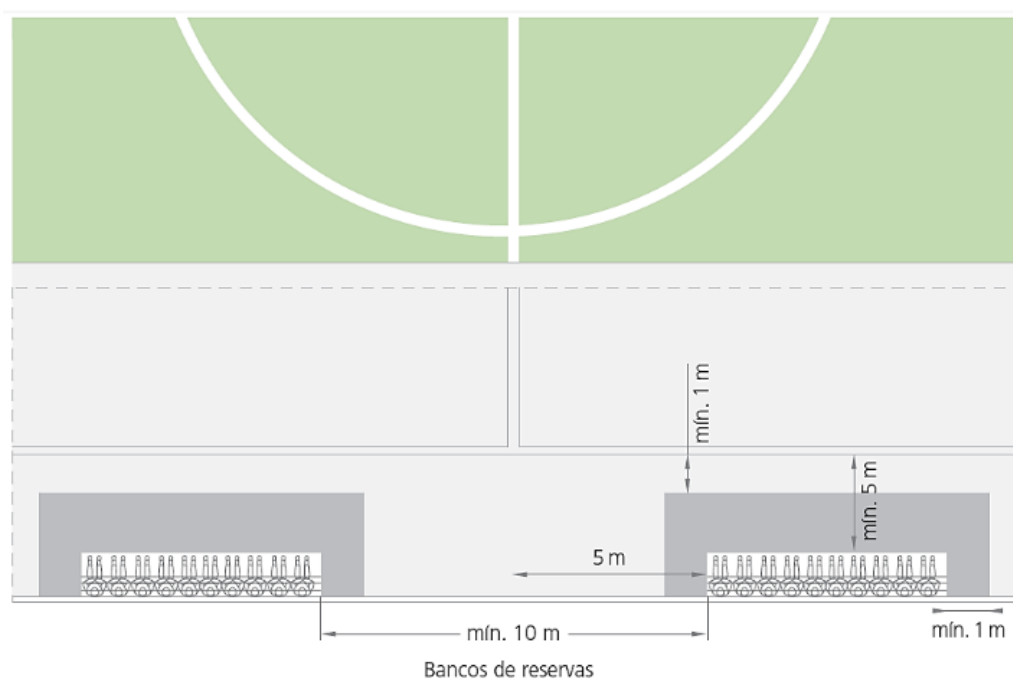
Las medidas del estadio que se está estudiando es de 105 x 68 metros como se observa en la Ilustración 30, por lo que se respeta la dimensiones mínimas de la zona de juego.



*Ilustración 30:* Dimensiones de la zona de juego del estadio de la Universidad Católica.

## 5. Banco de jugadores.

El criterio utilizado para el diseño del banco de espectadores es la localización y distancia del campo de juego, la zona del banco de jugadores se debe encontrar de manera paralela a la banda y a una distancia mínima de 1m, y el banco de jugadores a una distancia mínima de 5m de la línea de medio campo como se muestra en la Ilustración 31.



*Ilustración 31:* Banco de jugadores (FIFA, 2013).

El banco de jugadores debe estar al mismo nivel de la zona de juego, es decir a la misma cota de terreno, de igual manera el banco de jugadores debe estar protegido de los eventos climáticos y de los objetos que puedan ser arrojados por los espectadores.

## 6. El espectador.

El espectador debe poseer buena visibilidad, seguridad, comodidad y la capacidad de poder moverse con libertad, partiendo de eso el aspecto principal que se considera al momento del diseño son los asientos, estos deberán ser irrompible, a prueba de fuego y debe cumplir con las

dimensiones mínimas para mayor comodidad, como se explicó anteriormente en el aspecto de visibilidad se debe utilizar la **Ecuación 1** establecida por la UEFA. En el aspecto de seguridad y comodidad ya se toma en cuenta en el momento de diseño de los accesos, y de las dimensiones de las gradas donde irán colocados los asientos.

## **7. Estacionamientos.**

Durante el diseño de los estacionamientos el criterio o consideración que se utiliza es la esencialidad del acceso y salida a los estacionamientos sean rápidos y fluidos, considerando las calles o caminos cercanos que ayuden al ingreso del estadio. Es importante también que en el diseño de los estacionamientos se tome en cuenta que se tiene que separar en dos zonas para los aficionados de los diferentes equipos para evitar problemas o conflictos entre los mismos.

Para el caso de las personas que actúen en el campo de juego, para el staff médico, para el staff del equipo, se debe diseñar accesos y estacionamientos exclusivos para estos; estos estacionamientos deberán poseer un acceso y salida rápidos, fluidos y separados de los estacionamientos de los espectadores, esto para poder accionar de manera rápida en caso de que se tenga que transportar a alguien por motivos médicos u algún otro motivo.

En caso de ya no poseer área suficiente para la ubicación de estacionamientos, se deberán ubicar estos a una distancia máxima de 1.5km del estadio.

## **8. Criterios constructivos - estructurales.**

Para el funcionamiento correcto y seguro del estadio, es vital que durante el diseño del estadio se haga un enfoque en los distintos componentes de este, los cuales son las cimentaciones, el cuerpo y la cubierta.

Las cimentaciones del estadio estarán conformadas por pilotes, zapatas, vigas de cimentación, o losas de cimentación; todas estas son las opciones que se tienen que considerar durante el diseño y se escogerá la óptima dependiendo los resultados del estudio de suelos y el resultado del diseño con el peso del estadio y de todos los eventos que puedan ocurrir en él.

El cuerpo está formado por

- **Vigas**

Las vigas son los elementos más importantes y complicados del cuerpo ya que son los que distribuyen hacia las columnas el peso de las losas y los efectos de las cargas vivas y muertas sobre las losas. El criterio que se utiliza para el diseño de las vigas es que el acero resiste la tracción, el hormigón la compresión y los estribos son quienes resisten el corte.

- **Columnas**

Las columnas son elementos estructurales verticales, los cuales transmiten las cargas de las vigas hacia las zapatas las cuales transmitirán el peso y los efectos al suelo, lo más común es que la columna sea armada y sea construida in situ, de igual manera se puede utilizar columnas de acero.

- **Muros estructurales**

Los muros son elementos verticales que se usan para separar y cerrar espacios; se colocan los núcleos de los servicios como asesores gradas etc. Los muros estructurales se usan mucho por sus altas propiedades de rigidez y resistencia. Por las cargas que recibe los muros se clasifican en muros portantes y muros estructurales. Los muros estructurales reciben cargas paralelas y perpendiculares al plano y posee importantes características de resistencia rigidez de utilidad las cuales permiten resistir efectos de las cargas sísmicas, el criterio que se utiliza durante el diseño es la relación de aspecto,

y en cuanto al acero se diseñará y armará como columnas es decir con un mayor número de estribos a medida que llega al pie del muro.

La cubierta es un elemento destinado a la protección de los espectadores ante los rayos de sol y los eventos climáticos que puedan ocurrir sobre ellos. Las cubiertas en los estadios pueden ser conformadas por sistemas de armaduras, estructuras a tensión o sistemas de arcos.

El criterio principal en el diseño de la cubierta es la resistencia de su peso propio y los efectos que pueden ejercer grandes fuerzas sobre el cómo vientos a grandes velocidades.

Habiendo revisado todos los criterios y consideraciones que se utilizan durante el diseño del estadio podemos definir que como objetivo principal es el garantizar la visibilidad, comodidad y seguridad del estadio del espectador en cualquier lugar que se encuentre dentro del estadio.

### **3.4 Normativa utilizada en el diseño.**

Como se explicó anteriormente para el diseño estructural de un estadio la FIFA ha definido que se tiene que utilizar la normativa del país donde se va a construir el estadio, partiendo de eso se utilizaron las siguientes normativas para el diseño del estadio.

- NEC 2015.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION.
- AISC 360-16
- ACI 318-14.
- ACI.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE).
- GUIA UEFA DE ESTADIOS DE CALIDAD.
- REGLAMENTO FIFA DE SEGURIDAD EN LOS ESTADIOS.

- ISO 2631.

## **4. Capítulo 4: Modelación.**

### **4.1 Modelación de la vibración.**

---

Cuando se trata de las vibraciones creadas por fuente internas como los seres humanos que se encuentran momentáneamente en una estructura debemos dividir las vibraciones creadas en diferentes casos ya que las personas pueden estar realizando diferentes actividades en diferentes tiempos, para el modelamiento de las vibraciones en los graderíos del estadio nos enfocaremos en dos casos específicos los cuales serán:

- Acciones de bajo impacto.
  - Modelación de acciones de bajo impacto.
    - Procedimiento teórico que utiliza el programa.
    - Procedimiento de modelamiento.
- Acciones de alto impacto.
  - Modelación de acciones de alto impacto.
    - Procedimiento teórico que utiliza el programa.
    - Procedimiento de modelamiento.

Estos dos casos serán modelados en el Software Robot Structural Analysis, para cada caso se explicará de qué manera se realizó el procedimiento de modelamiento en el Software y su base teórica.

#### **4.1.1 Acciones de bajo impacto.**

---

Las acciones de bajo impacto consisten en aquellas que no generen cargas dinámicas muy altas, cargas que no logren llevar a la estructura a sus límites ya sean estructurales o de servicio. Como acción de bajo impacto se puede definir a la caminata de una persona o ya sea de varias sobre una superficie o sistema de piso.

Cuando una o varias personas realizan la acción de caminata sobre pisos, sistemas de piso, escaleras, puentes, pistas o cualquier otra estructura, generan fuerzas o cargas dinámicas que hacen que la estructura vibre. Cabe recalcar que las amplitudes de los desplazamientos que se generan con la vibración son sumamente pequeños, son tan pequeñas que llegan a ser medidas en milímetros, lo que hace que los efectos no sean perceptibles visualmente y mucho menos que intervengan en la integridad estructural. Cabe recalcar como se explicó en capítulos anteriores que la percepción puede variar de persona en persona, es por esto por lo que para algunas personas las vibraciones generadas por gente caminando pueden llegar a ser perceptibles y molestas en algunos casos.

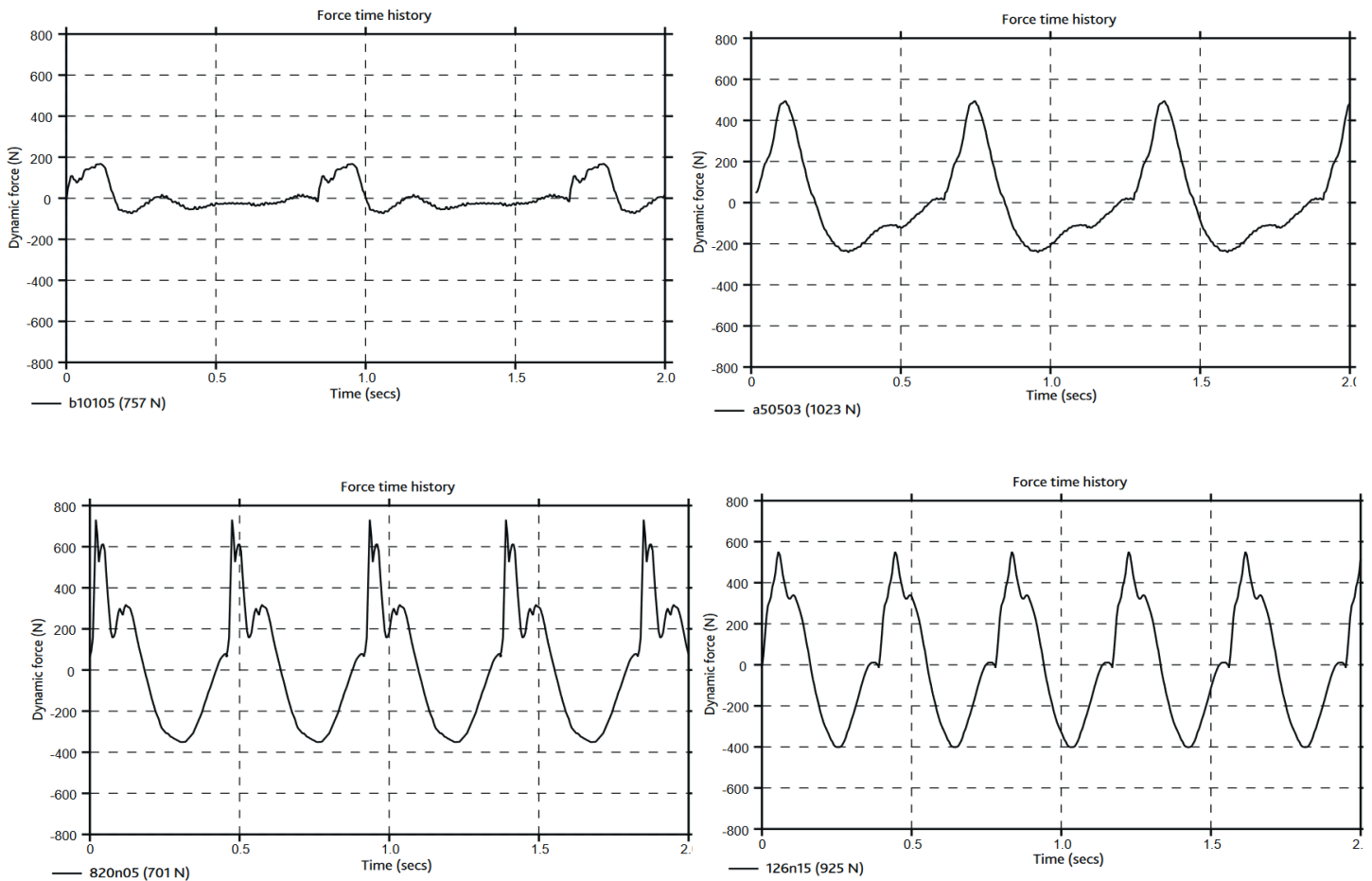
Para evaluar cómo responde una estructura a las fuerzas inducidas por personas que caminan, es necesario comprender:

- Las fuerzas aplicadas a la estructura.
- Propiedades de la estructura (formas modales, frecuencias naturales, amortiguamiento, etc.)
- La forma en que la estructura responde a las fuerzas aplicadas.

#### **Las fuerzas aplicadas a la estructura**

Cuando una persona está caminando, va aplicando una serie de fuerzas dinámicas sobre el suelo que pueden ser medidas directamente con instrumentación como plataformas y placas de fuerza

destinadas para experimentos de caminata. Para poder apreciar de mejor manera estas fuerzas podemos observaren las siguientes figuras donde se muestran cuatro ejemplos de historiales de pisadas.



**Ilustración 32:** Ejemplos de historiales de caminatas para 4 casos diferentes (M R Willford, P Young, 2007).

Las gráficas muestran el componente dinámico total de la fuerza sobre una estructura causada en el momento en que ambos pies realizan varias pisadas, las mediciones de las actividades de caminata en marcha normal han dado como resultado que el rango frecuencias probables que pueden ocurrir son entre 1.5Hz a 2.5Hz, pero el rango de frecuencias probables que deben usarse para el diseño:

$$1.8\text{Hz} \leq f_p \leq 2.5\text{Hz}$$

*Ecuación 3:* Rango promedio de frecuencia de estimulación.

Donde  $f_p$  es el valor de la frecuencia de diseño que se tendría que utilizar, se utiliza desde el valor de 1.8 Hz ya que es el promedio de los valores entre 1.5 y 2.5 Hz (M R Willford, P Young, 2007, p. 7).

Como se puede observar en los cuatro registros es que en cuanto al análisis de las pisadas podemos observar como una función periódica, la cual varía dependiendo el peso y la intensidad con la que camina la persona. Podemos recalcar que la fuerza aplicada sobre las placas no es directamente proporcional al peso de la persona, esto podemos observar relacionando la segunda y tercera imagen donde observamos que una persona de 105kg aproximadamente aplica una fuerza máxima de 500N, mientras que una persona de 72kg aproximadamente aplica una fuerza máxima de 720N, una vez definido esto podemos concluir que la fuerza dinámica que genera una persona al caminar siempre va a variar de persona a persona. Ya que no varía en el tiempo y no induce ninguna respuesta dinámica el peso estático del individuo sea restado en las mediciones.

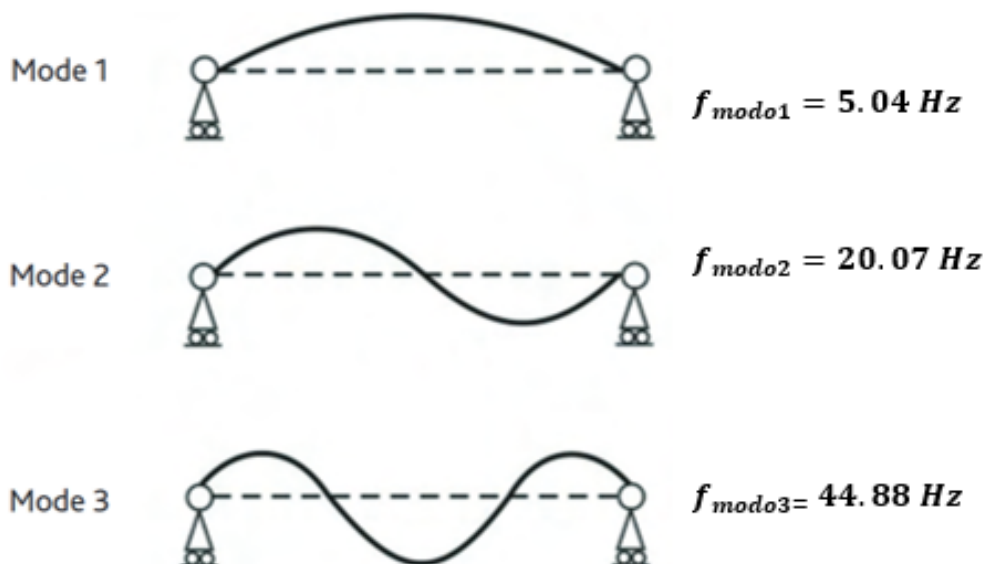
Dada la extensión de esta variabilidad, no existe una fuerza “correcta” única que pueda usarse para calcular la respuesta estructural, sino que es apropiado adoptar valores que sean estadísticamente representativos y tengan una probabilidad de excedencia arbitraria pero conocida. Se presentan las fuerzas dinámicas medias y sus coeficientes de variación que se han derivado de 882 historiales de tiempo de pisada medidos. Se proponen fuerzas de diseño que tienen un 25% de probabilidad de superación.

## Propiedades de la estructura.

Todas las estructuras tienen lo que se conoce como modos naturales de vibración, los modos naturales son las formas de vibración favoritas de la estructura, cada uno de estos modos poseen las siguientes características:

- Una distribución espacial única de desplazamiento (es decir la forma de cada modo).
- Frecuencia natural de vibración.
- Masa y amortiguación nodales (estas características no cambian con los modos, ya que son propiedades de la estructura).

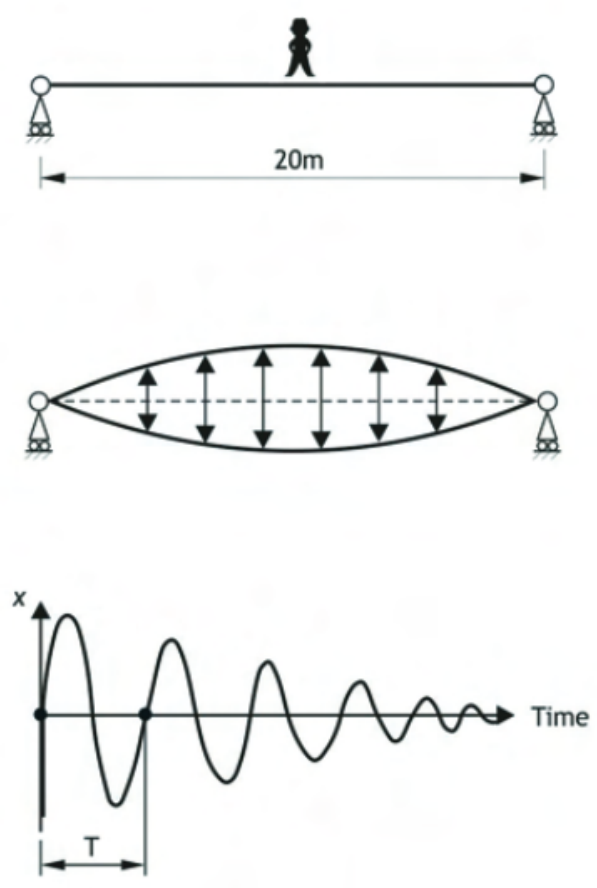
Si consideramos una viga uniforme simplemente apoyada, podremos mostrar cómo serían sus modos de vibración y sus respectivas frecuencias en lo que cabe recalcar que mientras se posean más modos la frecuencia de vibración irá aumentando con los modos.



**Ilustración 33:** Deformación y frecuencia de la viga simplemente apoyada respecto a sus tres primeros modos

(M R Willford, P Young, 2007).

Los primeros modos al poseer frecuencias naturales más bajas que en comparación con números de modos más altos, los convierte en más vulnerables a ser fácilmente excitados por acciones no muy fuertes como la de una persona realizando un salto en la mitad de la viga esto podría causar que la viga vibrara y existiera un cambio en el historial de desplazamiento del puente como se muestra en la siguiente figura.



*Ilustración 34:* Viga simplemente apoyada con una excitación en la mitad del vano (M R Willford, P Young, 2007).

En la primera parte de la imagen podemos observar que es la ilustración de la viga simplemente apoyada con la excitación en la mitad del tramo lo que se representó como una persona al saltar, en la segunda ilustración nos muestra la manera en cómo vibraría la viga al recibir el impacto del salto (el movimiento en un modo de vibración después de un solo impacto se conoce como

movimiento armónico simple amortiguado) y en la última ilustración podemos observar de manera gráfica en relación con el tiempo en cómo sería la deformación que sufrirá la viga el momento que la persona realce el salto.

La deflexión, la velocidad y la aceleración de la vibración varían sinusoidalmente con el tiempo a la frecuencia natural del modo, que depende de la rigidez, la masa y la envergadura estructural. La amplitud de la vibración decae con el tiempo a un ritmo que depende de la amortiguación, pero durante esta caída, la frecuencia y la distribución espacial de la vibración no cambian. Ni la frecuencia ni la forma del modo de la vibración dependen de qué tan alto salte la persona (asumiendo una respuesta elástica lineal), pero la amplitud inicial de la vibración se ve afectada por la altura del salto.

### **La forma en que la estructura responde a las fuerzas aplicadas.**

Si nos referimos a las acciones de bajo impacto que genera una persona sobre una estructura es apropiada asumir que es más probable que en lugar de realizar saltos la persona va a realizar una trayectoria caminando sobre la estructura. Al realizar la caminata, esta aplica una fuerza dinámica sobre la estructura que varía periódicamente en el tiempo, la estructura al recibir estas fuerzas en funciones de tiempo-historia produce de igual manera una respuesta dinámica.

La respuesta de la estructura a la aplicación repetida de esta fuerza depende de varios factores, siendo los más importantes:

- La rigidez y la masa.
- La amortiguación.
- La relación ( $r$ ) de la frecuencia natural ( $f_n$ ) a la frecuencia de estimulación ( $f_w$ ), como se indica en la ecuación:

$$r = \frac{f_n}{f_w}$$

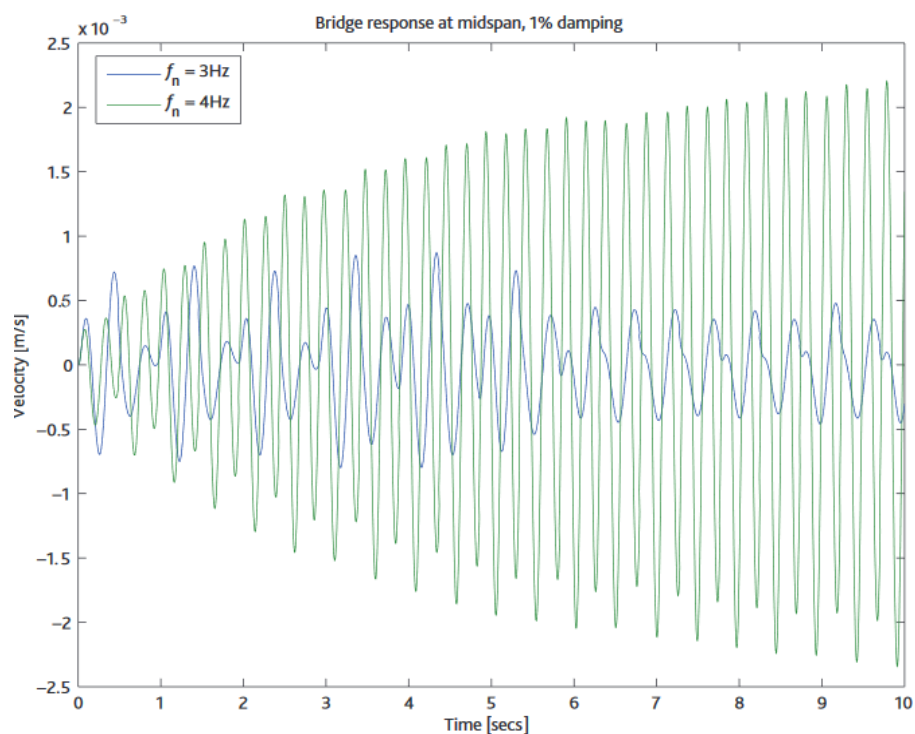
*Ecuación 4* : Relación entre frecuencia natural y frecuencia de estimulación (M R Willford, P Young, 2007).

El término  $r$  es una herramienta que nos permite analizar la relación que se produce entre la frecuencia natural de la estructura y la frecuencia de estimulación que se está produciendo, con esto podemos observar si es que se puede producir el fenómeno de resonancia en la estructura. Si  $r$  está cerca de 1.0, entonces la tasa de pisada es igual a la frecuencia natural del modo, y el modo responde fuertemente en resonancia al "primer armónico" de las fuerzas de pisada. Si  $r$  está cerca de 2.0, el modo responde de manera resonante al "segundo armónico" de las fuerzas de pisada, y así sucesivamente. Estas resonancias conducen a una respuesta significativamente mayor cuando  $r$  está cerca de 1.0, 2.0, 3.0 o 4.0 que la que surge para valores intermedios de  $r$ . Para  $r > 4$  hay mucha menos sensibilidad al valor exacto de  $r$ , también se debe recalcar que para los valores de  $r$  como "números enteros" el amortiguamiento influye de gran manera ya que a mayor amortiguamiento la respuesta resonante disminuye, pero para el caso de  $r > 4$  y valores de  $r$  lejos de los "números enteros" el amortiguamiento influye de manera más baja sobre la respuesta.

Existe la tendencia de que cuando los valores de  $r$  superan a el valor de 4,2 disminuye la respuesta con una frecuencia estructural más alta, como se observó anteriormente el rango de frecuencias que posee una caminata está entre 1,5Hz y 2,5Hz lo que haría que cualquier estructura con frecuencias modales entre 1,5Hz y 10,5Hz (el valor de 10,5 se obtiene de la multiplicación del factor 4,2 por el máximo valor de frecuencia de estimulación de 2,5Hz) sea potencialmente más susceptible a respuestas altas debido a la resonancia. Para modos estructurales con frecuencias naturales lo suficientemente altas como para que no puedan ser excitados por el cuarto armónico (es decir, frecuencias naturales superiores a aproximadamente 10,5Hz), las vibraciones no excederán significativamente la respuesta impulsiva debido a una

sola pisada. Sí la amortiguación es muy baja, entonces, en teoría, la resonancia al quinto y sexto armónico podría producir una respuesta más alta, pero esto no suele ser una preocupación práctica porque las pisadas sucesivas no son completamente idénticas y esto reduce la magnitud de los armónicos más altos.

La resonancia puede explicarse como el momento en que la frecuencia producida por la caminata de la persona se sincroniza con la frecuencia natural del modo de vibración de la estructura, dependiendo de esto podremos saber bajo que numero armónico el modo sufre el fenómeno de resonancia. Cuando se produce la resonancia la vibración se acumula con el tiempo de modo que la respuesta después de varias pisadas es significativamente mayor que después de la primera, es decir que las vibraciones inducidas por cada pisada refuerzan la vibración generada por pisadas anteriores. Cuando no se produce el fenómeno de resonancia las vibraciones de cada pisada se van disipando, dependiendo del amortiguamiento y de manera que no se acumulan, sino que se repitan periódicamente hasta que pierdan la energía por completo, como se muestra en la Ilustración 35.



**Ilustración 35:** Comparación de respuesta de la estructura respecto a velocidad entre una estructura de frecuencia natural de 3 Hz con una estructura de frecuencia natural de 4 Hz (M R Willford, P Young, 2007).

Podemos observar en la imagen que las líneas de color verde corresponden a una estructura con una frecuencia natural de 4Hz, mientras que las líneas azules corresponden a una estructura con frecuencia natural de 3Hz. Cabe recalcar que la estructura es la misma en masa y amortiguamiento, pero diferente en rigidez lo que hace que posean diferentes valores de frecuencia natural.

Una vez definido esto podemos observar que la estructura de 4Hz llegó al fenómeno de resonancia debido a que sus respuestas de velocidad se siguen acumulando en función del tiempo, al contrario de la estructura de 3Hz que se logra observar que sus respuestas de velocidad responden a un patrón periódico que va perdiendo energía con relación al tiempo.

#### **4.1.1.1 Modelación de acciones de bajo impacto.**

Una vez explicado el funcionamiento y los efectos que producen las acciones de bajo impacto sobre las estructuras, podemos continuar con la modelación de estas en ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS el cual posee como ventaja respecto a otros Softwares estructurales la opción de realizar el análisis el Footfall o análisis de excitación dinámica por pasantes el cual se explicara de manera teórica y de cómo aplicarlo en el software.

##### **4.1.1.1.1 Procedimiento teórico que utiliza el programa.**

El análisis Footfall examina los efectos provocados por la fuerza armónica en un intervalo de tiempo que sucede cuando un individuo realiza una caminata, es aplicado en estructuras sin material, sin linealidades geométricas y estructurales. El estudio no se puede definir en el caso de que la estructura posea barras elastoplásticas, soportes unidireccionales o no lineales,

liberaciones, compatibilidades, cables y elementos que se encuentre en ambos estados de esfuerzo, es decir ya sea a compresión o a tensión.

El objetivo principal del análisis Footfall es evaluar las respuestas verticales de aceleración, velocidad y deflexión que se generan en los nodos de la estructura el momento que se aplica la fuerza armónica en los mismos.

Hay dos enfoques para analizar los efectos del Footfall:

- Analizar la respuesta en el mismo nodo al que se aplica la fuerza (autoexcitación).
- Analizar la respuesta en cualquier nodo al efecto de la fuerza aplicada a otro nodo (excitación completa).

Esta fuerza es aplicada utilizando el mecanismo de análisis FRF (Análisis armónico en el dominio de frecuencias) aplicando la amortiguación respectiva que posea la estructura, utilizando este mecanismo se puede definir el dominio de frecuencia para la fuerza armónica. Los resultados del análisis solo incluyen resultados en nodos. Uno de los resultados más importantes del análisis es un factor de respuesta que especifica cuántas veces las vibraciones calculadas exceden las permisibles, perceptibles para un humano.

Para realizar el análisis Footfall existen varios métodos, cada uno de ellos se encuentra limitado en algún aspecto. El método utilizado en Robot plantea los siguientes problemas de manera consistente:

- El método es aplicable para cualquier estructura por la que se realice la acción de caminata, incluidos suelos, sistemas de piso, puentes, etc.
- Es aplicable para estructuras de cualquier forma o material de construcción, lo que es de gran ayuda para el momento de realizar comparaciones entre las mismas.
- Las estructuras irregulares complejas se pueden evaluar con tanta fiabilidad como las regulares simples.

- La precisión del método ha sido validada por cinco años de utilización que se le ha dado de manera rutinaria en proyectos de diseño a lo largo de todo el mundo.
- Se conecta bien con los métodos de diseño de ingeniería y los paquetes de Software modernos.

Es importante recalcar que el método que utiliza Robot es el apropiado para estimar las vibraciones causadas por un solo peatón que realiza una trayectoria de caminata sobre una superficie plana en una estructura que sea al menos diez veces más pesadas que la persona que realiza la caminata. Además, el método utiliza conjuntamente el análisis de elementos finitos para calcular las propiedades modales (masa modal, frecuencia modal y la forma del modo) de la estructura, lo que representa mayor precisión cuando se presentan estructuras menos regulares que otras.

Puede calcular el factor de respuesta utilizando dos tipos diferentes de análisis:

- Análisis de respuesta resonante.
- Análisis de respuesta impulsiva y transitoria.

El criterio para seleccionar un tipo de análisis es la primera frecuencia básica de las vibraciones propias de la estructura y la frecuencia máxima de pisadas. Para realizar los dos análisis utilizaremos el criterio establecido por Concrete Center 2006, de la misma manera que se realizó la explicación de las acciones de bajo impacto y el análisis Footfall.

### ***Análisis de respuesta resonante.***

El análisis de respuesta resonante consiste en distribuir la función de las vibraciones en series de Fourier que tienen componentes armónicos. Se utilizan hasta cuatro componentes de la serie. El valor máximo cuádruple del intervalo de la frecuencia de pisadas suele ser de aprox. 8-10Hz. Si una frecuencia básica de vibraciones propias es menor que este valor, pueden acumularse vibraciones resonantes en el intervalo de excitación. Calcule la aceleración para cada uno de

los cuatro componentes armónicos en cada paso del intervalo de frecuencia de excitación. A continuación, calcule un factor de respuesta para cada uno de los componentes armónicos comparando la aceleración calculada con la aceleración base  $a_{R=1}$  (m/s<sup>2</sup>) (M.R Willford, 2007):

Caso	Aceleración máxima de la línea base (Factor de respuesta de 1)
Si $f_h < 4 \text{ Hz}$	$a_{R=1,h} = \frac{0.0141}{\sqrt{f_h}} \text{ m/s}^2$
Si $4 \text{ Hz} < f_h < 8 \text{ Hz}$	$a_{R=1,h} = 0.0071 \text{ m/s}^2$
Si $f_h > 8 \text{ Hz}$	$a_{R=1,h} = 2.82\pi f_h \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$

**Tabla 4:** Aceleración máxima para rangos de frecuencia en análisis Footfall (M.R. Willford, P. Young, 2007).

La fórmula para el factor de respuesta para el componente de número armónico h:

$$R_h = \frac{|a_h|}{a_{R=1,h}}$$

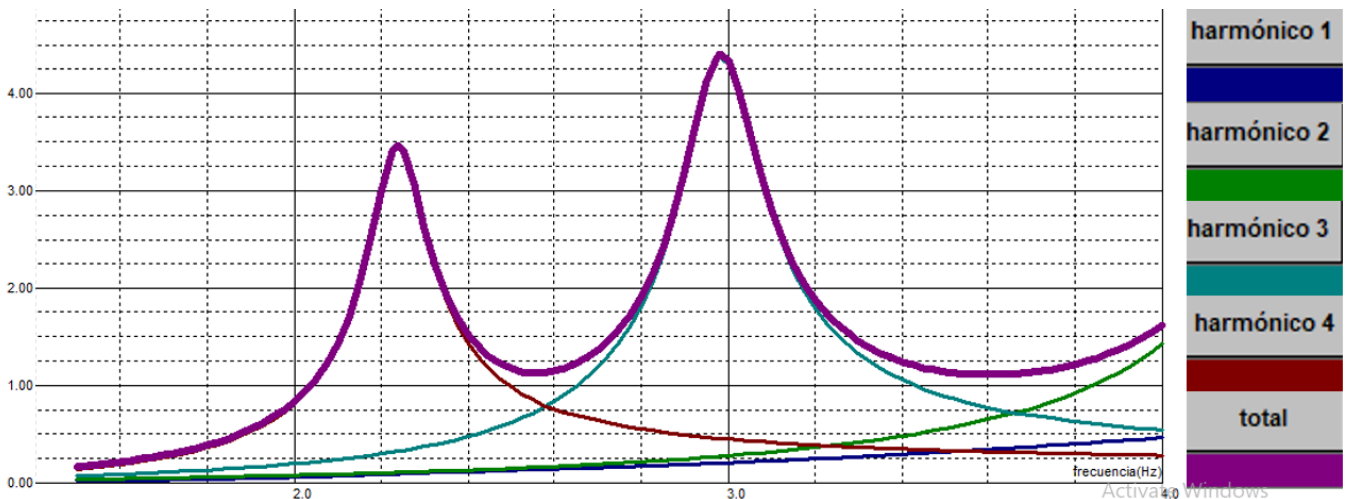
**Ecuación 5:** Formula factor de respuesta para análisis Footfall (M.R. Willford, P. Young, 2007).

Como paso final para calcular el factor de respuesta total R del modo, se utilizará la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del factor de respuesta de cada número armónico

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + R_4^2}$$

**Ecuación 6:** Factor de respuesta total del modo (M.R. Willford, P. Young, 2007).

Una vez obtenido estos datos se deberá realizar una gráfica en la cual se compare el factor de respuesta de los cuatro números armónicos y el factor de respuesta total con relación a la frecuencia de estimulación, para de esta manera poder obtener cual es el mayor factor de respuesta y a que frecuencia se produce. La gráfica se debería hacer de la siguiente manera para poder hacerla comparación.



**Ilustración 36 :** Grafico de Factor de respuesta vs Frecuencia de estimulación por numero armónico.

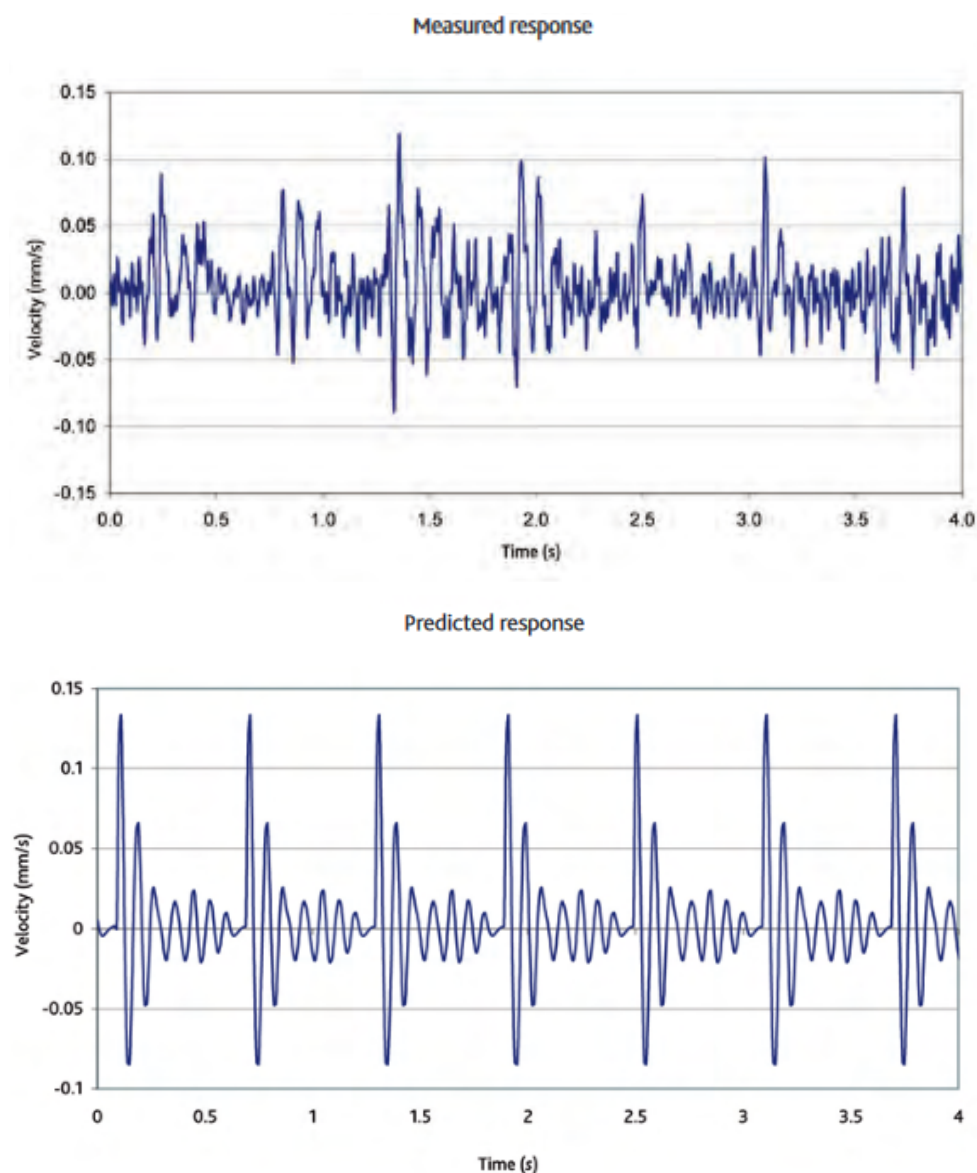
La Ilustración 36 es la gráfica del factor de respuesta vs frecuencia de estimulación de una viga de 15 de metros simplemente apoyada, en la cual se aplicó el análisis Footfall con los parámetros de un persona de 80kg que realiza un trayecto del punto 0 al punto 15 en una serie de 10 pasos y con un rango de frecuencias de 1.5Hz a 4Hz (se utiliza un rango de 1.5Hz -4Hz para poder apreciar de mejor manera la forma que toma la figura), en la ilustración se muestran 5 gráficas de 5 colores diferentes. Cada color pertenece para un número armónico y el quinto color pertenece a la respuesta total calculada con la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del factor de respuesta de cada número armónico como se explicó anteriormente.

***Análisis de respuesta inmediata.***

Si una estructura es más rígida, con la frecuencia básica de vibraciones propias por encima de 10Hz, las vibraciones resonantes no se acumulan, es decir que cada uno de los pasos del caminante induce vibraciones por una única excitación que se desvanece en el tiempo. El procedimiento de análisis para la respuesta inmediata se realiza con el cálculo del historial de tiempo de velocidad de una sola pisada en una localización particular, se ha observado que las velocidades de caminatas muy altas producen mayores respuestas y es por esta razón que es necesario realizar el cálculo de la velocidad de caminata anticipada más rápida. A partir de

esto, se pueden calcular las velocidades pico o RMS. La velocidad RMS se puede utilizar para calcular un factor de respuesta y, si es necesario, se puede derivar un VDV del historial de tiempo.

El análisis de respuesta transitoria se debe realizar para un solo impulso inducido para el valor máximo de la frecuencia de pisada. Un resultado del análisis es un gráfico de la función de velocidad en el tiempo, la gráfica debe ser como se cómo se mostrará en la siguiente ilustración en la cual también se realiza la comparación de la medición con la predicción.



**Ilustración 37:** Gráfica de Velocidades medidas y pronosticadas a una velocidad de marcha de 100 pasos por minuto (M.R. Willford, P. Young, 2007).

Una medida de vibraciones es un valor medio de la función de velocidad transitoria, es decir, la raíz cuadrada de la velocidad media (M.R. Willford, P. Young, 2007):

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

*Ecuación 7:* Velocidad media (M R Willford, P Young, 2007).

Calcule un factor de respuesta para el análisis de respuesta transitoria.

$$R_f = \frac{v_{RMS}}{v_{R=1}}$$

*Ecuación 8:* Respuesta para análisis transitorio (M R Willford, P Young, 2007).

Donde la velocidad básica  $v_{R=1}$  (m/s) es:

$$v_{R=1} = 5.0 * 10^{-3} / 2\pi f_1 \text{ para las frecuencias básicas de vibración } f_1 < 8 \text{ Hz}$$

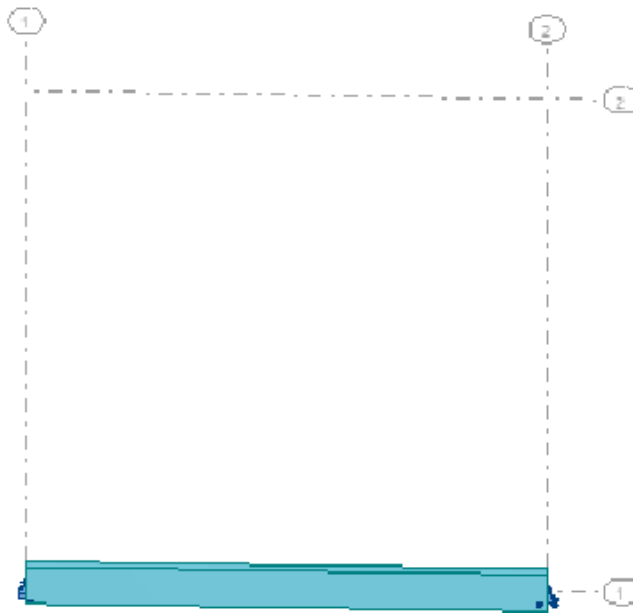
$$v_{R=1} = 1.0 * 10^{-4} \text{ para } f_1 \geq 8 \text{ Hz}$$

Una estructura con la frecuencia de vibración propia básica de aproximadamente 8-10 Hz pueden verse influenciados por vibraciones de impulso y resonancia. El Software realiza análisis de vibraciones y especifica el coeficiente de vibración total como el mayor de los coeficientes de ambos tipos de análisis.

#### **4.1.1.1.2 Procedimiento de modelamiento.**

Como se explicó anteriormente el software Robot Structural Analysis, posee la opción de realizar el análisis Footfall de manera directa, de manera que no se tendrá que realizar un modelamiento complejo. El procedimiento para realizar el análisis Footfall en el programa es el siguiente (se realizará el procedimiento en una viga de 15m simplemente apoyada como ejemplo ilustrativo):

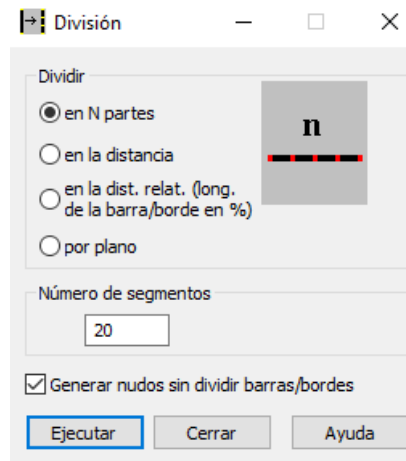
1. Realizar el modelo de la estructura, es decir definir propiedades geométricas, formas, distancias, materiales, etc.



**Ilustración 38:** Modelamiento de la estructura de ejemplo para análisis.

2. Ya que la estructura que se va a utilizar para el ejemplo es una viga simplemente apoyada se la tiene que dividir para poder obtener nudos dentro del trayecto de caminata, esto se tiene que hacer porque el análisis Footfall se desarrolla en los nudos. Este paso se tiene que realizar siempre que la estructura donde se va a realizar el análisis no posea nudos dentro del trayecto de caminata.

Para poder dividir la estructura nos dirigimos a la pestaña de edición, y seleccionamos la opción donde se desplegará el siguiente cuadro.

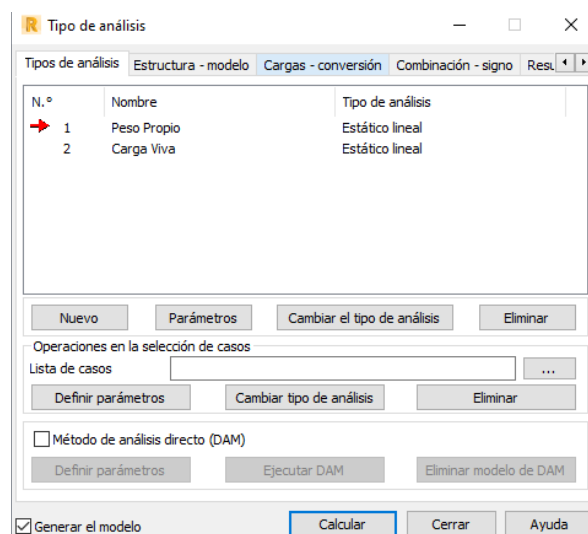


**Ilustración 39:** Cuadro de opciones para dividir elemento.

Como se muestra en la

Ilustración 39 se puede dividir de diferentes maneras ya sea en un número de partes específicas, en partes de longitudes definidas o en distancias relativas.

3. El paso siguiente es dirigirse a la pestaña de análisis y seleccionar el tipo de análisis, en donde como primera instancia realizaremos un análisis modal para poder observar las frecuencias fundamentales de cada modo. Al seleccionar tipo de análisis se desplegará el siguiente cuadro.



**Ilustración 40:** Cuadro de tipo de análisis.

Una vez desplegado el cuadro se debe seleccionar la opción de Nuevo.

Definición de un nuevo caso

Nombre: Modal

Tipo de análisis

- Modal
- Modal con definición automática de casos sísmicos
- Sísmica (Método del esfuerzo lateral equivalente)
- Sísmico ASCE 7-16
- Espectral
- Armónico
- Temporal
- Push over
- Análisis armónico en el dominio de frecuencia (FRF)
- Excitación dinámica por pasantes (Footfall)

OK Cancelar Ayuda

**Ilustración 41:** Cuadro para definir un nuevo caso de análisis.

Seleccionamos la opción de modal y esperamos que se despliegue el siguiente cuadro para poder definir los parámetros del análisis.

Parámetros del análisis modal

Caso: Modal

Parámetros

Número de modos: 10

Tolerancia: 0.0001

Número de iteraciones: 40

Aceleración: 9.80665

Matriz de masas

- Coherentes
- Concentradas con rotaciones
- Concentradas sin rotaciones

Direcciones activas de la masa

X  Y  Z

Ignorar densidad

Verificación de Sturm

Parámetros avanzados >>

OK Cancelar Ayuda

**Ilustración 42:** Cuadro de parámetros para análisis modal.

En el cuadro presente tenemos que definir cuantos modos se desea que calcule el programa y con qué exactitud se desean los cálculos al definir el número de iteraciones y la tolerancia, siguiente a esto se encuentra la opción de matriz de masas en donde pregunta de qué manera se desea calcular la distribución de masas y se poseen tres opciones:

- Coherentes.
- Concentradas con rotaciones.
- Concentradas sin rotaciones.

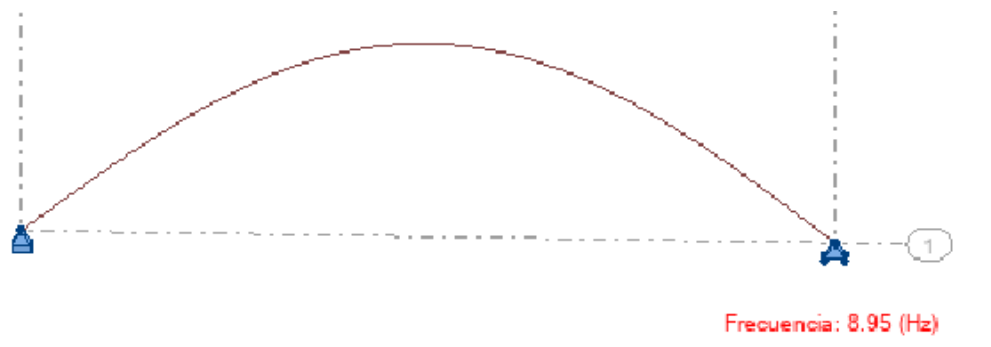
La diferencia que se encuentra entre las tres opciones son el número de grados de libertad que utilizan para el cálculo, en el caso de las opciones concentradas necesitan un mayor número de grados de libertad para poder calcular con precisión la distribución de masas, contrario de la opción coherente que es la que se va a utilizar ya que realiza el cálculo con un número de grados de libertad más bajo.

Ya que el análisis que vamos a realizar es un análisis vertical en el momento de definir las direcciones activas de masa se podría omitir en las direcciones del eje x y el eje y.

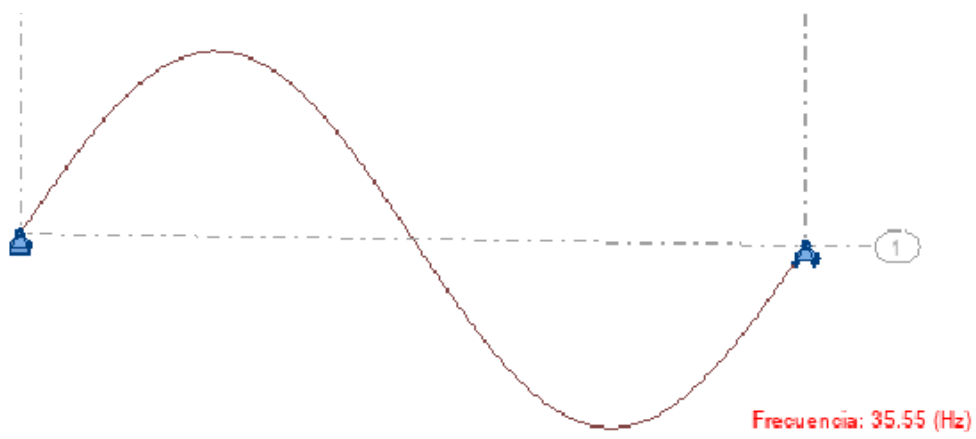
4. Una vez configurado todos los parámetros del análisis modal se escoge la opción de OK y se realiza el cálculo. Ya finalizado el cálculo para poder observar los resultados de cada modo se tiene dos opciones se puede desplegar modo a modo o desplegar la tabla donde se resumen todos los cálculos.

Para poder observar de modo a modo nos dirigimos a la opción de resultados, diagramas-barras y activamos la opción de deformaciones, de esta manera podremos observar cómo se deforma la estructura en cada uno de sus modos y con sus respectivas frecuencias.

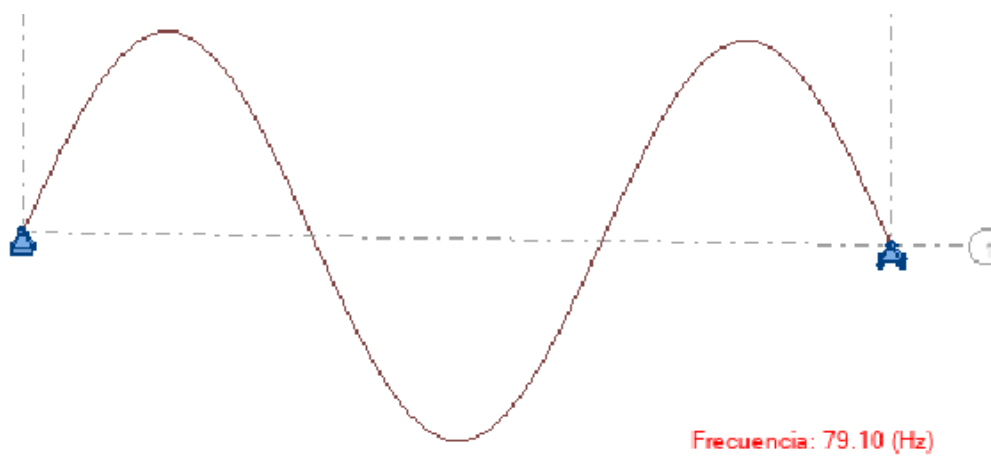
Modo 1



Modo 2



Modo 3.



*Ilustración 43:* Modos de vibración de la estructura de ejemplo

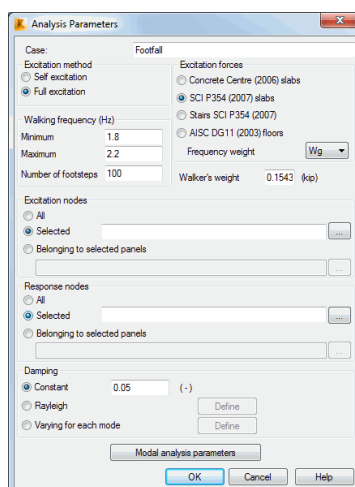
Para desplegar el cuadro resumido de los valores calculados nos dirigimos a la pestaña de resultados, opción avanzada y seleccionamos la opción modos propios y se desplegará una tabla como la siguiente.

Caso/Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (sec)	. UX (%)	. UZ (%)	Masas corr. UX (%)	Masas corr. UZ (%)	Total masas UX (kg)	Total masas UZ (kg)
3/ 1	8.95	0.11	0.0	80.69	0.0	80.69	0.0	20221.42
3/ 2	35.55	0.03	0.0	80.69	0.0	0.00	0.0	20221.42
3/ 3	79.10	0.01	0.0	89.34	0.0	8.65	0.0	20221.42
3/ 4	138.54	0.01	0.0	89.34	0.0	0.00	0.0	20221.42
3/ 5	212.53	0.00	0.0	92.24	0.0	2.91	0.0	20221.42
3/ 6	299.59	0.00	0.0	92.24	0.0	0.00	0.0	20221.42
3/ 7	398.27	0.00	0.0	93.59	0.0	1.35	0.0	20221.42
3/ 8	507.18	0.00	0.0	93.59	0.0	0.00	0.0	20221.42
3/ 9	625.13	0.00	0.0	94.32	0.0	0.72	0.0	20221.42
3/ 10	751.13	0.00	0.0	94.32	0.0	0.00	0.0	20221.42

**Ilustración 44:** Cuadro de resultados dinámicos análisis modales.

Una vez ya obtenidos estos resultados se puede realizar un análisis más exacto y acertado acerca de los efectos de las pisadas de una persona.

- Una vez concluido el análisis modal podemos continuar con el análisis Footfall, para esto nos dirigimos a la pestaña de análisis y seleccionamos la opción de tipo de análisis donde nuevamente se desplegará el cuadro mostrado en la Ilustración 40: Cuadro de tipo de análisis. y escogeremos la opción donde se desplegará el cuadro de la Ilustración 41 pero en este caso seleccionaremos la opción de Excitación Dinámica por Pasantes (Footfall), y se desplegará el siguiente cuadro.



**Ilustración 45:** Cuadro de parámetros de análisis para Footfall.

El cuadro de parámetro de análisis debe ser configurado dependiendo que se desea realizar en el análisis Footfall es por esto por lo que se explicara cada uno de los parámetros a completar.

- Dentro de los métodos de excitación podremos encontrar dos opciones de cálculo: La primera opción es la autoexcitación (Self Excitation) la cual analiza la respuesta del nodo donde se aplica la fuerza. La segunda y última opción es la excitación completa (Full Excitation) la cual analiza la respuesta de cualquier nodo, al efecto de la fuerza aplicada a otro nodo.
- Dentro de los parámetros de las fuerzas de excitación vamos a encontrar cuatro tipos, cada uno de un método diferente para análisis Footfall por autores diferentes donde la diferencia será el intervalo de frecuencia para las fuerzas de excitación:
  - Concrete Centre (2006) slabs according to A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures, M.R. Willford, P. Young, The Concrete Center 2006; intervalo de frecuencia para las fuerzas de excitación es 1.0 – 2.8Hz.
  - SCI P354 (2007) slabs according to SCI P354: Design of Floors for Vibration: A New Approach, The Steel Construction Institute (2007 Edition); intervalo de frecuencia para las fuerzas de excitación es 1.8 – 2.2 Hz.
  - Stairs SCI P354 (2007) according to SCI P354: Design of Floors for Vibration: A New Approach, The Steel Construction Institute (2007 Edition); intervalo de frecuencia para las fuerzas de excitación es 1.2 – 4.5 Hz.
  - AISC DG11 (2003) floors according to Steel Design Guide Series 11, Floor Vibrations Due to Human Activity, AISC 2003; intervalo de frecuencia para las fuerzas de excitación es 1.6 – 2.2Hz.

Peso del peón: Factor de gran importancia para la respuesta resonante, se deberá especificar el peso del individuo que vaya a realizar el recorrido

Frecuencia del peón. – En este apartado se deberá especificar el rango de frecuencia que va a realizar el peatón desde la frecuencia más baja hasta la más alta, como se detalló antes el rango de frecuencias es de 1.5Hz – 2.5Hz. Dentro de esta opción también está el número que va a necesitar el peatón para recorrer la distancia, este factor es de gran importancia para la respuesta resonante.

- Nudos con excitación impuesta: esta opción le permite realizar el análisis aplicando la excitación ya sea en un solo nudo o en algunos seleccionados
  - Búsqueda de respuesta para los nudos: esta opción le permite limitar el análisis y calcular los resultados solo en los nodos seleccionados
  - Por último, se encuentra el parámetro de amortiguación en donde podemos escoger entre las siguientes opciones: Constante, Rayleigh, variable para cada modo; si selecciona Rayleigh o variable para cada modo, el botón Definir estará disponible;
6. Una vez terminada la configuración nos dirigimos a la opción de Ok y se cerrará el cuadro de diálogo.
  7. Nos dirigiremos al cuadro de la Ilustración 40, allí seleccionaremos la opción de calcular para que empiece a realizar el cálculo.
  8. Para poder observar los resultados del análisis Footfall nos dirigiremos a la pestaña de resultados en el menú principal, seleccionaremos avanzado y encontraremos las opciones de tablas, diagramas y mapas donde se indicarán los resultados del análisis Footfall.

#### **4.1.2 Acciones de alto impacto.**

---

Cuando hablamos de acciones de alto impacto producidas por fuentes internas como los seres humanos, nos referimos a acciones como saltos, bailes, ejercicios aeróbicos, etc.; es decir acciones que transmitan una gran cantidad de carga dinámica al suelo o sistema de piso el momento de contacto. Estas cargas dinámicas pueden ser realizadas por un solo individuo o un conjunto grande de individuos al que lo identificaremos como multitud, cuando las acciones de alto impacto se realizan en conjunto pueden generar las mayores respuestas sobre la estructura y es por esto por lo que es el peor de los casos y por ende nuestro caso de análisis.

Las cargas dinámicas de multitud son generadas por el movimiento de personas. Las cargas más grandes son producidas por movimientos rítmicos sincronizados que surgen principalmente de personas bailando o saltando, generalmente en respuesta a la música. Una multitud de personas saltando rítmicamente puede generar grandes cargas y esto puede ser motivo de preocupación tanto para las evaluaciones de seguridad como para las de servicio. Partiendo de esto podemos recomendar calcular la carga dinámica de un piso que se encuentra sujeto a actividades rítmicas caracterizadas por el movimiento sincronizado de múltiples participantes o de uno solo, se utilizarán estos dos rangos de frecuencia para las vibraciones creadas por la actividad dependiendo del caso:

Individuos = 1,5 - 3,5Hz

Grupos = 1,5- 2,8Hz

Estos rangos de frecuencia cubren el aumento del nivel de actividad debido a los saltos, que es la peor situación de caso con la carga de multitudes. Se logra notar que el rango de frecuencias para grupos es más bajo que el rango de frecuencias para individuos, esto se debe a que es muy difícil que una multitud mantenga constante un rango de frecuencia. Al igual que es importante establecer un rango de frecuencias que van a tener las vibraciones creadas por las actividades,

los autores Bachmann y Ammann estudiaron y recomendaron que la densidad de carga es otro factor de gran importancia, el cual se debe aplicar para multitudes en actividades rítmicas deberá tomarse sobre un porcentaje o parte de área de la superficie como:

$$\text{Actividades aeróbicas y de gimnasio} = 0.25 \frac{\text{personas}}{m^2}$$

$$\text{Actividades de baile social} = 2.00 \frac{\text{personas}}{m^2}$$

Al igual que para el análisis de la caminata de un individuo se han realizado muchos estudios y medidas acerca de las cargas dinámicas inducidas por acciones de alto impacto, para realizar estas mediciones se utilizaron plataformas instrumentadas o estructuras sobre las cuales se realizaba la acción y de esta manera poder medir las formas de ondas de la carga o fuerza aplicada.

Estas formas de ondas son funciones complicadas con respecto al tiempo para las que no existe una solución de forma cerrada, lo que hace que no sean útiles para el desarrollo de ecuaciones que sirvan para la predicción de respuestas. Además, las formas de onda de fuerza no se pueden utilizar en respuesta al análisis de historia para predecir la respuesta estructural porque pequeños cambios en la forma de onda a menudo resultan en grandes cambios en espectro de fuerza y, por tanto, grandes cambios en la vibración prevista respuesta.

Es por esto por lo que se hace necesario que dichas formas de ondas deban convertirse en representaciones matemáticas que ayuden a predecir las respuestas de vibración, para lograr esto se utiliza una serie de Fourier la cual es la representación de una fuerza mediante la suma de sinusoides.

#### **4.1.2.1 Modelación de acciones de alto impacto.**

---

A diferencia de la modelación de las acciones de bajo impacto las modelaciones de alto impacto no poseen una opción que realice directamente el análisis en el Software Estructural por lo que para este caso se hace necesario el análisis por medio de una función tiempo historia.

##### **4.1.2.1.1 Procedimiento teórico que utiliza el programa.**

---

La función tiempo-historia de una carga se puede modelar como una fuerza de alto contacto mientras dure un cierto periodo de tiempo seguido de fuerza cero cuando los pies abandonan el piso. Para poder lograr esto se ha propuesto una función tiempo de carga mediante la serie de pulsos semi-sinusoidales.

La fuerza transferida se caracteriza por la relación de contacto  $\alpha_c$ , que se define por la duración del contacto con el suelo dividida por el período de la actividad. Diferentes relaciones de contacto caracterizan diferentes actividades rítmicas y cuanto más bajo es el valor de la relación de contacto, más vigorosa es la actividad. La carga dinámica máxima puede ser varias veces mayor que la carga estática.

Para el análisis, la función de carga para el salto de un individuo se puede expresar como una serie de Fourier de la siguiente manera:

$$F(t) = G \left\{ 1.0 + \sum_{h=1}^H \alpha_h \sin[2h\pi f_w t + \phi_h] \right\}$$

*Ecuación 9:* Función tiempo-historia para representar la carga de salto individual (The Steel Construction Institute, 2009).

Donde:

G: Es el peso de los individuos (usualmente se toma el valor de 746 N por individuo, esto sería un peso promedio de 76 kg por individuo por el valor de la gravedad de  $9.81 \frac{m}{s^2}$  ).

H: Es el número términos de Fourier a utilizar.

$\alpha_h$ : Coeficiente de Fourier o factor de carga dinámica en términos del número armónico utilizado.

$f_w = \pi r^2$ : Frecuencia de estimulación.

$\phi_h$ : Es el desfase con respecto al número armónico utilizado.

Los coeficientes de Fourier y los términos de desfase se encuentran en la siguiente tabla clasificada por categoría de impacto y el número armónico en relación.

			Coeficientes de Fourier y desfase de acuerdo con el número armónico.					
			h = 1	h = 2	h = 3	h = 4	h = 5	h = 6
$\alpha_c=2/3$	Bajo impacto aeróbicos	$\alpha_h$	9/7	9/55	2/15	9/247	9/391	2/36
		$\phi_h$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$
$\alpha_c=1/2$	Alto impacto aeróbicos	$\alpha_h$	$\pi/2$	2/3	0	2/15	0	2/35
		$\phi_h$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
$\alpha_c=1/3$	Normal saltar	$\alpha_h$	9/5	9/7	2/3	9/55	9/91	2/15
		$\phi_h$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$-5\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

**Tabla 5:** Coeficientes de Fourier y de desfase respecto al número armónico de diferentes radios de contacto para grupos pequeños de personas (The Steel Construction Institute, 2009).

Los valores mostrados en la Tabla 5 son adecuados desde un solo individuo hasta grupos pequeños de individuos involucrados en actividades rítmicas. Para grupo grandes se hace presente la falta de coordinación lo que generaría coeficientes de Fourier mucho más pequeños que los de grupos pequeños, para poder representar la falta de coordinación se deben reemplazar los primeros tres coeficientes de Fourier ( $\alpha_h$ ) de la tabla con los siguientes valores:

$$\alpha_1 = 1.61 p^{-0.082}$$

$$\alpha_2 = 0.94 p^{-0.24}$$

$$\alpha_3 = 0.44 p^{-0.31}$$

En conjunto con los coeficientes de desfase para el caso normal de saltar presentados en la tabla, el  $p$  en los coeficientes de Fourier representan el número de personas que van a formar el grupo y van a participar en la actividad rítmica ( $2 \leq p \leq 64$ ).

La tabla quedaría de la siguiente manera para grupos grandes de hasta 64 personas.

			Coeficientes de Fourier y desfase de acuerdo con el número armónico.					
			h = 1	h = 2	h = 3	h = 4	h = 5	h = 6
$\alpha_c=2/3$	Bajo impacto aeróbicos	$\alpha_h$	$1.61 p^{-0.082}$	$0.94 p^{-0.24}$	$0.44 p^{-0.31}$	9/247	9/391	2/36
		$\phi_h$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$
$\alpha_c=1/2$	Alto impacto aeróbicos	$\alpha_h$	$1.61 p^{-0.082}$	$0.94 p^{-0.24}$	$0.44 p^{-0.31}$	2/15	0	2/35
		$\phi_h$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
$\alpha_c=1/3$	Normal saltar	$\alpha_h$	$1.61 p^{-0.082}$	$0.94 p^{-0.24}$	$0.44 p^{-0.31}$	9/55	9/91	2/15
		$\phi_h$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$-5\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

**Tabla 6:** Coeficientes de Fourier y de desfase respecto al número armónico de diferentes radios de contacto para grupos grandes de personas.

Estos coeficientes poseen la limitación de realizar hasta 64 personas debido que al ser valores y formulas obtenidos a través de experimentación, se determinó que durante las pruebas se debía restringir hasta 64 personas debido a preocupaciones de seguridad relacionadas con el piso de prueba, pero el desarrollo del modelo de carga permite la evaluación para grupos más grandes e incluso ha realizado para grupos de hasta 8192. Donde a partir de los datos obtenidos con grupos hasta de ese tamaño se logró observar que los coeficientes de Fourier ya que no se reducen al aumentar el tamaño de la multitud, sino que alcanzan un valor constante, lo que

sugiere que las relaciones de poder derivadas de los datos experimentales solo son apropiadas para los grupos más pequeños.

Aunque es posible calcular cargas para grupos tan grandes, es importante darse cuenta de que otros factores, que no están incluidos en el estudio, pueden llegar a ser importantes. Por ejemplo, para un grupo grande podría haber un retraso de tiempo entre las personas más cercanas a los altavoces que escuchan la indicación musical y las más alejadas y esto se ha observado en una tribuna. Esto puede resultar en diferencias de fase significativas y, por lo tanto, cargas diferentes. A valores finales para grandes multitudes, es posible cuantificar los efectos de cambiar la desviación estándar para la variación de fase. Para poder considerar estos factores ya mencionados existe una variación de la función sinusoidal en la cual se ve reflejado los efectos de estos factores, en esta función se podrán utilizar los mismos coeficientes de Fourier y coeficientes de desfase. La función es la siguiente:

$$F(t) = G \left[ 1.0 + C_e \sum_{h=1}^{\infty} \alpha_h \sin (2\pi f_w t + \phi_h) \right]$$

**Ecuación 10:** Función tiempo-historia para representar la carga de salto considerando parámetros de multitud (Ji. T, Ellis. B. R, 1993).

Como se puede observar la ecuación se deriva de la ya antes explicada con la diferencia de la inclusión de estos parámetros.

$G$ : Es la densidad de carga por multitud (el valor de G ha sido tema de discusión durante algún tiempo por diferentes autores, al final después de revisar muchos textos se llegó al consenso de para actividades aeróbicas se optará por el valor de 0.2 kPa o  $0.2 \frac{Kn}{m^2}$  que como se explicó anteriormente representara a  $0.25 \frac{personas}{m^2}$ , de la misma manera para bailes sociales se optara el valor de 1.5 kPa o  $1.5 \frac{Kn}{m^2}$  que como se explicó anteriormente representara a  $2.00 \frac{personas}{m^2}$ )

$C_e$ : Efecto dinámico por carga de multitud (este parámetro representara a la falta de coordinación entre las personas saltando y la atenuación en los resultados de respuesta, el valor recomendado a tomar es  $\frac{2}{3}$  (*Factor de disminucion*)).

#### 4.1.2.1.1.1 Casos especiales.

---

Como se explicó antes existen los casos especiales, en los que se deberá realizar el diseño del sistema de piso de acuerdo con el estado límite y que se considerarán especiales si cumplen lo siguiente:

- Si el suelo o sistema de piso posee una frecuencia fundamental máxima de 8.4Hz vertical y 4Hz horizontal se debe evaluar considerando los efectos resonantes, si la frecuencia fundamental sobrepasa estos valores no se considera los efectos resonantes y se considerará un caso especial.

La frecuencia natural vertical del piso debe evaluarse para determinar el modo de vibración apropiado de una estructura vacía. Si la estructura supera la condición de la frecuencia fundamental mínima de 8.4Hz y al ser insensible a los efectos de la respuesta resonante se deberá diseñar para soportar cargas dinámicas anticipadas, que deben considerarse como un caso de carga impuesta adicional. En estas circunstancias, la fuerza por unidad de área se puede calcular usando la siguiente ecuación, asumiendo una densidad de gente apropiada para el uso del piso.

$$F(t) = q \left\{ 1.0 + \sum_{h=1}^H \alpha_h D_{\delta,h} \sin (2h\pi f_w t + \phi_h + \phi_{1,h}) \right\}$$

*Ecuación 11: Función tiempo-historia para representar la carga de salto para casos especiales (The Steel Construction Institute, 2009).*

Donde:

$q$ : Es el peso de los individuos (usualmente se toma el valor de 746 N por individuo, esto sería un peso promedio de 76 kg por individuo por el valor de la gravedad de  $9.81 \frac{m}{s^2}$ ).

$D_{\delta,h}$ : Es el factor de amplificación dinámica para desplazamientos según el número armónico de la frecuencia de estimulación. Se calcula con la siguiente ecuación.

$$D_{\delta,h} = \frac{1}{\sqrt{(1-h^2\beta^2)^2+(2h\zeta\beta)^2}}$$

*Ecuación 12:* Factor de amplificación dinámica (The Steel Construction Institute, 2009).

Donde:

$h$ : Es el número del término armónico.

$\beta$ : Es el radio de frecuencia  $\left(\frac{f_p}{f_1}\right)$ .

$\zeta$ : Es el radio de amortiguamiento.

$f_1$ : Es la frecuencia fundamental del piso o sistema de piso.

$H$ : Es el número términos de Fourier a utilizar.

$\alpha_h$ : Coeficiente de Fourier o factor de carga dinámica en términos del número armónico utilizado.

$f_w$ : Frecuencia de estimulación

$\phi_h$ : Es el desfase con respecto al número armónico utilizado.

$\phi_{1,h}$ : Es la fase de la respuesta del primer modo relativa al término armónico.

A la ecuación puede ser simplificada para reducir la cantidad de cálculos que se realizan, para poder hacer esto se considera la suposición de que todos los números armónicos llegan a su máximo pico al mismo tiempo:

$$F = q \left( 1.0 + \sum_{h=1}^H \alpha_h D_{\delta,h} \right)$$

**Ecuación 13:** Función simplificada tiempo-historia para representar la carga de salto (The Steel Construction Institute, 2009).

Para determinar la fuerza máxima, la frecuencia de actividad debe elegirse de manera que uno de los armónicos,  $h$ , corresponda a la frecuencia más baja del piso:

$$f_p = \frac{f_1}{h}$$

**Ecuación 14:** Frecuencia que produzca la fuerza máxima.

Donde:

$f_1$ : Frecuencia del primer modo de vibración.

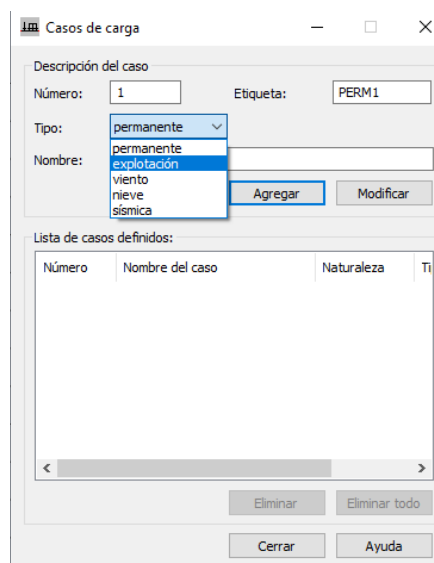
$h$ : Número entero que hará que  $f_p$  entre dentro del rango de frecuencias de la actividad (generalmente se toma el valor que de la peor respuesta es decir la frecuencia más alta dentro del rango).

#### 4.1.2.1.2 Procedimiento de modelamiento.

Como se especificó anteriormente para poder modelar las acciones de alto impacto va a ser necesario utilizar una función tiempo-historia, parte del proceso de análisis es realizar el análisis modal, pero como ese procedimiento ya se explicó en la sección anterior de acciones

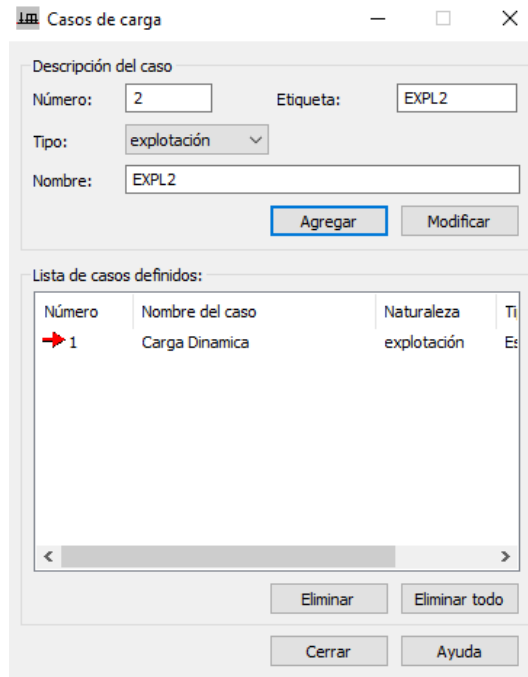
de bajo impacto, en esta sección se omitirá su explicación y se mostrarán los pasos para realizar un análisis tiempo historia:

1. Como primer paso se debe definir el peso de los individuos que van a ocupar la estructura, para poder realizar esto se debe crear un nuevo caso de carga al cual relacionar con las cargas de las personas, para crear un caso de carga se debe ir al menú de herramientas a la pestaña de cargas y seleccionamos casos de carga donde se desplegara el siguiente cuadro.



**Ilustración 46:** Cuadro de opciones para casos de carga.

En el cuadro podemos definir los parámetros como el número de caso, el nombre, la etiqueta y el tipo de carga que vamos a considerar (la naturaleza o tipo de carga va a cambiar dependiendo el código que se haya configurado en el programa). En nuestro caso vamos a agregar una carga viva que va a representar a las personas en el graderío y utilizaremos un tipo de carga de explotación.



**Ilustración 47:** Caso de carga "Carga Dinámica" definido en el cuadro de casos de carga.

- Una vez definido el caso de carga procederemos a aplicar la carga sobre la estructura, para poder realizar esto nos dirigimos a la pestaña de cargas y seleccionamos la opción de cargas y se desplegará el siguiente cuadro.



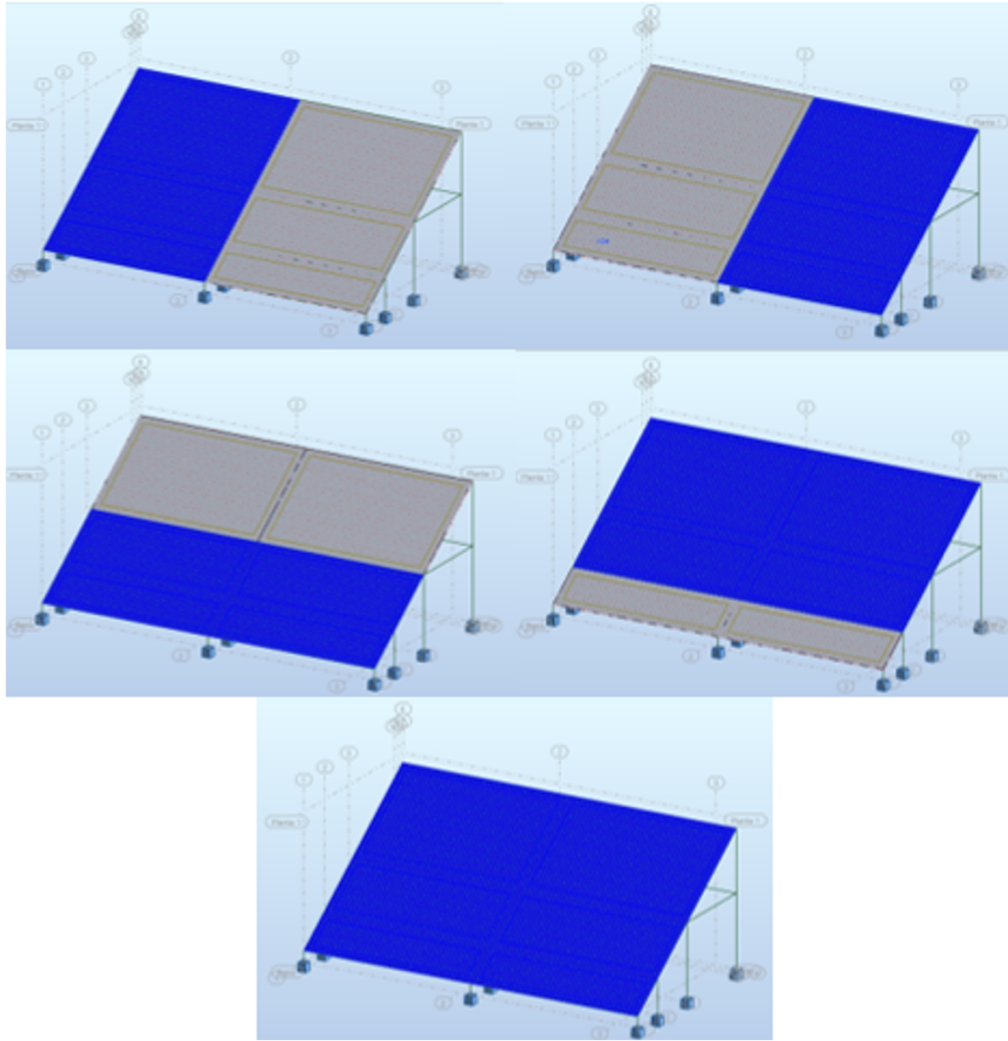
**Ilustración 48:** Cuadro de opciones para aplicar una carga.

En Ilustración 48 ya que estamos hablando de una multitud escogeremos la opción de superficie y la opción de carga rectangular uniforme distribuida, y se desplegará el siguiente cuadro.



*Ilustración 49:* Cuadro para definir parámetros de la carga uniforme rectangular.

En la Ilustración 49 configuraremos los parámetros de la carga distribuida que va a ser aplicada en diferentes áreas representando a la misma área cargada con un número de espectadores, se va a aplicar una carga de  $0.24 \text{ Tonf/m}^2$  que represente a tres personas en un metro cuadrado y se aplicara en las siguientes combinaciones de áreas.



**Ilustración 50:** Áreas designadas para análisis.

- Área Zona 1 = 320 m<sup>2</sup>.
- Área Zona 2 = 320 m<sup>2</sup>.
- Área Zona 3 = 320 m<sup>2</sup>.
- Área Zona 4 = 512 m<sup>2</sup>.
- Área Zona 5 = 640 m<sup>2</sup>.

Con las cargas ya definidas para cada caso se puede suprimir el valor de la densidad de carga por multitud en la función y como paso siguiente ya se puede definir la función historia, para realizar esto nos dirigimos a la pestaña de análisis, opción tipo de análisis y se desplegará la Ilustración 40 en donde se tendrá que seleccionar la opción de nuevo

y se desplegará el cuadro de la Ilustración 41 en donde para realizar el análisis de la función tiempo historia se tendrá que seleccionar la opción de temporal (la cual se habilita una vez que se realiza el análisis modal) y se desplegará el siguiente cuadro.

The image shows a software dialog box titled "Análisis temporal". It is divided into several sections:

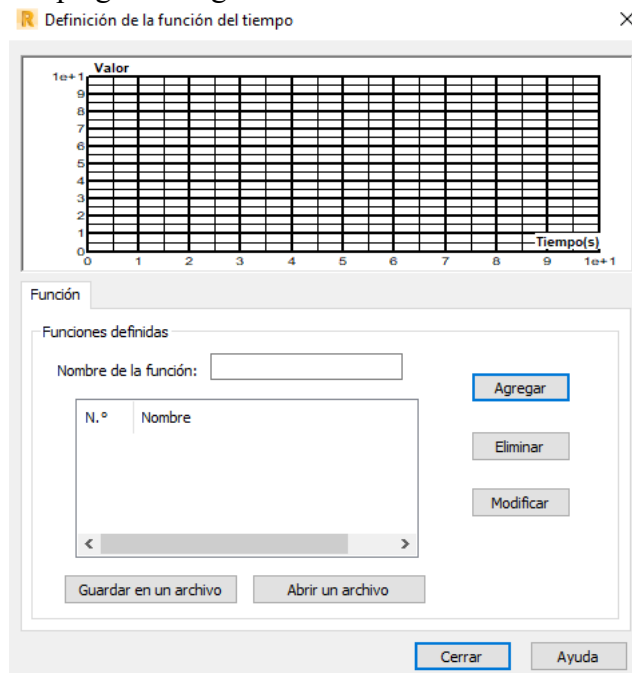
- Caso:** A dropdown menu showing "Análisis temporal".
- Metodo:** Radio buttons for "Newmark" (selected), "Descomposición modal", "Hilber-Hughes-Taylor", and "Newmarka (aceleración)". Below these is a button labeled "Amortiguam." and a text field for "alfa" with the value "-0.3".
- Tiempo:** Text fields for "Guardar result. cada:" (0.1), "División:" (10), and "Fin:" (1), all with "(s)" units.
- Geometría de no linealidad:** Checkboxes for "P-Delta" and "Desplazamientos grandes".
- Parámetros del análisis no lineal:** A greyed-out button.
- Considerar lo resultados del caso selec. como iniciales:** A checkbox and a text field with the value "0".
- Análisis temporal:** A section with dropdowns for "Caso:" (1: CD), "Función:", and "Coeficiente:" (1), and a text field for "Shift:" (0). Below are buttons for "Agregar", "Eliminar", "Modificar", and "Definición de la función".
- Table:** A table with columns "N.º", "Función", "Coeficiente", and "Cambiar".
- Plot:** A grid for plotting "Valor" (y-axis, 0 to 1e+1) against "Tiempo(s)" (x-axis, 0 to 1e+1).
- Buttons:** "OK", "Cancelar", and "Ayuda" at the bottom.

*Ilustración 51:* Cuadro de parámetros de análisis temporal.

3. Con el cuadro de parámetros del análisis abierto, procedemos a definir y a explicar diferentes los parámetros:
  - El parámetro método es una la lista de opciones que se puede utilizar para realizar el análisis del historial de tiempo, dentro de los que se encuentran cuatro tipos Método de Newmark, descomposición modal (valor predeterminado), Hilber-Hugues-Taylor, método de Newmark (aceleración).

- El amortiguamiento es una opción del parámetro de método en el cual existen dos casos, en caso de escoger descomposición modal el programa pedirá determinar los valores de amortiguación detallados de los modos de vibración individuales, en caso de escoger cualquiera de las otras tres opciones el programa provee la amortiguación de Rayleigh le permite determinar los factores alfas y betas.
- En los parámetros de tiempo podemos definir el tiempo de cada paso, la división y el final. Todos estos parámetros definirán la acción y cada cuanto se registran datos, en cuantos lapsos dividirla y el final de ella.
- El parámetro de geometría de no linealidad nos brinda tres opciones a poder escoger las cuales son:
  - P-Delta. - Esta es opción para considerar los efectos P-Delta durante el análisis (El efecto P-Delta también se conoce coloquialmente como un cálculo según el análisis de segundo orden con la aplicación de la imperfección. Según ASCE 7-16, después del cálculo de las cargas sísmicas equivalentes es necesario considerar este efecto P-Delta. Las siguientes fórmulas se dan en el apartado 12.8-16 de la norma.) (Stefan Frenzel, 2020).
  - Desplazamientos largos: Esta opción para tener en cuenta grandes desplazamientos y/o rotaciones durante el análisis.
  - Parámetros de análisis no lineal: abre un cuadro de diálogo que le permite configurar las opciones del análisis no lineal.
- El paso final para definir para completar el análisis tiempo-historia es el parámetro de análisis temporal en el que se deberán llenar los siguientes parámetros:

- Caso: En este apartado se debe seleccionar el caso de carga creado para el análisis.
- Función: Aquí se desplegarán las funciones que se hayan configurado en el programa con su respectivo gráfico, para poder programar una función se debe escoger la opción de “Definición de Función” donde se desplegara el siguiente cuadro.



**Ilustración 52:** Cuadro para definir la función de tiempo.

En la Ilustración 52 podremos comenzar dándole el nombre a la función para poder identificarla con mayor facilidad si fuese el caso necesario, una vez definido el nombre tendremos que relacionarla con la función que queremos utilizar, para esto debemos escoger la pestaña de puntos y agregar la expresión.

**R** Expresión ×

Expresión:

Tiempo al inicio:  (s)

Tiempo al final:  (s)

Paso del tiempo:  (s)

Unidad de ángulo

Grados

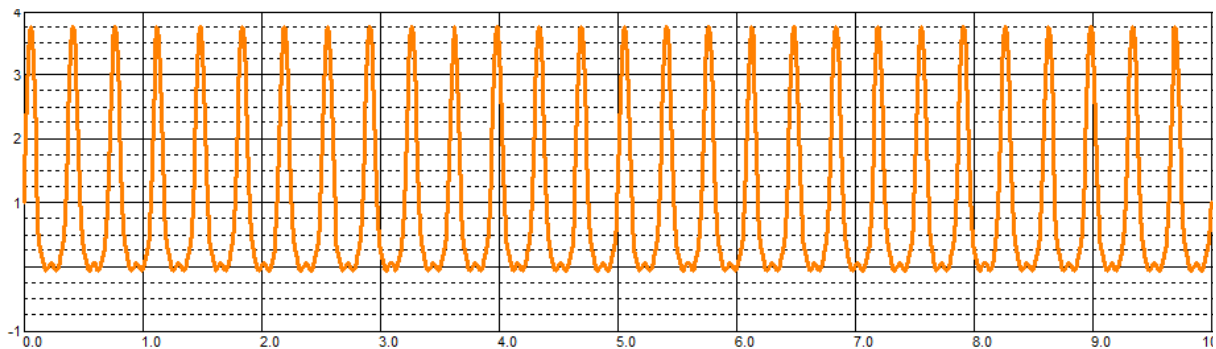
Radianes

**Ilustración 53:** Cuadro para definir la función a utilizar para el análisis tiempo-historia.

4. Para poder tener un mayor análisis vamos a utilizar las siguientes funciones, para que se reflejen diferentes casos sobre nuestra estructura (utilizando los valores extremos del rango de frecuencias explicado antes 1.5-2.8Hz).

2.8 Hz.

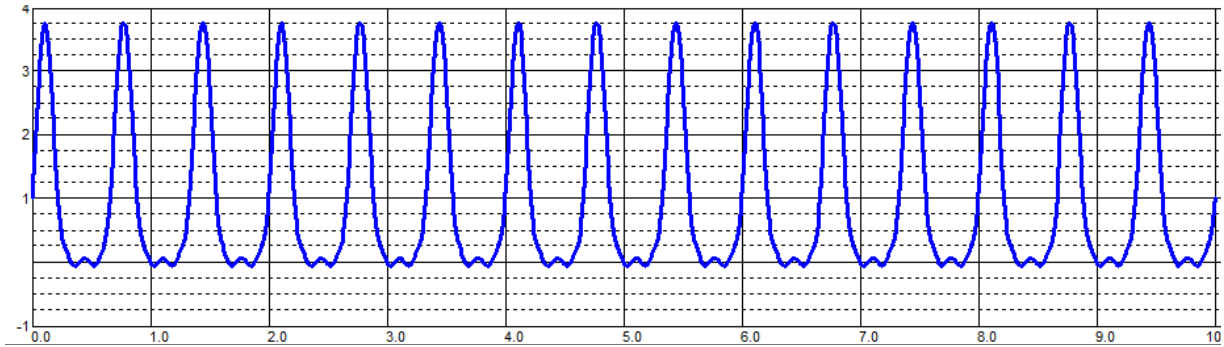
$$1+(1.62*\sin(17.5929*t+3.1416/6))+0.852*\sin(35.1858*t-3.1416/6)+0.283*\sin(52.7787*t-3.1416/2)+0.0831*\sin(70.3716*t-5*3.1416/6)+0.0434*\sin(87.9645*t-3.1416/6)+0.0245*\sin(105.5574*t-3.1416/2))$$



**Ilustración 54:** Función 2.8 Hz para representar la vibración creada por el salto de un grupo.

1.5 Hz.

$$1+(1.62*\sin(9.4247*t+3.1416/6)+0.852*\sin(18.8495*t-3.1416/6)+0.283*\sin(28.2743*t-3.1416/2)+0.0831*\sin(37.6991*t-5*3.1416/6)+0.0434*\sin(47.1238*t-3.1416/6)+0.0245*\sin(56.5486*t-3.1416/2)).$$



*Ilustración 55:* Función 1.5 Hz para representar la vibración creada po el salto de un grupo.

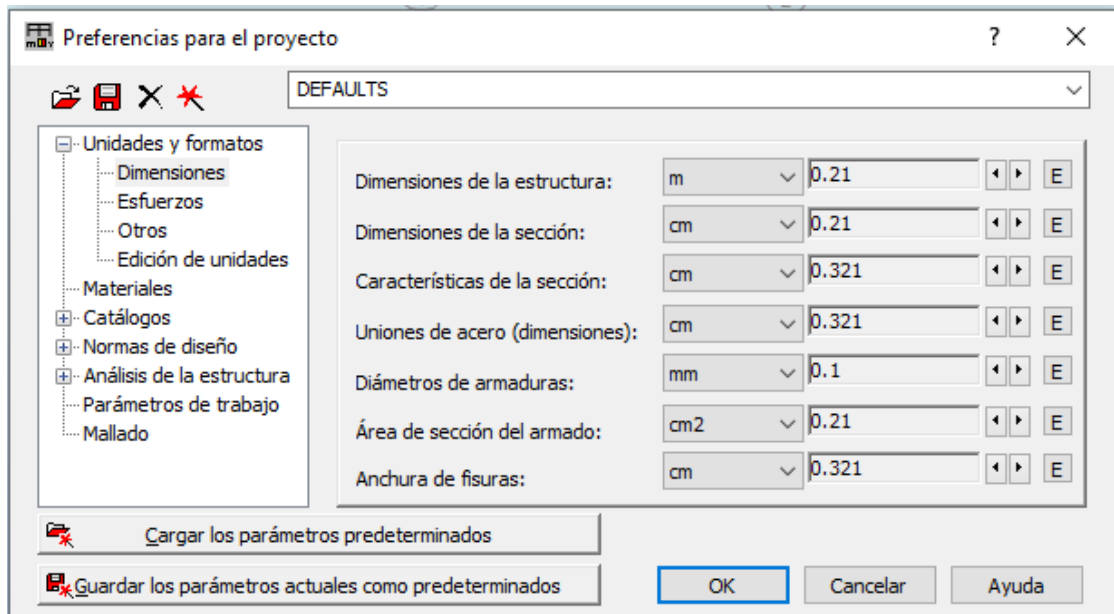
## 4.2 Modelación de la estructura.

### 4.2.1 Normas y unidades

Para el modelado de los pórticos porta-gradas y de entrada se va a utilizar el Software Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2020, en el cual detallaremos todos los elementos que componen al pórtico como vigas, columnas, losas horizontales y losas inclinadas. A continuación, se indicará el proceso de modelación en el software.

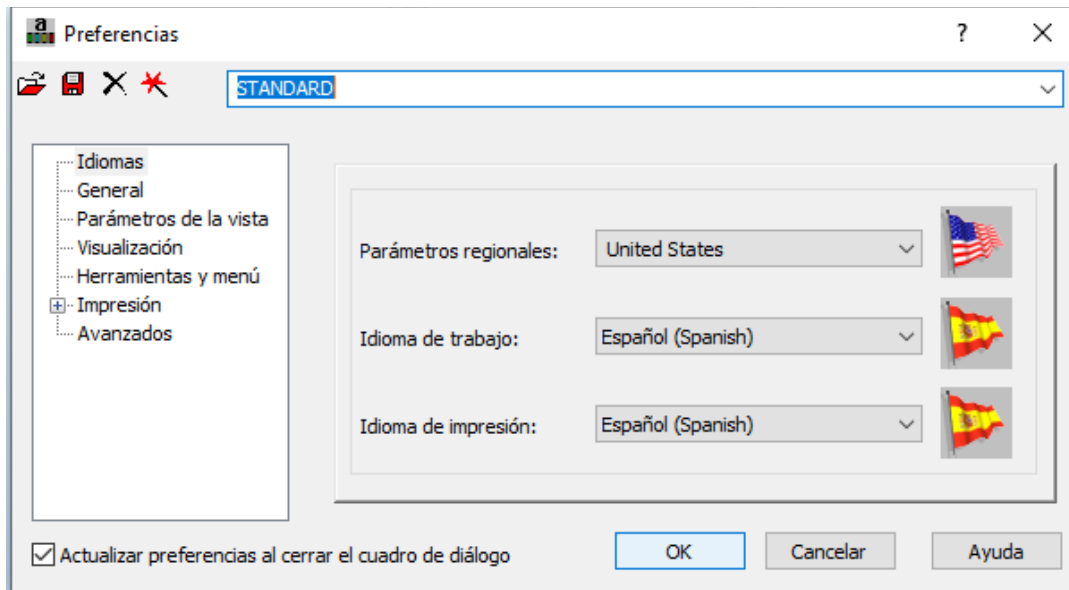
Para comenzar el modelado el primer paso es la definición de las unidades en las que se quiere trabajar y las normas de diseño que se necesita utilizar.

Para la definición de las unidades a trabajar se debe ir a la opción de preferencias para el proyecto como se muestra en la imagen.

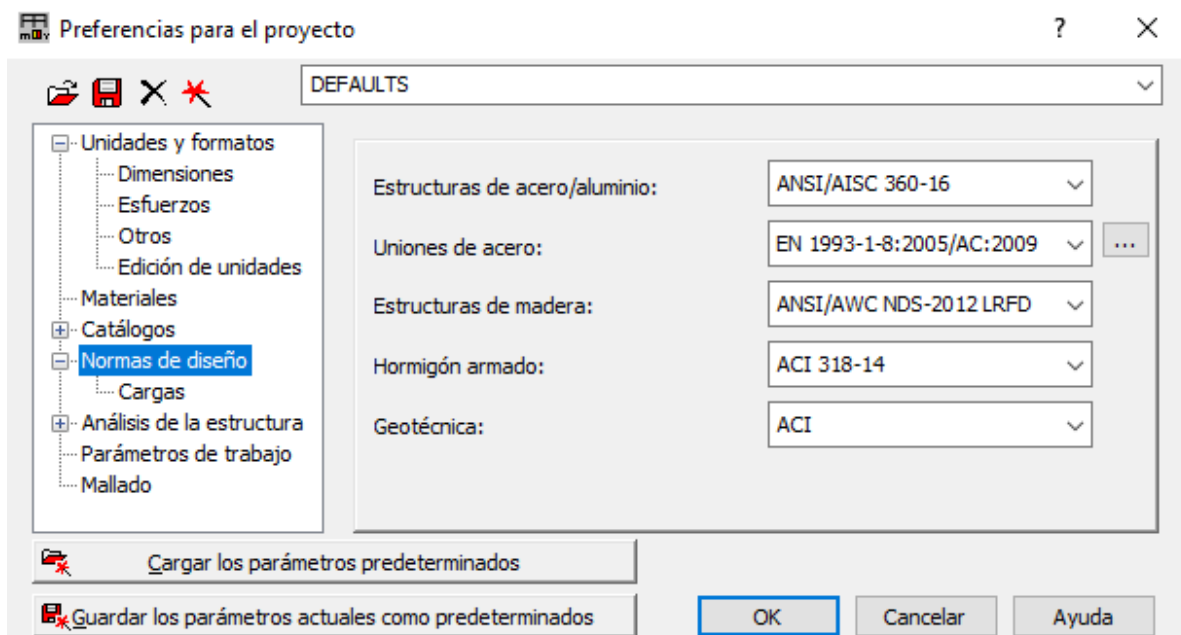


*Ilustración 56:* Preferencias para el Proyecto.

Para nuestro caso las unidades que vamos a utilizar son en el sistema métrico, una vez definido esto podemos ir configurando las normas y catálogos a utilizar como se indica en la ilustración de manera manual o se podría configurar de manera automática dependiendo la normativa de que país se quiere utilizar.



**Ilustración 57:** Preferencias Regionales.



**Ilustración 58:** Normas y catálogos utilizados.

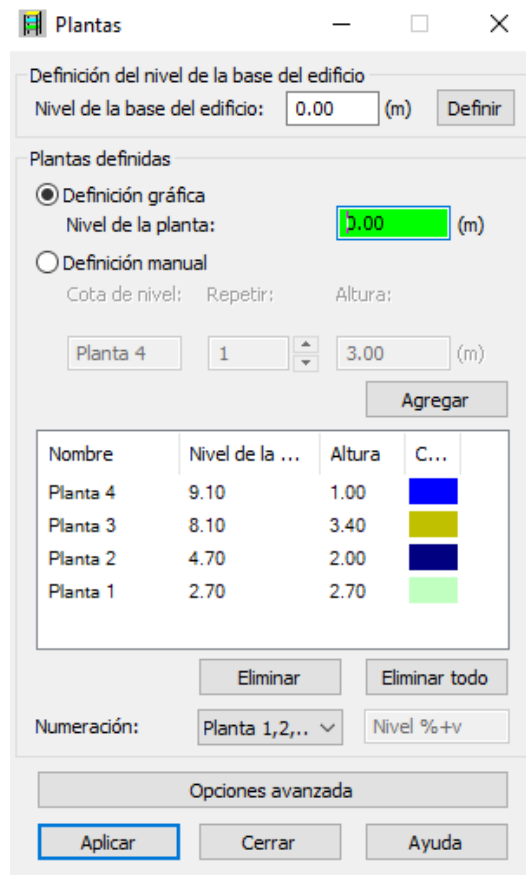
Para poder resumir el proceso de definición de las normas y catálogos hemos configurado al Software para que automáticamente utilice todas las normativas de Estados Unidos, ya que la norma ecuatoriana se basa o se fundamenta de la norma establecida en Estados Unidos.

Sabiendo esto como se muestra en la imagen se ha definido como parámetros regionales los de Estados Unidos, y los parámetros de idioma e impresión están definidos en español.

### 4.3 Ejes y plantas en el espacio.

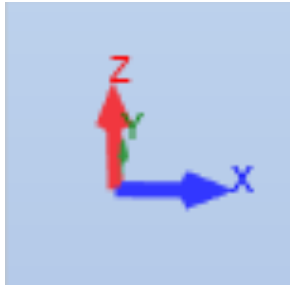
Una vez que ya se hayan configurado las preferencias del proyecto el siguiente paso es la definición de los ejes donde se van a ubicar vigas y columnas y la definición del número las plantas o pisos que posee la estructura.

Para el pórtico porta-gradas se establecieron las siguientes dimensiones en el sistema de plantas.



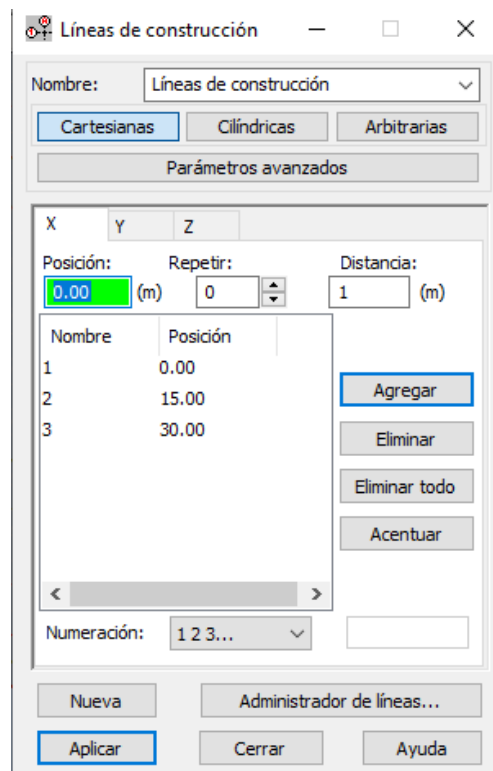
*Ilustración 59:* Definición de las plantas del pórtico.

Antes de definir los ejes para el modelo, debemos poner atención al sistema de ejes globales que posee el software el cual es el siguiente.

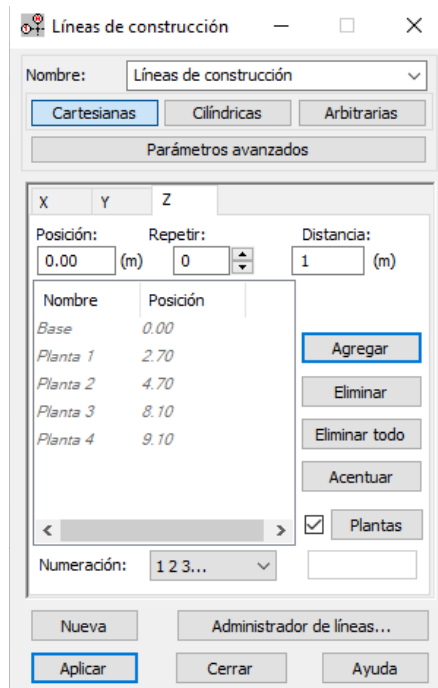


**Ilustración 60:** Sistema de ejes globales del software.

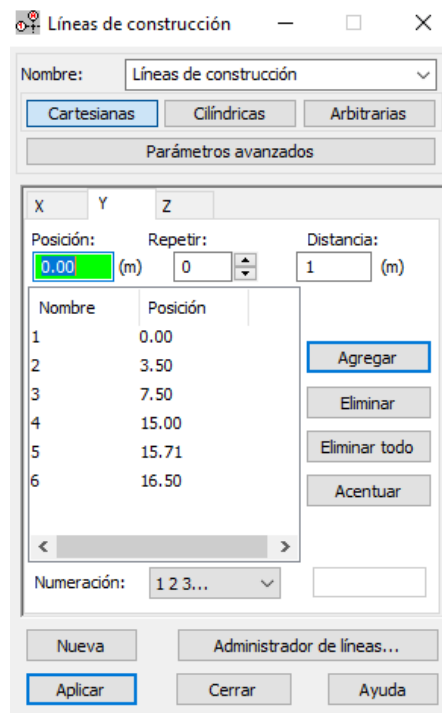
Con el sistema de ejes analizado y entendido podemos definir los ejes o líneas de construcción para nuestro modelo, en nuestro caso las distancias entre ejes van a ser la siguiente.



**Ilustración 61:** Ejes o líneas de construcción para X.



**Ilustración 62:** Ejes o líneas de construcción para Z.



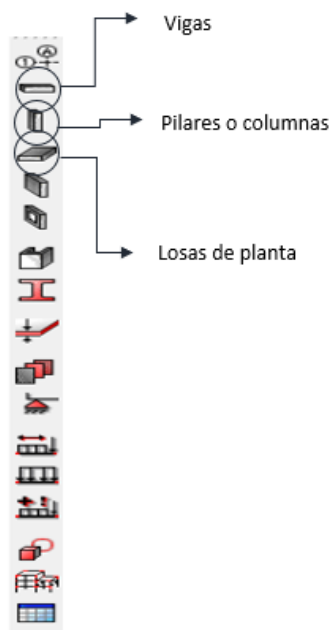
**Ilustración 63:** Ejes o líneas de construcción para Y.

Se puede notar que en el caso de las líneas de construcción del eje  $z$  posee las mismas dimensiones que en la definición del sistema de plantas, esto se debe a que, en el sistema de ejes, el eje  $z$  corresponde a las alturas de la estructura.

#### **4.3.1 Definición de columnas, vigas, losas y apoyos.**

La interfaz del Software es muy amigable en el momento de definir las propiedades geométricas y materiales de los elementos como vigas, columnas y losas.

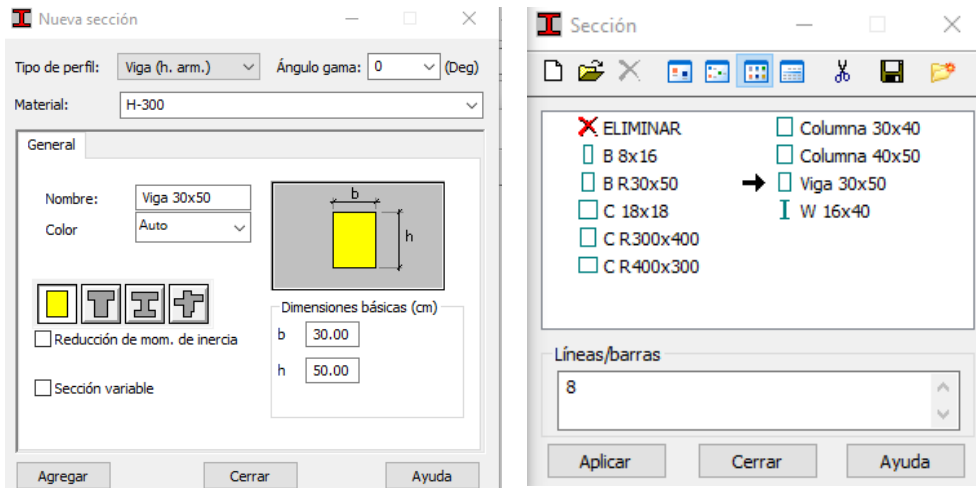
Para la definición de estas se puede utilizar la barra de herramientas del lado derecho.



*Ilustración 64:* Barra de herramientas.

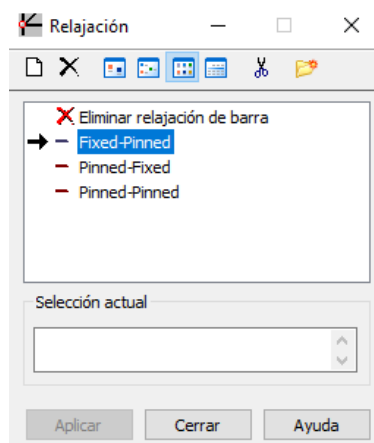
Para nuestra estructura tenemos que definir vigas de 30x50cm, columnas de 40x50cm y tres losas con los espesores de 45, 35 y 20cm.

### 4.3.1.1 Vigas



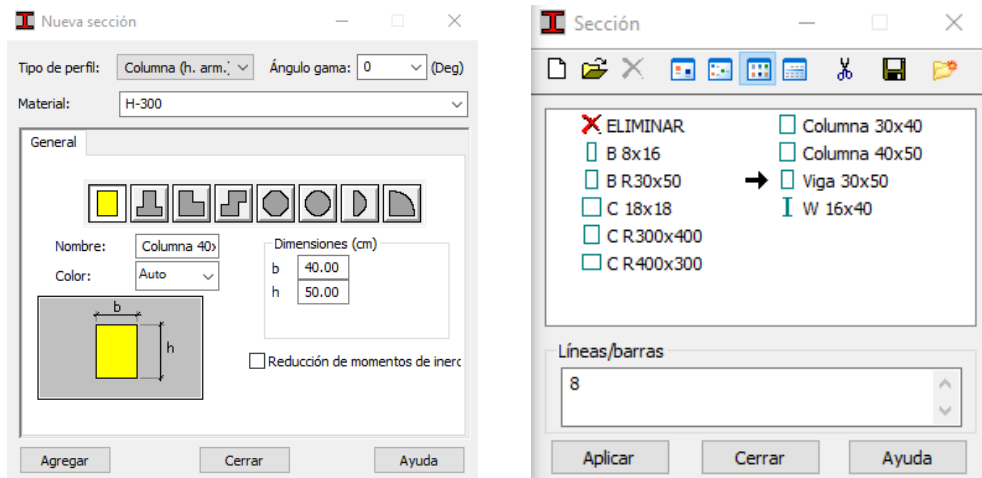
*Ilustración 65:* Definición de vigas.

Una vez definida y dibujada las vigas se debe aplicar relajación en la misma ya que son elementos de hormigón armado, para realizar esto debemos dirigirnos al menú de estructura y a la opción de relajación. En donde se desplegará el siguiente menú donde aplicaremos la relajación.



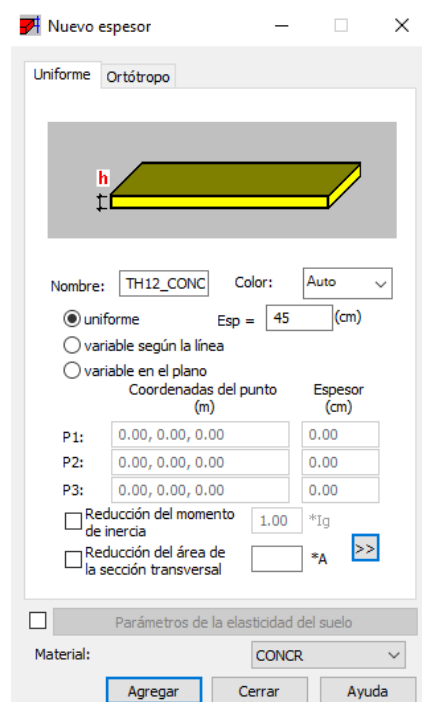
*Ilustración 66:* Menú de relajación.

### 4.3.1.2 Pilares o Columnas.



*Ilustración 67:* Definición de Columnas.

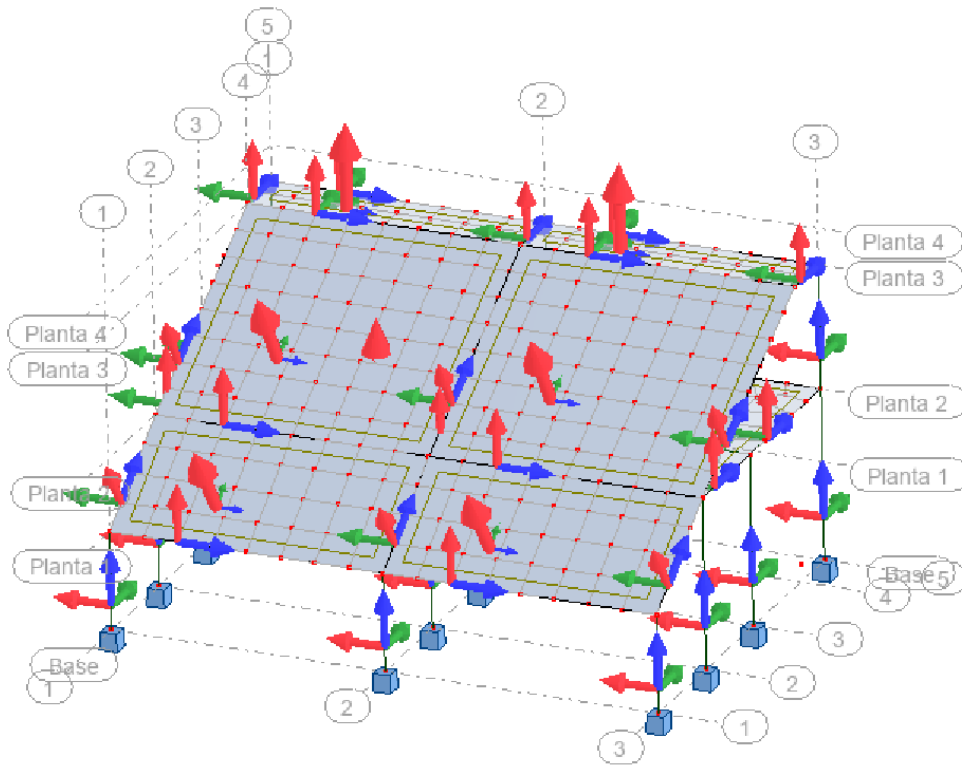
### 4.3.1.3 Losas



*Ilustración 68:* Definición de Losas.

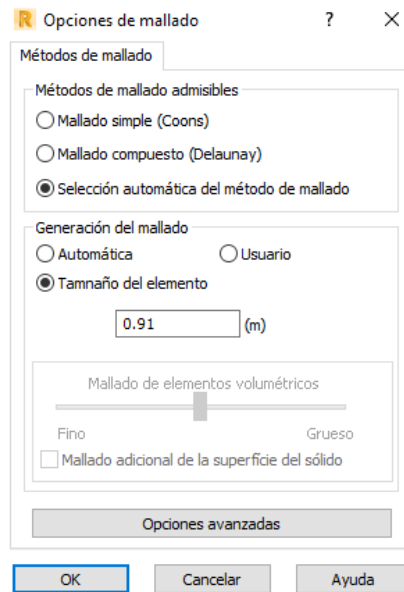
Es importante tomar en cuenta ya el momento de dibujar los elementos que si se desea dibujar elementos inclinados se tiene que desactivar la opción de elemento horizontal, y de igual manera se debe tomar en cuenta los niveles o plantas en donde comienza y termina el elemento.

Al momento de dibujar los sistemas de losa es importante revisar el sentido de los ejes de cada elemento como se muestra en la Ilustración 69.



**Ilustración 69:** Demostración de los ejes de cada elemento de la estructura.

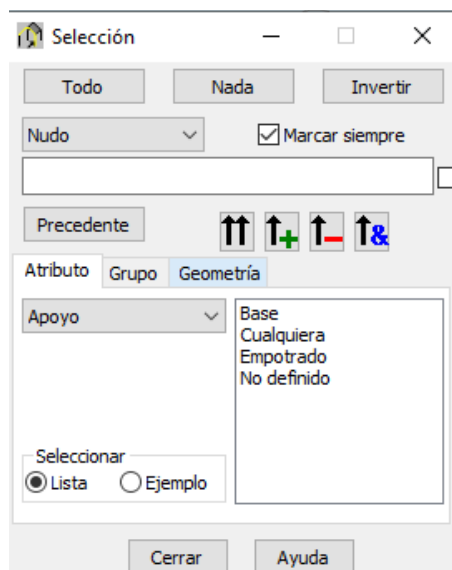
Una vez definida las losas es importante aplicar la malla la cual podremos encontrar en las opciones de generación de malla.



**Ilustración 70:** Menú de las opciones de mallado.

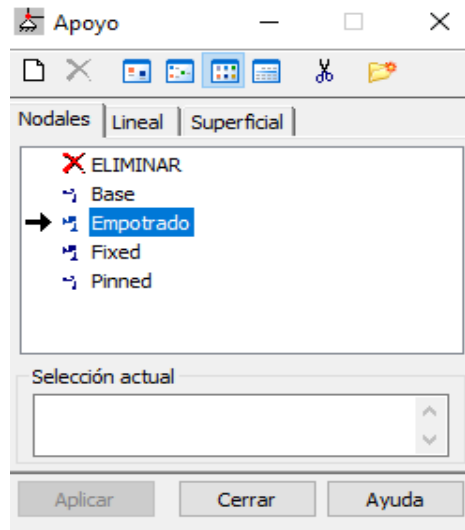
El último paso que se necesita hacer es la modelación de los apoyos los cuales van a representar las zapatas en la vida real, los apoyos que se utilizarán son apoyos empotrados los cuales restringirán el movimiento en los ejes y los giros.

Para poder establecer estos apoyos es necesario seleccionar los nudos donde van a ir estos, para seleccionarlos se debe ir al menú de edición y seleccionar.



**Ilustración 71:** Menú de selección.

Una vez seleccionados los nudos se debe ir a la opción de apoyos que se encuentra en la barra de herramientas a la derecha en donde se definió los elementos.



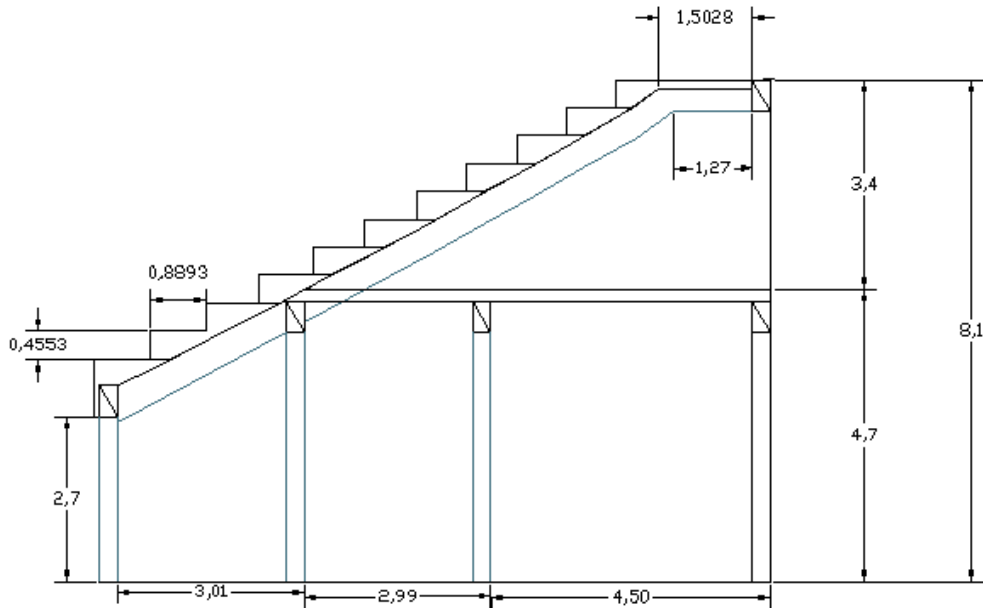
**Ilustración 72:** Menú de apoyos.

En este menú se puede escoger entre las opciones predeterminadas que nos brinda el Software o también se puede definir un tipo de apoyos específico dependiendo el caso de la estructura.

#### **4.3.2 Propuesta de estructura nueva.**

Al realizar un análisis previo a la estructura mostrada a lo largo del trabajo, se concluyó que la misma poseía deformaciones y frecuencias que sobrepasaban los límites establecidos para la respuesta de los sistemas de piso ante vibraciones. Es por esta razón que se realizó un predimensionamiento en el cual las dimensiones tanto de vigas y columnas fueron cambiadas.

Antes de realizar el proceso de dimensionamiento de los elementos de la estructura, se debe cambiar la configuración geométrica la misma, a continuación, se mostrada la configuración anterior y la propuesta nueva.



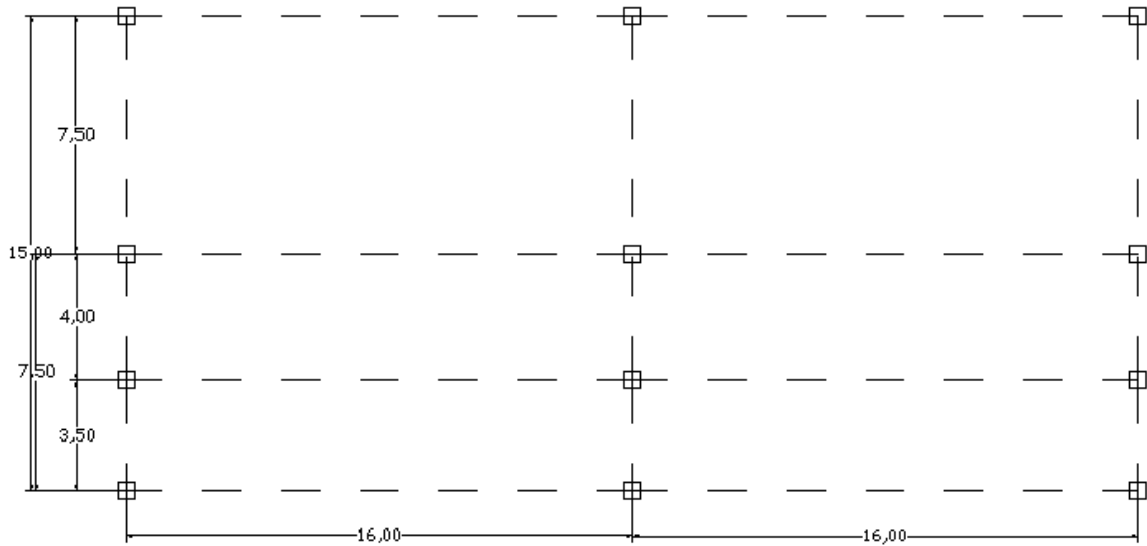
**Ilustración 73:** Configuración de estructura pasada.

Como se explicó en capítulos anteriores, la configuración original de la estructura es de 7.5m de ancho y 10.5m de profundidad para cada sección de graderío, la cual estaba conformada por vigas de 30x50cm, columnas de 30x40cm y losas de 35 y 45cm de espesor.

Longitudinalmente posee cuatro columnas en la planta baja y una columna en el primer piso, y transversalmente posee dos columnas por cada columna longitudinal, todo este sistema conectado por las vigas de 30x50cm y las losas respectivamente en cada lugar.

En la propuesta de la nueva estructura del pórtico porta-gradas, se realizaron cambios tanto en la distribución de vigas, columnas y losas, como en sus dimensiones y la separación entre elementos.

Los primeros cambios que se realizaron fueron las distancias del pórtico-portagradas, las nuevas dimensiones son de 16m entre las columnas transversales y se conservaron los 15m de profundidad distribuidos entre columnas como se muestra en la imagen.

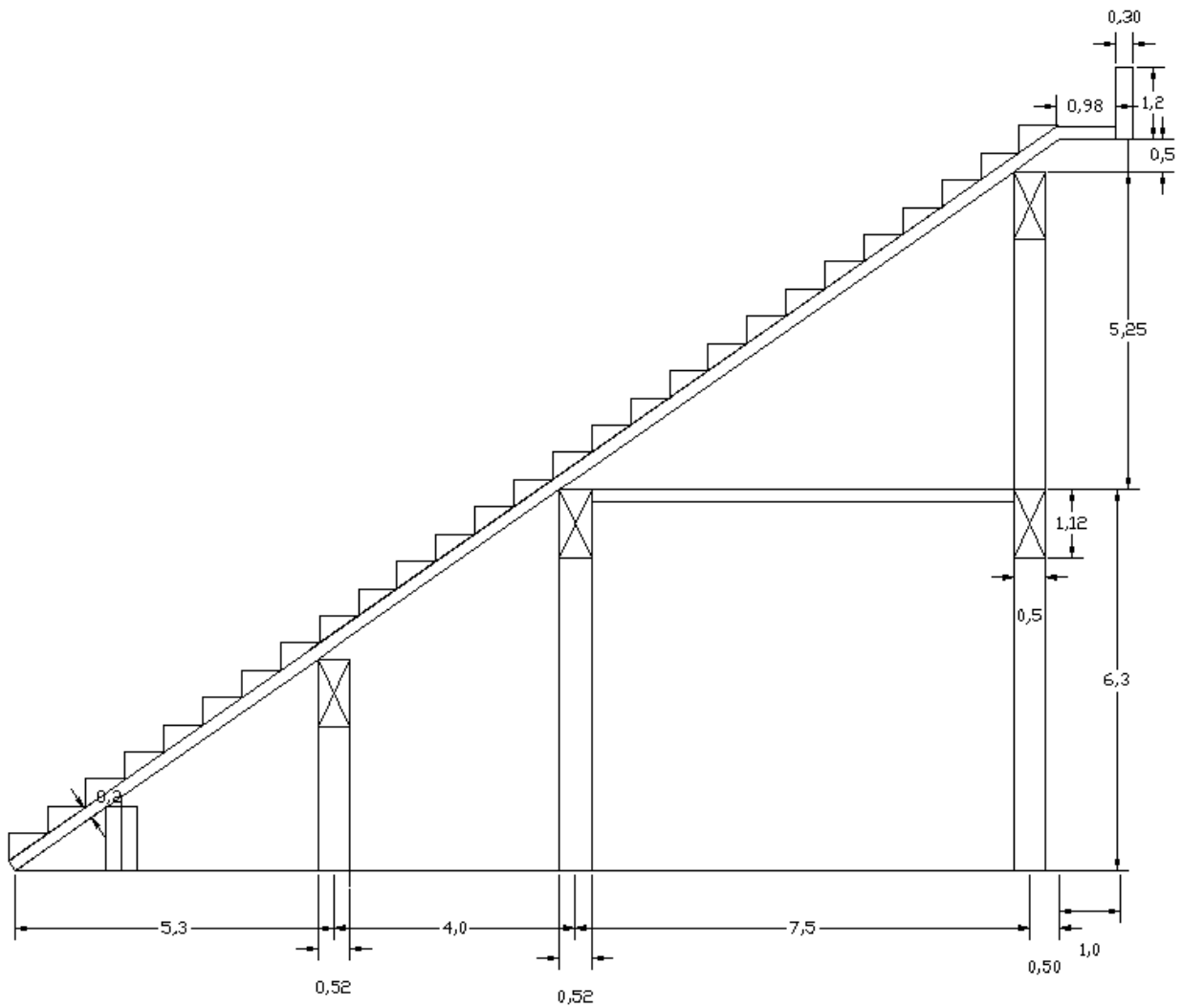


**Ilustración 74:** Vista en planta de los ejes de columnas (Elaboración propia).

Al cambiar la distribución de distancias entre columnas tanto longitudinal como transversalmente hace que la manera como se reparte la carga entre vigas y columnas cambie, cambiando las dimensiones de estas para que no fallen frente a las cargas. Las nuevas dimensiones son las siguientes:

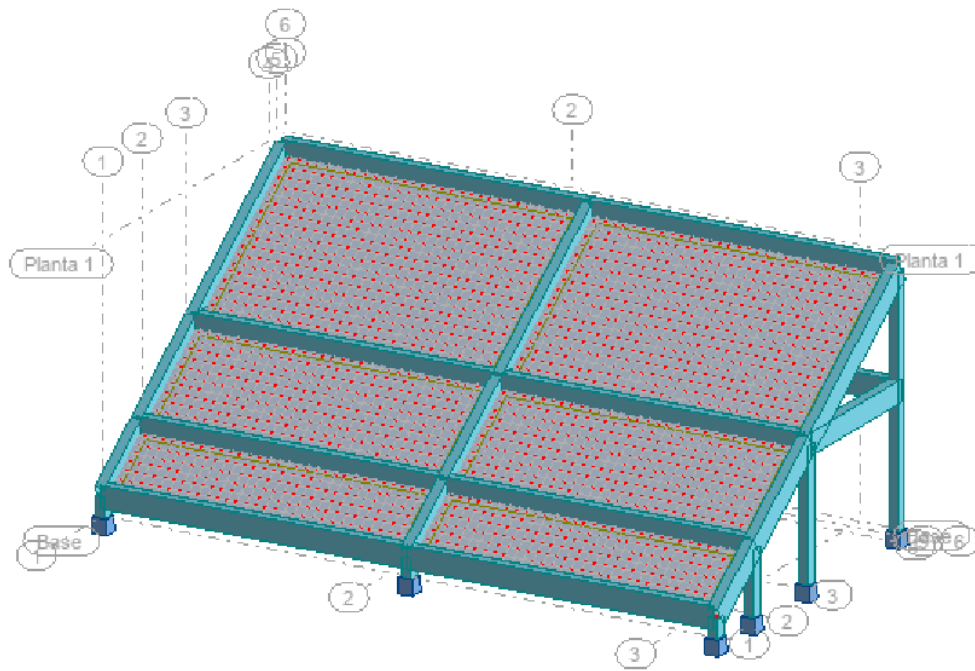
- Columnas de 52 x 52cm.
- Vigas de 50 x 112cm.

De modo que la estructura quedaría configurada de la siguiente manera.



**Ilustración 75:** Propuesta de nueva configuración de la estructura (*Elaboración propia*).

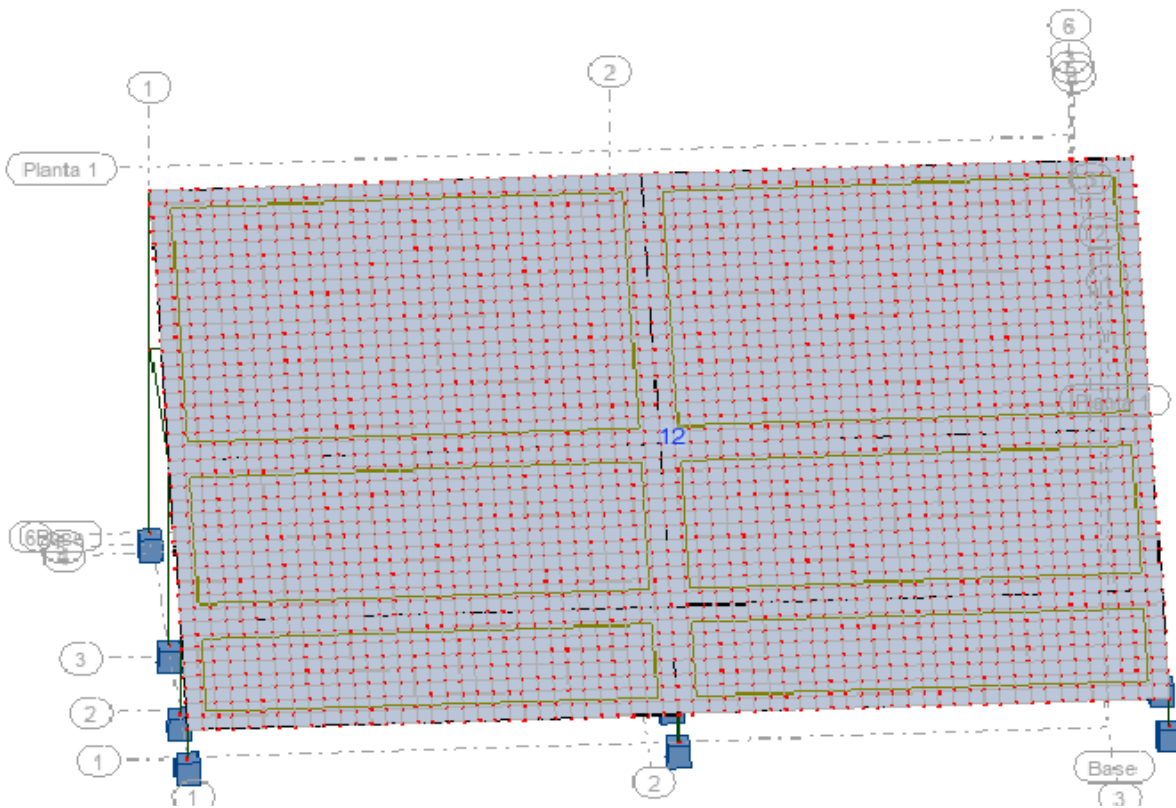
Cabe recalcar que el proceso de modelamiento para la propuesta va a ser el mismo que se utilizó para la estructura inicial. El resultado del modelamiento será la Ilustración 76



**Ilustración 76:** Modelamiento final de la estructura en Robot Structural Analysis.

## 5. Capítulo: Resultado de los análisis.

Una vez definidas las funciones que vamos a utilizar, las áreas que se van a analizar y el número de personas que se encontraran por cada metro cuadrado del graderío lo que brindará la carga la representación de las actividades sobre la estructura. Se presentará análisis y la comparación de todos estos casos para poder observar cual exigirá más a la estructura. Para poder realizar la comparación entre cada análisis se tomarán los datos del nudo 12 que se encuentra en todas las zonas designadas para el análisis. Seleccionando este número podremos observar los efectos de la aceleración y desplazamiento generados por los saltos, para comparar fuerzas cortantes y Momentos se tomarán los máximos generados en las vigas. Cabe recalcar que el nudo 12 no es el nudo más afectado pero es el nudo que comparte localización con todas las zonas designadas para el estudio, los nudos más afectados será el nudo 159 y el nudo 414 los cuales se localizan en la mitad de la sección de la losa más grande.



**Ilustración 77:** Localización del nudo a analizar.

Como se comentó anteriormente los casos que se van a analizar son los siguientes:

- Análisis Footfall, rango de frecuencias 1.5-2.5 Hz realizando 43 pasos.
- Máximo aforo de personas que soporta el graderío, dentro de los máximos y mínimos del rango (1.5-2.8Hz), realizando la actividad de salto con una duración de 15 segundos con intervalo de 0.4 segundos entre cada salto. (Los parámetros del salto se tomaron al analizar una situación en la vida real registrado en Frankfurt el 23 de mayo del 2016 en el estadio del equipo del Eintracht Frankfurt).

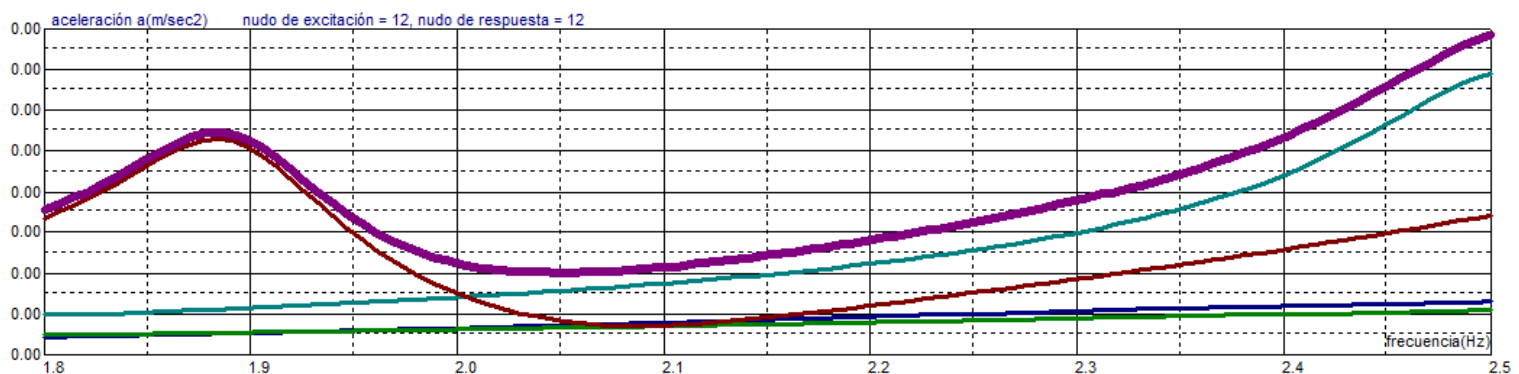
## 5.1 Análisis Footfall, rango de frecuencias 1.5-2.5 Hz realizando 43 pasos.

Dentro del análisis Footfall como se explicó antes tenemos dos parámetros a tomar en cuenta el momento de observar si la estructura cumple o no con normas de seguridad y servicio, de la misma manera que para el análisis tiempo-historia el análisis se realizará en el nudo 12, los parámetros que se pueden ser analizados son:

- La aceleración vs frecuencia
- El coeficiente de respuesta vs frecuencia.

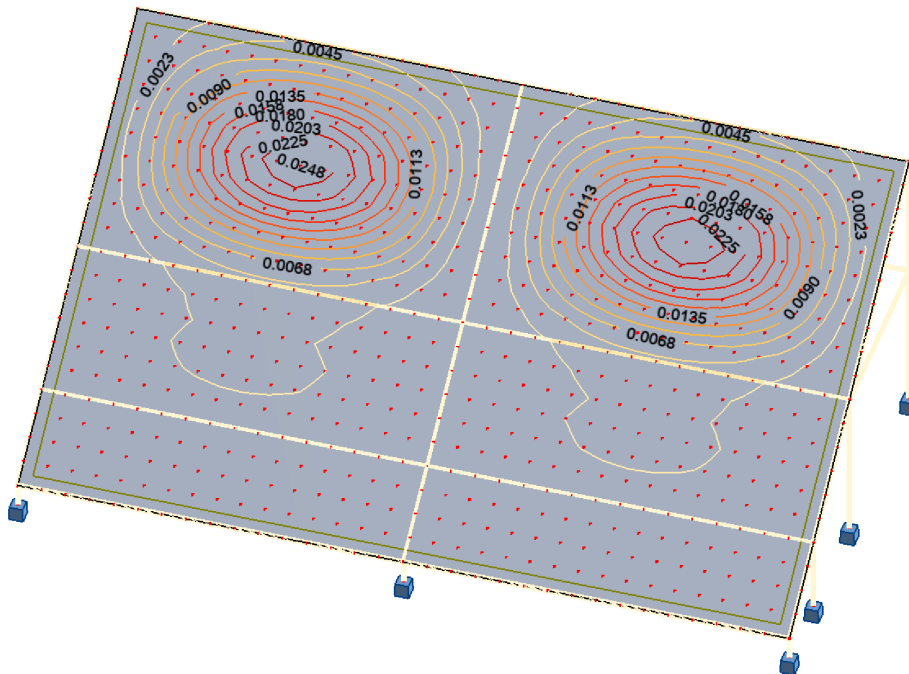
Por razones de comparación el análisis se realizará únicamente con la aceleración para poder observar de manera más directa las diferencias con el análisis tiempo historia (ya que el análisis tiempo-historia no posee el cálculo directo del coeficiente de respuesta). También es importante recalcar que el análisis Footfall al no ser un análisis tiempo - historia no posee componentes que se puedan analizar para los desplazamientos o las cargas producidas sobre los elementos, es decir no se puede observar la deformación o la carga que sufre la estructura en un punto específico de tiempo durante el trayecto.

### 5.1.1 Aceleración en el nudo 12



*Ilustración 78:* Frecuencia vs Aceleración Nudo 12 en Análisis Footfall.

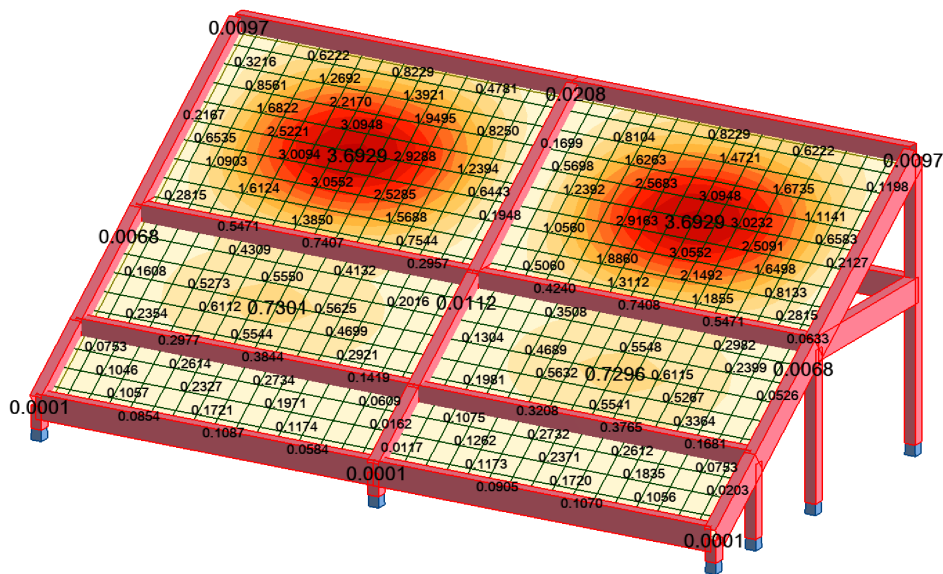
Como se puede observar tanto en la gráfica existen cinco valores que van cambiando a medida que sube la frecuencia de estimulación del individuo, el valor a remarcar para poder analizar es el total ya que en este como se explicó anteriormente se calcula mediante la raíz cuadrada de la suma de los valores de cada número armónico. Sabiendo esto se puede observar que el valor máximo de aceleración en el nudo 12 que posee la estructura durante la caminata del individuo es de  $0.0001 \frac{m}{s^2}$  cuando el mismo realiza la caminata que produce una vibración a una frecuencia de 2.5Hz, como se explicó en capítulos anteriores el valor de aceleración que se utiliza como parámetro de control es del 4-7% de la gravedad por lo tanto el rango estaría entre  $0.3924 \frac{m}{s^2} - 0.6867 \frac{m}{s^2}$  y el valor que provocaría durante la caminata no produciría ningún efecto perjudicial tanto a la estructura como a la comodidad de los espectadores. En la Ilustración 79 se mostrará un mapa detallado de la aceleración total máxima presente en la estructura.



*Ilustración 79:* Mapa de aceleración por análisis Footfall.

### 5.1.2 Coefficiente de Respuesta nudo 12.

Durante el análisis que se realizó de la actividad de una persona caminando en la estructura se deberá observar el coeficiente de respuesta el cual nos mostrara cuantas veces la vibración sobrepasa a la admisible en nuestro caso se producirá un factor de respuesta máximo de 3.69 el cual se considerara como aceptable durante la actividad. En la siguiente ilustración se mostrara un mapa donde se localizara el factor de respuesta más grande y en los demás nudos de igual manera.



*Ilustración 80:* Mapa de coeficiente de respuesta.

Se debe aclarar que en la zona donde se produce el mayor factor de respuesta también se produce la mayor aceleración, con esto se puede saber dónde la estructura deberá ser reforzada con un buen armado.

**5.2 Máximo aforo de personas que soporta el graderío, dentro de todos los valores del rango (1.5-2.8 Hz), realizando la actividad de salto con una duración de 30 segundos con intervalo de 0.4 s entre cada salto.**

Este tipo de análisis dinámico se lleva a cabo para los problemas de la estructura de los graderíos de los estadios mediante el Software Estructural Robot Structural Analysis. Para considerar todos los problemas se realizó el cálculo de frecuencia vertical, aceleración, desplazamiento, de igual manera se realizó el cálculo de esfuerzo cortante y momento flector, es importante calcular estos últimos parámetros para poder calcular el refuerzo que necesitaran los elementos de la estructura para no ceder ante las cargas producidas durante la actividad.

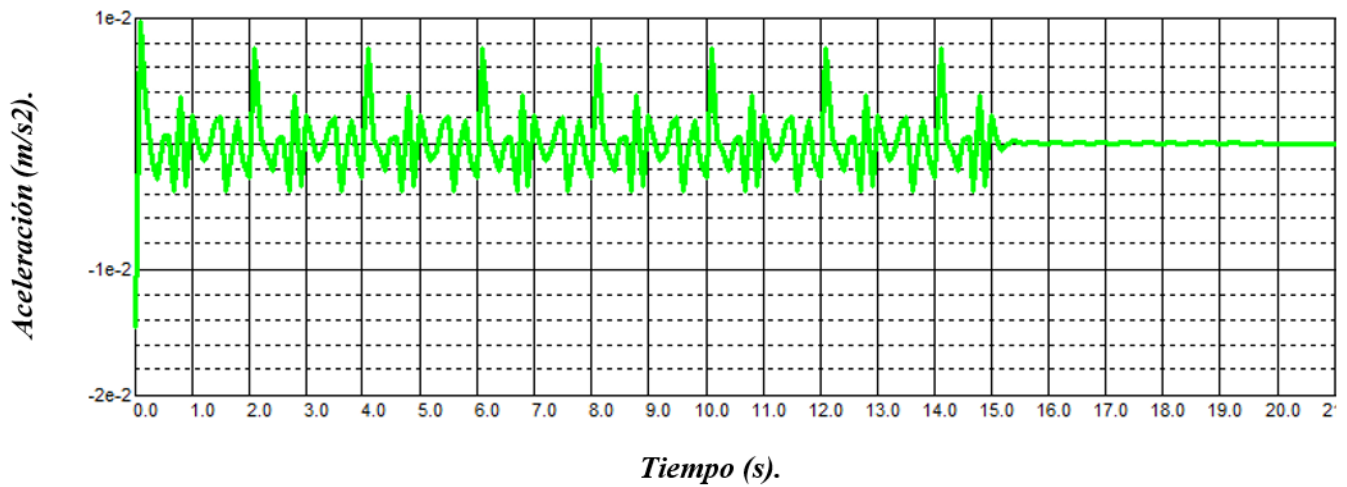
Para poder obtener una mayor efectividad en los cálculos y en el entendimiento de los efectos que producen las vibraciones creadas por grupos grandes de personas se realizó el análisis de tiempo-historia para todo el rango establecido de frecuencias para actividades de alto impacto para grupos numerosos. Como se expuso en el capítulo anterior para realizar el análisis se utilizó una función para determinar la carga creada por el grupo a un tiempo específico, el análisis de resultados se hará para las frecuencias 1.5Hz y 2.8Hz. El análisis al ser tiempo-historia nos permite revisar los componentes que se producen dentro de los 30 segundos de análisis, gracias a esto podremos observar la aceleración, deformaciones, momentos flectores y carga cortante en los elementos estructurales como vigas, y por ende poder establecer si las dimensiones establecidas soporta las cargas y momentos creados.

Primero se mostrará las aceleraciones generadas por las frecuencias de estimulación 1.5Hz y 2.8Hz, en el siguiente gráfico se mostrará el desarrollo de las aceleraciones a lo largo de los 30 segundos de análisis.

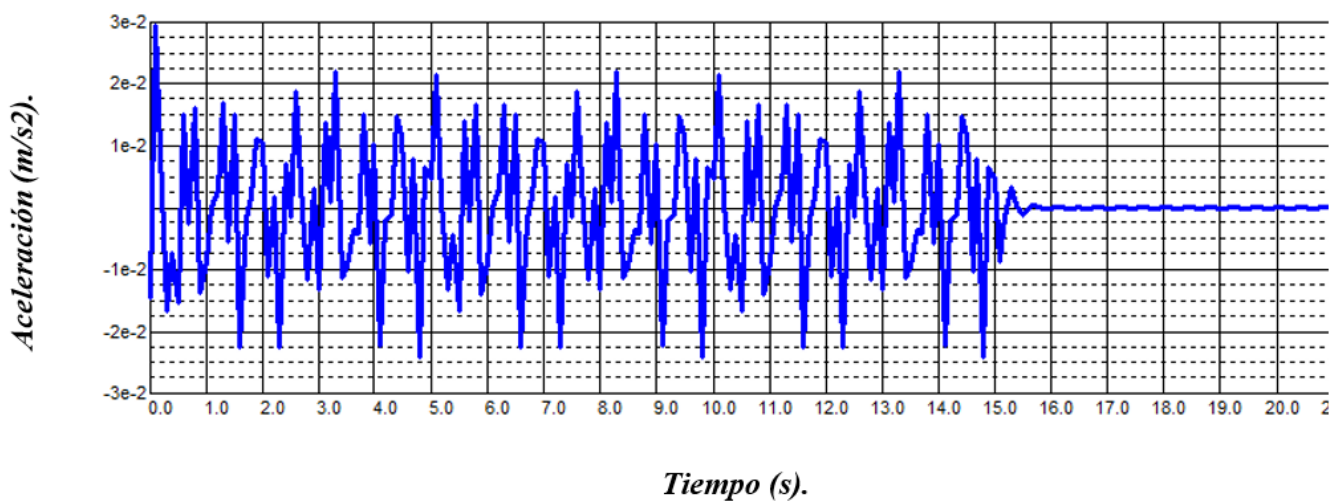
En la gráfica mostrada se puede observar varias aceleraciones a lo largo de los 30 segundos del evento y en lapsos de 0.4 segundos (es decir desde el momento que el pie deja el suelo hasta

que regresa a él), se ha logrado generar esta ilustración para que se pueda observar cómo es el desarrollo de las aceleraciones dependiendo la zona donde sea aplicada, mediante esta ilustración podemos compararla y observar sus diferentes cambios dependiendo el caso, pero para poder observar los máximos y mínimos de aceleración generada para cada frecuencia se mostrará la siguiente tabla de valores.

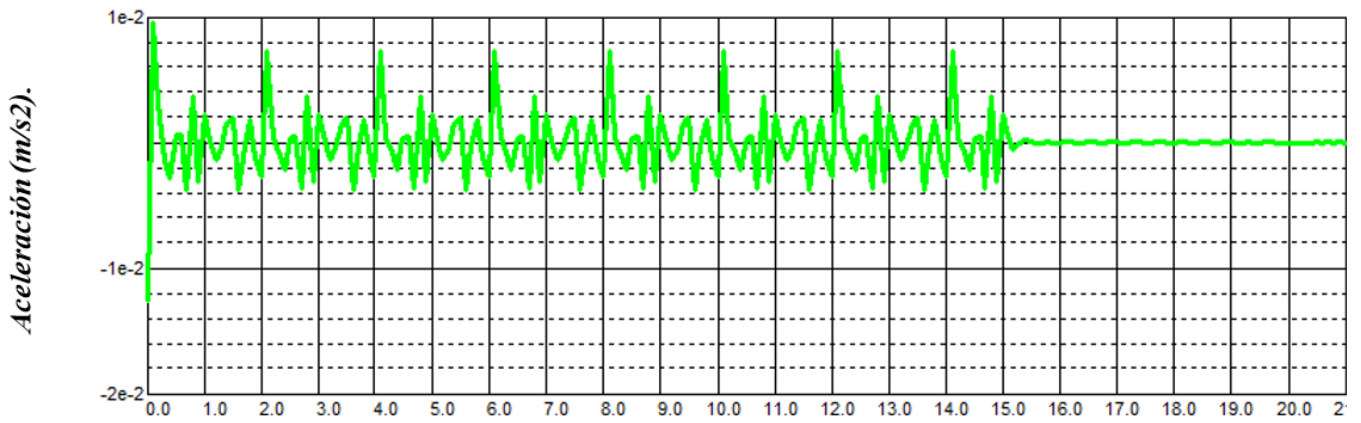
*Zona 1 Frecuencia 1.5 Hz.*



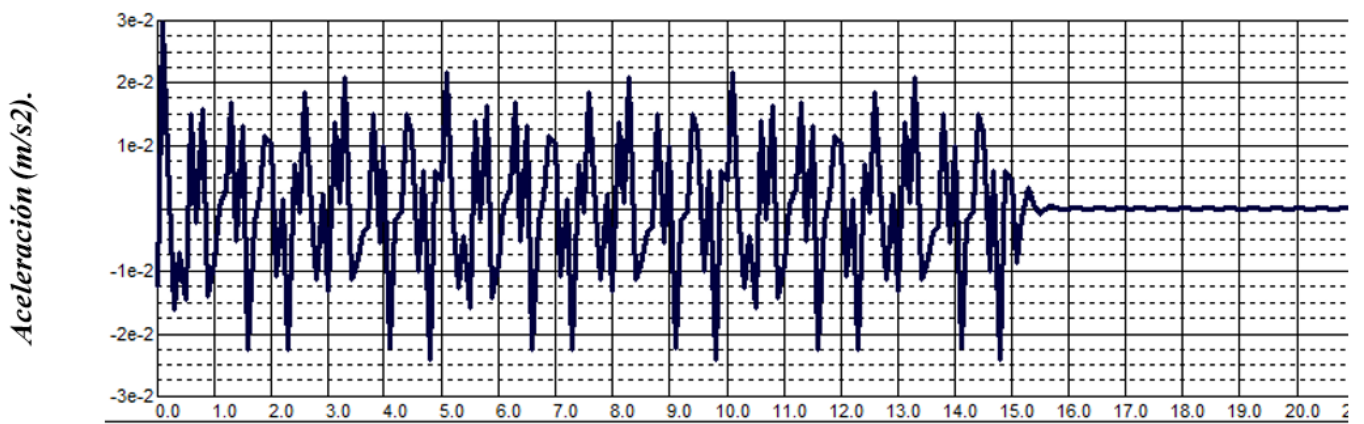
*Zona 1 Frecuencia 2.8 Hz.*



*Zona 2 Frecuencia 1.5 Hz.*

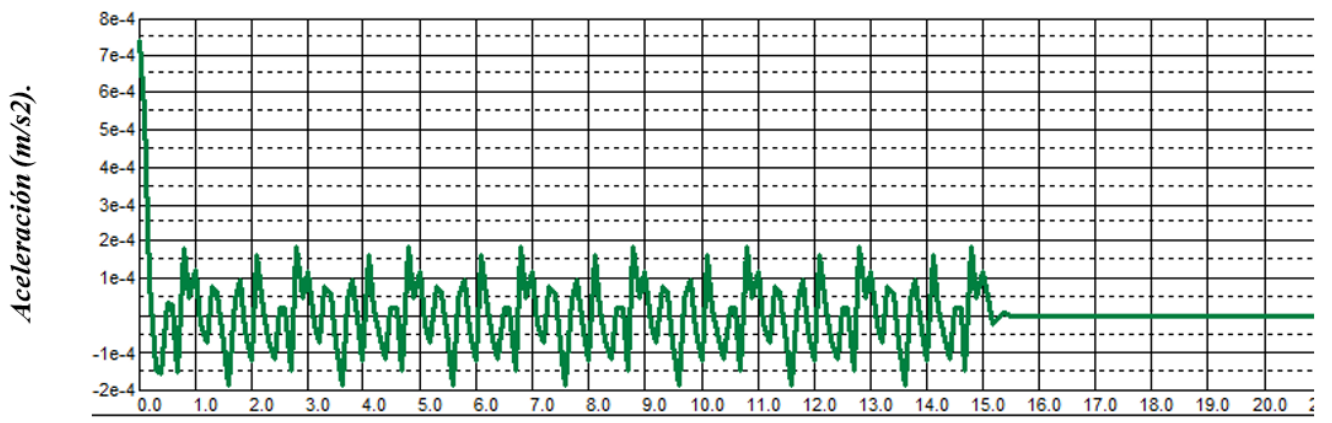


*Zona 2 Frecuencia 2.8 Hz.*



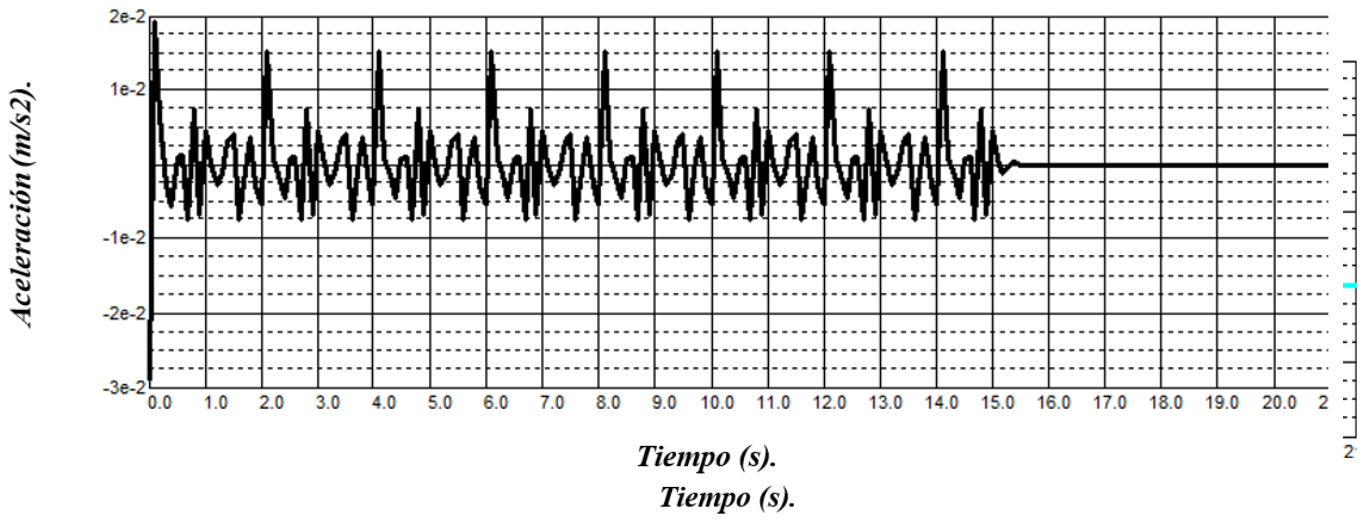
*Tiempo (s).*

*Zona 3 Frecuencia 1.5 Hz.*

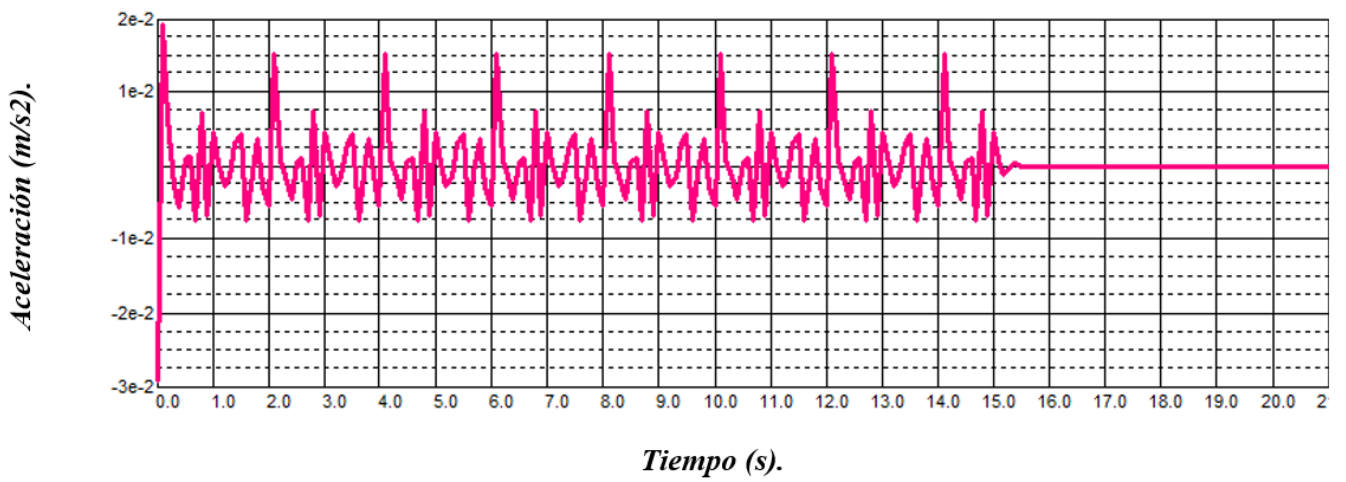


*Tiempo (s).*

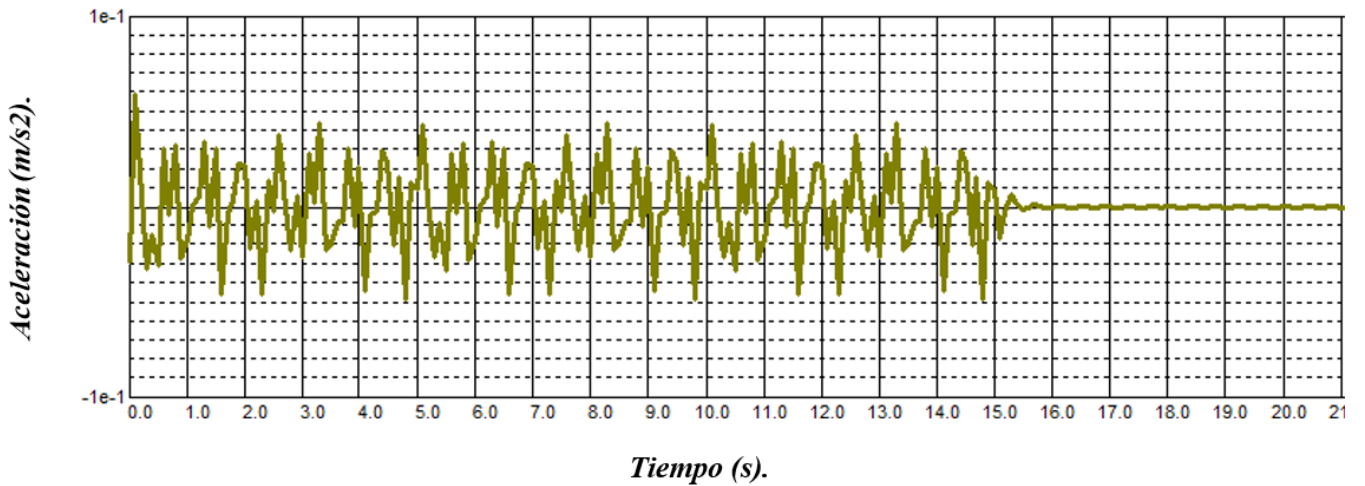
*Zona 5 Frecuencia 1.5 Hz.*



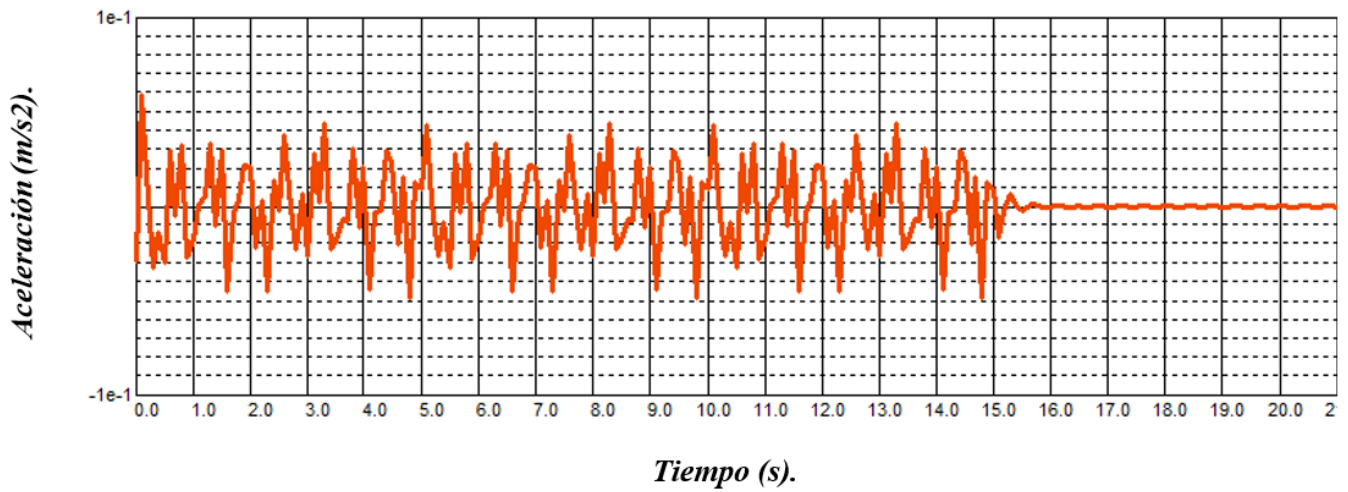
*Zona 4 Frecuencia 1.5 Hz.*



*Zona 4 Frecuencia 2.8 Hz.*



**Zona 5 Frecuencia 2.8 Hz.**



**Ilustración 81:** Gráficas aceleración vs tiempo de los valores extremos del rango de frecuencias en el nudo 12 (1.5 y 2.8 Hz).

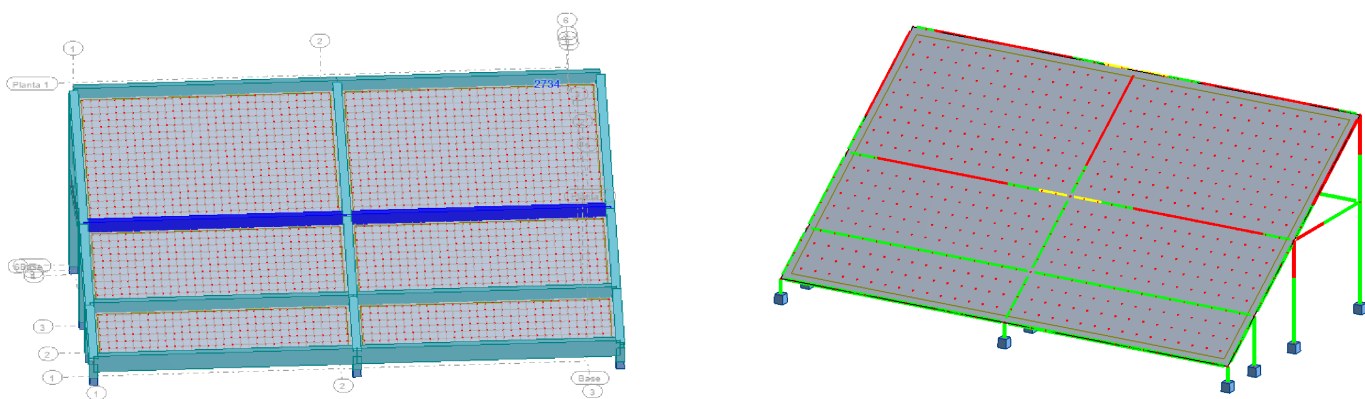
	<i>Unidad</i>	<i>Frecuencia 1.5 Hz</i>	<i>Frecuencia 2.8 Hz</i>
<b>Zona 1</b>	<i>m/sec2</i>	0.0096	0.0293
<b>Zona 2</b>	<i>m/sec2</i>	0.0096	0.0297
<b>Zona 3</b>	<i>m/sec2</i>	0.0007	0.0021
<b>Zona 4</b>	<i>m/sec2</i>	0.0192	0.0585
<b>Zona 5</b>	<i>m/sec2</i>	0.0192	0.0585

**Tabla 7:** Aceleraciones máxima para cada frecuencia de estimulación (*Elaboración propia*).

A simple vista se puede observar que las aceleraciones generadas por un grupo grande de personas realizando una actividad de alto impacto son mucho más grandes que las

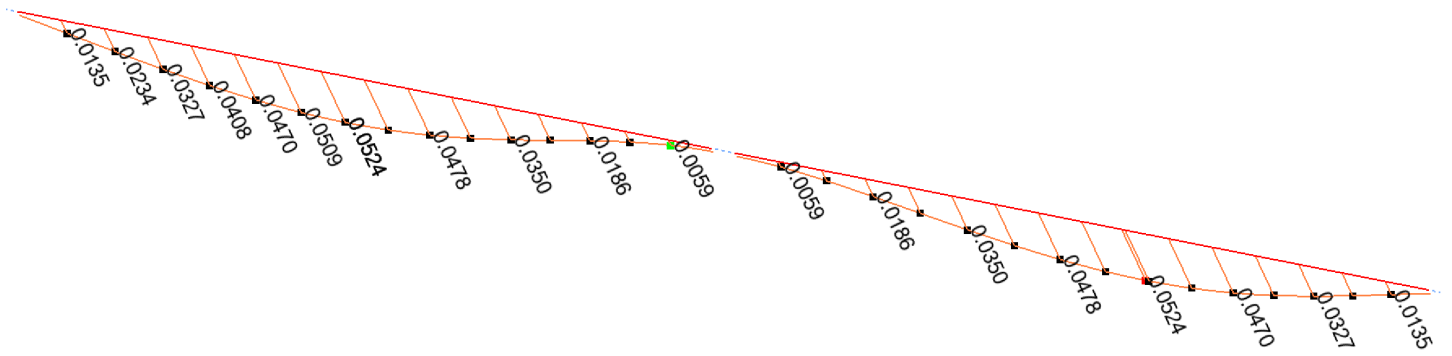
aceleraciones generadas por una sola persona realizando una caminata de hasta 2.5Hz, al realizar la comparación de estas aceleraciones podemos ver que en la caminata se produjo una aceleración máxima de  $0.000084 \frac{m}{s^2}$  para el nudo estudiado, mientras que la aceleración máxima producida por la multitud fue de  $0.0585 \frac{m}{s^2}$  para el nudo estudiado, esto quiere decir que la aceleración generada por la actividad realizada por la multitud supera considerablemente a la producida por una persona caminando y por ende no cumpliría con el rango de aceleración de  $0.3924 \frac{m}{s^2} - 0.6867 \frac{m}{s^2}$  y causaría un grado muy alto de incomodidad sobre los espectadores, pero ya que se ha modelado pensando que todos los espectadores están realizando la acción estos no sentirían ningún efecto ya que forman parte de la producción la vibración, de igual manera el pico de aceleración presente posee una duración muy corta que llega a ser de fracciones de 2 o 3 segundos máximo, entonces se podría ignorar los efectos producidos por esta vibración en cuestión de perceptibilidad del usuario.

Debido a que el análisis Footfall solo nos permite revisar resultados específicos de aceleraciones en variación con el tiempo pero no nos permite analizar los desplazamientos que se realizan a lo largo del todo el tiempo se procederá a mostrar únicamente los desplazamientos máximos en la estructura con los espectadores estáticos, el análisis Footfall, el análisis temporal y posteriormente la combinación de carga. Para poder observar esto se han seleccionado los elementos o vigas número 26 y 27.



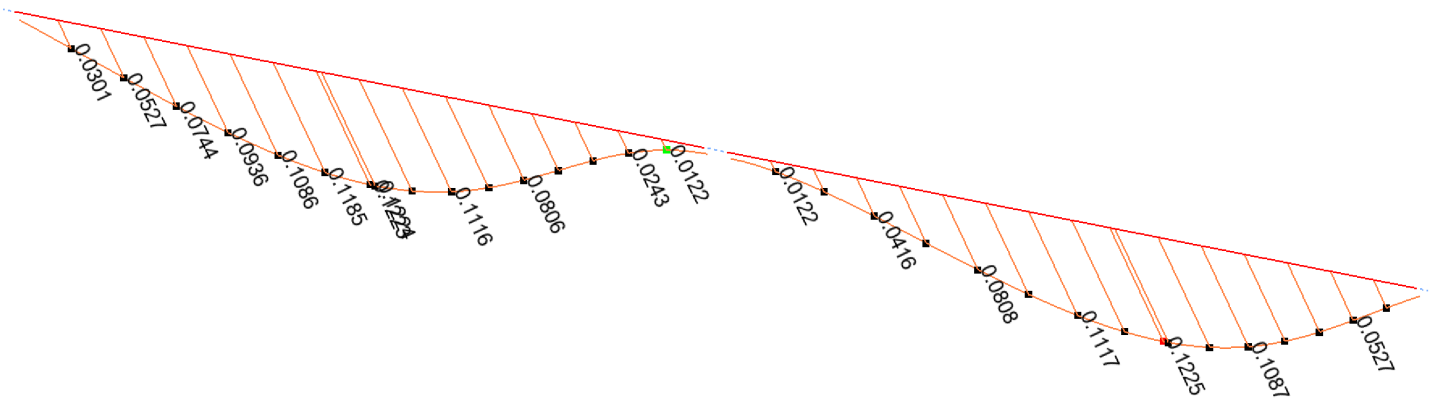
**Ilustración 82:** Localización elementos 26 y 27.

- Deflexión máximos cuando la estructura está cargada en la zona 5.



**Ilustración 83:** Deflexión en los elementos 26 y 27 zona 5 cargada.

- Deflexión máxima zona 5 a 2.8 Hz.



**Ilustración 84:** Deflexión en elementos 26 y 27 por vibraciones en la zona 5 a 2.8 Hz.

Una vez mostrada la deflexión en cada caso, se deberá revisar si entran dentro de los límites establecidos por norma.

Miembro	Condición		Deflexión considerada	Límite de deflexión
Cubiertas planas	Que no soporten ni estén ligados a elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes		Deflexión inmediata debida a $L_r$ , $S$ y $R$	$\ell/180^{[1]}$
Entrepisos			Deflexión inmediata debida a $L$	$\ell/360$
Cubiertas o entrepisos	Soporten o están ligados a elementos no estructurales	Susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.	La parte de la deflexión total que ocurre después de la unión de los elementos no estructurales (la suma de la deflexión a largo plazo debida a todas las cargas permanentes, y la deflexión inmediata debida a cualquier carga viva adicional) <sup>[2]</sup>	$\ell/480^{[3]}$
		No susceptibles de sufrir daños debido a deflexiones grandes.		$\ell/240^{[4]}$

**Ilustración 85:** Deflexión máxima admisible calculada. (ACI 318-14, 2014).

Observando en la ACI 318-14 podríamos determinar que al poseer vigas y elementos estructurales de al menos 16 m de cerca del nudo donde se produce la mayor deflexión tendríamos un límite de  $\frac{l}{360} = \frac{16\text{ m}}{360} = 4.44\text{ cm}$  y nuestros desplazamientos estarían dentro del límite de deflexión aceptado por la ACI.

Es importante recalcar que, aunque se haya realizado el análisis tanto de las aceleraciones y las deflexiones generadas sobre la estructura, es de gran importancia realizar el análisis de las cargas máximas generadas sobre la estructura, para esto el SOFTWARE ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS no nos brinda una tabla o cuadro con los valores resumidos sobre cada elemento, así que se procedió de la siguiente manera:

El análisis tiempo - historia al ser un análisis formado por componentes de tiempo establecidas antes de realizar el cálculo, nos permite observar la carga que actúa sobre un elemento o la deformación que este puede tener en cierto punto del tiempo mientras la actividad está siendo realizada, así que se procedió a observar todas estas componentes y escoger la máxima de cada caso de análisis es decir para cada frecuencia (1.5Hz y 2.8Hz).

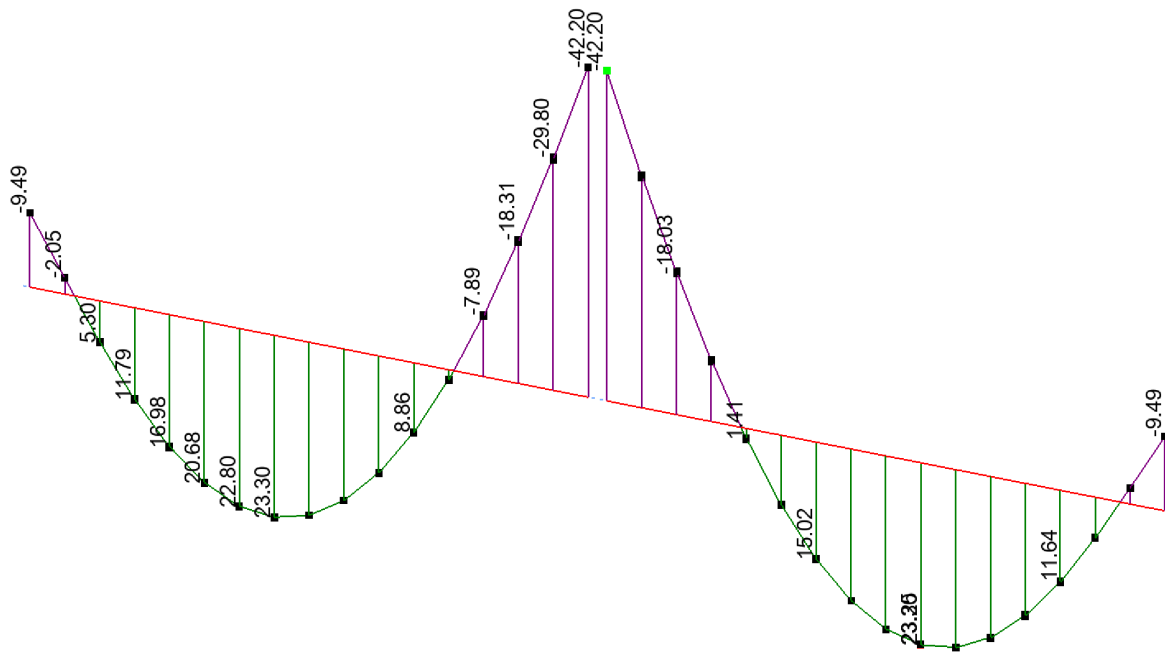
A continuación, se mostrará un gráfico y una tabla resumiendo estos valores tanto para carga cortante como para momento flector para las dos vigas más afectadas (elementos 26 y 27).

	Unidad	Frecuencia 1.5 Hz Elemento 26	Frecuencia 2.8 Hz Elemento 26	Frecuencia 1.5 Hz Elemento 27	Frecuencia 2.8 Hz Elemento 27
Zona 1	Tf*m	74.59	80.19	0.70	7.16
Zona 2	Tf*m	0.74	7.82	75.06	79.45
Zona 3	Tf*m	1.92	1.97	2.01	2.08
Zona 4	Tf*m	54.34	56.67	54.34	56.66
Zona 5	Tf*m	54.19	56.62	54.15	56.54

**Tabla 8:** Valores de Momento Máximo respecto a cada frecuencia de estimluacion (Elaboración propia).

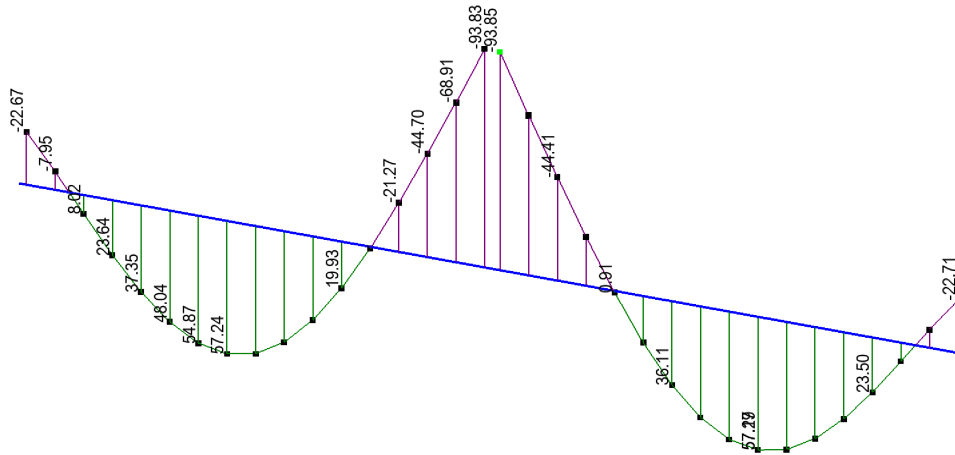
De igual manera se mostrará la comparación en los casos de la zona 5 cargada y la zona 5 cargada a 2.8 Hz de momento flector máximo.

- Momento Flector máximo en zona 5 cargada.



**Ilustración 86:** Momento Flector máximo para elementos 26 y 27 con la zona 5 cargada.

- Momento Flector máximo con vibraciones causadas en zona 5 cargada a 2.8 Hz.



**Ilustración 87:** Momento Flector máximo para elementos 26 y 27 por vibraciones en zona 5 cargada a 2.8 Hz.

Previamente se realizó un análisis de todas las zonas en las que se iban a aplicar las vibraciones, es por esto por lo que sea escogido la zona 5 en la se realizaran las diferentes comparaciones. A simple vista se puede observar que las vibraciones generan una amplificación dinámicas significativa sobre los momentos flectores en este caso poseemos un momento flector máximo de 23.36 Ton\*m cuando la estructura está con la carga de la multitud, pero estática, el momento flector generado una vez que la actividad con vibración de 2.8 Hz haya empezado es de 57.29 Ton\*m lo cual nos dice que existió un incremento de 2.45 veces el valor estático.

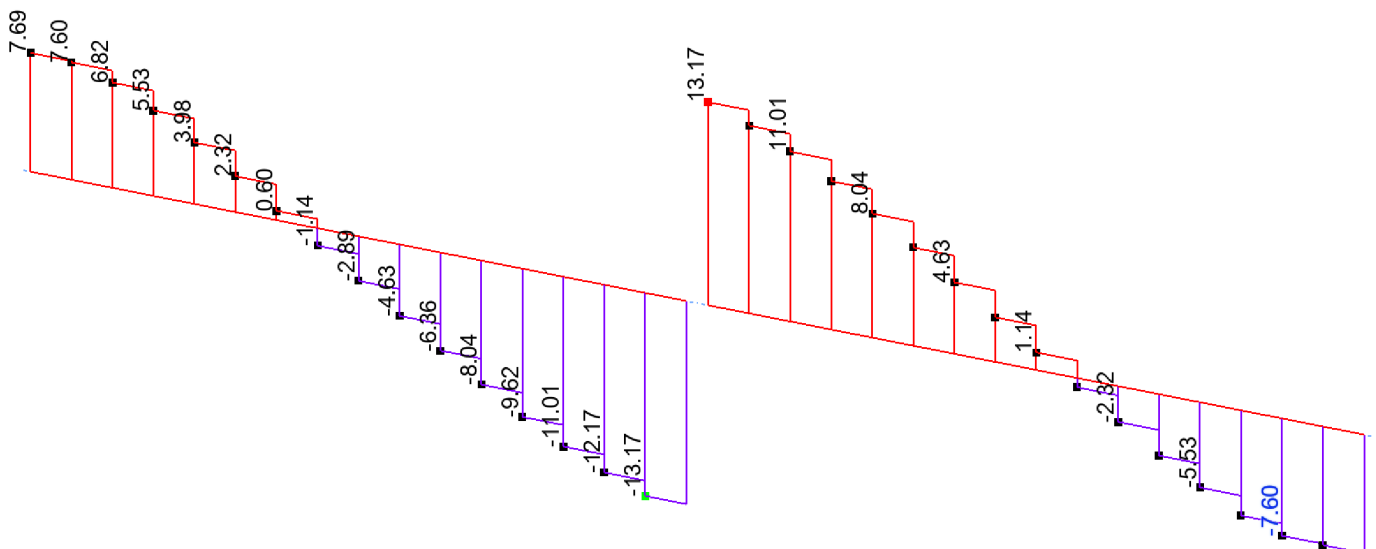
A continuación, se mostrará los valores de cortante en los elementos seleccionados.

	Unidad	Frecuencia 1.5 Hz Elemento 26	Frecuencia 2.8 Hz Elemento 26	Frecuencia 1.5 Hz Elemento 27	Frecuencia 2.8 Hz Elemento 27
Zona 1	Tf	20.42	21.98	0.38	2.13
Zona 2	Tf	0.20	2.16	24.01	25.29
Zona 3	Tf	0.65	0.68	0.50	0.59
Zona 4	Tf	15.65	16.27	23.72	24.87
Zona 5	Tf	15.41	16.06	23.32	26.30

**Tabla 9:** Valores de Esfuerzo para cada frecuencia de estimulación. (Elaboración propia).

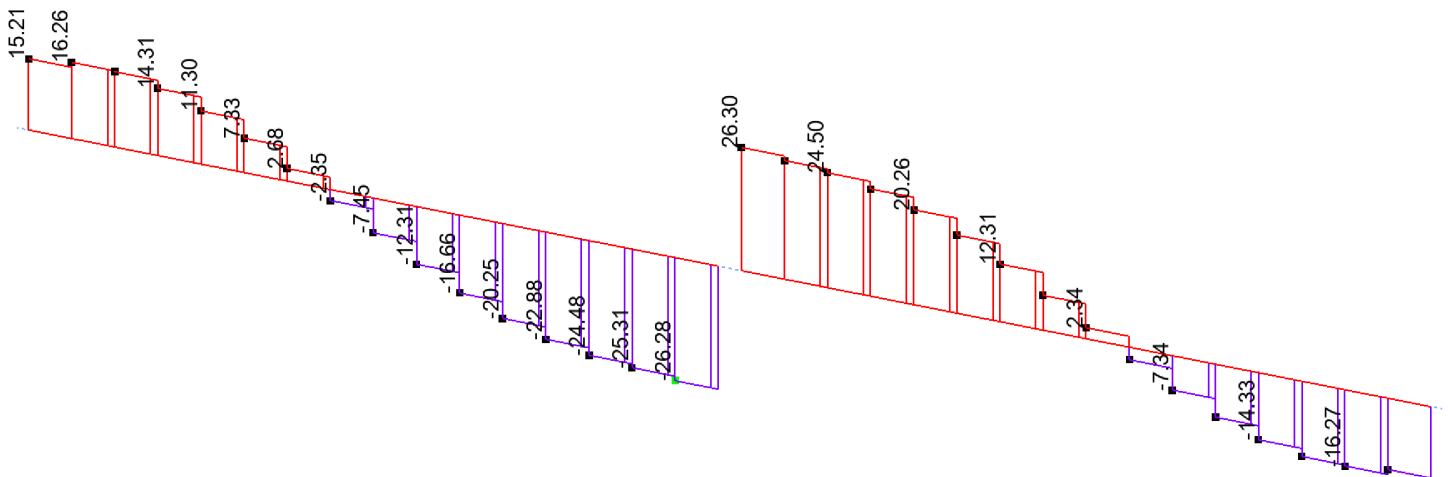
De igual manera se mostrará la comparación en los casos de la zona 5 cargada y la zona 5 cargada a 2.8 Hz del esfuerzo cortante máximo.

- Esfuerzo cortante máximo en zona 5 cargada.



**Ilustración 88:** Esfuerzo Cortante máximo para elementos 26 y 27 con la zona 5 cargada

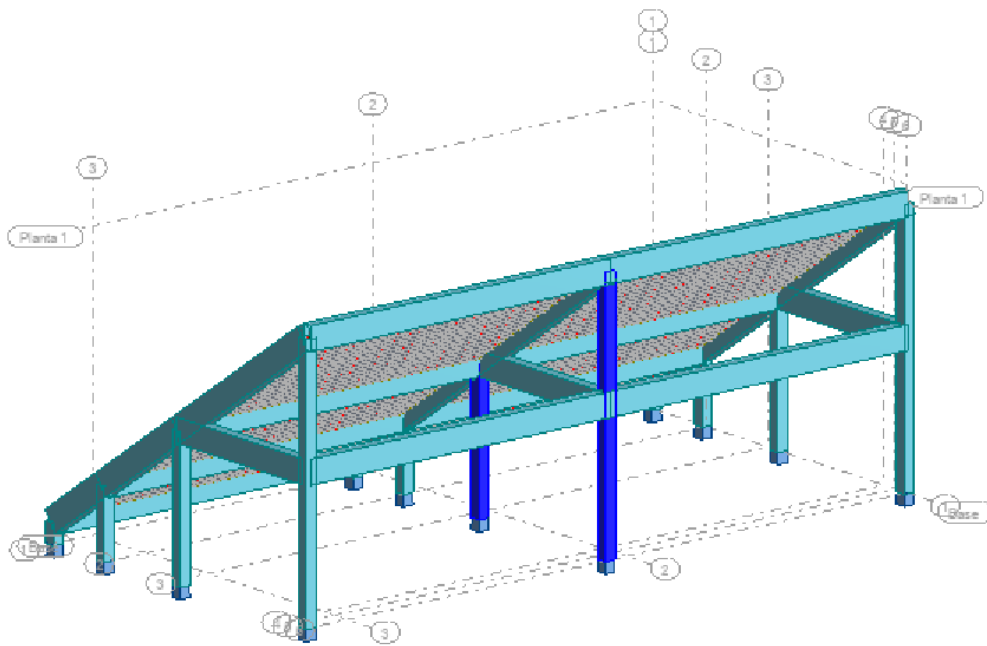
- Esfuerzo cortante máximo con vibraciones causadas en zona 5 cargada a 2.8 Hz



**Ilustración 89:** Esfuerzo Cortante máximo para elementos 26 y 27 por vibraciones en zona 5 cargada a 2.8 Hz.

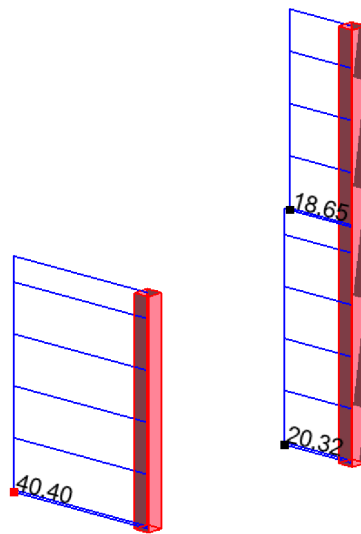
Como podemos observar en las Ilustración 88 y Ilustración 89 el corte máximo que se produce cuando la zona 5 se encuentra cargada estáticamente es de 13.17 Ton y en comparación al corte máximo de 26.30 que se produce cuando la vibración se efectúa, es decir que existe un incremento de 1.996 veces, y se puede recalcar que el valor de incremento es muy similar al valor de 2.45 veces con respecto al momento flector.

Una vez ilustrado y analizado las fuerzas que se van a producir sobre los elementos como las vigas es importante ilustrar y analizar las fuerzas internas creadas sobre las columnas y ver como estas cambian dependiendo la situación. Analizaremos la fuerza axial sobre la columna tanto cuando está cargada estáticamente en la zona 5 como cuando se aplica la actividad con vibración de 2.8 Hz sobre esta zona para esto se han seleccionado las siguientes dos columnas, las cuales en el programa serán identificadas como elemento 9 y 8.



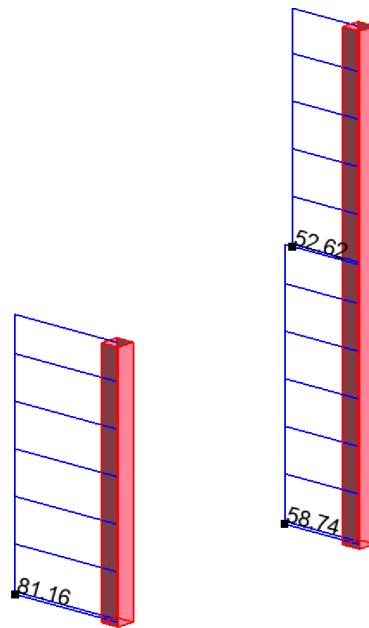
**Ilustración 90:** Localización de elementos 9 y 8.

- Carga axial sobre las columnas por zona 5 cargada.



**Ilustración 91:** Carga puntual sobre las columnas por zona de carga 5 en los elementos 9 y 8.

- Carga axial sobre las columnas por zona 5 cargada con una actividad de 2.8 Hz de frecuencia.



**Ilustración 92:** Carga puntual sobre las columnas por zona 5 de carga con una actividad 2.8 Hz de frecuencia en los elementos 9 y 8.

A simple vista se puede observar que existe un incremento de 2.89 veces para el elemento 9 y un incremento de 2 para la columna número 8 con respecto cuando la multitud se encuentra estática. Para poder observar de mejor manera y tener un mejor análisis de cómo van cambiando las fuerzas puntuales sobre la columna se mostrará un cuadro donde se ilustrará el cambio dependiendo la zona y la frecuencia que se use.

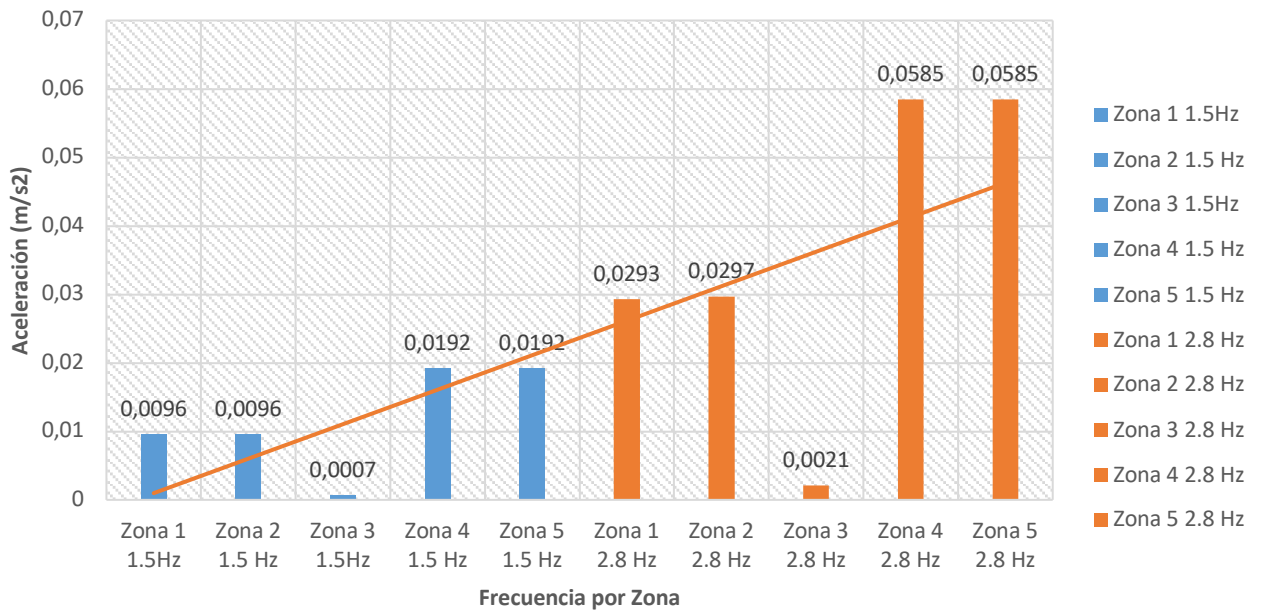
	<i>Unidad</i>	<i>Frecuencia 1.5 Hz Elemento 9</i>	<i>Frecuencia 2.8 Hz Elemento 9</i>	<i>Frecuencia 1.5 Hz Elemento 8</i>	<i>Frecuencia 2.8 Hz Elemento 8</i>
<b>Zona 1</b>	<i>Tf</i>	27.88	29.41	38.52	40.62
<b>Zona 2</b>	<i>Tf</i>	26.66	28.63	36.88	39.64
<b>Zona 3</b>	<i>Tf</i>	0.61	1.09	0.82	1.49
<b>Zona 4</b>	<i>Tf</i>	56.03	58.95	77.25	81.29
<b>Zona 5</b>	<i>Tf</i>	55.70	58.74	76.95	81.16

**Tabla 10:** Valores de Fuerza axial para cada frecuencia de estimulación. (Elaboración propia).

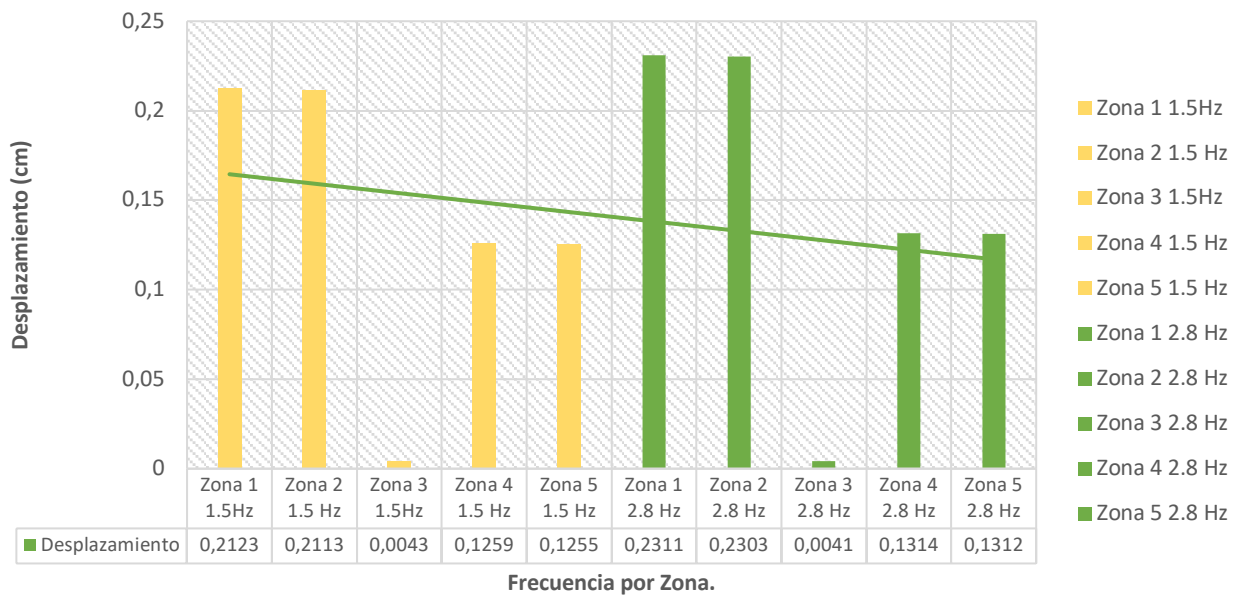
Una vez ilustrado como se ve afectada las cargas puntuales por efecto de las vibraciones ya sean de 1.5 Hz o de 2.8 Hz podemos hacer lo mismo con los momentos. Para esto utilizaremos las mismas columnas y lo expondremos a las vibraciones como en la tabla anterior pero antes analizaremos el cambio que se genera con la multitud quieta en comparación a la multitud realizando una acción de 2.8 Hz.

Se mostrará el resumen de los resultados antes mostrados de desplazamiento, aceleración, fuerza cortante y momento flector en manera de diagrama de barras para poder observar los resultados de mejor manera como se muestran en las ilustraciones.

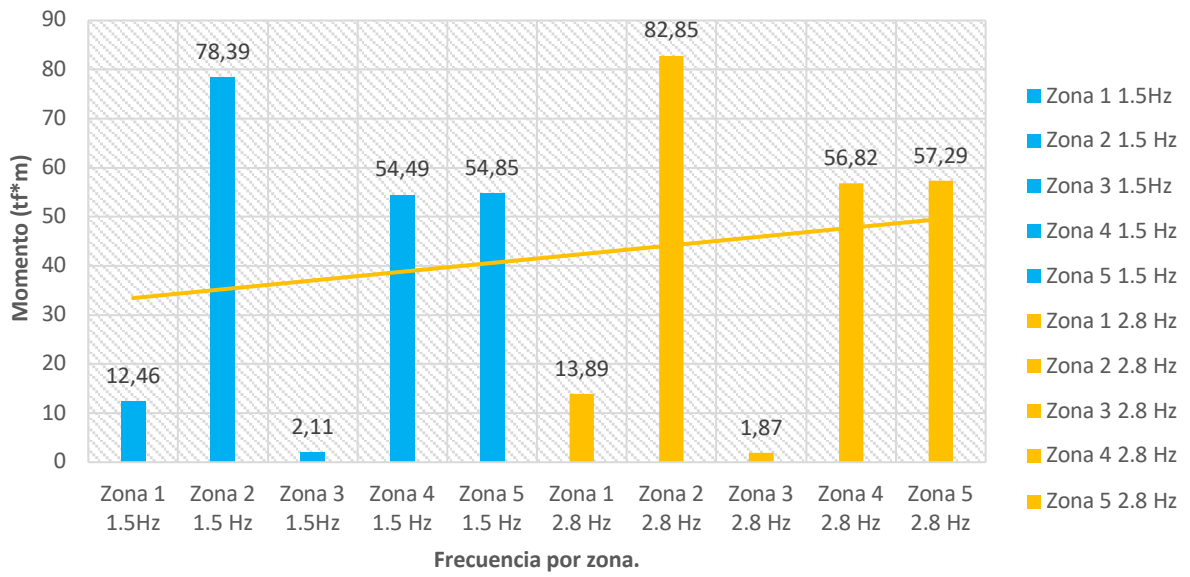
### Aceleración vs Frecuencia por Zona



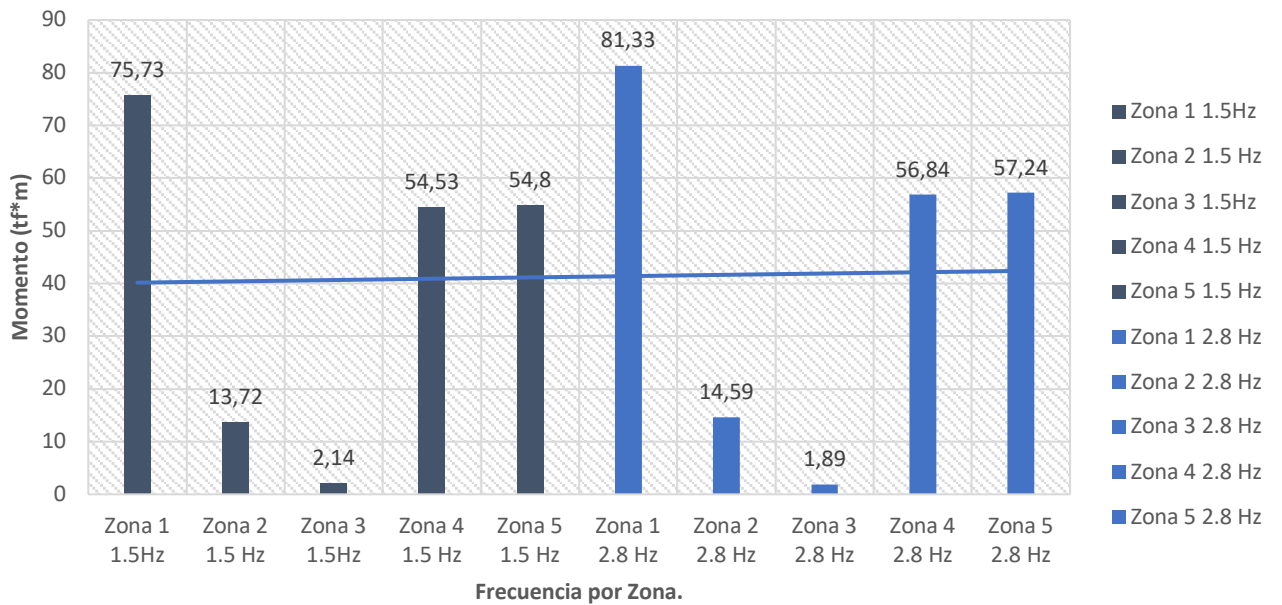
### Desplazamiento vs Frecuencia por Zona.



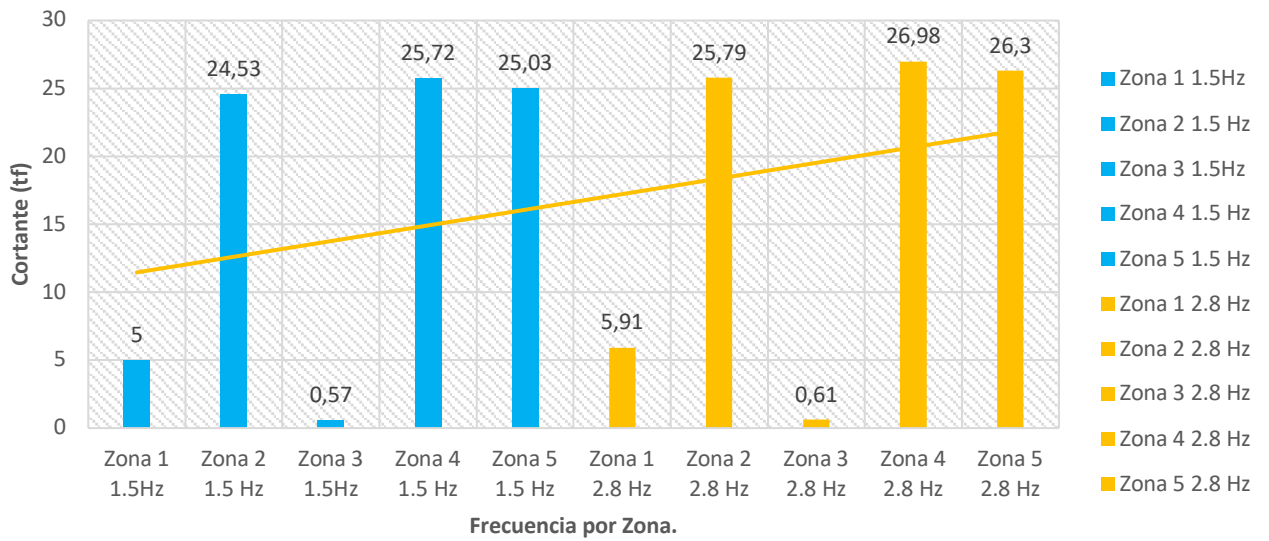
Momento elemento 27 vs Frecuencia por Zona.



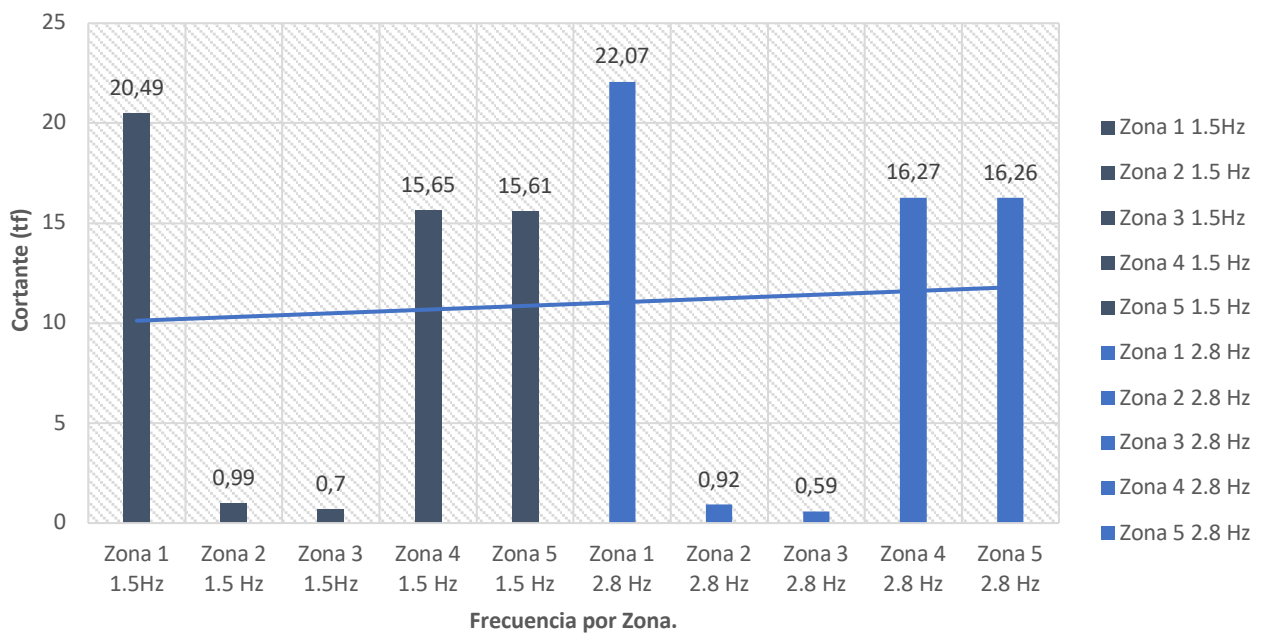
Momento elemento 26 vs Frecuencia por Zona.



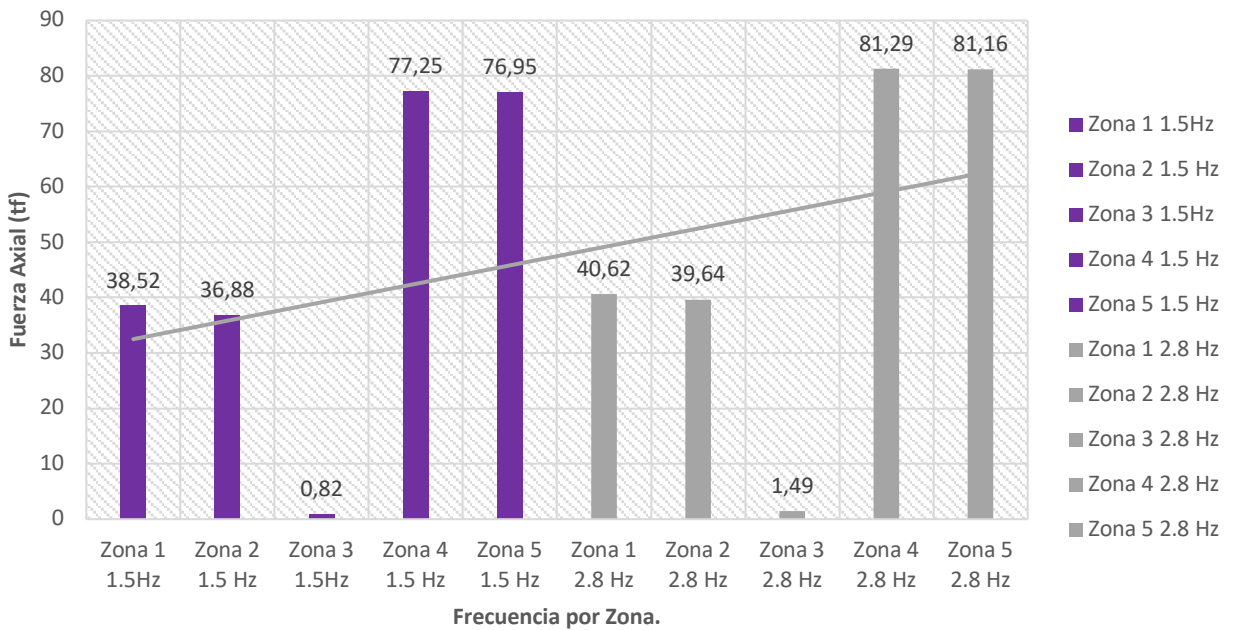
Cortante elemento 27 vs Frecuencia por Zona.



Cortante elemento 26 vs Frecuencia por Zona.



Fuerza axial elemento 8 vs Frecuencia por Zona.



Fuerza axial elemento 9 vs Frecuencia por Zona.

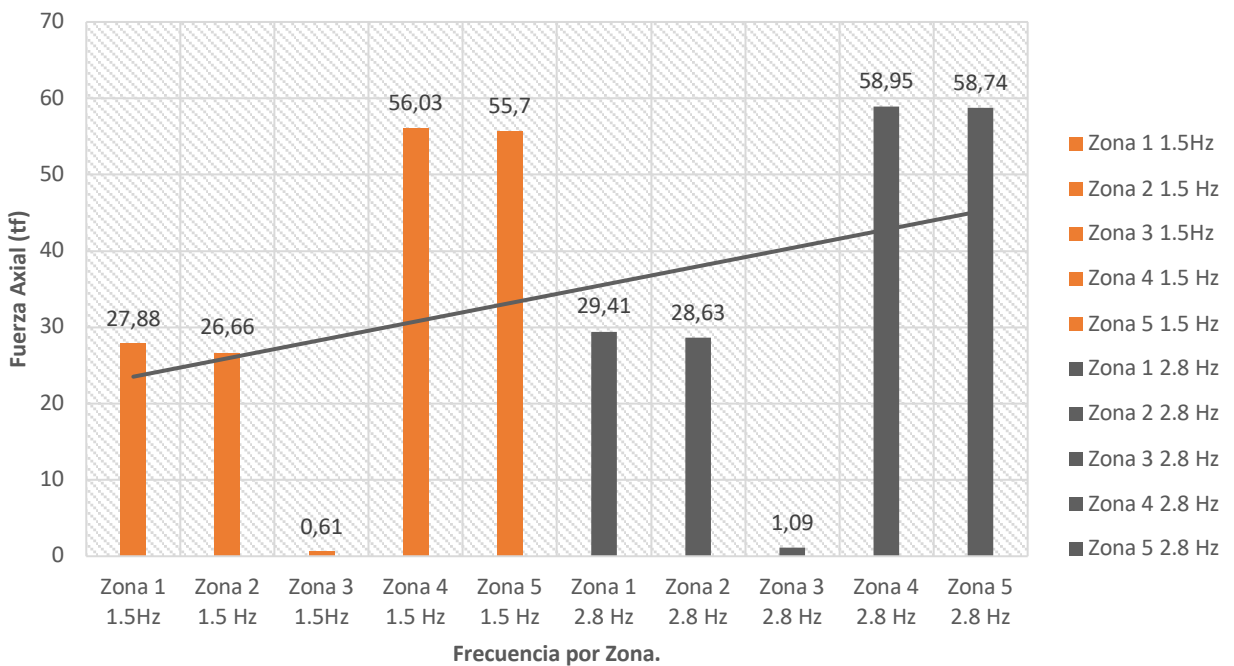


Ilustración 93: Diferentes respuestas a varias frecuencias de estimulación (Elaboración Propia).

Se observa que la frecuencia de carga es directamente proporcional a la aceleración y a las fuerzas internas que actúan sobre los elementos, pero cuando se refiere a los desplazamientos generados en los elementos, vemos que dependiendo del tamaño de la zona cambian los valores en donde la zona 1 y 2 poseen valores similares y los máximos desplazamientos, la razón por la cual en ambas zonas se da el mismo desplazamiento es debido a que la estructura al ser simétrica y que se aplique la misma carga genera el mismo efecto de desplazamiento. Es importante recalcar que tanto la aceleración como el desplazamiento máximo que se genera en la estructura llega a un pico en una fracción de 0.3 segundos y después de llegar a este pico debido al amortiguamiento estos dos parámetros decrecen hasta llegar a cero y esto ocurre al lapso de 10 segundos más o menos.

### **5.3 Valores de Diseño para vigas y columnas**

Una vez analizados los parámetros de aceleración y desplazamiento que ocurren en los elementos estructurales y que estos sean tan confortables como seguros para los espectadores, se necesitará hacer un análisis de las cargas producidas sobre vigas y columnas para poder brindar un diseño básico de los elementos.

Para poder realizar este análisis se ha proyectado los valores tanto de momento como de fuerzas con los valores extremos de 1.5Hz y 2.8Hz dentro de las diferentes zonas previamente definidas con numeración desde 1 hasta 5. A continuación se mostrarán los valores dados por el software.

- Frecuencia 1.5 Hz Zona 1 My(Max : 29.22 tf\*m) (Min: -56.78) Fx( Max:38.52 tf) (Min: -9.97 ).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	38.52	4.73	19.40	29.18	29.22	15.70
<b>Barra</b>	8	26	28	28	9	5
<b>Nudo</b>	11	12	5	14	14	4
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-9.97	-6.11	-24.11	-28.42	-56.78	-16.52
<b>Barra</b>	3	26	28	28	26	10
<b>Nudo</b>	4	4	14	5	12	12
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

*Ilustración 94:* Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 1.

- Frecuencia 2.8 Hz Zona 1 My(Max: 32.07 tf\*m)(Min: -60.11 tf\*m) Fx (Max: 40.72 tf) (Min:-13.56 tf)

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	40.72	5.11	21.10	31.30	32.07	16.86
<b>Barra</b>	39	26	28	28	9	5
<b>Nudo</b>	28	12	5	14	14	4
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-13.56	-6.53	-25.80	-30.68	-60.11	-17.96
<b>Barra</b>	39	26	28	28	26	10
<b>Nudo</b>	28	4	14	5	12	12
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

*Ilustración 95:* Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 1.

- Frecuencia 1.5 Hz Zona 2 My(Max: 31.05 tf\*m)(Min: -57.36 tf\*m) Fx (Max: 38.75 tf) (Min:-10.15 tf)

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	38.75	6.41	24.00	28.28	31.05	17.17
Barra	16	27	27	29	17	10
Nudo	20	21	12	23	23	12
Caso	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-10.15	-4.95	-19.83	-29.00	-57.36	-16.32
Barra	19	27	27	29	27	18
Nudo	21	12	21	14	12	21
Caso	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

**Ilustración 96:** Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 2.

- Frecuencia 2.8 Hz Zona 2 (Max: 33.59 tf\*m)(Min: -60.47 tf\*m) Fx (Max: 41.34 tf) (Min:-13.55 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	41.34	6.70	25.60	30.60	33.59	18.33
Barra	16	27	29	29	17	10
Nudo	20	21	14	23	23	12
Caso	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-13.55	-5.23	-21.03	-31.20	-60.47	-17.21
Barra	8	27	29	29	27	18
Nudo	11	12	23	14	12	21
Caso	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

**Ilustración 97:** Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 2.

- Frecuencia 1.5 Hz Zona 3 ( Max: 0.89 tf\*m)(Min: -2.37 tf\*m) Fx (Max: 1.63 tf) (Min:-0.35 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	1.63	0.13	0.68	0.93	0.89	0.50
<b>Barra</b>	39	27	26	29	17	5
<b>Nudo</b>	28	21	4	23	23	4
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-0.35	-0.14	-0.67	-0.93	-2.37	-0.50
<b>Barra</b>	3	26	27	28	26	18
<b>Nudo</b>	4	4	21	5	12	21
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

*Ilustración 98:* Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 3.

- Frecuencia 2.8 Hz Zona 3 (Max: 0.93 tf\*m)(Min: -2.51 tf\*m) Fx (Max: 1.74 tf) (Min:-0.78 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	1.74	0.13	0.72	0.93	0.93	0.53
<b>Barra</b>	39	27	26	29	17	5
<b>Nudo</b>	28	21	4	23	23	4
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-0.78	-0.14	-0.71	-0.93	-2.51	-0.52
<b>Barra</b>	8	26	27	28	26	18
<b>Nudo</b>	11	4	21	5	12	21
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

*Ilustración 99:* Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 3.

- Frecuencia 1.5 Hz Zona 4 (Max:35.15 tf\*m)(Min: -90.97 tf\*m) Fx (Max: 77.25 tf) (Min:-12.10 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	77.25	4.38	25.72	28.46	35.15	18.52
<b>Barra</b>	8	27	27	29	10	9
<b>Nudo</b>	11	21	12	23	12	14
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-12.10	-5.12	-25.57	-28.51	-90.97	-12.47
<b>Barra</b>	7	9	26	28	29	29
<b>Nudo</b>	9	14	12	5	14	14
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

*Ilustración 100:* Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 4.

- Frecuencia 2.8 Hz Zona 4 (Max: 37.07 tf\*m)(Min: -95.22 tf\*m) Fx (Max: 81.29 tf) (Min:-27.10 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	81.29	4.58	26.98	29.72	37.07	19.52
<b>Barra</b>	8	27	27	29	10	9
<b>Nudo</b>	11	21	12	23	12	14
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-27.10	-5.40	-26.82	-29.77	-95.22	-13.04
<b>Barra</b>	8	9	26	28	29	29
<b>Nudo</b>	11	14	12	5	14	14
<b>Caso</b>	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

*Ilustración 101:* Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 4.

- Frecuencia 1.5 Hz Zona 5 (Max: 35.05 tf\*m)(Min: -90.59 tf\*m) Fx (Max: 76.95 tf) (Min:-12.11 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	76.95	4.19	25.03	28.64	35.05	18.46
Barra	8	27	27	29	10	9
Nudo	11	21	12	23	12	14
Caso	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-12.11	-5.11	-25.01	-28.64	-90.59	-12.41
Barra	7	9	26	28	29	28
Nudo	9	14	12	5	14	14
Caso	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

*Ilustración 102:* Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 1.5 Hz en la zona 5.

- Frecuencia 2.8 Hz Zona 5 (Max: 37.06 tf\*m)(Min:-95.01 tf\*m) Fx (Max: 81.16 tf) (Min:-27.03 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	81.16	4.38	26.30	29.96	37.06	19.51
Barra	8	27	27	29	10	9
Nudo	11	21	12	23	12	14
Caso	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana
<b>MIN</b>	-27.03	-5.40	-26.28	-29.96	-95.01	-13.01
Barra	8	9	26	28	29	28
Nudo	11	14	12	5	14	14
Caso	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana	Time history ana

*Ilustración 103:* Valores máximos y mínimos generados por la vibración de frecuencia 2.8 Hz en la zona 5.

- Carga zona 5 (Max: 9.69 tf\*m)(Min:-42.20 tf\*m) Fx (Max: 40.40 tf) (Min:-4.07 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	40.40	1.94	13.17	7.22	9.69	5.79
Barra	8	27	27	29	10	9
Nudo	11	21	12	23	12	14
Caso	7	7	7	7	7	7
<b>MIN</b>	-4.07	-1.94	-13.17	-7.22	-42.20	-5.56
Barra	11	26	26	28	27	18
Nudo	12	4	12	5	12	21
Caso	7	7	7	7	7	7

*Ilustración 104:* Valores máximos y mínimos generados por el carga de 0.24 ton/m2 en la zona 5 .

- Peso Propio (Max: 38.73 tf\*m) (Min: -161.21 tf\*m) Fx (Max: 170.65 tf) (Min:-16.42 tf).

	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	170.65	7.82	51.83	21.54	38.73	21.27
Barra	8	27	27	29	14	5
Nudo	11	21	12	23	17	4
Caso	1	1	1	1	1	1
<b>MIN</b>	-16.42	-7.82	-51.83	-21.54	-161.21	-21.27
Barra	11	26	26	28	27	18
Nudo	12	4	12	5	12	21
Caso	1	1	1	1	1	1

*Ilustración 105:* Valores máximos y mínimos generados por el peso propio.

Al comparar todos los valores de momento y fuerzas axiales se puede concluir que como era de esperar el área con mayor cobertura es la que producirá los mayores efectos.

Se procederá a observar en que factor supera los valores creados con la vibración en comparación a los valores creados sin vibración, pero solamente con las personas estacionarias sin realizar ninguna acción.

<b>My Max : 37.06 tf*m</b>	<b>Min: -95.01 tf*m</b>
<b>Zona 5: 9.69 tf*m</b>	Zona 5 :-33.37 tf*m
<b>Factor de 3.82.</b>	Factor de 2.84.

<b>Fy Max: 4.38 tf</b>	<b>Min: -5.40 tf</b>
<b>Zona 5: 1.94 tf</b>	Zona 5:-1.94 tf
<b>Factor de 2.257.</b>	Factor de 2.783.

<b>Mx max: 29.96 tf*m</b>	<b>Min: -29.96 tf*m</b>
<b>Zona 5: 7.22 tf*m</b>	Zona 5: -7.22 tf*m
<b>Factor de 4.149.</b>	Factor de 4.149.

<b>Fx Max: 81.16 tf.</b>	<b>Min: -27.03 tf.</b>
<b>Zona 5 : 40.40 tf.</b>	Zona 5 :-4.07 tf
<b>Factor de 2.00.</b>	Factor de 6.64.

<b>Mz Max:19.51 tf*m</b>	<b>Min: -13.01 tf*m</b>
<b>Zona 5: -5.79 tf*m</b>	Zona 5: -5.56 tf*m
<b>Factor de 3.36.</b>	Factor de 2.339.

<b>Fz Max: 26.30 tf</b>	<b>Min: -26.28 tf</b>
<b>Zona 5: -13.17 tf</b>	Zona 5: -13.17 tf
<b>Factor de 1.99.</b>	Factor de 1.99.

*Tabla 11:* Factores de amplificación para las fuerzas generadas en los elementos (Elaboración propia).

Al encontrar los factores de amplificación y comprobar que efectivamente da el mismo valor se pudo crear los combos respectivos en el software para luego realizar una combinación de carga que nos permita dimensionar y aplicar la cuantía de aceros tanto en vigas como en columnas

Combinación de carga 1.2CM+1.2CV+1.0 CS

(My Max: 83.66 tf\*m) (My Min: -367.95 tf\*m) (Fx Max: 371.80 tf) (Fx Min: -36.54 tf).

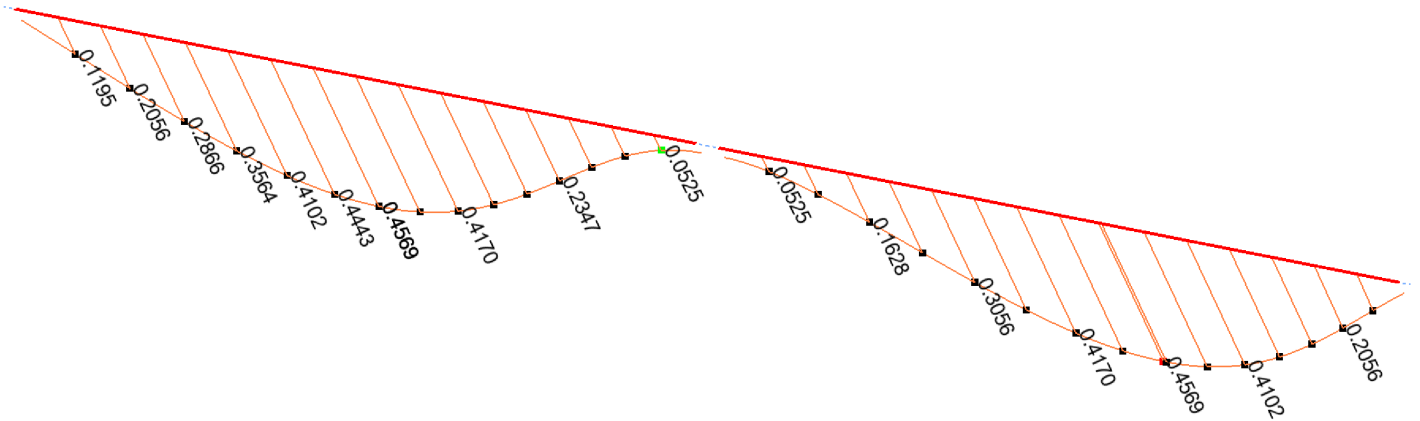
	FX (tf)	FY (tf)	FZ (tf)	MX (tfm)	MY (tfm)	MZ (tfm)
<b>MAX</b>	371.80	17.41	116.64	55.72	83.66	48.81
Barra	8	27	27	29	15	9
Nudo	11	21	12	23	19	14
Caso	20 (C)	20 (C)	20 (C)	20 (C)	20 (C)	20 (C)
<b>MIN</b>	-36.54	-17.41	-116.64	-55.72	-367.95	-48.50
Barra	11	26	26	28	27	18
Nudo	12	4	12	5	12	21
Caso	20 (C)	20 (C)	20 (C)	20 (C)	20 (C)	20 (C)

*Ilustración 106: Valores máximos y mínimos generados por la combinación de carga 1.2 CM+1.2 CV+1.0 CS*

Ya que se pudo obtener una combinación de carga para poder realizar el análisis y diseño en un caso en el cual se consideren factores de amplificación que brinden mayor seguridad, podremos realizar una comparación acerca de cuánto es el incremento de las fuerzas internas entre el caso con la zona cargada estáticamente, la zona cargada dinámicamente con vibraciones y el caso de la zona cargada con una combinación de carga.

Para hacer esto primero compararemos los desplazamientos en las mismas vigas seleccionadas anteriormente.

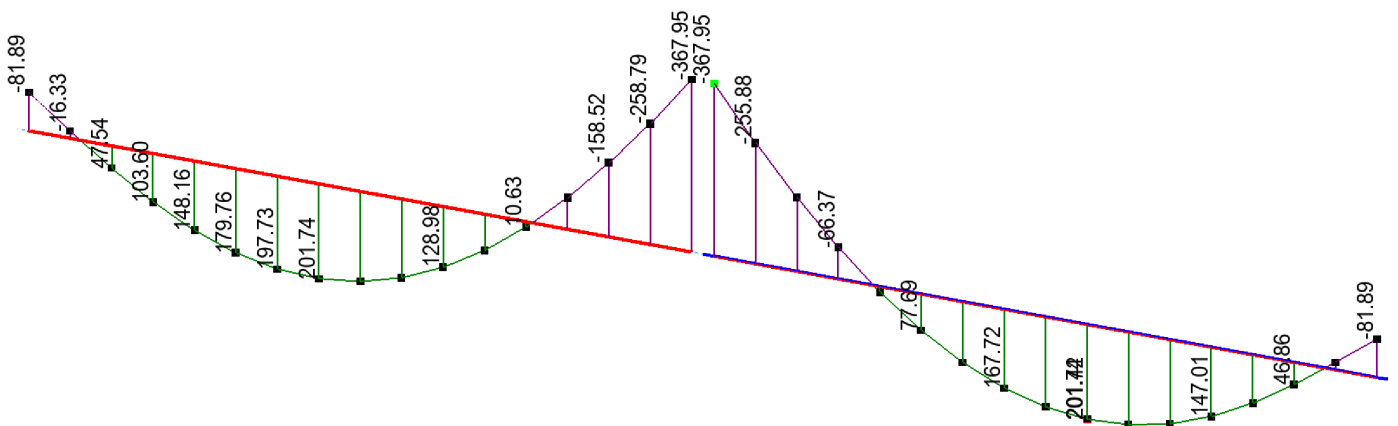
- Deflexión máximo generado por la zona 5 cargada con la combinación de cargas.



**Ilustración 107:** Deflexión generados por la zona 5 cargada con la combinación de carga para los elementos 26 y 27.

Como se observa en las gráficas anteriores de desplazamientos cuando la zona está cargada estáticamente posee un desplazamiento de 0.0524 cm, cuando posee la carga dinámica de vibración posee un desplazamiento de 0.1225 cm y cuando se aplica el peor caso es decir la combinación de carga posee 0.4569 cm de desplazamiento lo que quiere decir que existe un incremento del 0.3344 cm con relación al efecto vibracional.

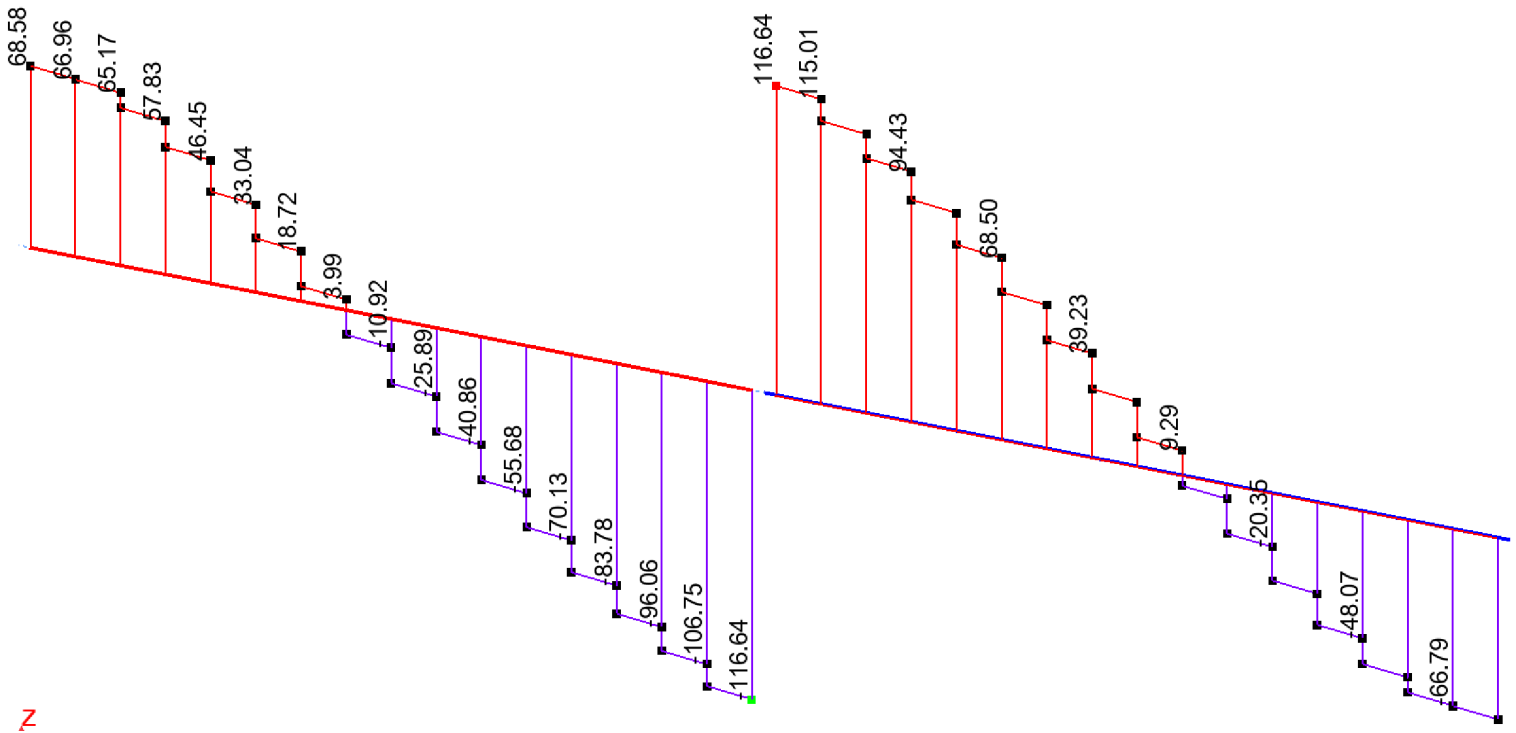
- Momento flector máximo generado por la zona 5 cargada con la combinación de cargas.



**Ilustración 108:** Momentos flectores generados por la zona 5 cargada con la combinación de carga para los elementos 26 y 27.

En el caso de los momentos flectores sobre las vigas podemos observar que el incremento es uno de los mayores en comparación a los demás parámetros, obteniendo en un caso inicial un momento de 23.36 Ton\*m siguiendo con el momento generado por la carga dinámica de vibración de 57.29 Ton \*m y el caso final con la combinación de carga el cual da un resultado de 201.72 Ton\*m, obteniendo un factor de incremento de 3.52.

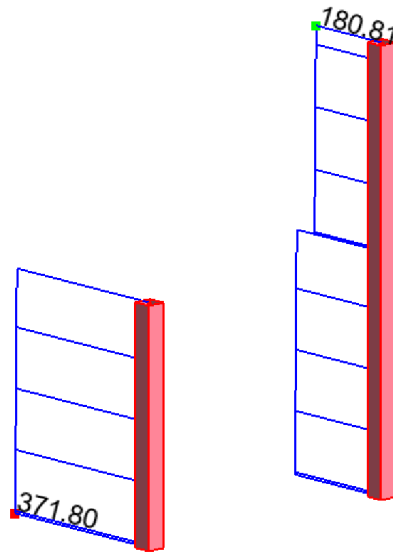
- Esfuerzo cortante máximo generado por la zona 5 cargada con la combinación de cargas.



**Ilustración 109:** Esfuerzos cortantes generados por la zona 5 cargada con la combinación de carga para los elementos 26 y 27.

En cuestión a los esfuerzos de corte generados poseemos para la carga estática un valor de 13.17 Ton, para el caso con la carga dinámica de vibración poseemos un valor de 26.30 Ton y en escenario final utilizando la combinación de carga poseemos un valor de 116.64 Ton lo que nos da un factor de amplificación de 4.4 con la relación a la carga vibracional.

- Carga puntual máxima generado por la zona 5 cargada con la combinación de cargas en los elementos 9 y 8.



**Ilustración 110:** Cargas puntuales generadas por la zona 5 cargada con la combinación de carga para los elementos 9 y 8.

Observando como se desarrolla el incremento de valores en columnas podemos observar que para la columna o elemento 9 en un primer escenario con la carga estática se genera una fuerza puntual de 20.30 Ton, con la carga dinámica se generan 58.74 Ton y finalmente con la combinación de carga se generan 180.01 Ton lo que nos da un factor de amplificación de 3.06. Con la columna o elemento 8 poseemos en el primer escenario con la carga estática un valor de 40.40 Ton, con la carga dinámica de vibración 81.16 Ton y con la combinación de carga 371.80 Ton lo que nos da un factor de amplificación de 4.58.

## 6. Capítulo : Conclusiones y recomendaciones.

### 6.1 Conclusiones.

---

- Tras haber modelado de la carga dinámica en el Software se pudo concluir que las vibraciones de magnitudes altas tienen como consecuencias efectos de un orden grande sobre la estructura, efectos como momentos flectores, cargas cortantes, desplazamientos, etc. pueden producir daños considerables sobre la estructura si no son analizados y correctamente tratados; sin embargo efectos como la aceleración son medidos en relación a la percepción humana por lo tanto deberían ser tomados en cuenta para el análisis después de los efectos mencionados anteriormente
- Para el modelo presentado inicialmente, en el cual se encontraban las dimensiones otorgadas por los planos arquitectónicos del estadio de fútbol de la Universidad Católica del Ecuador se corrió un análisis con cargas similares a las que se podían producir por efecto de la vibración y se pudo observar que las dimensiones originales no podrían soportar las cargas, es por eso por lo que se brindaron nuevas dimensiones reemplazando las originales de vigas de 50 x 30cm y columnas de 30 x 40cm por dimensiones de mayor tamaño como vigas de 112 x 52 cm y columnas de 52x 52cm.
- Durante el análisis de datos se pudo observar que tanto durante Footfall y tiempo-historia se cumplían todos los límites tanto de desplazamientos, deformaciones establecidos en la norma, los límites de aceleración recomendados para el análisis Footfall cumplieron con la norma, la única variación resultó cuando se analizó los resultados en tiempo-historia de la aceleración el cual sobrepasaba los límites recomendados de 4-7%g sin embargo este valor solo era por un rango de tiempo muy bajo y al estar realizando todas las personas la actividad su rango de sensibilidad iba a

ser muy alto es por esto que se descartó la aceleración como un problema para el análisis

- Se concluye que para poder obtener valores más conservadores el parámetro más importante a considerar es la densidad de espectadores por metro cuadrado ya que mientras más personas se encuentren por metro cuadrado se podrá generar una mayor fuerza en el elemento.
- El parámetro que rige la comodidad y confortabilidad del usuario al estar sometido a vibraciones de duraciones variadas es la aceleración ya que con esta se puede medir el nivel de disgusto que puede sufrir una persona, aunque es variable de persona a persona se han establecido algunos límites en situaciones respectivas.
- Una multitud saltando rítmica o arrítmicamente se la considera como una carga variable en el tiempo y por lo tanto son necesarias las características de la estructura vacía, y las características de la estructura con una multitud inmóvil para poder correr varios análisis y observar la relación multitud-estructura en diferentes casos
- El método utilizado para la estimación de las cargas generadas por grupos de personas saltando es un método numérico obtenido a través de experimentación, es por esto por lo que se pueden presentar variaciones muy pequeñas en comparación a resultados obtenidos con acelerogramas.
- Se concluye que para estructuras dirigidas a eventos de este estilo es una mejor opción reemplazar los elementos de hormigón armado por elementos de acero, ya que las dimensiones utilizadas con hormigón armado pueden ser de grandes magnitudes lo que en ciertos casos podría presentar problemas tanto el momento de construcción como de mantenimiento de estas.
- En los nudos definidos como los más afectados se generaran aceleraciones altas durante una fracción de segundo, a pesar de que el tiempo de ocurrencia sea muy corto este tipo

de aceleraciones son perjudiciales para la estructura y deberá ser considerada esta zona en el diseño para reforzarla.

- Una de las principales preocupaciones que se generaron durante el estudio de las vibraciones sobre las estructuras como graderíos fue el efecto de resonancia que se podría producir y los daños que podrían generar en la estructura, sin embargo se pudo concluir que para que se produzca dicho efecto deberían sincronizarse la frecuencia natural de la estructura la cual es en su primer modo de 7.74 Hz con la frecuencia de paso que se encuentre ese momento en la estructura la cual está dentro del rango de 1.5 Hz – 2.8 Hz.
- Al realizar un análisis de comparación entre los valores generados por solamente el efecto de las vibraciones y los valores generados por la combinación de carga podemos concluir que nos brinda diferentes factores de amplificación obtenido un rango de 2-3 como factores de amplificación.
- La relación humano-estructura brinda propiedades que son beneficiosas para el caso de estudio ya que se encuentra un notable incremento de masa, rigidez y sobre todo amortiguamiento lo cual ayudara a la estructura a disipar de mejor manera la energía producida sobre la misma.
- Es de gran importancia desarrollar técnicas de atenuación para reducir las respuestas excesivas generadas por las vibraciones.
- Es posible utilizar TMD pasivos para reducir la respuesta de la estructura de un estadio, como lo demuestra el análisis presentado en este artículo. Sin embargo, el uso de un dispositivo HTMD puede mejorar el rendimiento de la amortiguación al hacer que el amortiguador sea menos sensible al desajuste y al mejorar el rendimiento en comparación con un TMD pasivo.

## 6.2 Recomendaciones

---

- Habiendo analizado normas y guías de diseño que consideran los efectos de vibraciones sobre estructuras se recomienda que se deben considerar dos maneras de carga dinámica para los graderíos, una para el análisis durante eventos deportivos y otro para eventos rítmicos como conciertos.
- Para poder realizar un análisis más detallado y puntual es necesario considerar todos los valores de frecuencias definidos dentro de los rangos existentes para cada tipo de caso.
- Para poder realizar el análisis tiempo-historia con la función expuesta para un grupo de personas muy amplio es necesario tomar los valores de coeficientes de Fourier y desfase de estudios previos donde se han mostrado graficas que poseen la variación de estos valores y su estabilizando mediante el número de personas que vayan a estar en la multitud estudiada.
- Para el análisis de grupos de hasta 64 personas se utilicen las fórmulas establecidas para el cálculo de las componentes de la función o directamente los valores encontrados en tablas donde variara dependiendo el radio de contacto, la frecuencia y el desfase.
- Analizar los efectos de torsion que se puede dar en toda la estructura debido a que parte del edificio posee como soporte la topografía del lugar lo cual producira una torsion considerable.
- Para la estimación de cargas y aceleraciones en estructuras ya construidas, se deberá realizar utilizando instrumentación como acelerogramas ubicados en zonas específicas y previamente estudiadas para obtener la mayor cantidad de información de la vibración.
- Durante el modelamiento es importante definir que todos los nudos entre vigas y columnas se creados como nudos rígidos.

- En el panel o losa se produjeron aceleraciones de gran magnitud por fracciones de segundo, a pesar del tiempo de ocurrencia es importante realizar un diseño de aceros apropiados o implementar elementos que rigidicen los sectores críticos.
- Efectuar un análisis sísmico junto con el análisis de vibraciones para poder determinar las zonas débiles que podría poseer la estructura y de esta manera reforzarlas ya que al encontrarse en Ecuador existe la posibilidad de riesgo sísmico.
- Realizar más investigaciones sobre los valores del módulo de Young para estructuras de hormigón con el fin de estudiar los efectos de vibraciones
- Utilizar vigas de 52cm x 112cm con un estribo de 10mm y un armado de 7 varillas de 28mm con un espaciamiento de 5.37cm, para columnas se recomienda utilizar medidas de 65cm x 65cm con estribos de 10mm cumpliendo la dimensión mínima establecida por la norma y con un armado de 6 varillas de 28mm, 3 en la parte superior y 3 en la parte inferior.
- Para tener un control acerca del problema de resonancia se debe completar el diseño con criterios sísmicos y se deberán aplicar disipadores de energía sísmica en la estructura para controlar los dos efectos a la vez.

## 7. Bibliografía

M.R Willford, P. Y. (2007). A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures.

Parkhouse, & Ewins. (2006). Structures and Buildings. Institution of Civil Engineers.

Rao, S. S. (2012). Vibraciones Mecánicas. Pearson.

Marulanda, C., Thomson, P., & Marulanda, A. J. (2000). Monitoreo de salud estructural.

Obtenido de Universidad del Valle:

<https://go.gale.com/ps/i.do?id=GALE%7CA224990634&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=01233033&p=IFME&sw=w&userGroupName=anon%7E899d59b5>

- R, O. Z. (2007). Estabilidad II. Obtenido de Universidad del Nordeste:  
[http://ing.unne.edu.ar/mecap/Apuntes/Estabilidad\\_2/Cap11-Dinam.pdf](http://ing.unne.edu.ar/mecap/Apuntes/Estabilidad_2/Cap11-Dinam.pdf)
- Rosales, C. I. (2001). SOBRE EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LOS DEPÓSITOS DE SUELOS DEL ÁREA DE CAÑAVERALEJO, CALI, COLOMBIA. Obtenido de Corporacion OSSO: <https://www.osso.org.co/docu/tesis/2001/comportamiento/Tesis-Cris-DocumentoFinal-13septiembre2001.pdf>
- Hibbeler, R. C., Murrieta, J. E., Luna, G. J., & Garcia, D. S. (s.f.). Analisis Estructural. Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Martinez, J. C., Gomez Navarro, M, G. N., & Schaich, M. S. (2009). El proyecto de la estructura del Estadio Olímpico de Madrid. La adaptación y ampliación de una estructura existente a unos usos y condiciones diferentes y flexibles. Obtenido de Revista de Obras Públicas :  
[http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2009/2009\\_septiembre\\_3502\\_04.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2009/2009_septiembre_3502_04.pdf)
- Fomento, M. d. (2008). Intrucciones del Hormigón Estructural. Madrid: Secretaria General técnica .
- Giménez Azorin, R. (2019). Diseño y cálculo de la estructura de un estadio deportivo. Obtenido de Universidad Politecnica de Valencia:  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/125481>
- Rui-Wamba, J. M. (1981). Consideraciones sobre la orientación y dimensiones de un campo de fútbol y sobre la geometría tria de los graderíos. Obtenido de ESTEYCO S. A:  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiXvbqdgeTqAhUOhOAKHeOqBxQQFjAAegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Finformesdelaconstruccion.revistas.csic.es%2Findex.php%2Finformesdelaconstruccion%2Farticle%2Fdownload%2F2191%2F2510&usg=AOvVa>
- Herrero, M. L. (Abril de 2012). Diseño y cálculo estructural de un estadio. Obtenido de Universidad Pública de Navarra: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/handle/2454/6264>
- Beltrán , O. E. (Mayo de 2012). Diseño de pórticos espaciales abiertos resistnetes al viento para facilidades pretroleras e industriales. Obtenido de Escuela Politécnica del Ejército : <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/5390>
- Jiménez , A. (2016). Análisis Técnico y Económico de tenso estructura como propuesta de cubierta para el palco del estadio olímpico Atahualpa. Obtenido de Pontificia Universidad Catolica del Ecuador:  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjKhojj45vrAhWiv1kKHSsEBEsQFjAAegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Frepositorio.puce.edu.ec%2Fhandle%2F22000%2F11068&usg=AOvVaw2FQKblNCnnzysN21x3od9d>
- Fernandez García , M. (Septiembre de 2014). Nueva cubierta para el estadio municipal de Riazor. Obtenido de Universidad da Coruña:  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiJupKo45vrAhWPnFkKHZ2YAimQFjAAegQIBRAB&url=ht>



- Ellis, B. R., Ji, T., & Littler, J. D. (2000). The response of grandstands to dynamic crowd loads. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*.
- Ellis, B. R., & Ji, T. (2004). Loads generated by jumping crowds: numerical modelling. *Structural Engineer*.
- Thasrifa, M., Thowsif, M., & Ramaswamy, K. P. (2020). Effects of crowd behavior on dynamic responses of permanent grandstand structure. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing.
- Jovanović, M. &. (2018). A Human Crowd Effect Modelled by The Discrete-Time Fourier Series. *Facta Universitatis*.