



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS**

TESIS

**EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE LOSAS METÁLICAS COMPUESTAS CON CLAROS
GRANDES ANTE VIBRACIONES PROVOCADAS POR CARGAS RÍTMICAS**

PRESENTA

I.C. Luis Daniel Vela Ortiz

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON ESPECIALIDAD EN
ESTRUCTURAS**

TUTORES

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

M.I. Daniel Enrique Reyna Valdivia

COMITÉ TUTORAL

Dr. Mario Eduardo Zermeño De León

Aguascalientes, Ags. 27 de Noviembre de 2023

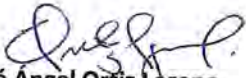
CARTA DE VOTO APROBATORIO
COMITÉ TUTORAL

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL
DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

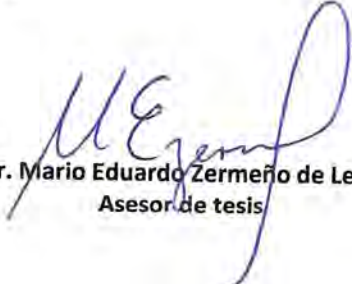
Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutorial** designado del estudiante **LUIS DANIEL VELA ORTIZ** con ID **96793** quien realizó la tesis titulada: **EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE LOSAS METÁLICAS COMPUESTAS CON CLAROS GRANDES ANTE VIBRACIONES PROVOCADAS POR CARGAS RÍTMICAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"
Aguascalientes, Ags., a 27 de noviembre de 2023.


Dr. José Ángel Ortiz Lozano
Tutor de tesis


M. en Ing. Daniel Enrique Reyna Valdivia
Co-tutor de tesis


Dr. Mario Eduardo Zermeño de León
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 27/11/2023

NOMBRE: LUIS DANIEL VELA ORTIZ

ID 96793

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL LGAC (del posgrado): ESTRUCTURAS

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico
EVALUACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE LOSAS METÁLICAS COMPUESTAS CON CLAROS GRANDES ANTE VIBRACIONES PROVOCADAS POR CARGAS RÍTMICAS

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): SE DESARROLLO UNA COMPARACION CUANTITATIVA ENTRE LA METODOLOGIA TRADICIONAL MARCADA POR LA NORMATIVA MEXICANA PARA LA EVALUACIÓN POR VIBRACIONES PARA SISTEMAS DE PISO COMPUESTOS Y LOS RESULTADOS DE ACELERACIÓN DE ENTREPISO OBTENIDAS CON UN MODELO REFINADO EN SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS, ENCONTRANDO QUE ESTA ÚLTIMA SUGIERE RESULTADOS MENOS CONSERVADORES PARA TABLEROS DE DIMENSIÓN CONSIDERABLE.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
N.A.				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
SI				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado

SI X

No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. Mario Eduardo Bermeño De León

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Marín

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. en Amb. Ant. Mario Ernesto Esparza Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Mtra. en Ing. Amb. Ma. Guadalupe Lira Peralta

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por esa constante evolución y desarrollo de programas vanguardistas, que permiten el desarrollo integral de sus estudiantes.

A mis profesores, compañeros, amigos y personal administrativo del Centro de Ciencias del Diseño y la Construcción que, en mayor o menor medida, contribuyeron para que el día de hoy mis compañeros y yo estemos concluyendo este hito académico, profesional y personal de nuestras vidas.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el apoyo económico, que me permitió concentrar los esfuerzos en el cumplimiento de mis obligaciones académicas y de investigación, aportando al desarrollo de México como un país moderno y competitivo.

Dr. José Ángel Ortiz Lozano, gracias por su paciencia y ese compromiso inquebrantable con el desarrollo de la ingeniería estructural mexicana, así como esa pasión por compartir sus conocimientos, sin los cuales hubiera sido imposible la culminación del trabajo.

A Usted, M.I Daniel Reyna Valdivia, por brindarme todos esos consejos basados en la experiencia que sólo una carrera profesional como la de Usted, puede dar.

Y gracias a Usted, Dr. Mario Eduardo Zermeño de León, por esa forma tan especial de enseñar, en la que busca que lleguemos al entendimiento profundo de los problemas de investigación o de cualquier índole.

DEDICATORIAS

A ti, Madre y a ti, Gerry por su apoyo y amor incondicional y todas las lecciones de vida que me permiten ser quien soy, el día de hoy y estar siempre buscando formas para crecer como persona y como familia.

A ti, Miss, porque me enseñaste el significado de aprender, no sólo los aspectos escolares sino el valor de amar lo que haces, con esa entrega tuya a la docencia.

A ustedes, Sonia, Ramón y José por interesarse y aconsejarme, siempre de manera auténtica, en mis decisiones profesionales y personales.

A ti, Jimbo, por tantas noches de desvelo conmigo, porque siempre me demostraste el significado de la lealtad y por regalarnos el cariño de esas dos chicas: Cherry y Kia, que nos aligeran tu ausencia.

Y por supuesto, a ti, mi Preciosa Pip, mi amiga y mi cómplice, porque día a día estás a mi lado creciendo conmigo y convirtiéndote en mi principal motivo de superación y felicidad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ACRÓNIMOS.....	12
NOTACIÓN DE ECUACIONES	13
RESUMEN	16
ABSTRACT	17
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 HIPÓTESIS	22
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	22
1.3 OBJETIVOS PARTICULARES.....	22
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	24
2.1. ANTECEDENTES DE FALLAS ESTRUCTURALES POR FENÓMENOS ASOCIADOS A VIBRACIONES..24	
2.1.1 PUENTE DE BROUGHTON	24
2.1.2 PUENTE DE ANGERS	24
2.1.3 SISMO DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1985	25
2.1.4 MILLENIUM BRIDGE.....	26
2.1.5 CENTRO COMERCIAL TECHNO MART	27
2.2 INVESTIGACIONES RELACIONADAS	27
2.3 CRITERIOS DE REVISIÓN DEL ESTADO LÍMITE DE VIBRACIONES.....	30
2.3.1 NORMATIVA MEXICANA.....	30
2.3.2 GUÍA DE DISEÑO 11 DEL AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION (DG11)	32
2.4 FUNCIONES DINÁMICAS DE FRECUENCIA	34
2.4.1 CRITERIO DE FAISCA.....	34
2.4.2 CRITERIO DE MILLÁN.....	37
2.5. ANÁLISIS Y MODELACIÓN ESTRUCTURAL	41
2.5.1 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO.....	41
2.5.2. SOFTWARE DE MODELACIÓN.....	42
2.6 CASO DE ESTUDIO	42
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	45
3.1 ZONIFICACIÓN DE ENTREPISO	45
3.2 DEFINICIÓN DE TABLEROS CRÍTICOS Y NODOS DE CONTROL.	46
3.3 ÁREA DE LA PISTA DE BAILE (A_p):	47
3.4 JERARQUÍA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	47

3.5 SEPARACIÓN ENTRE VIGAS.....	48
3.6 ESTIMACIÓN DE POBLACIÓN EJECUTANDO ACTIVIDADES RÍTMICAS EN PISTA DE BAILE	49
3.6.1 POBLACIÓN MÁXIMA ($N_{máx}$)	49
3.6.2. POBLACIÓN MÍNIMA ($N_{mín}$).....	50
3.7 DEFINICIÓN DE CARGAS.....	50
3.7.1 CARGAS MUERTAS (CM)	50
3.7.2 CARGAS VIVAS (CV).....	51
3.8 MATERIALES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	52
3.8.1 ACERO EN PERFILES IPR.....	52
3.8.2 ACERO EN LÁMINA ACANALADA	52
3.8.3. CONCRETO EN CAPA DE COMPRESIÓN	53
3.9 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE PISO.....	54
3.9.1. SECCIONES DE VIGAS.....	54
3.9.2. SECCIONES DE COLUMNAS.....	56
3.9.3. LÁMINA ACANALADA Y CAPA DE COMPRESIÓN	57
3.10. PROPIEDADES DEL SISTEMA DE PISO TRABAJANDO COMO SECCIÓN COMPUESTA.....	58
3.10.1. RELACIÓN MODULAR (n)	58
3.10.2. ANCHO EFECTIVO (B)	58
3.10.3. ANCHO EFECTIVO TRANSFORMADO.....	59
3.10.4. CENTROIDE DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (y_t)	59
3.10.5. MOMENTO DE INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (I_t).....	60
3.11. METODOLOGÍA DE LA GUÍA 11 DEL AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION	61
3.11.1. CARGA TOTAL DEL SISTEMA ESTRUCTURAL (C_T).....	61
3.11.2 MASA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL (M_T).....	62
3.11.3 DEFORMACIONES EN ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PISO.....	62
3.11.4 FRECUENCIA NATURAL DEL TABLERO	67
3.11.5 DEFINICIÓN DE AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL	68
3.11.6 CÁLCULO DE LAS ACELERACIONES PICO DE ENTREPISO	69
3.12 MODELACIÓN NUMÉRICA	72
3.12.1 MODELO NUMÉRICO CON ELEMENTOS TIPO DECK	73
3.12.2 MODELO NUMÉRICO CON ELEMENTOS TIPO SHELL	79
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	89
4.1 ÁREA DE LA PISTA DE BAILE	89
4.2. ESTIMACIÓN DE POBLACIÓN REALIZANDO ACTIVIDADES RÍTMICAS EN PISTA DE BAILE.....	89
4.2.1 POBLACIÓN MÁXIMA ($N_{máx}$)	89
4.2.2 POBLACIÓN MÍNIMA ($N_{mín}$).....	90

4.3 DEFINICIÓN DE CARGAS.....	91
4.3.1 CARGA VIVA MÁXIMA EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDAD RÍTMICA (CV_{MAX}).....	91
4.4 MATERIALES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	91
4.4.1. CONCRETO EN CAPA DE COMPRESIÓN.....	91
4.5. PROPIEDADES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DE PISO TRABAJANDO COMO SECCIÓN COMPUESTA.....	92
4.5.1. RELACIÓN MODULAR (n).....	92
4.5.2. ANCHO EFECTIVO (B).....	92
4.5.3. ANCHO EFECTIVO TRANSFORMADO.....	93
4.5.4. CENTROIDE DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (y_t).....	94
4.5.5. MOMENTO DE INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (I_t).....	94
4.6 METODOLOGÍA DE LA GUÍA 11 DEL AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION.....	95
4.6.1 CARGA TOTAL DEL SISTEMA PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL.....	95
4.6.2 MASA TOTAL DEL SISTEMA ESTRUCTURAL (M_T).....	96
4.6.3 DEFORMACIONES EN LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PISO.....	96
4.6.4. CÁLCULO DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL SISTEMA DE PISO (f_n).....	99
4.6.5. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL (β).....	100
4.6.6. CÁLCULO DE LAS ACELERACIONES PICO DE ENTREPISO.....	100
4.7 RESULTADOS DE LOS MODELOS REFINADOS EN SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS.....	107
4.7.1 MODELO CON ELEMENTOS TIPO DECK.....	107
4.7.2 MODELO CON ELEMENTOS TIPO SHELL.....	115
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	137
5.1 PROPIEDADES DE LA SECCIÓN COMPUESTA.....	137
5.2 DEFORMACIONES.....	138
5.3 FRECUENCIA NATURAL.....	140
5.4 ACELERACIONES PICO.....	142
5.4.1 ACTIVIDADES RÍTMICA DE LA DG11.....	142
5.4.2 ACTIVIDADES RÍTMICAS DE FAISCA.....	144
5.4.3. RITMOS DE BAILE DE MILLÁN.....	145
5.4.4 NIVELES DE PERCEPCIÓN DE ACELERACIÓN Y SENSACIÓN DE CONFORT DE LOS USUARIOS.....	146
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES.....	154
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA.....	159

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PARÁMETROS PARA CÁLCULO DE ACELERACIÓN PICO DE ACTIVIDADES RÍTMICAS (DG11)	33
TABLA 2. PARÁMETROS PROPUESTOS PARA ACTIVIDADES RÍTMICAS DE FAISCA.....	35
TABLA 3. FACTOR DE IMPACTO (K_p) PARA LOS 4 RITMOS DE BAILE	38
TABLA 4. COEFICIENTES DE FOURIER PARA EL RITMO DE BACHATA	38
TABLA 5. COEFICIENTES DE FOURIER PARA EL RITMO DE MERENGUE.....	39
TABLA 6. COEFICIENTES DE FOURIER PARA EL RITMO DE REGGAETÓN	40
TABLA 7. COEFICIENTES DE FOURIER PARA EL RITMO DE SALSA.....	41
TABLA 8. CARGAS MUERTAS CONSIDERADAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA DE PISO.....	50
TABLA 9. PROPIEDADES DE VIGAS Terciarias DEL SISTEMA DE PISO.....	54
TABLA 10. PROPIEDADES DE VIGAS SECUNDARIAS DEL SISTEMA DE PISO.....	55
TABLA 11. PROPIEDADES DE VIGAS PRINCIPALES DEL SISTEMA DE PISO.....	56
TABLA 12. PROPIEDADES DE COLUMNAS.....	56
TABLA 13. FRACCIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (β) PARA DIFERENTES SISTEMAS DE PISO	68
TABLA 14. FACTOR DE AJUSTE DE INERCIA DE VIGAS IPR EN MODELO CON SHELLS	82
TABLA 15. PARÁMETROS PARA CÁLCULO DE ACELERACIÓN EN PISTA DE BAILE CON 240 PERSONAS.....	100
TABLA 16. PARÁMETROS PARA CÁLCULO DE ACELERACIÓN EN PISTA DE BAILE CON 120 PERSONAS.....	104
TABLA 17. PROPIEDADES DE SECCIÓN TRANSFORMADA DE VIGAS Terciarias EN MODELO CON DECKS..	108
TABLA 18. PROPIEDADES DE SECCIÓN TRANSFORMADA DE VIGAS SECUNDARIAS EN MODELO CON DECKS	108
TABLA 19. PROPIEDADES DE SECCIÓN TRANSFORMADA DE VIGAS PRINCIPALES EN MODELO CON DECKS	108
TABLA 20. RELACIÓN DE ESFUERZOS EN VIGAS Terciarias PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE....	109
TABLA 21. RELACIÓN DE ESFUERZOS EN VIGAS SECUNDARIAS PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE	109
TABLA 22. RELACIÓN DE ESFUERZOS EN VIGAS PRINCIPALES PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE .	109
TABLA 23. REVISIÓN POR DEFORMACIONES EN VIGAS Terciarias PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE	110

TABLA 24. REVISIÓN POR DEFORMACIONES EN VIGAS SECUNDARIAS PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE 111

TABLA 25. REVISIÓN POR DEFORMACIONES EN VIGAS PRINCIPALES PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE 112

TABLA 26. DEFORMACIONES EN VIGAS Terciarias PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL. 113

TABLA 27. DEFORMACIONES EN VIGAS SECUNDARIAS PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL. 113

TABLA 28. DEFORMACIONES EN VIGAS PRINCIPALES PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL. 113

TABLA 29. FRECUENCIA NATURAL DE PANEL COMPUESTO POR VIGAS Terciarias Y VIGAS SECUNDARIAS. 114

TABLA 30. FRECUENCIA NATURAL DE PANEL COMPUESTO POR VIGAS SECUNDARIAS Y VIGAS SECUNDARIAS. 114

TABLA 31. FRECUENCIAS Y PORCENTAJES DE PARTICIPACIÓN MODAL PARA LOS PRIMEROS 10 MODOS.... 121

TABLA 32. DIFERENCIAS ENTRE INERCIA DE SECCIÓN DE ACERO SIMPLE CONTRA INERCIA COMPUESTA.. 137

TABLA 33. COMPARACIÓN ENTRE MOMENTOS DE INERCIA COMO LA SECCIÓN COMPUESTA (I_T) 138

TABLA 34. DEFORMACIONES EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DEL SISTEMA DE PISO 139

TABLA 35. FRECUENCIAS NATURALES DE TABLERO CRÍTICO BAJO LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS..... 140

TABLA 36. ACELERACIONES PICO EN PISTA DE BAILE CON ACTIVIDADES PROPUESTAS EN LA DG11..... 143

TABLA 37. ACELERACIONES PICO PROVOCADAS POR ACTIVIDADES PROPUESTAS POR FAISCA..... 144

TABLA 38. ACELERACIONES PICO PROVOCADAS POR RITMOS DE BAILE DE MILLÁN 145

TABLA 39. EVALUACIÓN DE NIVELES ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE SEGÚN LA METODOLOGÍA DE LA GUÍA 11 DEL A.I.S.C PARA 120 PERSONAS 146

TABLA 40. EVALUACIÓN DE NIVELES ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE SEGÚN LA METODOLOGÍA DE LA GUÍA 11 DEL A.I.S.C PARA 240 PERSONAS. 147

TABLA 41. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDADES DE FAISCA (240 PERSONAS). 148

TABLA 42. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDADES DE FAISCA (120 PERSONAS). 148

TABLA 43. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN ZONA DE COMENSALES PARA ACTIVIDADES DE FAISCA (240 PERSONAS)..... 149

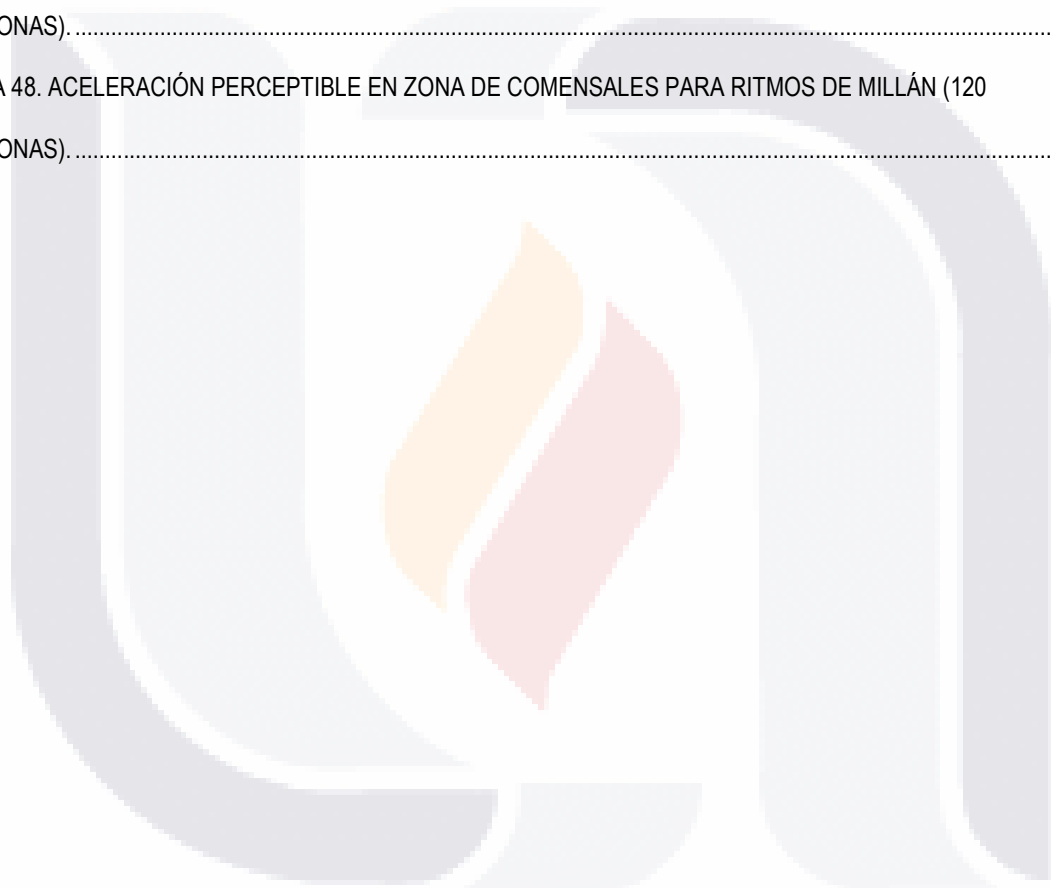
TABLA 44. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN ZONA DE COMENSALES PARA ACTIVIDADES DE FAISCA (120 PERSONAS)..... 150

TABLA 45. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE PARA RITMOS DE MILLÁN (240 PERSONAS)..... 150

TABLA 46. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE PARA RITMOS DE MILLÁN (120 PERSONAS)..... 151

TABLA 47. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN ZONA DE COMENSALES PARA RITMOS DE MILLÁN (240 PERSONAS)..... 151

TABLA 48. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN ZONA DE COMENSALES PARA RITMOS DE MILLÁN (120 PERSONAS)..... 152



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Puente suspendido de Broughton. Fuente: Fernández, 2014, Sin nombre [Foto], recuperado de <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/01/colapsos-estructurales-historicos-parte-3-del-ano-1500-al-1831/> 24

Fig. 2 – Colapso del puente de Angers. Fuente: Fernández, 2014, Sin nombre [Foto], recuperado de <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/04/colapsos-estructurales-historicos-parte-5-ano-1850/>..... 25

Fig. 3 – Colapso del puente de Angers. Fuente: Fernánde, 2014, Sin nombre [Foto], recuperado de <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/04/colapsos-estructurales-historicos-parte-5-ano-1850/>..... 26

Fig. 4 – Vista Aérea del Millenium Brigde. Fuente: Foster&Partners, Sin nombre [Fotografía], recuperada de <https://www.fosterandpartners.com/projects/millennium-bridge>..... 26

Fig. 5 – Zonas de medición de vibración y ubicación de potenciales fuentes de vibración del centro comercial Techno Mart. Fuente: En Vertical Shaking Accident and Cause Investigation of 39-story Office Building, Chung et al., 2016, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 15, p. 621. 27

Fig. 6 - Límites de aceleración perceptible de la normativa mexicana. Adaptada de NTC-DCEA 2020, Gobierno de la Ciudad de México, 2020, p. 199. 31

Fig. 7 - Límites de aceleración perceptible de la DG11. Adaptada de DG11, (Murray et al., 2003), Steel Design Guide Series, Vol. 11, p. 7..... 34

Fig. 8 – Coeficiente de variación de carga para la función de Faisca. Fuente: Multimode vibration control of building steel–concrete composite floors submitted to human rhythmic activities, Gaspar et al., 2016, Computer & Structures, Vol. 165, p. 107-122..... 36

Fig. 9 – Variación de carga de una persona, saltando a voluntad con la función de Faisca. Fuente: Elaboración propia. 36

Fig. 10 – Variación de carga de una persona, realizando aerobics con la función de Faisca. Fuente: Elaboración propia. 37

Fig. 11 – Variación de carga de una persona, actuando como multitud con la función de Faisca. Fuente: Elaboración propia 37

Fig. 12 – Variación de carga de una persona, bailando al ritmo de bachata. Fuente: Elaboración propia 39

Fig. 13 – Variación de carga de una persona, bailando al ritmo de merengue. Fuente: Elaboración propia. 40

Fig. 14 – Variación de carga de una persona, bailando al ritmo de reggaetón. Fuente: Elaboración propia. 40

Fig. 15 – Variación de carga de una persona, bailando al ritmo de salsa. Fuente: Elaboración propia. 41

Fig. 16 – Render de fachada principal de salón de usos múltiples. Fuente: Arkylab..... 43

Fig. 17 – Planta estructural del salón de usos múltiples. Fuente: Elaboración propia..... 43

Fig. 18 - Zonificación de entepiso de caso de estudio. Fuente: Elaboración propia..... 45

Fig. 19 - Definición de tableros críticos para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia..... 46

Fig. 20 - Ubicación de nodos de control para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia..... 47

Fig. 21 – Jerarquía y dimensiones de elementos en tablero crítico. Fuente: Elaboración propia..... 48

Fig. 22 – Separación entre vigas principales. Fuente: Elaboración propia..... 49

Fig. 23 Sección transversal de vigas terciarias. Fuente: Elaboración propia..... 55

Fig. 24 Sección transversal de vigas secundarias. Fuente: Elaboración propia..... 55

Fig. 25 Sección transversal de vigas principales. Fuente: Elaboración propia..... 56

Fig. 26 Sección transversal de columnas. Fuente: Elaboración propia..... 57

Fig. 27 – Propiedades del sistema compuesto. Fuente: Elaboración Propia..... 57

Fig. 28 – Esquema general de una sección compuesta. Fuente: Elaboración Propia..... 59

Fig. 29 – Esquema general de una sección compuesta transformada. Fuente: Elaboración Propia..... 59

Fig. 30 – Ubicación de ejes de referencia utilizados para cálculo de centroide de sección transformada. Fuente:
Elaboración Propia..... 60

Fig. 31 – Condición de carga actuando sobre vigas principales. Fuente: Elaboración Propia..... 63

Fig. 32 – Área tributaria actuando sobre vigas principales. Fuente: Elaboración Propia..... 64

Fig. 33 – Aceleración límite para actividades de cena o baile. Fuente: Elaboración Propia..... 71

Fig. 34 – Aceleración límite para actividades de saltos, conciertos y bailes masivos. Fuente: Elaboración Propia..... 71

Fig. 35 – Planta general de modelo con elementos tipo Deck. Fuente: Elaboración Propia..... 73

Fig. 36 – Vista isométrica con renderizado 3D de modelo con elementos tipo Deck. Fuente: Elaboración Propia..... 74

Fig. 37 – Perspectiva inferior de modelo con elementos tipo Deck. Fuente: Elaboración Propia..... 74

Fig. 38 – Propiedades del concreto usado en modelo estructural en modelos numéricos. Fuente: Elaboración Propia ... 74

Fig. 39 – Propiedades del acero en vigas IPR de modelos numéricos. Fuente: Elaboración Propia..... 75

Fig. 40 – Propiedades de la lámina acanalada y capa de compresión de modelos numéricos. Fuente: Elaboración Propia
..... 76

Fig. 41 – Planta general de modelo con elementos tipo Shell. Fuente: Elaboración Propia..... 79

Fig. 42 – Vista isométrica con renderizado 3D de modelo con elementos tipo Shell. Fuente: Elaboración Propia..... 80

Fig. 43 – Perspectiva inferior de modelo con elementos tipo Shell. Fuente: Elaboración Propia..... 80

Fig. 44 – Propiedades de la sección de concreto equivalente en modelo con Shells. Fuente: Elaboración Propia..... 81

Fig. 45 – Modificación de momento de inercia de vigas terciarias. Fuente: Elaboración Propia 82

Fig. 46 – Modificación de momento de inercia de vigas secundarias. Fuente: Elaboración Propia 83

Fig. 47 – Modificación de momento de inercia de vigas principales. Fuente: Elaboración Propia 83

Fig. 48 – Ubicación de zonas y nodos de control en modelo con Shells. Fuente: Elaboración Propia 84

Fig. 49 – Modelo estructural cargado con 240 personas. Fuente: Elaboración Propia 84

Fig. 50 – Modelo estructural cargado con 120 personas. Fuente: Elaboración Propia 85

Fig. 51 Definición de función tiempo-historia para el ritmo de Reggaetón. Fuente: Elaboración propia. 86

Fig. 52 – Pista de baile ocupada con 240 personas. Fuente: Elaboración Propia..... 90

Fig. 53 – Pista de baile cargada con 120 personas. Fuente: Elaboración propia..... 90

Fig. 54 Relación de esfuerzos de elementos en modelo estructural ante cargas gravitacionales. Fuente: Elaboración propia..... 109

Fig. 55 Deformaciones globales de tableros en modelo estructural con Decks. Fuente: Elaboración propia. 110

Fig. 56- Desplazamiento máximo de nodo central de vigas principales de modelo con Shells. Fuente: Elaboración propia. 115

Fig. 57- Desplazamiento de nodo central de vigas secundarias de modelo con Shells. Fuente: Elaboración propia..... 116

Fig. 58- Desplazamiento a un tercio del claro de vigas principales de modelo con Shells. Fuente: Elaboración propia.. 116

Fig. 59 - Desplazamiento de nodo central de vigas terciarias en modelo con Shells. Fuente: Elaboración propia..... 117

Fig. 60 Modo de vibrar No. 1 (Frecuencia = 5.66 Hz). Fuente: Elaboración propia..... 119

Fig. 61 Modo de vibrar No. 2 (Frecuencia = 6.10 Hz). Fuente: Elaboración propia..... 119

Fig. 62 Modo de vibrar No. 3 (Frecuencia = 7.08 Hz). Fuente: Elaboración propia..... 119

Fig. 63 Modo de vibrar No. 4 (Frecuencia = 7.14 Hz). Fuente: Elaboración propia..... 120

Fig. 64 Modo de vibrar No. 5 (Frecuencia = 8.03 Hz). Fuente: Elaboración propia..... 120

Fig. 65 Modo de vibrar No. 6 (Frecuencia = 9.35 Hz). Fuente: Elaboración propia..... 120

Fig. 66 Modo de vibrar No. 7 (Frecuencia = 10.56 Hz). Fuente: Elaboración propia..... 121

Fig. 67 Modo de vibrar No. 8 (Frecuencia = 11.76 Hz). Fuente: Elaboración propia..... 121

Fig. 68 Aceleración en zona de comensales con 120 personas realizando aerobics. Fuente: Elaboración propia. 122

Fig. 69 Aceleración en pista de baile con 120 personas realizando aerobics. Fuente: Elaboración propia. 122

Fig. 70 Aceleración en zona de comensales con 240 personas realizando aerobics. Fuente: Elaboración propia. 123

Fig. 71 Aceleración en pista de baile con 240 personas realizando aerobics. Fuente: Elaboración propia. 123

Fig. 72 Aceleración en zona de comensales con 120 personas moviéndose como multitud. Fuente: Elaboración propia. 124

Fig. 73 Aceleración en pista de baile con 120 personas realizando movimientos como multitud. Fuente: Elaboración propia. 124

Fig. 74 Aceleración en zona de comensales con 240 personas moviéndose como multitud. Fuente: Elaboración propia. 125

Fig. 75 Aceleración en pista de baile con 240 personas realizando movimientos como multitud. Fuente: Elaboración propia. 125

Fig. 76 Aceleración en zona de comensales con 120 personas saltando. Fuente: Elaboración propia. 126

Fig. 77 Aceleración en pista de baile con 120 personas saltando. Fuente: Elaboración propia. 126

Fig. 78 Aceleración en zona de comensales con 240 personas saltando. Fuente: Elaboración propia. 127

Fig. 79 Aceleración en pista de baile con 240 personas saltando. Fuente: Elaboración propia. 127

Fig. 80 Aceleración en zona de comensales con 120 personas bailando Bachata. Fuente: Elaboración propia. 128

Fig. 81 Aceleración en pista de baile con 120 personas bailando Bachata. Fuente: Elaboración propia. 128

Fig. 82 Aceleración en zona de comensales con 240 personas bailando Bachata. Fuente: Elaboración propia. 129

Fig. 83 Aceleración en pista de baile con 240 personas bailando Bachata. Fuente: Elaboración propia. 129

Fig. 84 Aceleración en zona de comensales con 120 personas bailando Merengue. Fuente: Elaboración propia. 130

Fig. 85 Aceleración en pista de baile con 120 personas bailando Merengue. Fuente: Elaboración propia. 130

Fig. 86 Aceleración en zona de comensales con 240 personas bailando Merengue. Fuente: Elaboración propia. 131

Fig. 87 Aceleración en pista de baile con 240 personas bailando Merengue. Fuente: Elaboración propia. 131

Fig. 88 Aceleración en zona de comensales con 120 personas bailando Reggaetón. Fuente: Elaboración propia. 132

Fig. 89 Aceleración en pista de baile con 120 personas bailando Reggaetón. Fuente: Elaboración propia. 132

Fig. 90 Aceleración en zona de comensales con 240 personas bailando Reggaetón. Fuente: Elaboración propia. 133

Fig. 91 Aceleración en pista de baile con 240 personas bailando Reggaetón. Fuente: Elaboración propia. 133

Fig. 92 Aceleración en zona de comensales con 120 personas bailando Salsa. Fuente: Elaboración propia..... 134

Fig. 93 Aceleración en pista de baile con 120 personas bailando Salsa. Fuente: Elaboración propia..... 134

Fig. 94 Aceleración en zona de comensales con 240 personas bailando Salsa. Fuente: Elaboración propia..... 135

Fig. 95 Aceleración en pista de baile con 240 personas bailando Salsa. Fuente: Elaboración propia..... 135



ACRÓNIMOS

AISC	American Institute of Steel Construction
DG11	Design Guide No. 11 del AISC
NTC-DCEA (2020)	Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Acero, Versión 2020



NOTACIÓN DE ECUACIONES

a	Distancia entre los apoyos de vigas principales y eje de vigas secundarias.
a_m	Aceleración efectiva máxima para actividades rítmicas.
a_p	Aceleración pico para actividades rítmicas.
a_0	Aceleración límite para actividades rítmicas.
A_h	Superficie habitable para personas en una sala de reunión.
A_i	Área de la figura, i , que conforma la sección compuesta.
A_P	Área de la pista de baile.
A_S	Área de la sección de acero de vigas IPR.
A_{VP}	Área de la sección transversal de vigas principales.
A_{VS}	Área de la sección transversal de vigas secundarias.
A_{VT}	Área de la sección transversal de vigas terciarias.
B	Ancho efectivo de la sección compuesta general.
B_{VP}	Ancho efectivo de la sección compuesta de vigas principales.
B_{VS}	Ancho efectivo de la sección compuesta de vigas secundarias.
B_{VT}	Ancho efectivo de la sección compuesta de vigas terciarias.
B_t	Ancho efectivo transformado de la sección compuesta general.
$B_{i(VP)}$	Ancho efectivo transformado de la sección compuesta de vigas principales.
$B_{i(VS)}$	Ancho efectivo transformado de la sección compuesta de vigas secundarias.
$B_{i(VT)}$	Ancho efectivo transformado de la sección compuesta de vigas terciarias.
B_P	Ancho de la pista de baile.
CD	Coefficiente de variación de carga.
CM	Carga muerta.
C_T	Carga total considerada para el cálculo de la frecuencia natural.
CV	Carga viva.
CV_{MAX}	Carga viva máxima para evaluación de actividades rítmicas.
CV_{MIN}	Carga viva mínima para evaluación de actividades rítmicas.
CV_{EL}	Carga viva uniforme en pista de baile.
CV_{COM}	Carga viva uniforme en pista de restaurantes, según CMA.
d	Peralte total de las secciones de acero IPR.
d_c	Espesor de concreto por encima de la cresta de la lámina acanalada.

\bar{d}_i	Distancia medida desde el centroide de una figura, i , hasta el centroide de la sección compuesta.
d_{VP}	Peralte total de vigas principales.
d_{VS}	Peralte total de vigas secundarias
d_{VT}	Peralte total de vigas terciarias.
E_c	Módulo de elasticidad estático del concreto.
E_{CM}	Módulo de elasticidad dinámico del concreto.
E_s	Módulo de elasticidad del acero.
$f'c$	Resistencia nominal del concreto a compresión.
f	Frecuencia forzada.
f_n	Frecuencia natural del sistema de piso.
F_y	Esfuerzo de fluencia del acero en perfiles IPR.
$F_{y-lám}$	Esfuerzo de fluencia del acero en lámina acanalada.
$F_{u-lám}$	Esfuerzo de ruptura del acero en lámina acanalada.
g	Aceleración de la gravedad.
$h_{lám}$	Peralte de la lámina acanalada.
I	Momento de inercia, alrededor del eje mayor de vigas, en general.
$I_{t(VP)}$	Momento de inercia transformado, alrededor del eje mayor, de vigas principales.
$I_{t(VS)}$	Momento de inercia transformado, alrededor del eje mayor, de vigas secundarias.
$I_{t(VT)}$	Momento de inercia transformado, alrededor del eje mayor, de vigas terciarias.
I_{VP}	Momento de inercia, alrededor del eje mayor, de vigas principales.
I_{VS}	Momento de inercia, alrededor del eje mayor, de vigas secundarias.
I_{VT}	Momento de inercia, alrededor del eje mayor, de vigas terciarias.
K_P	Factor de impacto para las actividades rítmicas.
L	Longitud general de vigas.
L_P	Largo de la pista de baile.
L_{VT}	Longitud de vigas terciarias.
L_{VS}	Longitud de vigas secundarias.
L_{VP}	Longitud de vigas principales.
n	Relación modular.
$N_{máx}$	Número máximo de personas realizando actividades rítmicas en pista de baile.
$N_{mín}$	Número mínimo de personas realizando actividades rítmicas en pista de baile.
P_{IND}	Peso promedio de personas en pista de baile.

PP_{VP}	Peso propio de vigas principales.
PP_{VS}	Peso propio de vigas secundarias.
PP_{VT}	Peso propio de vigas terciarias.
s	Separación general de vigas.
s_{VP}	Separación entre vigas principales.
s_{VS}	Separación entre vigas secundarias.
s_{VT}	Separación entre vigas terciarias.
T	Tiempo total de duración de cada ciclo de actividad rítmica de Faisca.
T_c	Tiempo en contacto con la plataforma de los individuos realizando la actividad.
w	Carga de servicio por unidad de longitud.
w_p	Peso de los participantes sobre el sistema de piso.
w_t	Peso total del sistema de piso, incluido el de los participantes.
\bar{y}_i	Distancia medida desde el centroide de una figura, i , hasta el eje de referencia.
\bar{y}_t	Centroide de la sección compuesta.
$\bar{y}_{t(VP)}$	Centroide de la sección compuesta de vigas principales.
$\bar{y}_{t(VS)}$	Centroide de la sección compuesta de vigas secundarias.
$\bar{y}_{t(VT)}$	Centroide de la sección compuesta de vigas terciarias.
α_i	Coefficiente de Fourier para el i -ésimo armónico.
β	Amortiguamiento estructural.
γ_c	Peso volumétrico del concreto.
Δ_T	Deformación global del sistema de piso.
Δ_{VP}	Deformación máxima, al centro del claro, de vigas principales.
Δ_{VS}	Deformación máxima, al centro del claro, de vigas secundarias.
Δ_{VT}	Deformación máxima, al centro del claro, de vigas terciarias.
Δ_{P1}	Deformación máxima en vigas principales por efecto de cargas puntuales.
Δ_{P2}	Deformación máxima en vigas principales por efecto de su peso propio.
ρ	Masa por unidad de longitud.

RESUMEN

Las actividades humanas rítmicas, llevadas a cabo sobre sistemas de piso metálicos con grandes claros libres, provocan niveles de vibración altos que pueden llegar a regir la respuesta dinámica de los entresijos, afectando no sólo a la zona destinada para la realización de los eventos, sino también a espacios aledaños que, en caso de no estar preparados para soportar tales sollicitaciones, reducirán la percepción de confort de los usuarios de las edificaciones y, en casos graves, pondrán en riesgo la integridad estructural de las obras, la seguridad de los ocupantes y las grandes inversiones económicas que se requieren para la construcción de este tipo de proyectos.

La normativa mexicana actual remite a la Guía de Diseño 11 del American Institute for Steel Construction para el estudio detallado del fenómeno de vibraciones humanas rítmicas en la que se plantea una metodología simplificada para la revisión del estado límite de servicio por vibraciones cuyos criterios de aceptación datan de finales del siglo pasado y vuelven a los tableros de piso con grandes dimensiones en proyectos económicamente inviables.

Investigaciones recientes caracterizan, de formas menos conservadoras, algunas de las actividades humanas rítmicas más comunes lo que, aunado al avance de las herramientas computacionales que permiten la construcción de modelos refinados, brindan a los diseñadores estructurales la posibilidad de realizar análisis detallados de sistemas de piso compuestos, que puedan resultar en estructuras más seguras, económicas y sustentables.

Este trabajo toma el caso práctico de estudio de un salón de usos múltiples, proyectado para construirse en el Estado de Aguascalientes; sobre él se realiza una comparativa entre los resultados obtenidos con la metodología tradicional y aquellos estimados tras la realización de 2 modelos computacionales sobre los que se definen funciones dinámicas, basadas en enfoques modernos, que permiten la obtención de las historias de aceleración en puntos de interés sobre la pista de baile y un tablero aledaño.

Palabras clave: vibraciones, actividades humanas rítmicas, sistemas de piso compuestos, aceleración perceptible, confort.

ABSTRACT

Human rhythmic activities, performed on floor systems with large free spans, cause high vibration levels that could determine the dynamic response of the affected story due to this phenomenon, affecting not only to the destined zone for the activity development but also adjacent bays, which in case they are not prepared to endure these external actions, will reduce the human comfort perception from the building users and, in grave cases, will compromise the structural integrity of the construction, the safety of the occupants and the big economic investments required for the construction of this type of projects.

The current Mexican regulations refer to the Design Guide 11 of the American Institute of Steel Construction for a detailed assessment of the human rhythmic vibrations, where it is stated a simplified methodology for the checking of the service limit state of vibrations whose acceptance criteria date from the late past century and turned the floor bays with big dimensions in economically unviable projects.

Recent research characterizes, in less conservative ways, some of the most common human activities that, in addition to the development of computational tools that allow the construction of refined models, provide to the structural designers the possibility to perform detailed composite floor analysis, that could result in safer, more economical, and sustainable structures.

This work takes a case-study of a multipurpose hall, projected to be built in the State of Aguascalientes, on which it is made a comparison between the results gotten with the traditional methodology and those estimated after the realization of 2 computer models on which they were defined dynamic functions, based on modern approaches, allowing the collecting of information regarding with the acceleration histories of interest points on the dance floor and an adjacent bay.

Key words: vibrations, human rhythmic activities, composite steel floors, noticeable acceleration, comfort.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Las exigencias arquitectónicas y tendencias de diseño contemporáneas, sumadas a las demandas de infraestructura que satisfaga las necesidades de entretenimiento y desenvolvimiento social de las urbes con proyecciones exponenciales de crecimiento, tanto poblacional como económico, dentro de las cuales podemos incluir al Municipio de Aguascalientes, requieren de obras intrépidas, con grandes espacios libres, valiéndonos de materiales ligeros como el acero para su edificación. Algunos ejemplos de este tipo de proyectos van desde los estadios a las salas de conciertos, los gimnasios y salones de baile, sólo por mencionar algunos.

Las vibraciones rítmicas son una condición a la que se someterán estos espacios la cual, de no ser estimada de manera efectiva, puede llegar a provocar problemas en la respuesta estructural de la construcción y, considerando el hecho que su uso está destinado normalmente, para grandes multitudes, cualquier nivel de falla es potencialmente catastrófico en términos económicos e incluso de pérdidas humanas.

Los sistemas de piso, particularmente aquellos con claros considerables, son los elementos más susceptibles a las consecuencias de la vibración no controlada, debido a que se trata de zonas con una flexibilidad alta; aunado a lo anterior, en ocasiones el diseño arquitectónico limita las dimensiones del peralte máximo de los elementos que conforman las losas, reduciendo, aún más, la rigidez de las losas.

Los efectos adversos de las vibraciones excesivas van desde la pérdida de sensación de confort de los usuarios del inmueble, hasta situaciones graves en que se puede provocar un daño estructural y potencialmente, el colapso de la edificación provocado por el fenómeno de la resonancia.

Los reglamentos de construcción mexicanos, específicamente las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Acero, versión 2020 (NTC-DCEA (2020)), cubren las revisiones para este estado límite de servicio con una metodología de análisis relativamente sencilla, basada en principios básicos la mecánica clásica de las estructuras, recomienda diseñar sistemas de piso con frecuencias naturales mínimas de 8 Hz, el cual, bajo los criterios marcados en el reglamento, sólo se puede lograr reduciendo las deformaciones globales de los tableros estudiados a niveles de 5.00 mm (NTC-DCEA,2020) , valor que para sistemas compuestos con claros grandes, requiere del uso de secciones de acero de peraltes considerables y/o una densidad de estructura que, en muchas ocasiones terminan volviendo a este tipo de proyectos, económicamente inviables.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Las últimas versiones de la normativa proponen el uso de modelos computacionales refinados que permitan una estimación realista y menos conservadora de las frecuencias naturales de vibración de los sistemas de piso compuestos, para lograr diseños más eficientes, sin embargo, no define con claridad el tipo de análisis, los procedimientos para modelar las diversas cargas rítmicas o las características propias de la modelación numérica sugerida. Aunado a lo anterior, el reglamento remite a publicaciones internacionales, específicamente la Guía de Diseño 11 del American Institute of Steel Construction (DG11), para realizar un análisis más detallado del fenómeno de vibraciones, en general, y de las perturbaciones provocadas por actividades rítmicas, de manera particular

El procedimiento de la DG11 para evaluar las vibraciones provocadas por cargas dinámicas rítmicas toma en cuenta diferentes factores, además de las deformaciones y la frecuencia natural, como lo son coeficientes de Fourier para tres tipos de eventos, así como el amortiguamiento estructural (Murray et al., 2003). Con ellos, se calculan aceleraciones de entrepiso que se pueden comparar directamente contra las aceleraciones máximas permitidas, las cuales se relacionan con el nivel de confort de los usuarios de la edificación. Similarmente a la normativa nacional, esta guía de diseño basa buena parte de la obtención de los parámetros mencionados en simplificaciones del comportamiento de los elementos del tablero y por ende, recomienda la realización de modelos numéricos computacionales, que permitan una predicción más eficiente de la respuesta estructural.

Muchas actividades humanas cotidianas, desde el caminar, el baile o las actividades físicas relacionadas con el ejercicio como correr o los aerobics, provocan vibraciones harmónicas sobre las estructuras y, dado que son fenómenos cuyos efectos son directamente relacionados con la forma particular en que cada persona ejecuta dicho tipo de actividad, impiden una caracterización física o matemática sencilla de este fenómeno. (Gaspar et al., 2016)

Normalmente, las series de Fourier han sido utilizadas desde hace tiempo para tratar de modelar el comportamiento humano durante actividades periódicas, sin embargo, en los últimos años se han desarrollado investigaciones que brindan a los diseñadores estructurales nuevos modelos de comportamiento humano para caracterizar las actividades rítmicas de forma más cercana a la realidad; estos han sido obtenidos a través de instrumentación de plataformas construidas en laboratorios, como el propuesto por Faisca, el cual evalúa, la gimnasia aeróbica, el comportamiento de un grupo de personas como multitud y los saltos a voluntad. (Faisca, 2013); otro enfoque, utiliza la representación del movimiento con series de Fourier pero buscando con coeficientes estimados para actividades específicas: un ejemplo de este último enfoque es el trabajo realizado por Millán, en el cual se determina, a través de la instrumentación de una plataforma de concreto construida en

laboratorio, los coeficientes dinámicos de la serie, los cuales brindan la posibilidad de evaluar las aceleraciones en sistemas de piso provocadas por 4 ritmos individuales. (Millán Yusti et al., 2013)

El objetivo de este trabajo es presentar una comparativa detallada entre los niveles de aceleración provocada por actividades rítmicas en sistemas de piso compuesto, obtenidos con la metodología que propone la normativa mexicana actual, específicamente la DG11, con las aceleraciones estimadas mediante modelos numéricos desarrollados en un software de elementos finitos, sobre el cual se modelen los eventos rítmicos, bajo los criterios de caracterización propuestos por Faisca y Millán. Los resultados pretenden llegar a conclusiones importantes que nos acerquen al establecimiento nuevas metodologías de diseño, logrando estructuras eficientes para contrarrestar los problemas asociados con las vibraciones excesivas, pero reduciendo la posibilidad de sobreestimación en la densidad de estructura requeridas para tal fin con los procedimientos de diseño actuales.

Para lograr lo anterior, se aplicará la metodología propuesta en un caso práctico de estudio, obtenido de la información preliminar de un proyecto arquitectónico y el proyecto estructural de un salón de usos múltiples, planteado para construirse en los próximos años dentro de las instalaciones de un Club Privado, ubicado en el Municipio de Aguascalientes, cuyo diseño estructural de entrepiso está planteado para resolverse con un sistema compuesto entre perfiles IPR de acero estructural, lámina acanalada y capa de compresión de concreto reforzado trabajando en conjunto por medio de conectores de cortante.

Para la modelación de la estructura se utiliza el programa ETABS V.20, desarrollado por Computers and Structures, Inc., el cual incluye un módulo que permite modelar secciones compuestas, considerando el efecto de los conectores de cortante en losas, las cuales conforman el sistema constructivo base que servirá para la obtención e interpretación de los análisis dinámicos a efectuarse. No menos importante es la posibilidad de obtener, directamente, las historias de aceleración en cualquier nodo del tablero que se desee estudiar, lo que convierte al software en un programa potencialmente útil para la evaluación de vibraciones en sistemas de piso.

Desde un punto de vista personal, la evaluación por el estado límite de servicio de vibraciones es un fenómeno poco entendido y muchas veces subestimado en las revisiones de proyectos estructurales reales, con todas las consecuencias que esto puede traer; este trabajo pretende brindar a los lectores, con un buen nivel de detalle, las consideraciones y limitaciones encontradas en los enfoques teóricos y prácticos de la investigación, así como recomendaciones útiles en lo que respecta a la modelación computacional de este tipo de fenómenos, coadyuvando a contar con obras más seguras, eficientes y cómodas para los usuarios.

1.1 HIPÓTESIS

Los modelos numéricos refinados de sistemas de piso compuestos de claros grandes, afectados por actividades humanas rítmicas, caracterizadas de acuerdo con enfoques modernos, predicen de una forma más precisa los parámetros que se relacionan con las aceleraciones pico en los tableros evaluados, resultando en la posibilidad de diseñar estructuras con claros grandes, construidas con este tipo de sistemas constructivos, seguras pero mucho más eficientes y económicas respecto a los criterios simplificados actuales de la normativa aplicable en México.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Establecer una metodología clara y relativamente simple que permita a los diseñadores estructurales obtener estimaciones más certeras de las propiedades dinámicas de sistemas de piso compuestos, así como de las aceleraciones pico para diferentes actividades rítmicas, de una forma segura y menos conservadora que el procedimiento marcado por las normas mexicanas y la DG11 del A.I.S.C, valiéndonos del avance de las capacidades computacionales actuales.

1.3 OBJETIVOS PARTICULARES

- Establecer de manera concisa las características propias de lo que las normativas definen como un modelo numérico refinado.
- Comparar las aceleraciones obtenidas según la metodología de la DG11 contra las obtenidas a partir de la definición de funciones dinámicas a partir de la caracterización de actividades rítmicas propuesta por Faisca así como de los coeficientes de Fourier investigados por Millán para 4 ritmos de baile.
- Definir la importancia de la consideración de la sección compuesta en sistemas de piso sometidos a vibraciones.
- Comparar los valores de los parámetros relevantes para la evaluación del estado límite por vibraciones, entre la modelación numérica y las metodologías tradicionales de revisión.
- Determinar el efecto del tipo de conexiones entre los elementos constitutivos de un sistema de piso compuesto en la respuesta estructural de un entrepiso



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE FALLAS ESTRUCTURALES POR FENÓMENOS ASOCIADOS A VIBRACIONES

2.1.1 PUENTE DE BROUGHTON

En 1831, se produjo uno de los primeros colapsos de estructuras registrados, causado por fenómenos relacionados con la vibración: el Puente de Broughton. Este se trató de uno de los primeros puentes colgantes construidos en Inglaterra, específicamente en 1826 por indicaciones de Irwin John Fitzgerald, con la finalidad de contar con una vía que permitiera cruzar el río Irwell y unir las poblaciones de Broughton y Pendleton, en las cercanías de Manchester.

Se trataba de una estructura de puente colgante de 144.00 m de claro, el cual colapsó cuando las tropas del 60° batallón del cuerpo de fusileros marchaban sincronizadamente sobre la construcción, a una frecuencia que coincidía con la frecuencia natural del puente, provocando que ésta comenzara a oscilar de manera excesiva al entrar en resonancia, provocando el colapso posterior de la obra.



Fig. 1 – Puente suspendido de Broughton. Fuente: Fernández, 2014, Sin nombre [Foto], recuperado de <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/01/colapsos-estructurales-historicos-parte-3-del-ano-1500-al-1831/>

2.1.2 PUENTE DE ANGERS

Posteriormente, en 1850 se produjo el colapso de otro puente colgante de 102.00 m de claro, que cruzaba el río Maine, en la ciudad de Angers, Francia, el cual fue construido entre 1836 y 1839 y diseñado por Bordillon y Joseph Chaley. Si bien se ha llegado a concluir que una buena parte del colapso se debió a fenómenos relacionados con corrosión en los cables que suspendían la estructura, se tienen registros de que el tablero comenzó a oscilar por efectos de los altos vientos que afectaban ese día a la ciudad, situación que empeoró

con el paso de un pelotón de alrededor de 1,000 soldados los cuales, al sentir los movimientos del puente y pese a que habían roto filas antes de ingresar a la calzada por los antecedentes conocidos de Broughton en 1831, provocaron que se produjeran acumulaciones de masa en puntos críticos de la estructura que coadyuvaron a la aparición de la resonancia estructural, causando en combinación con el daño por corrosión de los cables, el desplome del puente, dando como resultado el fallecimiento de más de 200 personas, colocando el desastre como uno de los más mortíferos casos de muertes por falla en obras de ingeniería en la historia.



Fig. 2 – Colapso del puente de Angers. Fuente: Fernández, 2014, Sin nombre [Foto], recuperado de <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/04/colapsos-estructurales-historicos-parte-5-ano-1850/>

2.1.3 SISMO DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1985

Más recientemente, el sismo del 19 de Septiembre de 1985 en la ciudad de México propició el colapso de alrededor de 371 edificaciones en una zona específica de la megalópolis, específicamente aquella en la que en la antigüedad se encontraba el lago de Texcoco. El Dr. Jorge Andrés Flores, junto con sus colaboradores: Dr. Octavio Novaro y el Dr. Thomas Seligman, determinaron a través de sus investigaciones que el fenómeno de resonancia lateral provocado por la coincidencia de la frecuencia de vibrado del subsuelo de la zona en cuestión con la frecuencia natural propia de edificaciones de ciertas características, constituyeron una de las principales causas de derrumbe de las construcciones en el sismo de 1985 (Flores et al., 1987); el fenómeno provocó pérdidas económicas estimadas cerca de 8 mil millones de dólares y más de 3,500 personas fallecidas, según los datos con los que se cuenta.



Fig. 3 – Colapso del puente de Angers. Fuente: Fernánde, 2014, Sin nombre [Foto], recuperado de <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/04/colapsos-estructurales-historicos-parte-5-ano-1850/>

2.1.4 MILLENIUM BRIDGE

Uno los casos más mediáticos relacionados con una subestimación de las consecuencias de las vibraciones y en particular, del fenómeno de resonancia estructural, es la oscilación lateral del Millenium Bridge en Londres, con 144 m de claro, del cual se pueden encontrar videos y fotografías del día de su apertura ocurrida el 10 de Junio del 2000, en el que debido al valor alto de carga viva del puente, combinado con el hecho de que las personas, al empezar a notar cierto movimiento en la estructura, comenzaron a caminar con una frecuencia de pasos tal, que excitaron las frecuencias resonantes del puente. (Boam, 2007)



Fig. 4 – Vista Aérea del Millenium Brigde. Fuente: Foster&Partners, Sin nombre [Fotografía], recuperada de <https://www.fosterandpartners.com/projects/millennium-bridge>

2.1.5 CENTRO COMERCIAL TECHNO MART

El 5 de Julio de 2011, el centro comercial y edificio de oficinas, Techno Mart, ubicado en Seúl, Coral del Sur, comenzó a vibrar de manera perceptible e inexplicable, situación que obligó al desalojo de todos los ocupantes del inmueble de 39 niveles. Investigaciones posteriores determinaron que el edificio tiene una frecuencia natural de vibración vertical de 2.7 Hz, la cual es una frecuencia que grupos realizando actividades rítmicas repetitivas pueden alcanzar, provocando que la estructura entre en resonancia. (Chung et al., 2016)

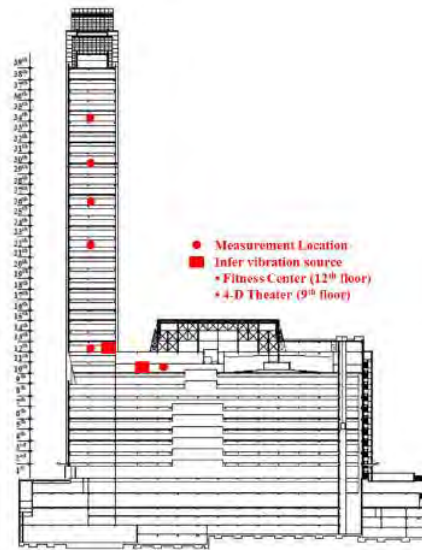


Fig. 5 – Zonas de medición de vibración y ubicación de potenciales fuentes de vibración del centro comercial Techno Mart. Fuente: En Vertical Shaking Accident and Cause Investigation of 39-story Office Building, Chung et al., 2016, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 15, p. 621.

2.2 INVESTIGACIONES RELACIONADAS

El movimiento del cuerpo humano ha sido objeto de estudio de numerosos investigadores y científicos desde hace varios siglos. Algunas de las primeras publicaciones relacionadas con el tema fueron hechas por Borelli, conocido como el “Padre de la Biomecánica”, específicamente en su obra: “On the movement of Animals”, en la cual estableció algunos principios de mecánica para explicar el funcionamiento del sistema muscular y el esqueleto humanos; dentro de los más relevantes se pueden mencionar el efecto de palanca que se genera en los músculos y huesos para permitir al hombre desarrollar un aumento considerable de fuerza, la estimación de las fuerzas que permiten el equilibrio en ciertas articulaciones y la ubicación del centro de gravedad del cuerpo, según la posición en la que se encuentre. (Borelli, 2015).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Los hermanos Wilhem Eduard Weber y Eduard Friedrich Weber, fueron los primeros investigadores en estudiar sistemáticamente la mecánica del movimiento humano; en su libro: “Über die Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge. Eine anatomisch-physiologische Untersuchung”, en el que, entre otras aportaciones, se incluyen las primeras imágenes de fases subsecuentes de humanos caminando, las cuales se calcularon usando ecuaciones diferenciales, graficadas con proyección de perspectiva. Los hermanos Weber brindaron una teoría de locomoción tomando en cuenta, por primera vez, la trayectoria del centro de masa, durante el movimiento. (Klette & Tee, 2008)

Posteriormente, Otto Fischer, matemático y físico alemán, dentro de sus diversas investigaciones realizadas en lo que concierne al movimiento del cuerpo humano, en 1889 considera el movimiento del centro de masa del cuerpo humano como un todo para poder entender muchas de las fuerzas involucradas en las actividades físicas. Una de sus principales aportaciones fue el Método de Vectores Principales, el cual es un análisis de los movimientos relativos de las diferentes partes del cuerpo humano, respecto al movimiento del centro de masa, conocido estudio con el que se pueden deducir las fuerzas usadas en los músculos para lograr el movimiento (Van Der Wijk & Herder, 2012) .

Otra de las grandes aportaciones de Fischer fue el primer estudio tridimensional del andar humano (human gait), considerando tanto cuerpos sin carga como con carga sobre ellos para desarrollar su análisis. (Van Der Wijk & Herder, 2012)

En 1931, H. Reiher y F.J. Meister, desarrollan experimentos en los que un grupo de personas de pie fue sometido a vibraciones continuas y estables con variaciones de frecuencias con un mínimo de 5 y un máximo de 100 Hz (Reiher & Meister, 1931); con ello lograron el desarrollo de una de las primeras escalas que relacionan el nivel de vibraciones con la percepción humana, en términos de confort.

En 1990, Allen publica el análisis de un caso de estudio correspondiente con un centro de ejercicio en el que en la segunda planta, compuesta por un sistema de losa de concreto soportada por joists de 20 m de claro, 0.85 m de separación entre ellos y 1.80 m de peralte, sin conectores de cortante que permitieran considerar al entrepiso como sección compuesta, se llevaban a cabo actividades relacionadas con aerobics y levantamiento de pesas; estas actividades provocaban problemas de aceleraciones perceptibles. Este fue el primer estudio sistemático de los problemas de vibración asociados con este tipo de eventos rítmicos y el cual concluyó, dentro de otros resultados, la necesidad de tomar en cuenta un tercer armónico en la función dinámica para este tipo de actividades (Allen, 1990). Este fue uno de los artículos que sirvieron como antecedente para la creación de

la DG11, la cual constituye, hasta la actualidad, uno de los estándares de diseño más relevantes en el área de las vibraciones de entrepiso.

En 1994, Ellis y Ji en su artículo: "Floor vibrations induced by dance-type loads: Verification" desarrollan una serie de experimentos sobre una viga de concreto presforzado sobre la que se realizaron mediciones de diferente índole, usando personas sobre la viga para evaluar el efecto de la masa en los parámetros dinámicos usados para la determinación de frecuencias naturales de vibración, así como en el amortiguamiento del sistema estructural.

Dentro de las principales conclusiones a las que llegan está el hecho de que, de acuerdo con el trabajo realizado, algunas losas de entrepiso usadas para soportar cargas rítmicas con una rigidez alta ($f_n > 10$ Hz), pueden ser susceptibles a fenómenos de resonancia, por lo que recomiendan usar un número mayor de componentes de Fourier, debería ser usado y no sólo los primeros 3, como marcan las normativas actuales (Ellis & Ji, 1994)

Otro resultado relevante es el correspondiente con la forma en el efecto que produce una persona sobre el sistema estructural de prueba, reduciendo el valor del amortiguamiento en diferente proporción, dependiendo de si el sujeto se encuentra de pie o sentado sobre la viga; por su parte, al incluir una masa equivalente a la de la persona de prueba, los resultados en la medición del amortiguamiento del sistema no presentaron diferencia, sugiriendo que el cuerpo humano es un sistema, masa-resorte-amortiguamiento en sí mismo y no sólo una masa actuando sobre el sistema (Ellis & Ji, 1994)

En 1997, Murray, Allen y Ungar publican la primera edición de la Guía de Diseño 11 del American Institute of Steel Construction (DG11), la cual compila las metodologías de diseño de sistemas de piso metálicos para diferentes tipos de actividades: desde el caminar humano, las vibraciones rítmicas y diseño para equipos altamente sensibles, por mencionar algunos (Murray et al., 2003). Este documento es referido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero, en su versión con comentarios 2020, para consultarse en caso de querer realizarse un análisis más detallado del fenómeno de vibración.

Renata Faisca en 2003, como parte de su trabajo de doctorado, desarrolló la tesis: "Caracterización de cargas dinámicas provocadas por Actividades Humanas", la cual tiene como uno de sus grandes resultados, el desarrollo de una función dinámica de respuesta para modelación de las cargas rítmicas de una persona sobre tableros de losa compuesta, la cual se ajusta a una función Hanning modificada con algunos parámetros

obtenidos de la instrumentación de una plataforma a escala real de un sistema de piso con vigas IPR, ligados a una capa de compresión de concreto reforzado conectados con pernos de cortante (Faisca, 2013).

En 2012, Carolina Millán, Patricia Valenzuela y Peter Thompson, desarrollan en su artículo “Caracterización de cargas de baile en una plataforma experimental”, un procedimiento para determinar los coeficientes de Fourier asociados 4 diferentes ritmos de baile: salsa, merengue, bachata y reggaetón, así como los factores de los coeficientes de impacto para cada caso, los cuales se obtuvieron al analizar los resultados obtenidos de la instrumentación de una plataforma experimental de 4.00x4.00 m, construida con un sistema de losa aligerada de 32.00 cm de espesor, sobre la cual se evaluaron las aceleraciones producidas por grupos de hasta 9 personas bailando a los diferentes ritmos propuestos. (Millán Yusti et al., 2013)

2.3 CRITERIOS DE REVISIÓN DEL ESTADO LÍMITE DE VIBRACIONES

2.3.1 *NORMATIVA MEXICANA*

Las Normas Técnicas Complementarias para diseño y Construcción de Estructuras de Acero 2020 (NTC-DCEA,2020), en su apartado 11.5, incluye los criterios de diseño para el estado límite por vibraciones, sin hacer una diferenciación entre los diversos tipos de cargas dinámicas que originan el fenómeno.

Las expresiones propuestas en el documento para evaluar el efecto de vibraciones requieren una idealización de los tableros de losas como una viga simplemente apoyada con carga distribuida (Ecuación 1.0), con la cual se calculan las deformaciones de las vigas que componen al tablero que se pretenda revisar para posteriormente calcular, con los valores calculados, una frecuencia natural de la bahía de piso (Ecuación 2.0)

Para una viga simplemente apoyada, la deformación máxima al centro del claro (Δ) se puede estimar como:

$$\Delta_T = \left(\frac{5}{384}\right) \left(\frac{wL^4}{EI}\right) \quad 1.0$$

En la cual:

EI = Rigidez a flexión del elemento evaluado.

L = Claro del tablero.

w = Carga de servicio por unidad de longitud.

La ecuación base de la normativa, la cual estima la frecuencia fundamental del sistema de piso, se define como:

$$f_n = \left(\frac{\pi}{2L^2}\right) \left(\frac{EI}{\rho}\right)^{0.5} \tag{2.0}$$

Donde:

EI = Rigidez a flexión del piso.

L = Claro del tablero

$$\rho = \frac{w}{g}$$

g = Aceleración de la gravedad = $981 \frac{cm}{s^2}$

w = Suma de cargas gravitacionales por unidad de longitud

Despejando el valor de EI de la Ecuación 1.0 y sustituyéndolo en la ecuación 2.0, tenemos:

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_T}} \tag{3.0}$$

En la normativa mexicana, los parámetros de percepción de vibraciones por parte de los usuarios se expresan en términos del valor máximo de aceleración que el cuerpo humano es tolera con sensación de confort. La Fig. 6 muestra los niveles tolerables de aceleración como una función de la frecuencia natural del sistema de piso:



Fig. 6 - Límites de aceleración perceptible de la normativa mexicana. Adaptada de NTC-DCEA 2020, Gobierno de la Ciudad de México, 2020, p. 199.

Como se observa en la figura, en el rango de frecuencias naturales delimitado entre los 2 y los 6 Hz, el nivel de aceleración asociado con los diferentes usos de los tableros, los valores de aceleración perceptible son los más críticos. Para actividades rítmicas, el valor de aceleración de entrepiso máxima soportada con sensación de confort es del orden del 5% de la gravedad, mientras que para casas u oficinas el valor se reduce 10 veces, siendo este del orden del 0.5% de la gravedad.

No existe expresión en las NTC-DCEA (2020) que permita el cálculo de la aceleración máxima en entrepisos. Las recomendaciones que se dan van en dos sentidos: el primero está en función del valor de la frecuencia natural del sistema, la cual debe ser por lo menos 2 veces la frecuencia de excitación externa, sin mostrar ningún valor de frecuencias forzadas para las diferentes actividades; el segundo criterio tiene que ver con buscar que la deformación global del tablero no rebase los 5.00 mm, valor que, sustituido en la Ecuación 3.0, resulta en una frecuencia natural de 8 Hz, la cual se considera aceptable para el reglamento.

En los comentarios de este apartado, se menciona que, en caso de requerirse un análisis más detallado, se debe recurrir a la DG11, así como a la realización de modelos tridimensionales refinados, sin ahondar en las características de estos.

2.3.2 GUÍA DE DISEÑO 11 DEL AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION (DG11)

La Guía de Diseño 11, “Floor Vibrations due to Human Activity” del American Institute for Steel Construction (DG11.), en su capítulo 5: Design for Rhythmic Excitation, propone el siguiente procedimiento para calcular las aceleraciones de un sistema de piso afectados por eventos rítmicos humanos (Murray et al., 2003):

1. Calcular las propiedades de sección compuesta de cada uno de los elementos que soportan a la losa. En el apartado 3.10 se desarrolla en detalle este procedimiento y sus correspondientes expresiones.
2. Calcular las deformaciones en los elementos tipo viga del sistema, asumiendo sus condiciones de apoyo como simplemente apoyados, utilizando la Ecuación 1.0, la cual se reescribe, a continuación:

$$\Delta_T = \left(\frac{5}{384}\right)\left(\frac{wL^4}{EI}\right) \tag{1.0}$$

Siendo:

3. Calcular la frecuencia natural con la Ecuación 3.0, tomando en cuenta que:

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_T}} \tag{4.0}$$

Donde:

$g = \text{Aceleración de la gravedad} = 981.00 \frac{cm}{s^2}$

$\Delta_T = \text{Deformación total máxima del tablero idealizado}$

4. Calcular las aceleraciones pico con la Ecuación 5.0:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.30 \alpha_i \left(\frac{w_p}{w_t}\right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_n}{f}\right)^2 - 1\right]^2 + \left[\frac{2\beta f_n}{f}\right]^2}} \tag{5.0}$$

Donde:

$\frac{a_p}{g} = \text{Aceleración pico, expresada como fracción de la gravedad.}$

$\alpha_i = \text{Coeficiente dinámico (Ver Tabla 1.00)}$

$w_p = \text{Carga por unidad de área de los participantes en la actividad, distribuida uniformemente en el tablero.}$

$w_t = \text{Carga total del tablero, incluyendo el peso de los participantes.}$

$f_n = \text{Frecuencia natural del sistema de piso.}$

$f = \text{Frecuencia forzada.}$

$\beta = \text{Relación de amortiguamiento.}$

5. Comparar las aceleraciones pico obtenidas con los límites de aceleración de la Fig. 6 o la Fig. 7; **Error!** **No se encuentra el origen de la referencia.**, dependiendo si se siguen los criterios de la DG11 o las NTC-DCEA (2020), las cuales son muy similares, pero no idénticas.

TABLA 1. PARÁMETROS PARA CÁLCULO DE ACELERACIÓN PICO DE ACTIVIDADES RÍTMICAS (DG11)

Actividad	Armónico	Frecuencia Forzada, f (Hz)			Carga de participantes w_p (kg/m ²)	Coef. Dinámico α_i
		Mín	Max	Prom		

Cena/Baile	1.00	1.50	3.00	2.25	60.00	0.50
Concierto/Evento	1.00	1.50	3.00	2.25	150.00	0.25
Deportivo	2.00	3.00	5.00	4.00		0.05
Saltos	1.00	2.00	2.75	2.38	20.00	1.50
	2.00	4.00	5.50	4.75		0.60
	3.00	6.00	8.25	7.13		0.10

Nota: Adaptada de DG11, Murray et al., 2003, Steel Design Guide Series, Vol. 11, p. 38.

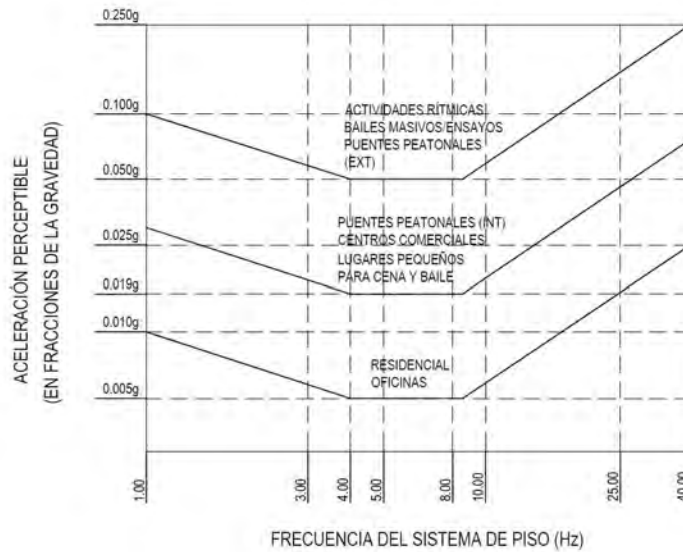


Fig. 7 - Límites de aceleración perceptible de la DG11. Adaptada de DG11, Murray et al., 2003, Steel Design Guide Series, Vol. 11, p. 7.

- Recomienda realizar una modelación computacional que permita la identificación puntual de los modos y frecuencias de vibrado más bajas del sistema estructural, la determinación de las aceleraciones máximas producidas por cargas rítmicas y comparar el resultado con los valores límites indicados en el punto 5

2.4 FUNCIONES DINÁMICAS DE FRECUENCIA

2.4.1 CRITERIO DE FAISCA

En 2003, la Doctora Renata Faisca y su equipo de la Universidad de Rio de Janeiro, construyeron una plataforma en laboratorio, la cual fue instrumentada con equipos tales como acelerómetros y vibrómetros, sobre la cual se logró definir un comportamiento esperado de individuos realizando 3 grandes tipos de actividad rítmica: saltos a voluntad, multitud/espectáculo y gimnasia aeróbica.

En su trabajo de investigación, se justifica el comportamiento rítmico de una persona con una función Hanning, también conocida como ventana de coseno elevado, y no sólo con una serie de Fourier, como normalmente se han considerado este tipo de movimientos humanos (Faisca, 2013).

Esta función se ve afectada por diferentes parámetros, obtenidos después de rigurosos análisis estadísticos realizados en el trabajo de investigación, los cuales toman en cuenta las muy diversas variables que una actividad rítmica puede tener, tales como el número de personas involucradas en la actividad, su masa y el factor de impacto característico para cada evento rítmico (Ver **TABLA 2**). Matemáticamente, lo anterior se expresa como:

$$F(t) = \begin{cases} CD \left\{ K_p P_{IND} \left[0.50 - 0.50 \cos \left(\frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\}; & t \leq T_c \\ 0.00; & T_c \leq t \leq T \end{cases} \quad (6.0)$$

Donde:

CD = Coeficiente de variación de carga

K_p = Factor de Impacto

P_{IND} = Peso del individuo.

T_c = Tiempo de contacto del individuo con el piso.

t = Punto en el tiempo en el que se evalúa la carga.

T = Duración total de cada ciclo de actividad dinámica.

TABLA 2. PARÁMETROS PROPUESTOS PARA ACTIVIDADES RÍTMICAS DE FAISCA

Actividad	T (seg)	T _c (seg)	K _p
Salto a voluntad	0.44 ± 0.15	0.32 ± 0.09	1.74 ± 0.32
Gimnasia Aeróbica	0.44 ± 0.09	0.34 ± 0.09	2.56 ± 0.55
Multitud	0.37 ± 0.03	0.33 ± 0.09	1.71 ± 0.36

Nota: Adaptada de *Caracterização De Cargas Dinâmicas Geradas Por Atividades Humanas*, Faisca, 2013, p. 173.

Tomando los valores promedio de los 3 parámetros, y los coeficientes de variación (*CD*), correspondientes para 100 personas (ver Fig. 8), las cuales, como se verá más adelante, son aproximadamente el número máximo de población máxima esperada actuando al mismo tiempo sobre la pista, a continuación, se muestran las gráficas

que representan la variación de carga para una persona de 80.00 kg, realizando cada una de las actividades (Ver, Fig. 9, Fig. 10 y Fig. 11):

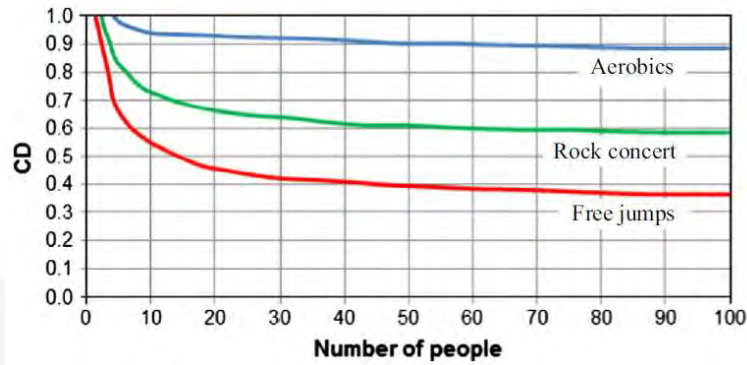


Fig. 8 – Coeficiente de variación de carga para la función de Faisca. Fuente: Multimode vibration control of building steel-concrete composite floors submitted to human rhythmic activities, Gaspar et al., 2016, Computer & Structures, Vol. 165, p. 107-122.

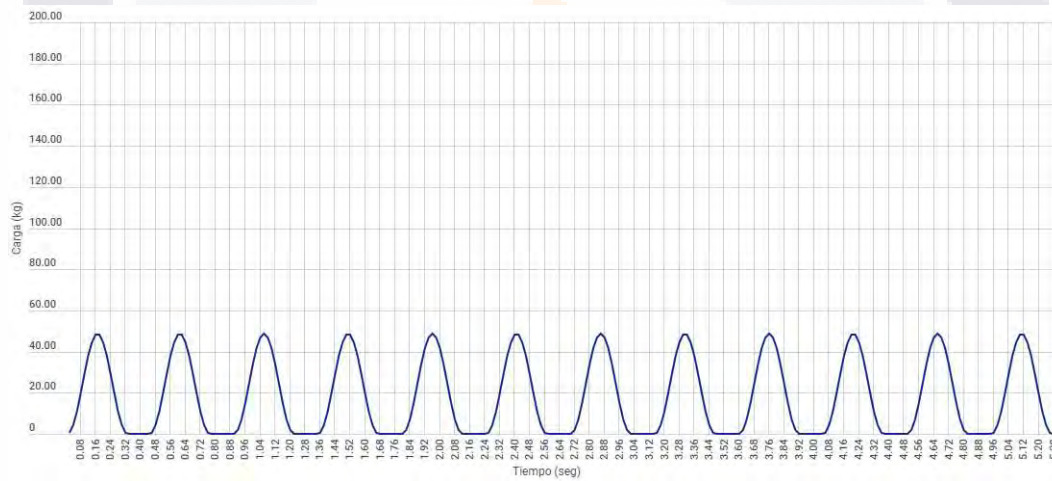


Fig. 9 – Variación de carga de una persona, saltando a voluntad con la función de Faisca. Fuente: Elaboración propia.

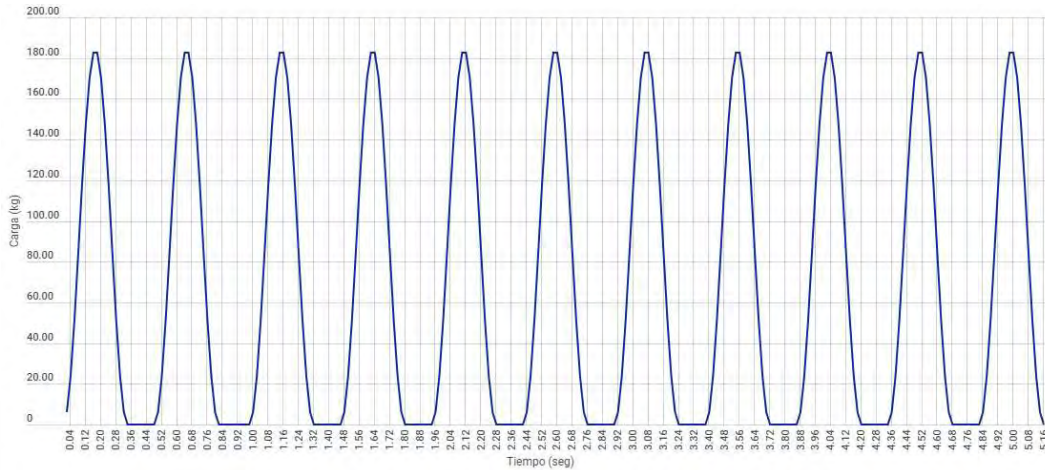


Fig. 10 – Variación de carga de una persona, realizando aerobics con la función de Faisca. Fuente: Elaboración propia.

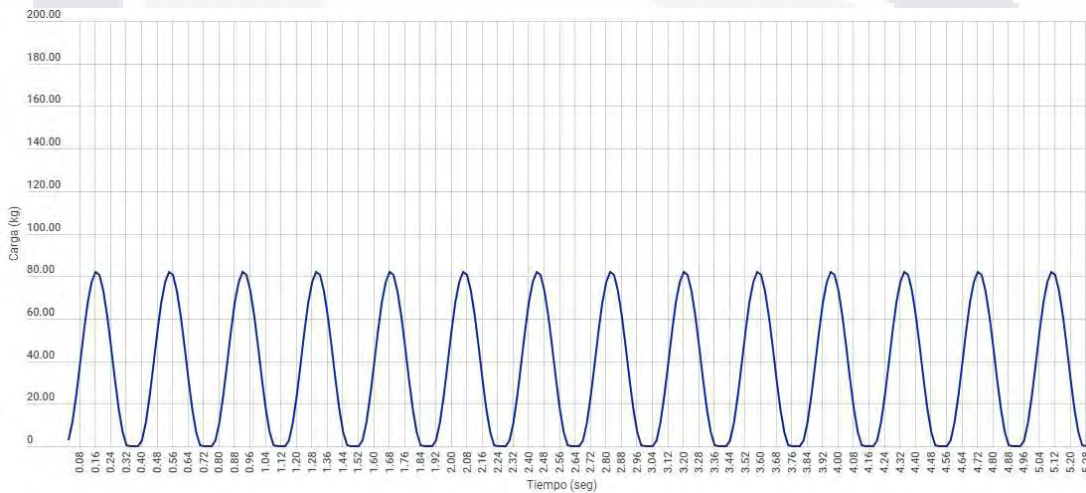


Fig. 11 – Variación de carga de una persona, actuando como multitud con la función de Faisca. Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 CRITERIO DE MILLÁN

Por su parte, en 2015, la Dra. Carolina Millán, en colaboración con un equipo de trabajo de la Universidad de Medellín, construyó una plataforma de concreto reforzado, con una alta rigidez, la cual fue instrumentada para evaluar el efecto de diferentes números de personas bailando simultáneamente sobre ella, obteniendo, de ese modo, los valores de los coeficientes dinámicos característicos de 4 ritmos de baile: bachata, salsa, reggaetón y merengue, así como su respectivo factor de impacto (K_p), indicados en la **TABLA 3** (Millán Yusti et al., 2013). A diferencia de Faisca, Millán utiliza una serie de Fourier de la forma:

$$P(t) = P_{IND} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \text{sen} (2\pi nft + \varphi_n) \right] \quad (7.0)$$

Siendo:

P_{IND} = Peso de la persona

α_i = Coeficiente de Fourier para el armónico, i

i = Armónico

f = Frecuencia forzada

t = Tiempo en el que se evalúa la función

φ_n = Ángulo de fase

TABLA 3. FACTOR DE IMPACTO (K_p) PARA LOS 4 RITMOS DE BAILE

No. personas	Bachata	Merengue	Reggaetón	Salsa
1	1.83	2.24	1.83	1.28
2	1.84	1.96	1.69	1.35
3	1.59	1.89	1.61	1.23
4	1.22	1.86	1.30	1.23
5	1.35	1.79	1.44	1.20
6	1.37	1.93	1.41	1.29
7	1.34	1.57	1.48	1.18
8	1.36	1.66	1.32	1.21
9	1.37	1.63	1.35	1.21

Nota: Adaptada de Caracterización de Cargas de Baile en una Plataforma Experimental, Millán Yusti et al., 2013, Revista Ingenierías, Vol. 12, No.23, p. 52-53.

A continuación, se muestra el resumen de los resultados obtenidos para cada ritmo. De las tablas se tomarán los valores promedio de los coeficientes dinámicos (α_i) para el mayor número de personas estudiadas, de tal modo que las condiciones de carga se asemejen a una condición de carga concurrida actuando sobre el tablero. Los datos fueron sustituidos en la Ecuación 7.0, considerando el peso promedio de una persona de 80.00 kg; los resultados son las Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 y la Fig. 15, las cuales representan la variación de carga en el tiempo del individuo para cada ritmo estudiado.

TABLA 4. COEFICIENTES DE FOURIER PARA EL RITMO DE BACHATA

No. Personas	Peso (kg)	1º Armónico			2º Armónico			3º Armónico		
		Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 1_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 1_{máx}$)	Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 2_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 2_{máx}$)	Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 3_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 3_{máx}$)
1.00	54.00	2.17	0.53	0.60	4.38	0.05	0.06	6.44	0.05	0.06
2.00	106.00	2.16	0.43	0.49	4.30	0.08	0.06	6.45	0.04	0.05
3.00	160.00	2.13	0.38	0.38	4.30	0.02	0.02	6.45	0.03	0.03
4.00	210.00	2.16	0.15	0.17	4.31	0.05	0.06	-	-	-
5.00	264.00	2.16	0.20	0.45	4.31	0.05	0.05	-	-	-
6.00	319.00	2.15	0.18	0.31	4.30	0.06	0.06	6.45	0.03	0.03
7.00	382.00	2.16	0.18	0.23	3.22	0.05	0.07	-	-	-
8.00	442.00	2.13	0.38	0.38	4.30	0.02	0.02	6.45	0.03	0.03
9.00	497.00	2.15	0.24	-	4.30	0.03	-	6.45	0.02	-

Nota: Adaptada de Caracterización de Cargas de Baile en una Plataforma Experimental, Millán Yusti et al., 2013, Revista Ingenierías, Vol. 12, No.23, p. 55.

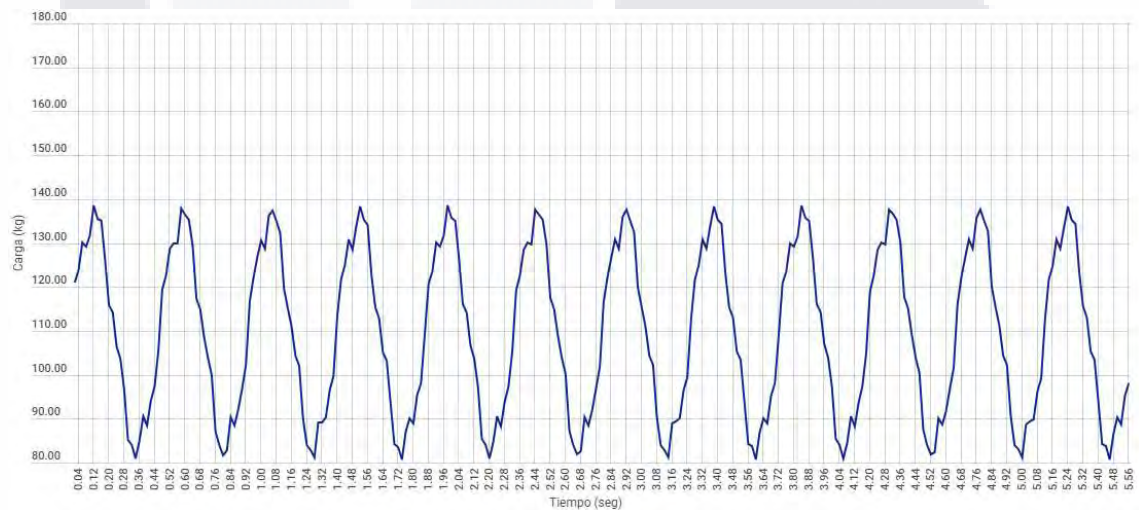


Fig. 12 – Variación de carga de una persona, bailando al ritmo de bachata. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 5. COEFICIENTES DE FOURIER PARA EL RITMO DE MERENGUE

No. Personas	Peso (kg)	1º Armónico			2º Armónico			3º Armónico		
		Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 1_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 1_{máx}$)	Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 2_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 2_{máx}$)	Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 3_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 3_{máx}$)
1.00	54.00	2.50	0.42	0.69	5.00	0.16	0.32	7.47	0.06	0.14
2.00	106.00	2.50	0.35	0.66	5.00	0.13	0.23	7.56	0.03	0.03
3.00	160.00	2.50	0.51	0.68	5.00	0.16	0.23	-	-	-
4.00	210.00	2.50	0.48	0.86	5.00	0.12	0.25	7.50	0.04	-
5.00	264.00	2.50	0.42	0.82	5.00	0.13	0.31	-	-	-
6.00	319.00	2.50	0.52	0.72	5.00	0.15	0.19	7.50	0.05	0.08
7.00	382.00	2.50	0.31	0.53	5.00	0.07	0.12	7.50	0.02	0.02
8.00	442.00	2.50	0.51	0.68	5.00	0.16	0.23	-	-	-
9.00	497.00	2.47	0.20	0.37	4.97	0.04	0.09	7.44	0.03	-

Nota: Adaptada de Caracterización de Cargas de Baile en una Plataforma Experimental, Millán Yusti et al., 2013, Revista Ingenierías, Vol. 12, No.23, p. 56.

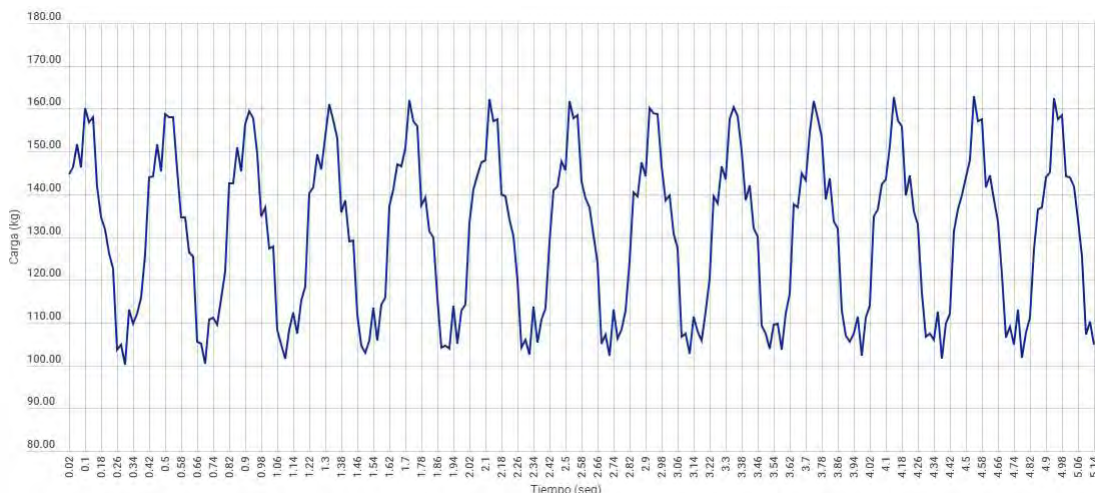


Fig. 13 – Variación de carga de una persona, bailando al ritmo de merengue. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 6. COEFICIENTES DE FOURIER PARA EL RITMO DE REGGAETÓN

No. Personas	Peso (kg)	1º Armónico			2º Armónico			3º Armónico		
		Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 1_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 1_{máx}$)	Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 2_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 2_{máx}$)	Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 3_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 3_{máx}$)
1.00	54.00	2.16	0.42	0.83	4.34	0.36	0.42	6.50	0.08	0.09
2.00	106.00	2.13	0.28	0.61	4.38	0.16	0.25	6.75	0.08	0.10
3.00	160.00	2.13	0.63	1.19	4.25	0.26	0.33	6.50	0.07	-
4.00	210.00	2.13	0.18	0.22	4.38	0.12	0.25	6.50	0.03	0.06
5.00	264.00	2.16	0.29	0.50	4.34	0.14	0.26	-	-	-
6.00	319.00	2.23	0.17	0.21	4.50	0.11	0.32	6.50	0.02	0.06
7.00	382.00	2.13	0.22	0.42	4.34	0.12	0.13	-	-	-
8.00	442.00	2.13	0.63	1.19	4.25	0.26	0.33	6.50	0.07	-
9.00	497.00	2.25	0.17	0.21	4.50	0.11	0.32	6.50	0.02	0.06

Nota: Adaptada de Caracterización de Cargas de Baile en una Plataforma Experimental, Millán Yusti et al., 2013, Revista Ingenierías, Vol. 12, No.23, p. 56.

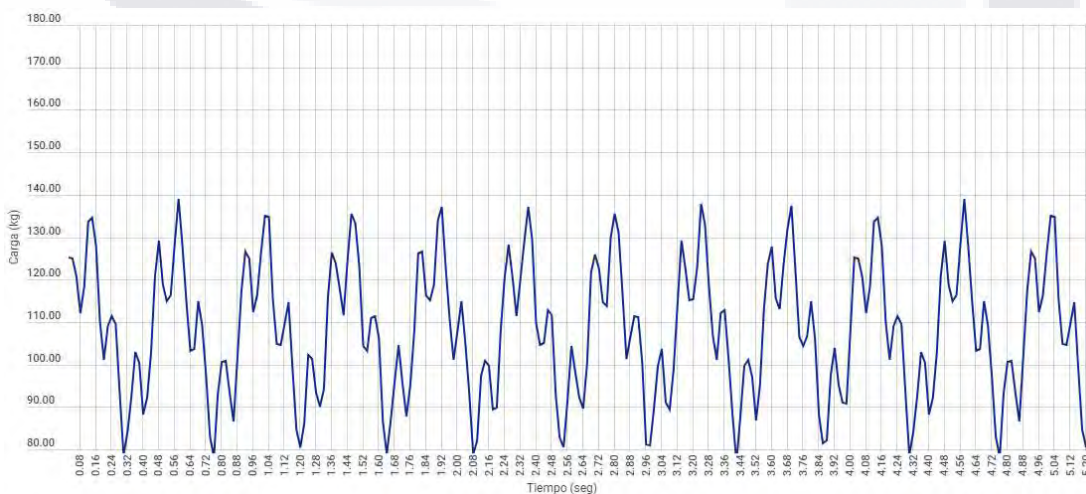


Fig. 14 – Variación de carga de una persona, bailando al ritmo de reggaetón. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 7. COEFICIENTES DE FOURIER PARA EL RITMO DE SALSA

COEFICIENTES DE FOURIER Y FRECUENCIAS FORZADAS PARA LOS 3 ARMÓNICOS FUNDAMENTALES DE LA SALSA										
No. Personas	Peso (kg)	1º Armónico			2º Armónico			3º Armónico		
		Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 1_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 1_{máx}$)	Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 2_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 2_{máx}$)	Frecuencia (Hz)	Coef. de Fourier prom. ($\alpha 3_{prom}$)	Coef. de Fourier máx. ($\alpha 3_{máx}$)
1.00	54.00	1.56	0.10	0.13	3.13	0.11	0.13	4.69	0.05	0.09
2.00	106.00	1.59	0.06	0.08	3.19	0.14	0.25	4.78	0.05	0.07
3.00	160.00	1.63	0.07	0.10	3.19	0.11	0.20	4.75	0.04	0.04
4.00	210.00	1.59	0.08	0.11	3.19	0.08	0.13	4.78	0.02	0.03
5.00	264.00	1.56	0.09	0.15	3.19	0.06	0.09	-	-	-
6.00	319.00	1.59	0.06	0.07	3.17	0.08	0.15	4.77	0.02	0.03
7.00	382.00	1.59	0.06	0.08	3.19	0.16	0.07	-	-	-
8.00	442.00	1.59	0.05	0.08	3.19	0.08	0.13	4.78	0.02	0.03
9.00	497.00	1.59	0.06	0.07	3.19	0.07	0.10	-	-	-

Nota: Adaptada de Caracterización de Cargas de Baile en una Plataforma Experimental, Millán Yusti et al., 2013, Revista Ingenierías, Vol. 12, No.23, p. 53.

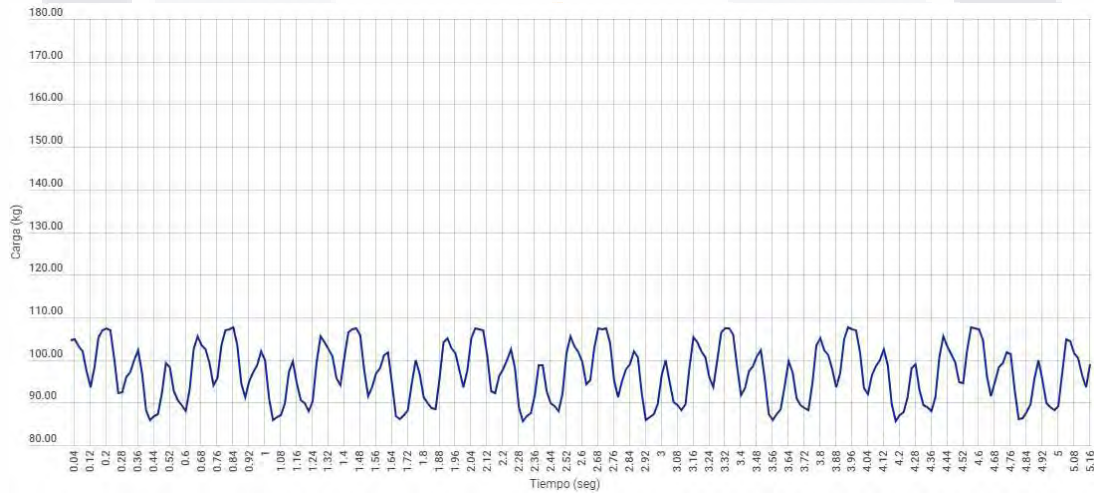


Fig. 15 – Variación de carga de una persona, bailando al ritmo de salsa. Fuente: Elaboración propia.

2.5. ANÁLISIS Y MODELACIÓN ESTRUCTURAL

2.5.1 MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico que permite obtener la solución de ecuaciones diferencial de casi todos los problemas relacionados con los problemas de ingeniería: desde la mecánica de fluidos hasta el análisis estructural. A diferencia de los métodos clásicos que consideraban a las estructuras como un medio continuo, el MEF subdivide a los elementos en partes de número finito (elementos). El comportamiento de las partículas individuales y el consecuente resultado de un sistema global involucra la

resolución de una serie de sistemas algebraicos que pueden ser solucionado, de manera relativamente sencilla, con las capacidades de los sistemas computacionales actuales.

La mayoría de los softwares de análisis estructural modernos, como el que se utiliza en esta investigación para el análisis y construcción del modelo numérico refinado del caso de estudio, utilizan los principios de la metodología del MEF en la solución de problemas dinámicos en estructuras, con los cuales se pueden obtener, entre muchos otros resultados, los modos de vibrar de una estructura y las frecuencias naturales de vibración de sistemas complejos conformados por elementos tipo barra y placas, como lo son aquellos que se usarán para el desarrollo de las revisiones analíticas desarrolladas en este trabajo.

2.5.2. SOFTWARE DE MODELACIÓN

El modelo tridimensional de elementos finitos se realizará en ETABS V.17, el cual es un programa computacional desarrollado por la empresa estadounidense Computers and Structures, Inc. (CSI), el cual ha sido desarrollado con algunas particularidades que simplifican el proceso de modelación de obras tipo edificación, incluyendo algunos módulos que permiten la definición clara y simple de las propiedades de sistemas de piso compuestos, como el que se usará para la solución del caso práctico de estudio, el cálculo automático de los centros de masa y los centros de rigidez, así como práctica modalidad que permite obtener gráficos de interés para este tipo de análisis como los son las historias de aceleración por nodos, por mencionar algunas de las más relevantes.

2.6 CASO DE ESTUDIO

Para validar la metodología propuesta de análisis, se utilizó la información del proyecto estructural de un edificio proyectado a construirse en un club privado de la Ciudad de Aguascalientes, el cual cuenta con un salón de baile, con capacidad para alojar hasta 500 personas y cuyas dimensiones generales son de 28.00 m de largo, por 28.00 m de ancho, subdivido en 6 tableros de 8.00x12.00 m, 2 tableros de 4.00x12.00m. 4 tableros de 3.00x8.00 m y un tablero de 4.00x3.00 m de acuerdo con la propuesta de apoyos. A continuación, se muestran algunas imágenes del proyecto.



Fig. 16 – Render de fachada principal de salón de usos múltiples. Fuente: Arkylab

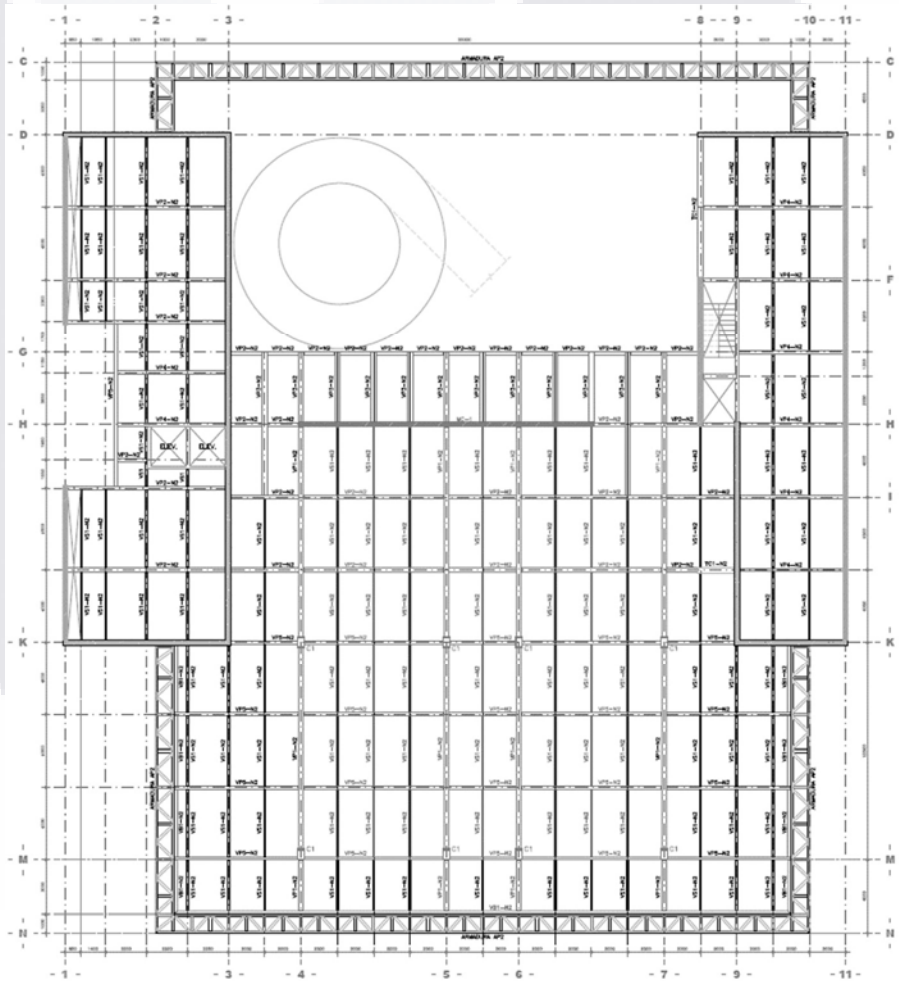


Fig. 17 – Planta estructural del salón de usos múltiples. Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO III

**METODOLOGÍA DE LA
INVESTIGACIÓN**

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo, se desarrollan los pasos que se siguieron para el análisis y obtención de resultados de esta investigación. La metodología propuesta es aplicable a cualquier sistema de piso compuesto que sea sometido a este tipo de cargas, sin embargo, cada entrepiso de estudio debe particularizarse y aplicar el criterio correspondiente con la finalidad de obtener resultados confiables.

3.1 ZONIFICACIÓN DE ENTREPISO

Con la información con la que se cuenta se sabe que el entrepiso está destinado a ser un salón de usos múltiples y tiene capacidad para albergar a 500 personas; para este trabajo se consideró que la edificación será utilizada en eventos similares a bodas o graduaciones en los cuales se tiene una fracción de los usuarios sentados mientras que el resto realizan actividades rítmicas en un espacio definido. De lo anterior, se definieron dos categorías de interés: la zona de comensales y la pista de baile (Ver Fig. 18):

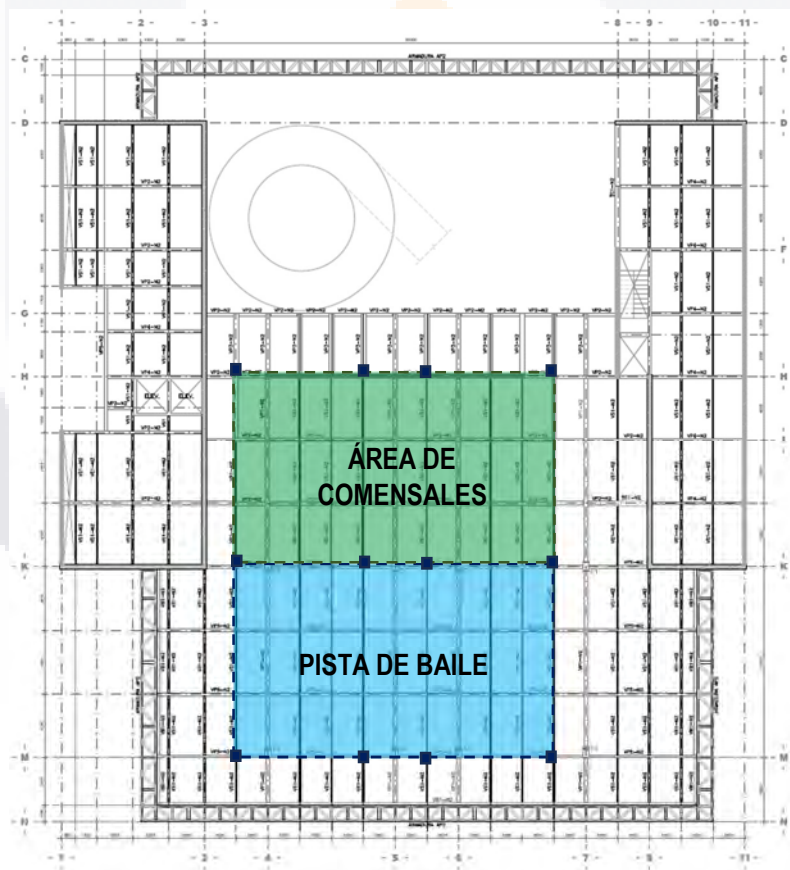


Fig. 18 - Zonificación de entrepiso de caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.2 DEFINICIÓN DE TABLEROS CRÍTICOS Y NODOS DE CONTROL.

Como se aprecia en la Fig. 19, debido a la geometría de la estructura, se subdividieron las zonas que se establecieron para sistema de piso en 6 tableros independientes. De estos, dada la simetría propia del diseño arquitectónico se observó que los tableros más críticos son los No. 1, 3, 4 y 6, cada uno de los cuales tiene una dimensión en planta de 12.00 x 8.00 m; se evaluaron las aceleraciones de los dos tableros contiguos marcados con los números 1 y 4, en la zona de comensales y en la pista de baile, respectivamente, con el objeto de analizar el efecto que la actividad rítmica en la pista tenía sobre el área ocupada por los comensales.

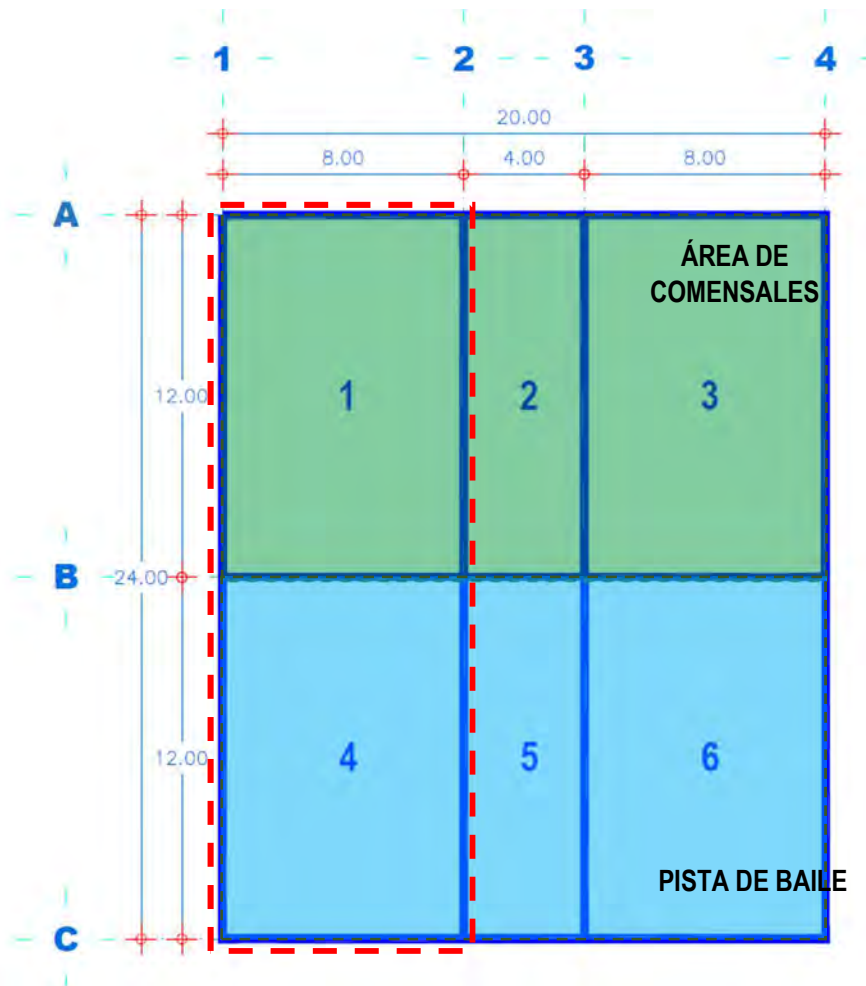


Fig. 19 - Definición de tableros críticos para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Las aceleraciones más importantes serán encontradas en la zona de mayor flexibilidad en un sistema de piso, la cual, para tableros soportados en sus cuatro esquinas, está en su centro geométrico. De lo anterior que los nodos de control se ubicaron al centro de cada tablero crítico (Ver Fig. 20)

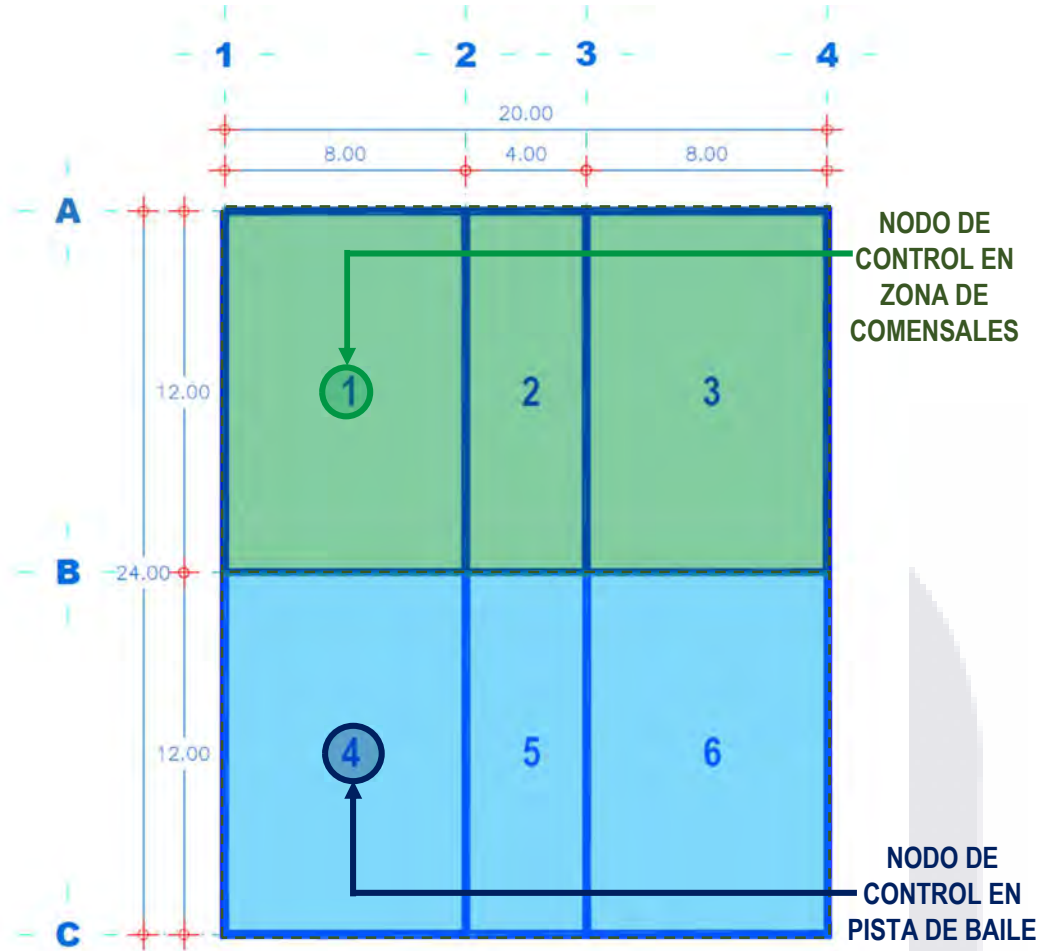


Fig. 20 - Ubicación de nodos de control para el caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.3 ÁREA DE LA PISTA DE BAILE (A_p):

Fue necesario definir la superficie de la pista de baile (A_p), en función de su ancho (B_p) y su longitud (L_p) para después utilizarla en la estimación de la población que realiza las actividades rítmicas. Así:

$$A_p = B_p L_p \quad (8.0)$$

3.4 JERARQUÍA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Con la información de la planta estructural se definieron las separaciones, longitudes, tipos de conexión y jerarquías entre los elementos tipo viga que soportan el sistema de losa compuesta.

Se definen como vigas terciarias a los elementos sobre los que se apoya la lámina acanalada, vigas secundarias a los elementos que reciben la carga de las vigas terciarias y vigas principales a aquellos que están conectados directamente a las columnas (Ver Fig. 21); de acuerdo con la imagen, la longitud de las vigas terciarias (LVT) es de 4.00 m, la de vigas secundarias (LVS) es igual a 8.00 m y la correspondiente con las vigas principales (LVP), es de 12.00 m.

Para fines de esta investigación, se consideró que la conexión entre vigas terciarias y secundarias es únicamente a cortante, mientras que la de vigas secundarias a vigas principales y la de vigas principales a columnas fueron uniones rígidas, a momento.

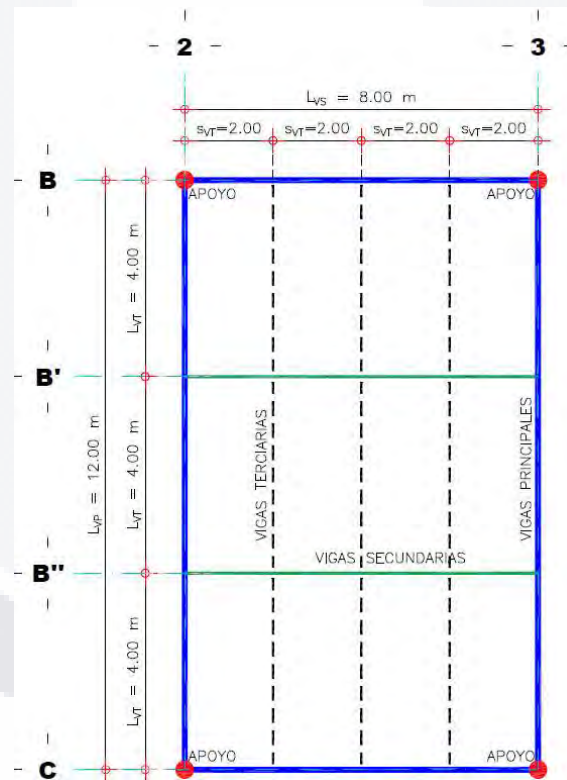


Fig. 21 – Jerarquía y dimensiones de elementos en tablero crítico. Fuente: Elaboración propia.

3.5 SEPARACIÓN ENTRE VIGAS

Con la información presentada en la Fig. 21, se observa que la separación entre vigas terciarias (s_{VT}) y vigas secundarias (s_{VS}) es igual a 2.00 y 4.00 m, respectivamente.

Para poder determinar la separación de las vigas principales (s_{VP}) debemos analizar la Fig. 22, que nos muestra, de manera esquemática, las condiciones particulares de los tableros críticos, respecto a losas contiguas a ellas; en ella se aprecia que las vigas principales tienen 2 diferentes separaciones entre sí, s_{VP1} y s_{VP2} , por lo que, para fines de realizar un análisis más conservador, se tomará como base la separación más corta e igual a 4.00 m.

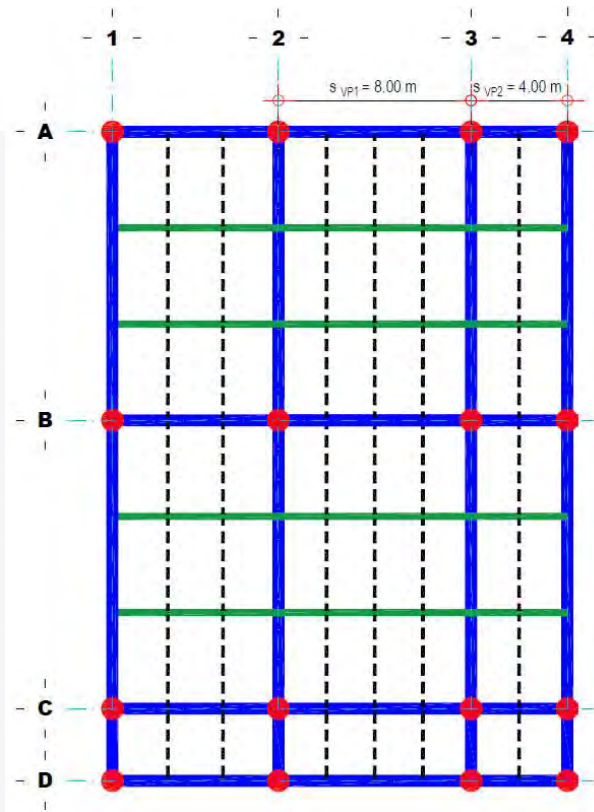


Fig. 22 – Separación entre vigas principales. Fuente: Elaboración propia.

3.6 ESTIMACIÓN DE POBLACIÓN EJECUTANDO ACTIVIDADES RÍTMICAS EN PISTA DE BAILE

3.6.1 POBLACIÓN MÁXIMA ($N_{máx}$)

Un factor relevante que determinará en gran medida los niveles de aceleración obtenidos y, por ende, la tendencia de un sistema de piso a vibrar es la cantidad de personas que realizarán las actividades rítmicas. Debido a que sólo se cuenta con la capacidad del salón, la cual es de 500 personas, según proyecto arquitectónico, fue necesario establecer un criterio lógico que permitiera una estimación realista del número máximo de personas que pudiera ejecutar, simultáneamente, los eventos rítmicos que se estudiaron ($N_{máx}$). Para ello, se recurrió al Código Municipal de Aguascalientes, el cual, en su Art. 646, define un área habitable

mínima (A_h) para sala salas de reunión de 1.00 m²/persona. Con este parámetro se calculó el número máximo de personas que pueden encontrarse en la pista de baile:

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{A_p}{A_h} \quad (9.0)$$

3.6.2. POBLACIÓN MÍNIMA ($N_{m\acute{i}n}$)

Por su parte, se decidió estudiar la respuesta estructural de la losa con una población mínima ($N_{m\acute{i}n}$), definida como el 50% de la población máxima, a fin de establecer comparaciones con un caso de carga menos conservador.

$$N_{m\acute{i}n} = 0.50 N_{m\acute{a}x} \quad (10.0)$$

3.7 DEFINICIÓN DE CARGAS

Se definieron las acciones externas que actúan sobre los tableros de interés; para este tipo de análisis, enfocados en vibraciones de sistemas de piso de un grado de libertad, son las cargas gravitacionales las que aportan los efectos que pueden llegar a provocar el fenómeno, por lo que se procedió a determinar las cargas muertas (CM) y vivas (CV) asociadas al sistema estructural.

3.7.1 CARGAS MUERTAS (CM)

Las cargas muertas son todas aquellas que provienen de los materiales con los que está construido el sistema de piso, los acabados como pisos y los plafones, las instalaciones hidrosanitarias, eléctricas y de aire acondicionado, así como cualquier otra acción que tenga un efecto de carácter permanente en la estructura del piso. La **TABLA 8** muestra las cargas muertas consideradas para el caso de estudio, de acuerdo con la memoria de cálculo del proyecto estructural:

TABLA 8. CARGAS MUERTAS CONSIDERADAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA DE PISO.

DESCRIPCIÓN	CARGA (kg/m ²)
Lámina galvanizada Galvadeck 25/Cal 22, con capa de compresión de 8 cm de concreto	266.00
Piso cerámico	30.00

Pegapiso	20.00
Plafón	30.00
Instalaciones	10.00
*Peso propio de elementos estructurales	69.25
	CM 425.25

3.7.2 CARGAS VIVAS (CV)

Las cargas vivas son las acciones derivadas de la masa de los usuarios sobre los sistemas de piso. Es importante mencionar que, para este tipo de análisis, se tendrán 2 tipos de cargas vivas para cada zona del tablero: la carga viva uniforme que será usada en la evaluación de los estados límite de falla, así como del estado límite por deflexiones (CV_{EL}) y la carga viva de servicio con la que se evaluarán las aceleraciones de entrepiso (CV_{DIN}).

3.7.2.1 CARGA VIVA UNIFORME EN ZONA DE COMENSALES PARA ESTADOS LÍMITE (CV_{EL-C}).

Este es el valor de la carga viva uniforme que recomienda el CMA para restaurantes, el cual fue utilizado en el área de comensales y con cuyo efecto se estudiaron los estados límite de falla y servicio de los perfiles propuestos en la memoria de cálculo del proyecto estructural del caso de estudio. De acuerdo con el Art. 845 del CMA, la carga viva uniforme para restaurantes es:

$$CV_{EL-C} = 350.00 \frac{kg}{m^2}$$

3.7.2.2 CARGA VIVA UNIFORME EN PISTA DE BAILE PARA ESTADOS LÍMITE (CV_{EL-P}). Este es el valor de la carga viva uniforme que recomienda el CMA para salones de baile, el cual fue utilizado en el área de la pista de baile y con cuyo efecto se estudiaron los estados límite de falla y servicio de los perfiles propuestos en la memoria de cálculo del proyecto estructural del caso de estudio. De acuerdo con el Art. 845 del CMA, la carga viva uniforme para salones de baile es:

$$CV_{EL} = 450.00 \frac{kg}{m^2}$$

3.7.2.3 CARGA VIVA MÁXIMA EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDAD RÍTMICA (CV_{MAX}). Es la carga uniforme calculada dividiendo el peso de la máxima población estimada ($N_{máx}$) para la pista de baile entre la superficie de esta (A_p). Si definimos el peso promedio de cada individuo como (P_{IND}), se tiene:

$$CV_{MAX} = \frac{N_{m\acute{a}x} P_{Ind}}{A_p} \quad (11.0)$$

3.7.2.4 CARGA VIVA MÍNIMA EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDAD RÍTMICA (CV_{MIN}). Para poder tener un punto de comparación en la respuesta del tablero crítico provocados por la máxima cantidad de personas estimadas para la pista de baile, se definió como carga viva mínima para actividad rítmica al 50% de la carga viva máxima para actividad rítmica. Esto es:

$$CV_{MIN} = 0.50 CV_{MAX} \quad (12.0)$$

3.8 MATERIALES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

3.8.1 ACERO EN PERFILES IPR

Se eligió el tipo de acero que venía especificado en el proyecto estructural del caso de estudio para los IPR, el cual, para este caso se trató de un acero ASTM A992 Gr. B, mismo que es típico para perfiles I rolados en caliente, fabricados en los alrededores de la ciudad de Aguascalientes; esta calidad de acero debe ser validada por el diseñador estructural previo a la aplicación de los siguientes pasos. De acuerdo con la NTC-DCEA (2020), este acero presenta las siguientes propiedades:

3.8.1.1 ESFUERZO DE FLUENCIA (F_y).

$$F_y = 3,515.00 \frac{kg}{cm^2}$$

3.8.1.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_s):

$$E_s = 2,040,000.00 \frac{kg}{cm^2}$$

3.8.2 ACERO EN LÁMINA ACANALADA

Se propuso la calidad del acero para la lámina acanalada que formará parte de la losa compuesta, así como sus propiedades básicas; similarmente a las vigas IPR, los valores deberán verificarse para cada proyecto y modificarse según las condiciones reales con las que se cuente.

3.8.2.1 ESFUERZO DE FLUENCIA ($F_{y-lám}$):

$$F_{y-lám} = 2,600.00 \frac{kg}{cm^2}$$

3.8.2.2 ESFUERZO DE RUPTURA ($F_{u-lám}$):

$$F_{u-lám} = 3,655.00 \frac{kg}{cm^2}$$

3.8.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD (E_s):

$$E_s = 2,040,000.00 \frac{kg}{cm^2}$$

3.8.3. CONCRETO EN CAPA DE COMPRESIÓN

En lo que concierne al concreto que formará la capa de compresión, para esta investigación se definió el que viene especificado en el proyecto estructural, sin embargo, siempre debe evaluarse de acuerdo con las características propias de los materiales pétreos de la zona, el ambiente en el que son construidas las edificaciones, las temperaturas inherentes de la zona de construcción, etc.

3.8.3.1 PESO VOLUMÉTRICO (γ_c). El peso volumétrico del concreto (γ_c) para concretos Clase 1, indicada en el proyecto estructural es:

$$\gamma_c = 2,400.00 \frac{kg}{m^3}$$

3.8.3.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (f'_c). La resistencia a compresión nominal de la capa de compresión (f'_c) fue elegida en concordancia con la memoria de cálculo del proyecto, sin embargo, este valor puede variar de un proyecto a otro por lo que el calculista deberá utilizar el que se tenga especificado para cada caso particular.

$$f'_c = 250.00 \frac{kg}{cm^2}$$

3.8.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO (E_c). De acuerdo con las NTC-DCEA (2020), el módulo de elasticidad del concreto Clase 1 (E_c), con agregado calizo, típico en la zona del Estado de Aguascalientes, se calculó como:

$$E_c = 14,000\sqrt{f'c} \tag{13.0}$$

En caso de tratarse de un concreto Clase II, el módulo de elasticidad será obtenido con la siguiente expresión:

$$E_c = 8,000\sqrt{f'c} \tag{14.0}$$

3.8.3.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (E_{CM}). De acuerdo con la DG11, el módulo de elasticidad del concreto utilizado para evaluar fenómenos dinámicos puede incrementarse en 35% para tomar en cuenta el comportamiento del material cuando es sometido a actividades rítmicas. De este modo, se definió un valor de módulo de elasticidad modificado (E_{CM}), como:

$$E_{CM} = 1.35 E_c \tag{15.0}$$

3.9 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE PISO

La estructura del tablero del caso de estudio se compone de un sistema compuesto de vigas IPR interconectadas entre sí, ligadas mediante pernos de cortante a la capa de compresión de concreto reforzado vertido sobre una lámina acanalada de acero galvanizado. En los apartados posteriores se muestran las características particulares de cada miembro, según lo indicado en la información con la que se cuenta.

3.9.1. SECCIONES DE VIGAS

3.9.1.1. VIGAS TERCIARIAS. Se definió una sección IPR 305 x 23.90 kg/m (W 12"x 16 lb/ft). En la **TABLA 9** se resumen las propiedades geométricas que se requirieron para las etapas posteriores de análisis, mientras que en la **Fig. 23** se aprecia un esquema general de la sección:

TABLA 9. PROPIEDADES DE VIGAS TERCIARIAS DEL SISTEMA DE PISO.

Sección	IPR 305 x 23.90 kg/m (W 12"x 16 lb/ft).
Peralte total (d_{VT})	30.50 cm
Momento de Inercia alrededor del eje mayor (I_{VT})	4,287.00 cm ⁴
Área de la sección transversal (A_{VT})	30.40 cm ²

Peso propio (PP_{VT})

23.90 kg/m

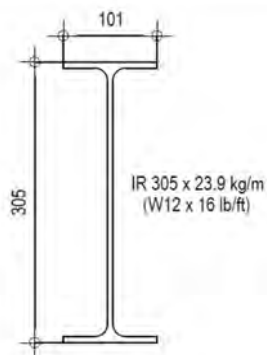


Fig. 23 Sección transversal de vigas terciarias. Fuente: Elaboración propia.

3.9.1.2. VIGAS SECUNDARIAS. Se definió una sección IPR 457 x 74.50 kg/m (W 18''x 50 lb/ft). En la TABLA 10 se resumen las propiedades geométricas que se requirieron para las etapas posteriores de análisis, mientras que en la Fig. 24 se aprecia un esquema general de la sección:

TABLA 10. PROPIEDADES DE VIGAS SECUNDARIAS DEL SISTEMA DE PISO.

Sección	IPR 457 x 74.50 kg/m (W 18''x 50 lb/ft).
Peralte total (d_{vs})	45.70 cm
Momento de Inercia alrededor del eje mayor (I_{vs})	33,298.00 cm ⁴
Área de la sección transversal (A_{vs})	94.80 cm ²
Peso propio (PP_{vs})	74.50 kg/m

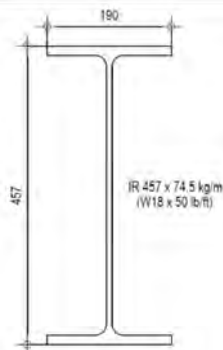


Fig. 24 Sección transversal de vigas secundarias. Fuente: Elaboración propia.

3.9.1.3. VIGAS PRINCIPALES. Se definió una sección IPR 457 x 157.50 kg/m (W 18''x 106 lb/ft). En la TABLA 11 se resumen las propiedades geométricas que se requirieron para las etapas posteriores de análisis, mientras que en la Fig. 25 se aprecia un esquema general de la sección:

TABLA 11. PROPIEDADES DE VIGAS PRINCIPALES DEL SISTEMA DE PISO.

Sección	IPR 457x 157.50 kg/m (W 18"x 106 lb/ft).
Peralte total (d_{VP})	45.60 cm
Momento de Inercia alrededor del eje mayor (I_{VP})	79,500.00 cm ⁴
Área de la sección transversal (A_{VP})	200.70 cm ²
Peso propio (PP_{VP})	157.50 kg/m

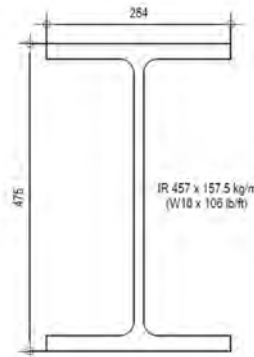


Fig. 25 Sección transversal de vigas principales. Fuente: Elaboración propia.

3.9.2. SECCIONES DE COLUMNAS

Con el objetivo de contar con una representación apegada a las condiciones reales de la estructura, principalmente en lo que concierne a la revisión de modelos tridimensionales, se decidió considerar para el sistema de piso, las propiedades de rigidez de los apoyos del tablero. Los datos de la sección tipo se tomaron del proyecto estructural, encontrando que las columnas son secciones cajón, fabricadas con 4 placas de acero, con espesor de media pulgada, orientadas de tal forma que la inercia del eje mayor provea rigidez al marco que forma con las vigas principales. Las propiedades de estos elementos se presentan en la **TABLA 12**, y su geometría general se muestran en la **Fig. 26**.

TABLA 12. PROPIEDADES DE COLUMNAS.

Sección	4 placas $t_p=1/2"$
Peralte total (d_{col})	61.00 cm
Momento de Inercia alrededor del eje mayor (I_{col})	99,030.60 cm ⁴
Área de la sección transversal (A_{col})	237.40 cm ²
Peso propio (PP_{col})	186.33 kg/m



Fig. 26 Sección transversal de columnas. Fuente: Elaboración propia.

3.9.3. LÁMINA ACANALADA Y CAPA DE COMPRESIÓN

Del proyecto estructural se tomaron los datos de la sección de lámina acanalada con la que está planteada la construcción del sistema de piso, así como las dimensiones de la capa de compresión, los cuales fueron usados para el cálculo de las propiedades como sección compuesta del tablero del siguiente apartado. En la Fig. 27, se muestran las dos dimensiones más relevantes que fueron requeridas durante el desarrollo de esta investigación, los cuales son: el peralte de la lámina acanalada ($h_{lám}$) y el espesor de concreto por encima de la cresta de la lámina (d_c), coloquialmente conocida como capa de compresión.

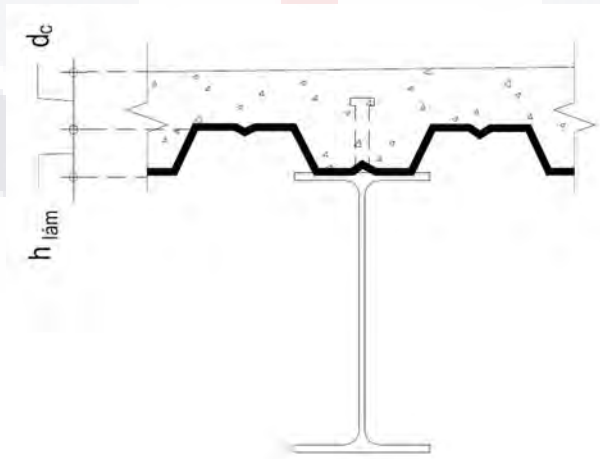


Fig. 27 – Propiedades del sistema compuesto. Fuente: Elaboración Propia

Para este caso de estudio, tenemos:

$$d_c = 8.00 \text{ cm}$$

$$h_{lám} = 6.35 \text{ cm}$$

3.10. PROPIEDADES DEL SISTEMA DE PISO TRABAJANDO COMO SECCIÓN COMPUESTA

Para cada uno de los tres tipos de vigas de las que se compone el sistema de piso, se calcularon las propiedades como sección compuesta, atendiendo las recomendaciones que marca la DG11. En los siguientes apartados se expone, de manera sintetizada, el procedimiento seguido; el desarrollo completo se puede encontrar en el capítulo de resultados. Es importante mencionar que los pasos mostrados fueron aplicados a todas las vigas; con la finalidad de no extender demasiado el contenido de este capítulo, sólo se incluyen las ecuaciones generales, las cuales deben particularizarse para cada viga.

3.10.1. RELACIÓN MODULAR (n)

Se calculó la relación modular (n), definida como la razón entre el módulo de elasticidad del acero (E_s) respecto al del concreto modificado (E_{CM}):

$$n = \frac{E_s}{E_{CM}} \quad (16.0)$$

3.10.2. ANCHO EFECTIVO (B)

El ancho efectivo (B) se calculó de acuerdo con la DG11, la cual menciona que, para vigas en tableros interiores, será el menor valor que resulte entre el espaciamiento entre elementos (s) o el 40% de la longitud del elemento evaluado (L). Matemáticamente:

$$B = \text{mín}(s, 0.4L) \quad (17.0)$$

En la Fig. 28 se muestra un esquema general que muestra los componentes y dimensiones básicas de un sistema de piso trabajando como sección compuesta. Es importante destacar que este trabajo de investigación no tiene por objetivo el diseño de los conectores de cortante que garanticen el trabajo del tablero como sección compuesta, por lo que se asumirá como válida esta consideración; en un proyecto real, esta aseveración debe revisarse para poder considerar el trabajo conjunto del acero con el concreto de la capa de compresión.

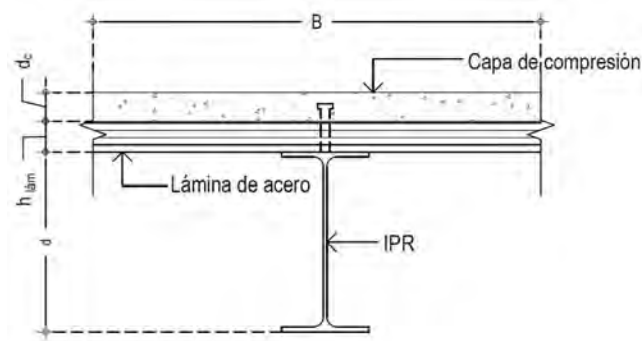


Fig. 28 – Esquema general de una sección compuesta. Fuente: Elaboración Propia

3.10.3. ANCHO EFECTIVO TRANSFORMADO

Con la relación modular (n) y el ancho efectivo (B), se calculó el ancho efectivo transformado (B_t), cuyo significado físico sería el de una sección equivalente rectangular de acero, con ancho B_t y un peralte igual a d_c , el cual es equivalente al espesor de la capa de compresión de concreto. La Fig. 29 muestra un esquema que clarifica su definición:

$$B_t = \frac{B}{n} \tag{18.0}$$

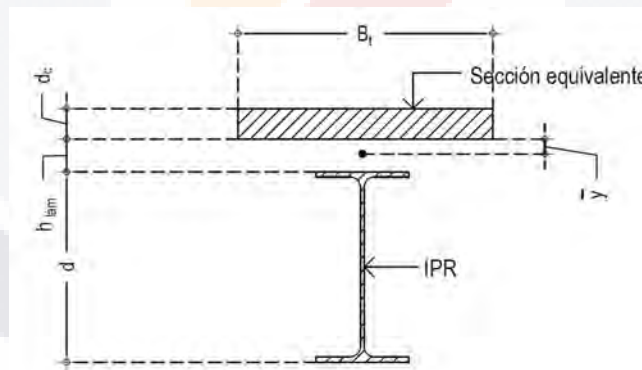


Fig. 29 – Esquema general de una sección compuesta transformada. Fuente: Elaboración Propia

3.10.4. CENTROIDE DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (\bar{y}_t)

El procedimiento continuó con la obtención del centroide la sección transformada (\bar{y}_t), aplicando los principios básicos de la estática. En la Fig. 30 se muestra la ubicación de los ejes de referencia, cuyo origen se estableció en la interfaz entre la capa de compresión y la lámina acanalada:

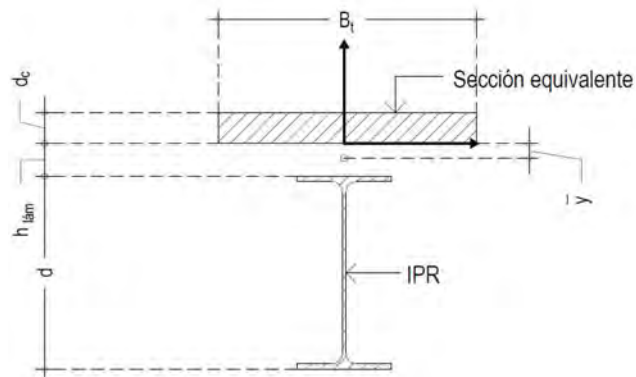


Fig. 30 – Ubicación de ejes de referencia utilizados para cálculo de centroide de sección transformada. Fuente: Elaboración Propia

Sabemos que, la ubicación del centroide en el sentido del eje vertical de una figura compuesta se calcula como:

$$\bar{y}_t = \frac{\sum A_i \bar{y}_i}{\sum A_i} \quad (19.0)$$

Donde:

A_i = Área de cada figura individual, i , que forme parte de la sección compuesta

\bar{y}_i

= Distancia entre el centroide de cada figura individual, i , y la ubicación del eje de referencia.

Como el lector puede darse cuenta, para cualquiera de las vigas del sistema de piso obtuvimos 2 figuras representativas de la sección compuesta: la viga misma y la sección rectangular equivalente de acero que se calculó al definir el ancho efectivo transformado (Ver Fig. 29). Sustituyendo los valores correspondientes en la Ecuación 19.0, tenemos:

$$\bar{y}_t = \frac{(B_t d_c) \left(\frac{d_c}{2}\right) - (A_s) \left(\frac{d}{2} + h_{lám}\right)}{B_t d_c + A_s} \quad (20.0)$$

3.10.5. MOMENTO DE INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (I_t)

Fue necesario determinar el momento de inercia de la sección transformada (I_t), para cada una de las vigas que componen los tableros de piso. Para ello, se recurrió al teorema de Huygens - Steiner, el cual estipula, en términos simples, lo siguiente:

$$I_t = \sum I_i + A_i \bar{d}_i^2 \quad (21.0)$$

Donde:

I_i

= *Momento de inercia de cada figura individual, i, que forme parte de la sección compuesta.*

A_i = *Área de cada figura individual, i, que forme parte de la sección compuesta.*

\bar{d}_i

= *Distancia entre el centroide de cada figura, i, y la ubicación del centroide transformado.*

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ecuación 21.0, tenemos:

$$I_t = \frac{B_t d_c^3}{12} + (B_t d_c) \left(\frac{d_c}{2} - \bar{y}_t \right)^2 + I_x + (A_s) \left(\frac{d}{2} + h_{lám} + \bar{y}_t \right)^2 \quad (22.0)$$

3.11. METODOLOGÍA DE LA GUÍA 11 DEL AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION

La DG11, específicamente en su Capítulo 5 destinado a la evaluación de actividades rítmicas, provee de una serie de pasos que permiten evaluar la respuesta estructural de un sistema de piso, en función de la frecuencia natural estimada del mismo. Con este valor, el cual depende primordialmente de las deformaciones individuales de los elementos que conforman los tableros investigados, fue posible establecer la magnitud de la máxima aceleración pico esperada para la estructura, según el tipo de actividad que se está efectuando.

En los siguientes apartados se desarrollarán las evaluaciones de los tres tipos de carga rítmica que considera este reglamento.

3.11.1. CARGA TOTAL DEL SISTEMA ESTRUCTURAL (C_T)

La carga total del sistema estructural utilizada para obtener la frecuencia natural del sistema se conforma por la suma de las acciones, no factorizadas, que son excitadas cuando se presenta una vibración libre en el tablero de piso. De acuerdo con la DG11, para la evaluación de cargas rítmicas, la carga total se tomó igual a la carga muerta de la estructura (Ver **TABLA 8**); en lo que concierne a la carga viva, la guía recomienda utilizar un valor

igual o cercano a cero, para este tipo de obras, por lo que la expresión que fue utilizada en el cálculo de la masa de la estructura se convierte en:

$$C_T = CM \quad (23.0)$$

3.11.2 MASA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL (M_T)

La masa total (M_T) del sistema se obtuvo multiplicando la carga total (C_T), por la superficie del tablero que se pretende evaluar (A_T), en este caso, la pista de baile y la cual se definió en el apartado 3.3:

$$M_T = CM A_T \quad (24.0)$$

3.11.3 DEFORMACIONES EN ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PISO

Se calcularon las deformaciones de los tres tipos de vigas que conforman el tablero crítico del caso de estudio, considerando a los elementos como simplemente apoyados; el tipo de carga de las vigas terciarias, así como el de las vigas secundarias fue considerada como uniformemente distribuida. Retomando la Ecuación 1.0 sabemos que:

$$\Delta_T = \left(\frac{5}{384}\right) \left(\frac{wL^4}{EI}\right) \quad (1.0)$$

La Ecuación 1.0 se utilizó para determinar las deformaciones máximas de las vigas considerando las propiedades de sección compuesta calculadas anteriormente. La carga distribuida w , se calculó según el área tributaria para estos dos tipos de elementos, de acuerdo con la separación s_{VT} y s_{VS} para vigas terciarias y secundarias, respectivamente. A la deformación calculada, derivada de la acción de las cargas externas, se le añadió la deflexión generada por el peso propio de los elementos.

En lo que concierne a las vigas principales, para el cálculo de su deformación máxima, la suposición de que la distribución de carga que reciben de las vigas secundarias es uniforme, no es realista; se aprecia que estas últimas se apoyan los elementos principales actuando como 2 cargas puntuales simétricas sobre estos, como lo esquematiza la Fig. 31.

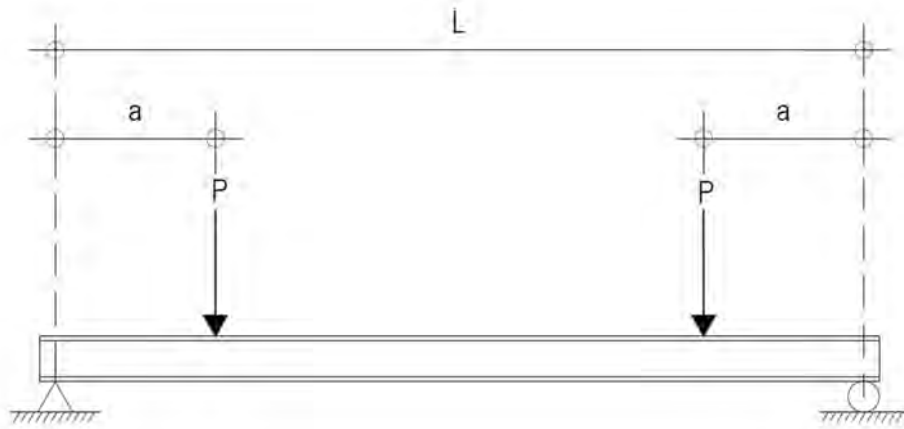


Fig. 31 – Condición de carga actuando sobre vigas principales. Fuente: Elaboración Propia

De la estática sabemos que la deformación máxima (Δ_p), al centro del claro, para una viga simplemente apoyada de estas características es:

$$\Delta_p = \left(\frac{Pa}{24 EI} \right) (3L^2 - 4a^2) \quad (25.0)$$

Al observar la geometría del tablero (ver Fig. 32), se observa que los elementos principales reciben dos reacciones del tablero aledaño el cual, si bien es más pequeño en dimensiones, su efecto fue considerado en el cálculo de la deformación total del elemento, así como el provocado por el peso propio de la viga.

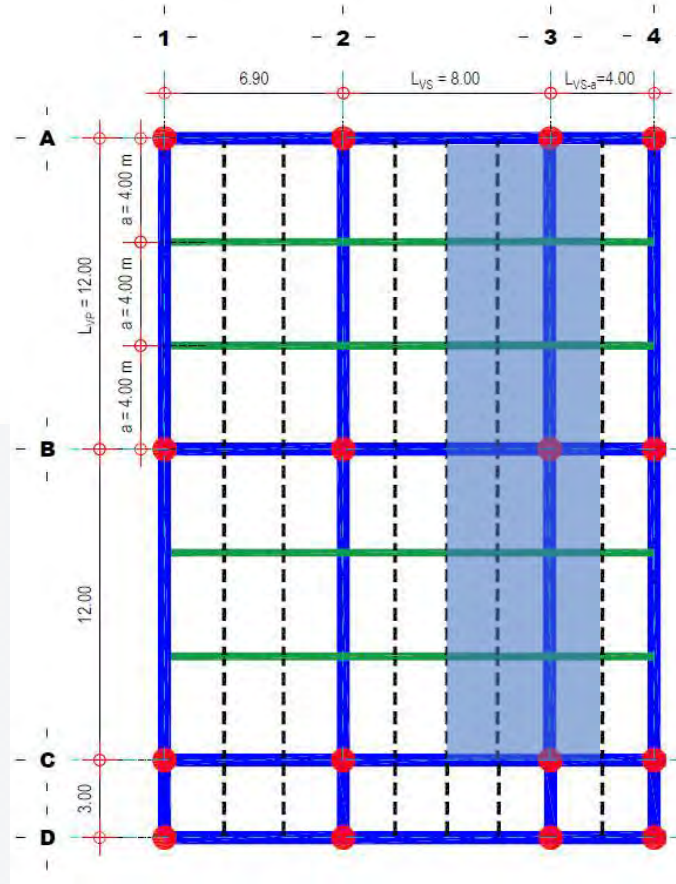


Fig. 32 – Área tributaria actuando sobre vigas principales. Fuente: Elaboración Propia

3.11.3.1 DEFORMACIÓN EN VIGAS TERCIARIAS. De acuerdo con lo anteriormente expuesto, la carga uniforme sobre las vigas terciarias se calculó como la siguiente expresión:

$$w_{VT} = C_{TEF} s_{VT} + PP_{VT} \tag{26.0}$$

Nótese que, para evitar duplicar la carga correspondiente con el peso propio de los elementos estructurales, se definió a la carga total efectiva (C_{TEF}) como el valor de la carga total de la siguiente forma:

$$C_{TEF} = C_T - PP_{SP} \tag{27.0}$$

Sustituyendo los valores de la carga uniforme, así como el momento de inercia de la sección transformada en la sección 3.10.5, en la Ecuación 26.0, se obtuvo la expresión que permitirá estimar la deflexión máxima de estos elementos:

$$\Delta_{VT} = \left(\frac{5}{384} \right) \left(\frac{(C_{TEF} s_{VT} + PP_{VT}) L^4}{E_s I_{t(VT)}} \right) \quad (28.0)$$

3.11.3.2 DEFORMACIÓN EN VIGAS SECUNDARIAS. Similarmente al caso de las vigas terciarias, se calculó la carga uniforme sobre las vigas secundarias con la siguiente expresión:

$$w_{VS} = (C_T + D_{VT}) s_{VS} + PP_{VS} \quad (29.0)$$

El parámetro D_{VT} se definió como la densidad de vigas terciarias y se calculó con la expresión que se muestra, en seguida:

$$D_{VT} = \frac{N_{VT} L_{VT} PP_{VT}}{A_T} \quad (30.0)$$

Donde:

N_{VT} = Número de vigas terciarias del sistema.

L_{VT} = Longitud de vigas terciarias.

PP_{VT} = Peso propio de las vigas terciarias.

A_T = Superficie del tablero.

Sustituyendo los valores de la carga uniforme, así como el momento de inercia de la sección transformada en la sección 5.8.5.1, en la Ecuación 17.0, se obtuvo la expresión que permitirá estimar la deflexión máxima de estos elementos:

$$\Delta_{VS} = \left(\frac{5}{384} \right) \left[\frac{\left[\left(C_T + \frac{N_{VT} L_{VT} PP_{VT}}{A_T} \right) s_{VS} + PP_{VS} \right] L^4}{E_s I_{t(VS)}} \right] \quad (31.0)$$

3.11.3.3 DEFORMACIÓN EN VIGAS PRINCIPALES. La deformación de los elementos principales de carga según lo explicado al inicio de este apartado, en donde la carga máxima al centro del elemento (Ver Fig. 31) se calculó como:

$$\Delta_p = \left(\frac{Pa}{24 EI} \right) (3L^2 - 4a^2) \quad (32.0)$$

Se definió como P_1 a la reacción de las vigas secundarias que se apoyan sobre el elemento:

$$P_1 = \frac{w_{VS} L_{VS}}{2} \quad (33.0)$$

Y a P_2 como la reacción de las vigas secundarias del tablero aledaño (Ver Fig. 32) tenemos:

$$P_2 = \frac{w_{VS} L_{VS-a}}{2} \quad (34.0)$$

La carga puntual total (P_T) que actúa sobre la viga principal se definió como:

$$P_T = P_1 + P_2 \quad (35.0)$$

Sustituyendo P_1 y P_2 en la Ecuación 35.0, resultó:

$$P_T = \frac{w_{VS}(L_{VS} + L_{VS-a})}{2} \quad (36.0)$$

Así, una vez aplicado el resultado anterior en la Ecuación 32.0, la deformación máxima al centro del claro de la viga principal, provocada por las cargas puntuales (Δ_{p1}) se calculó como:

$$\Delta_{p1} = \left[\frac{\left(\frac{w_{VS}(L_{VS} + L_{VS-a})}{2} \right) a}{24 E_s I_{t(VP)}} \right] (3L_{VP}^2 - 4a^2) \quad (37.0)$$

La deflexión de la viga principal por efecto de su peso propio (Δ_{p2}) es:

$$\Delta_{P2} = \left(\frac{5}{384}\right) \left[\frac{PP_{VP} L^4}{E_s I_{t(VP)}}\right] \tag{38.0}$$

Por último, gracias al principio de superposición, la deformación total de la viga principal (Δ_{VP}) se definió como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Delta_{VP} = \Delta_{P1} + \Delta_{P2} \tag{39.0}$$

Sustituyendo los resultados de la Ecuaciones 37.0 y 38.0 en la expresión anterior, tenemos:

$$\Delta_{VP} = \left[\frac{\left(\frac{w_{VS}(L_{VS} + L_{VS-a})}{2}\right)a}{24 E_s I_{t(VP)}}\right] (3L^2 - 4a^2) + \left(\frac{5}{384}\right) \left[\frac{PP_{VP} L_{VP}^4}{E_s I_{t(VP)}}\right] \tag{40.0}$$

3.11.3.4 EFECTO DE CONTINUIDAD EN VIGAS. El efecto de la continuidad provista por el tipo de conexión entre las vigas secundarias y las principales, así con el de estas últimas con las columnas no fue considerado ya que la DG11 sólo considera un factor de reducción para marcos muy particulares en donde la longitud de las vigas de dos tableros contiguos varía, considerablemente, entre sí. Para el caso que se trabajó, dado que se estudiaron dos tableros idénticos en magnitud, no se cumple la condición y, por ende, de acuerdo con los autores de este reglamento, no se ha encontrado evidencia de que las conexiones rígidas aumenten considerablemente la frecuencia de un sistema de piso.

3.11.4 FRECUENCIA NATURAL DEL TABLERO

En esta etapa de análisis se retomó lo establecido en el apartado 2.3.2, específicamente lo establecido en la Ecuación 4.0:

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_T}} \tag{4.0}$$

Si expresamos la deformación máxima del tablero idealizado como:

$$\Delta_T = \Delta_{VT} + \Delta_{VS} + \Delta_{VP} \tag{41.0}$$

Se reescribió la expresión 4.0 de la siguiente manera:

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_{VT} + \Delta_{VS} + \Delta_{VP}}} \quad (42.0)$$

3.11.5 DEFINICIÓN DE AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL

3.11.5.1. CRITERIO NTC-DCEA (2020). La TABLA 1, muestra los valores de amortiguamiento para diferentes sistemas de piso:

TABLA 13. FRACCIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (β) PARA DIFERENTES SISTEMAS DE PISO

Fracción de amortiguamiento (β) en porcentaje	Sistema de Piso
0.50	Estructuras de acero unidas por medio de soldaduras
1.00	Sistemas de piso vacíos o con muy pocos elementos estructurales.
3.00	Combinaciones de sistemas de piso de acero y concreto con algunos elementos estructurales que reducen los claros.
4.50	Combinaciones de sistemas de piso de acero y concreto que adicionalmente tienen elementos estructurales cercanos que trabajen como arriostramientos, de tal forma que modifiquen la forma modal vertical del entrepiso.

3.11.5.2. CRITERIO DG11. En lo que respecta a la definición de este parámetro, la Guía 11 del A.I.S.C. menciona en el Capítulo 5, correspondiente a la evaluación de cargas rítmicas, que la relación de amortiguamiento puede ser considerada del orden del 6%, ya que considera la aportación de amortiguamiento proporcionado por los ocupantes de la losa. Para el desarrollo de la investigación se usará este valor como el amortiguamiento del sistema.

3.11.6 CÁLCULO DE LAS ACELERACIONES PICO DE ENTREPISO

Retomando la Ecuación 5.0, del apartado 2.3.2, sabemos que para evaluar las aceleraciones de entrepiso en un tablero tenemos:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1.30 \alpha_i \left(\frac{W_p}{W_t}\right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_n}{f}\right)^2 - 1\right]^2 + \left[\frac{2\beta f_n}{f}\right]^2}} \quad (5.0)$$

Como se puede apreciar, la expresión 5.0 involucra definir, algunos parámetros asociados a diferentes tipos de actividad rítmica, entre ellos se encuentran los coeficientes dinámicos (α_i), así como las frecuencias forzadas para diferentes armónicos (f) y valores de carga uniforme de los participantes para cada tipo de actividad.

Las 3 actividades que se incluyen en este reglamento son las siguientes:

1. Cena/Baile
2. Conciertos en vivo y eventos deportivos
3. Actividades con saltos

3.11.6.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS. La **TABLA 1**, que se reescribe, a continuación, define los valores de los parámetros necesarios para la aplicación de la Ecuación 5.0, según el tipo de actividad:

TABLA 1
PARÁMETROS PARA CÁLCULO DE ACELERACIÓN PICO DE ACTIVIDADES RÍTMICAS (DG11)

Actividad	Armónico	Frecuencia Forzada, f (Hz)			Carga de participantes W_p (kg/m ²)	Coeficiente Dinámico α_i
		Mín	Max	Prom		
Cena/Baile	1.00	1.50	3.00	2.25	60.00	0.50
	2.00	3.00	5.00	4.00		
Concierto/Evento Deportivo	1.00	1.50	3.00	2.25	150.00	0.25
	2.00	3.00	5.00	4.00		
	3.00	6.00	8.25	7.13		
Saltos	1.00	2.00	2.75	2.38	20.00	1.50
	2.00	4.00	5.50	4.75		
	3.00	6.00	8.25	7.13		

Nota: Adaptada de DG11, Murray et al., 2003, Steel Design Guide Series, Vol. 11, p. 38.

En lo que respecta específicamente al parámetro de peso propio de los participantes (W_p), los valores propuestos en la tabla fueron modificados para apegarse a las dos densidades de carga discutidas en los apartados 3.7.2.3 y 3.7.2.4.

Por su parte, para esta investigación se tomaron las frecuencias forzadas máximas para la evaluación de las aceleraciones pico en el sistema de piso.

3.11.6.2 CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN EFECTIVA MÁXIMA (a_m). Cuando se evalúan actividades rítmicas con más de un armónico de interés, como en el caso de eventos con multitudes o aquellos relacionados con ejercicios aeróbicos y saltos, se debe calcular una aceleración efectiva máxima (a_m), que considere el efecto de todos los armónicos involucrados:

$$\frac{a_m}{g} = \frac{[\sum a_i^{1.5}]^{\frac{1}{1.5}}}{g} \quad (43.0)$$

3.11.6.3 COMPARACIÓN CONTRA LÍMITES DE ACELERACIÓN PERMISIBLES ($\frac{a_0}{g}$). Los órganos internos del ser humano tienen una frecuencia fundamental que determina el nivel de percepción tolerable para la mayoría de las personas, en lo que respecta a aceleraciones a las que son sometidos.

Los niveles de percepción varían según el tipo de actividad que estén desarrollando los humanos al presentarse las vibraciones del sistema estructural. Las aceleraciones permisibles se indican en diagramas como los mostrados en la Fig. 6 y en la Fig. 7, en los cuales se relaciona la frecuencia natural del sistema estructural con el valor máximo de aceleración pico, en porcentaje de la gravedad, que una persona es capaz de soportar sin perder la sensación de confort.

Según el tipo de actividad que se está evaluando y la frecuencia natural del sistema que se estudia, se compararon las aceleraciones pico calculadas antes contra los límites de aceleración explicados en el párrafo anterior para determinar la rigidez del entrepiso.

Para el caso de estudio y tomando como referencia las Fig. 6, se obtuvieron los siguientes límites de aceleración perceptible:

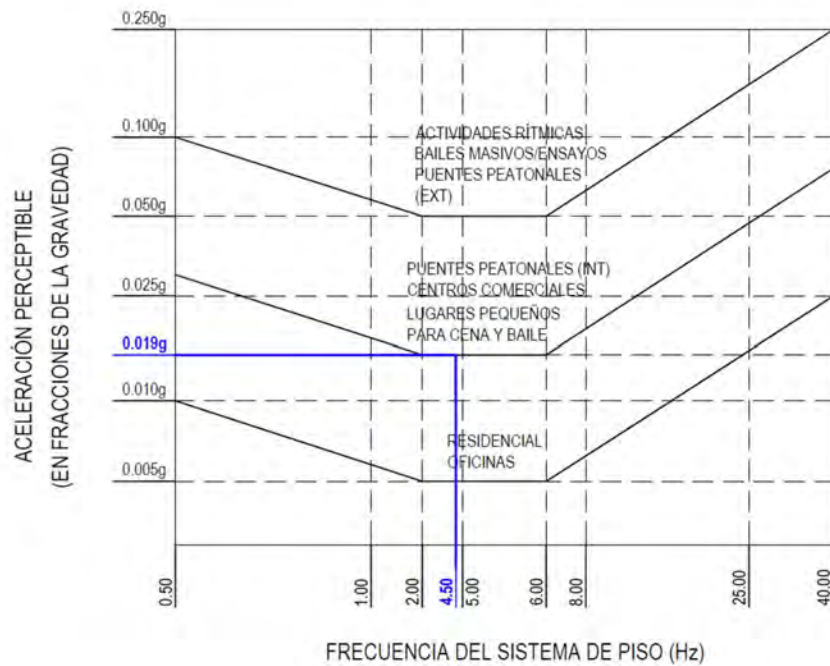


Fig. 33 – Aceleración límite para actividades de cena o baile. Fuente: Elaboración Propia

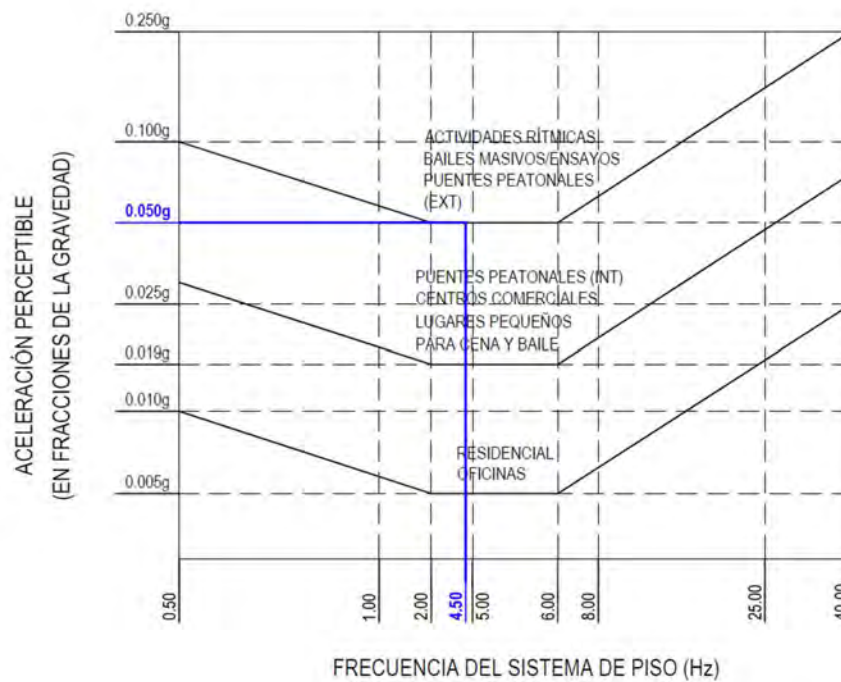


Fig. 34 – Aceleración límite para actividades de saltos, conciertos y bailes masivos. Fuente: Elaboración Propia

Del análisis realizado para las figuras anteriores, se definieron los siguientes límites para las aceleraciones de entepiso:

a) CENA/BAILE

$$\left(\frac{a_0}{g}\right)_{m\acute{a}x} = 0.019$$

b) CONCIERTO/EVENTO DEPORTIVO

$$\left(\frac{a_0}{g}\right)_{m\acute{a}x} = 0.050$$

c) SALTOS

$$\left(\frac{a_0}{g}\right)_{m\acute{a}x} = 0.050$$

3.12 MODELACIÓN NUMÉRICA

Con la finalidad de lograr probar la hipótesis planteada en esta investigación, en la que se parte de la idea de que un análisis computacional refinado nos puede brindar la posibilidad de diseñar sistemas de piso compuestos de grandes dimensiones, más eficientes y por ende, más económicas y sustentables, se construyeron dos modelos tridimensionales que representan, fielmente, las características propias del caso de estudio que se evalúa.

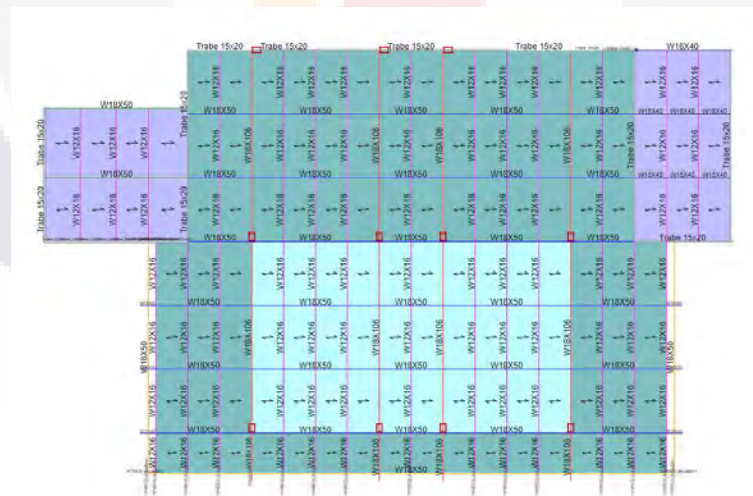
La diferencia entre ambos radica en el tipo de elementos que se utilizan para modelar la losa compuesta: por una parte se construyó un modelo con elementos conocidos como Decks, los cuales tienen la característica básica de transmitir las cargas hacia los elementos de soporte pero que, en ETABS v.20, permiten el diseño de los elementos de soporte considerando las propiedades de sección compuesta y brindan al usuario de un reporte con las frecuencias fundamentales de los elementos individuales así como de los tableros que consideran la interacción entre pares de vigas interconectadas entre sí. La limitación que tiene este modelo tiene que ver con que no se pueden modelar sobre él funciones dinámicas que simulen el comportamiento de individuos realizando actividades rítmicas sobre él.

En el segundo modelo se utilizaron elementos tipo Shell o membrana, los cuales pueden ser discretizados de tal forma que se represente la ubicación precisa de cada individuo actuando sobre la losa, además de la ejecución de un análisis modal en el sentido de aplicación de las cargas que, para este caso, es en el sentido vertical. Este tipo de análisis permite la obtención de las formas y frecuencias naturales asociadas a cada modo de vibrar que se requiera; además de lo anterior, con el software se obtuvieron las gráficas de aceleraciones pico obtenidas para cada una de las actividades rítmicas, las cuales se compararon contra la metodología propuesta por la DG11.

A continuación, se desarrollan en detalle, las propiedades de cada modelo y los pasos que se siguieron para cada una de las etapas, los cuales se redactan de tal forma que puedan ser aplicados para cualquier configuración estructural que se pretenda estudiar. En el capítulo de resultados se muestra la aplicación de estos en el caso de estudio que atañe a este trabajo de investigación.

3.12.1 MODELO NUMÉRICO CON ELEMENTOS TIPO DECK

Para esta investigación, se ha decidido modelar todo el sistema de piso, según las dimensiones reales en planta, obtenidas de los planos estructurales del caso de estudio, utilizando elementos tipo Frame para las vigas y columnas, así como elementos tipo Deck para la modelación y diseño del sistema de piso como un sistema compuesto. En las siguientes figuras, se muestran algunas imágenes representativas del modelo.



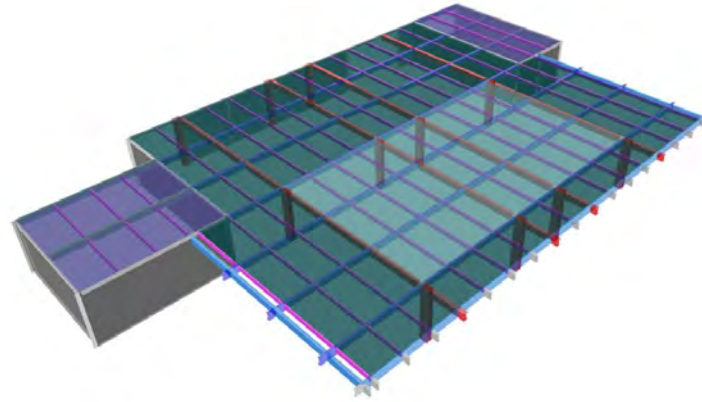


Fig. 36 – Vista isométrica con renderizado 3D de modelo con elementos tipo Deck. Fuente: Elaboración Propia

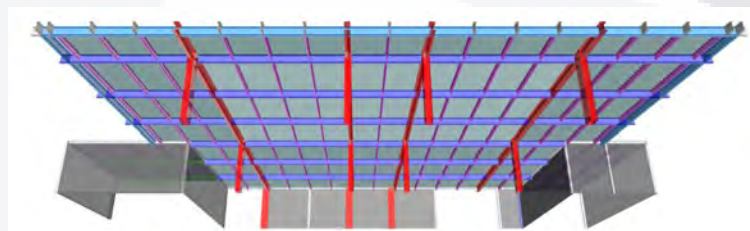


Fig. 37 – Perspectiva inferior de modelo con elementos tipo Deck. Fuente: Elaboración Propia

3.12.1.1 MATERIALES. Los materiales usados en el modelo estructural tienen las mismas propiedades definidas en los apartados 3.8 del capítulo anterior:



Fig. 38 – Propiedades del concreto usado en modelo estructural en modelos numéricos. Fuente: Elaboración Propia

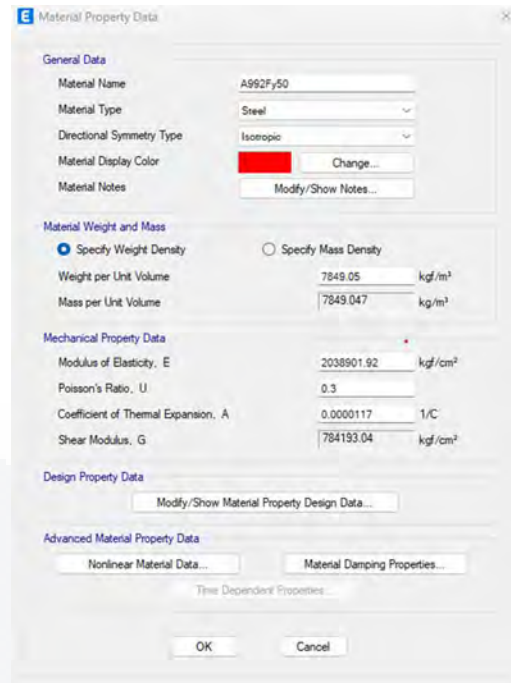


Fig. 39 – Propiedades del acero en vigas IPR de modelos numéricos. Fuente: Elaboración Propia

3.12.1.2 ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE PISO.

3.12.1.2.1 PROPIEDADES DE LÁMINA ACANALADA. Específicamente para el modelo con Decks, es posible evaluar los estados límites de las secciones propuestas trabajando como sección compuesta, tanto de esfuerzo como de deformación admisible: para ello se definieron las propiedades de la sección de lámina acanalada que trabajará como parte del sistema de piso:

General Data	
Property Name	Galvaldeck 25 Cal 22 (8 cm)
Type	Filled
Slab Material	FC=250 (Dinámico)
Deck Material	A653SQGr37
Modeling Type	Membrane
Modifiers (Currently Default)	Modify/Show...
Display Color	Change...
Property Notes	Modify/Show...
Property Data	
Slab Depth, tc	8 cm
Rib Depth, hr	6.4 cm
Rib Width Top, wrt	10.8 cm
Rib Width Bottom, wrb	13.9 cm
Rib Spacing, sr	30.5 cm
Deck Shear Thickness	0.1 cm
Deck Unit Weight	8.32 kg/m ²
Shear Stud Diameter	1.9 cm
Shear Stud Height, hs	11 cm
Shear Stud Tensile Strength, Fu	4078.86 kg/cm ²

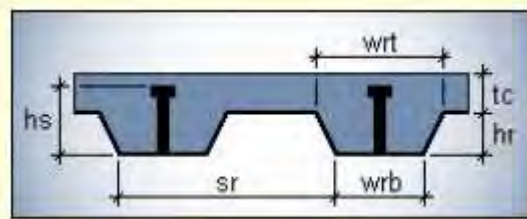


Fig. 40 – Propiedades de la lámina acanalada y capa de compresión de modelos numéricos. Fuente: Elaboración Propia

3.12.1.2.2 PROPIEDADES DE PERFILES IPR. Una de las tareas más relevantes en la evaluación de sistemas de piso sometidas a vibraciones es la determinación de las deformaciones del tablero. Como el lector puede observar en la sección destinada a la evaluación con la metodología de la Guía 11 del A.I.S.C., el valor del momento de inercia de las secciones IPR, usado para el cálculo de deflexiones, es el que corresponde a la sección compuesta.

Para el modelo con Decks, el programa realiza el cálculo de la sección transformada de manera automática, por lo que basta definir a los elementos barra que modelan las vigas de acuerdo con el catálogo de secciones propio del software.

3.12.1.3 CARGAS. En el modelo con Decks se definieron las siguientes acciones: la carga muerta del apartado 3.7.1, en toda la superficie de la losa, la carga viva para restaurantes del apartado 3.7.2.1 para la zona de comensales y la carga viva del apartado 3.7.2.2 en la pista de baile.

3.12.1.4 COMBINACIONES DE CARGA. Para la evaluación de los efectos de las diferentes acciones, se usaron las combinaciones de carga, inherentes a las cargas gravitacionales, debido a que son estas últimas las que tienen influencia en la vibración de sistemas de piso. Se consideraron las combinaciones marcadas en las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones en las Edificaciones, versión 2020.

El estado límite por deflexiones se considera un estado límite de servicio, por lo que se evalúa sin factores de carga; por su parte, la respuesta estructural por esfuerzos se evalúa con cargas factorizadas. Al tratarse de una estructura, potencialmente, sometida a eventos masivos, la edificación se categoriza como con el Tipo A, por lo que los factores de diseño son mayorados. De este modo:

COMBINACIONES DE SERVICIO (S_i)

$$S_1 = CM$$

$$S_2 = CM + CV$$

COMBINACIONES DE DISEÑO (D_i)

$$D_1 = 1.4CM$$

$$D_2 = 1.5CM + 1.7CV$$

3.12.1.5 ESTADOS LÍMITE DE FALLA Y DEFLEXIONES. El modelo con Decks permitió la verificación de las secciones propuestas en el proyecto estructural para los estados límite de falla y de servicio por deflexiones, considerando la sección compuesta. El módulo de diseño es muy práctico e intuitivo, permitiendo al usuario, incluso, el diseño del espaciamiento de los conectores de cortante. Así mismo, ETABS v.20 incluye una revisión por vibraciones basada en la metodología de la DG11 en la que se puede evaluar la frecuencia natural de los miembros individuales y de los tableros, de manera general.

3.12.1.6 DEFORMACIONES OBTENIDAS DE MODELO CON DECKS. Del modelo con Decks se obtuvieron los reportes de diseño emitidos por el programa, con la finalidad de verificar las deformaciones máximas calculadas y validar que la propuesta estructural del caso de estudio estuviera dentro de los límites

de aceptación de la normativa A.I.S.C. así como de la normativa local, específicamente del Código Municipal de Aguascalientes el cual, en su artículo 862, indica un límite de deformación vertical para elementos a flexión (Ver Ecuación 45.0), el cual se comparó con el obtenido de la modelación numérica.

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{240} + 0.50 \quad (45.0)$$

Donde:

L = Claro libre del elemento evaluado.

Dentro del reporte se reportan dos valores de deformación: el primero tiene que ver con las condiciones de servicio propuestas por el A.I.S.C., la cual no considera a los elementos como sección compuesta y se calcula de acuerdo con las condiciones de apoyo definidos en el modelo para cada viga.

El segundo enfoque calculó las deformaciones de los elementos siguiendo la metodología de la DG11, asumiendo que los elementos están simplemente apoyados, pero sí tomando en cuenta la sección compuesta; con esta última, se define el valor de la frecuencia natural individual para cada elemento.

3.12.1.7 FRECUENCIA NATURAL DE TABLERO CRÍTICO DE MODELO CON DECKS. En lo que concierne a frecuencias naturales, se decidió evaluar dos enfoques: el primero consistió en aplicar la Ecuación 42.0, utilizando las deformaciones por el programa, considerando las vigas simplemente apoyadas.

La segunda aproximación utilizó los datos de frecuencia natural calculada automáticamente por el software, el cual, únicamente, considera la deformación de pares de elementos conectados entre sí. En otras palabras, no realiza una evaluación de un tablero de manera global sino parcialmente para cada par de elementos constitutivos del sistema.

Para lograr la obtención de una frecuencia natural aproximada, tomando en cuenta todos los elementos que se deforman en el caso de estudio, se utilizó la relación de Dunkerley, la cual es aplicable a sistemas de un grado de libertad, y relaciona las frecuencias naturales de cada par de elementos, de nuestro caso de estudio, en la siguiente forma:

$$\frac{1}{f_n^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} \quad (46.0)$$

Siendo:

$f_1 =$ Frecuencia natural de un panel compuesto por vigas terciarias y vigas secundarias.

$f_2 =$ Frecuencia natural de un panel compuesto por vigas secundarias y vigas principales.

Considerando estas 2 frecuencias, estaremos tomando en cuenta las deformaciones de los 3 tipos de vigas en el sistema de piso investigado.

Despejando el valor de la frecuencia natura global (f_n), tenemos:

$$f_n = \frac{f_1 f_2}{\sqrt{f_1^2 + f_2^2}} \quad (47.0)$$

3.12.2 MODELO NUMÉRICO CON ELEMENTOS TIPO SHELL

Para la evaluación de las vibraciones, a diferencia del modelo para cargas estáticas, se utilizaron elementos tipo Frame para las vigas y columnas, pero con elementos tipo Shell para la representación de la losa de este tipo de sistemas compuestos. Esto debido a que sólo de esta forma es posible realizar un análisis modal de la estructura que nos permita obtener los periodos naturales de vibración, y por ende, las frecuencias fundamentales del sistema. En las siguientes figuras, se muestran algunas imágenes representativas del modelo.

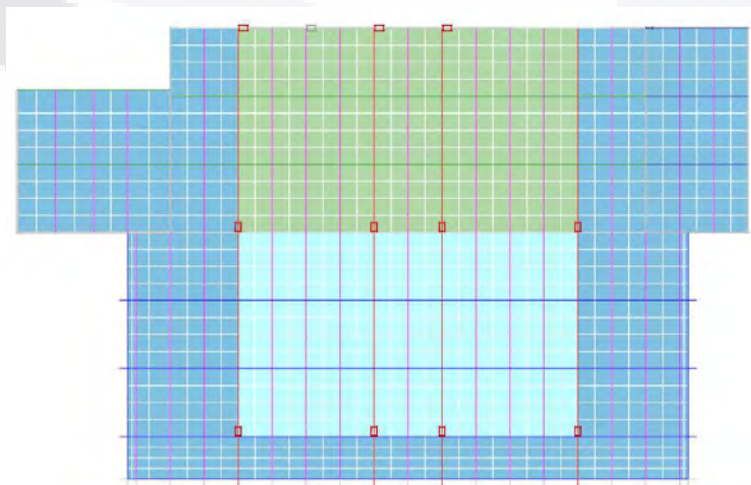


Fig. 41 – Planta general de modelo con elementos tipo Shell. Fuente: Elaboración Propia

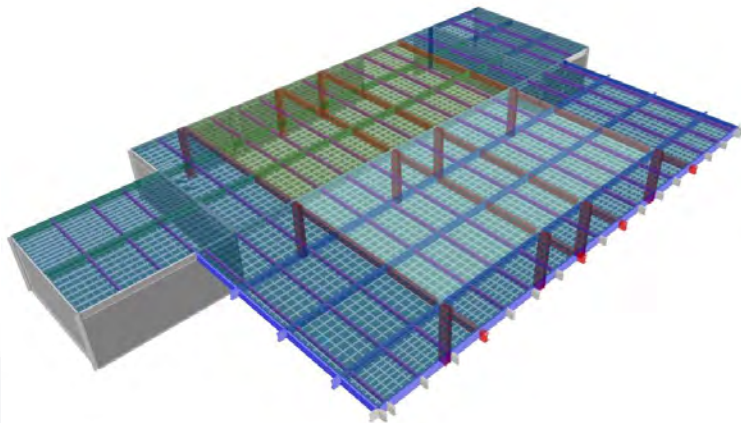


Fig. 42 – Vista isométrica con renderizado 3D de modelo con elementos tipo Shell. Fuente: Elaboración Propia

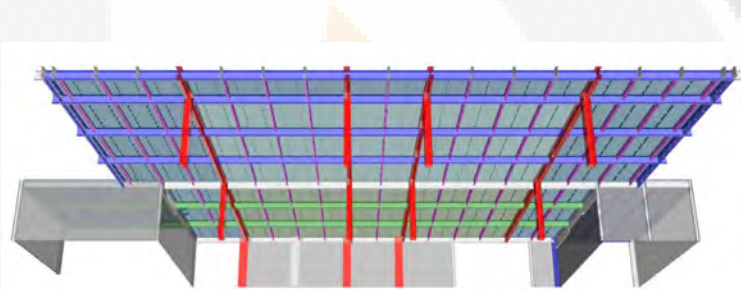


Fig. 43 – Perspectiva inferior de modelo con elementos tipo Shell. Fuente: Elaboración Propia

3.12.2.1 MATERIALES. Los materiales usados en el modelo estructural tienen las mismas propiedades que las definidas para el modelo con Decks.

3.12.2.2 ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE PISO.

3.12.2.2.1 PROPIEDADES DE LÁMINA ACANALADA. Una de las limitantes que se encontraron con la elaboración de un modelo con elementos tipo Shell, es que en este no fue posible definir las propiedades de la lámina galvanizada ni de la capa de compresión. Fue necesario modificar los elementos membrana, de tal forma que aportaran la masa correspondiente al sistema estructural lámina y capa de compresión ($PP_{\text{lám+cc}}$) definidos en la estimación de la carga muerta (Ver **TABLA 8**). De la definición de cargas tenemos:

$$PP_{lám+cc} = 266.00 \frac{kg}{m^2}$$

El peso volumétrico del concreto (γ_c) es:

$$\gamma_c = 2,400.00 \frac{kg}{m^3}$$

Por lo que el espesor de una sección rectangular de concreto, de 1.00 m² que tenga la masa asociada al sistema compuesto (e_{eq}):

$$e_{eq} = \frac{266.00 \frac{kg}{m^2}}{2,400.00 \frac{kg}{m^3}} = 0.111 m \cong 11.10 cm$$

En la siguiente figura se muestran las propiedades del elemento Shell que se usó en el modelo para evaluar respuesta dinámica:

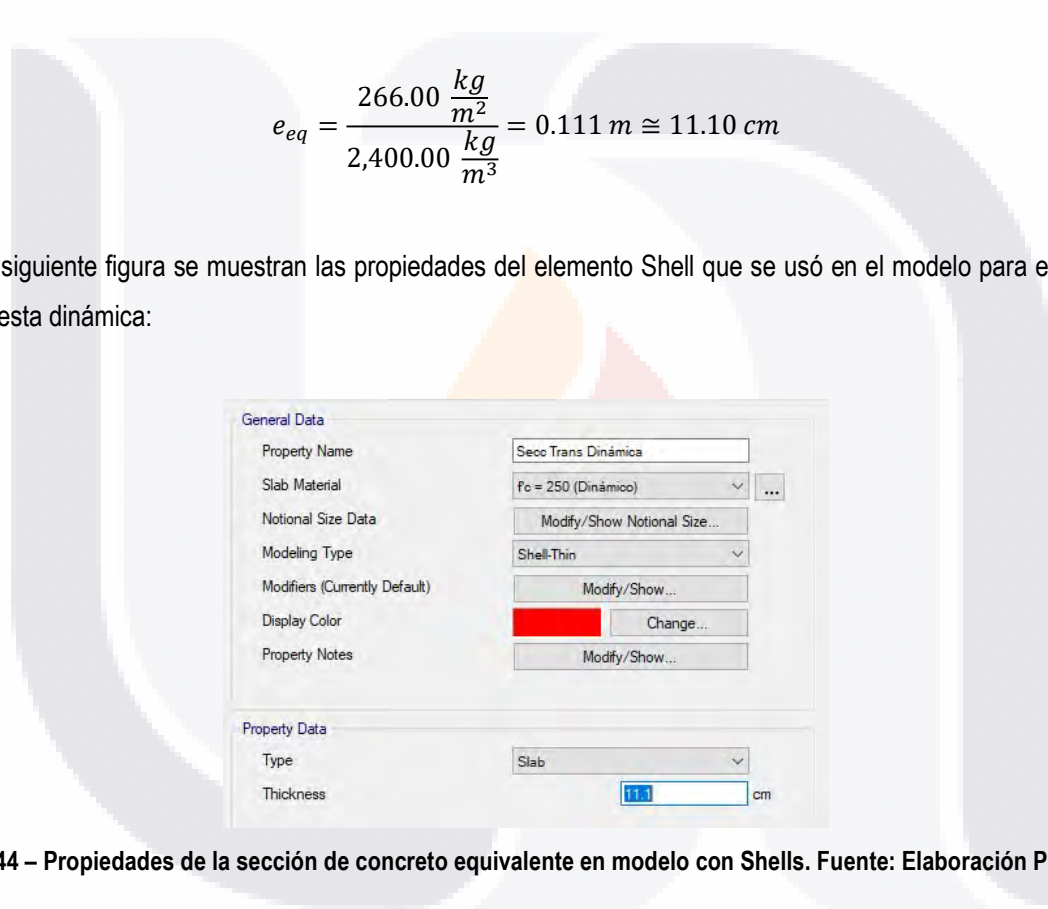


Fig. 44 – Propiedades de la sección de concreto equivalente en modelo con Shells. Fuente: Elaboración Propia

3.12.2.2 PROPIEDADES DE PERFILES IPR. Para el modelo con Shells se modificaron las secciones IPR de las diferentes vigas usadas en el tablero, multiplicando su inercia por un factor (F_a) que se definió como la relación entre la inercia transformada y la inercia propia de la sección.

$$F_a = \frac{I_t}{I_s} \tag{44.0}$$

A continuación, se resume en la **TABLA 14** el cálculo de tales factores, mientras que la **Fig. 45**, **Fig. 46** y la **Fig. 47** muestran las capturas de pantalla del modelo, en las cuales se aprecia la modificación del momento de inercia con el factor correspondiente para cada elemento

TABLA 14. FACTOR DE AJUSTE DE INERCIA DE VIGAS IPR EN MODELO CON SHELLS

	Inercia de sección	Inercia Transformada	Factor de Ajuste
Elemento	$I_s (cm^4)$	$I_t (cm^4)$	(F_a)
Vigas terciarias	4,287.20	22,430.50	5.23
Vigas secundarias	33,298.50	118,705.50	3.57
Vigas principales	79,500.20	245,869.99	2.82

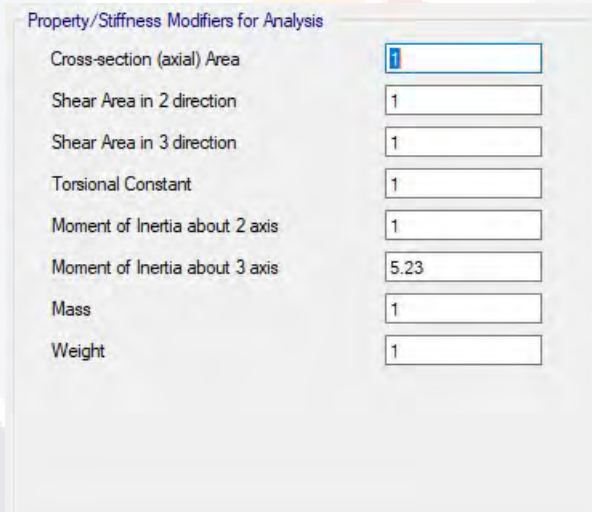


Fig. 45 – Modificación de momento de inercia de vigas terciarias. Fuente: Elaboración Propia

Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	1
Moment of Inertia about 3 axis	3.57
Mass	1
Weight	1

Fig. 46 – Modificación de momento de inercia de vigas secundarias. Fuente: Elaboración Propia

Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	1
Moment of Inertia about 3 axis	2.82
Mass	1
Weight	1

Fig. 47 – Modificación de momento de inercia de vigas principales. Fuente: Elaboración Propia

3.12.2.3 ZONIFICACIÓN DEL MODELO CON SHELLS. En el modelo estructural con shells, se definen los nodos de control en cada zona de interés. En la Fig. 48 se muestran las ubicaciones reales de los puntos de interés sobre el modelo numérico:

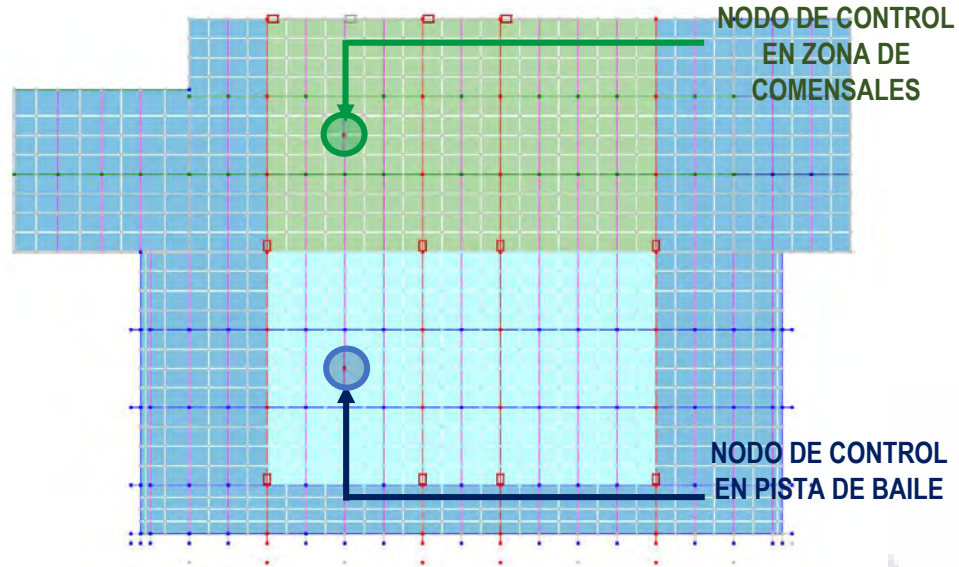


Fig. 48 – Ubicación de zonas y nodos de control en modelo con Shells. Fuente: Elaboración Propia

3.12.2.4. CARGAS. En el modelo con Shells se definieron, como cargas uniformes, las siguientes acciones: la carga muerta del apartado 3.7.1, en toda la superficie de la losa, omitiendo el peso propio ya que lo considera el programa, así como la carga viva para restaurantes del apartado 3.7.2.3 para la zona de comensales; por su parte, la carga viva del apartado 3.7.2.4, en la pista de baile, se consideró como carga unitarias puntual, discretizando la losa de tal forma que nos permitiera modelar las 240 personas del caso crítico (Ver Fig. 49), así como las 120 personas del evento menos conservador (Ver Fig. 50):

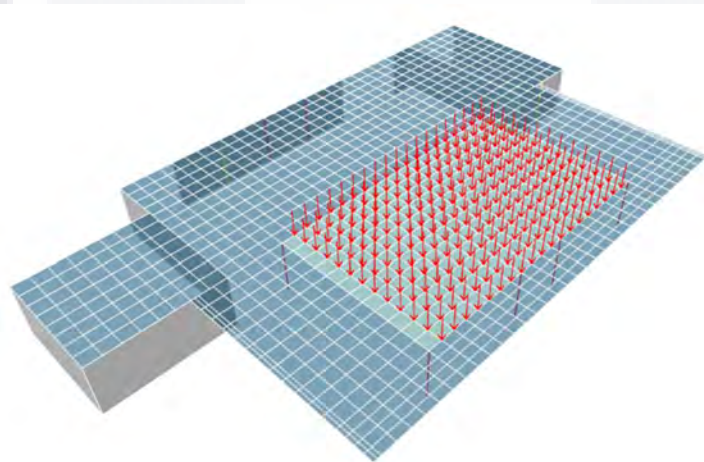


Fig. 49 – Modelo estructural cargado con 240 personas. Fuente: Elaboración Propia

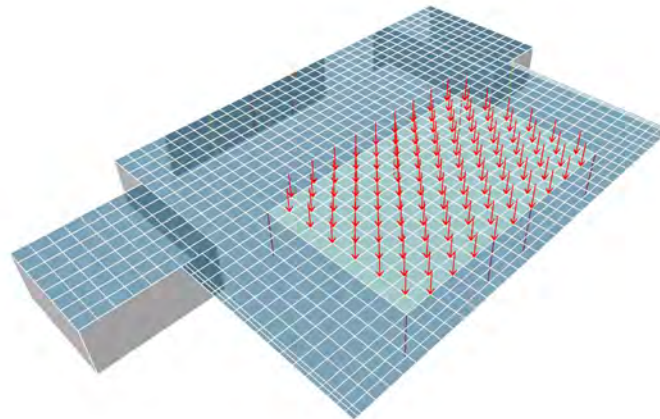


Fig. 50 – Modelo estructural cargado con 120 personas. Fuente: Elaboración Propia

El hecho de que se modelaran los individuos con una carga unitaria tiene que ver con el hecho de que las funciones dinámicas con las que se evaluarán los eventos rítmicos ya incluyen el peso propio de las personas, por lo que el software únicamente utiliza el valor unitario para identificar los nodos en los que se ejecutará la función tiempo-historia, sin duplicar el valor de carga.

3.12.2.5 DEFINICIÓN DE CARGAS DINÁMICAS EN SOFTWARE DE ELEMENTO FINITO. El programa ETABS v. 2021 permite la definición de una función tiempo – historia, las cuales, para este caso, están determinadas para cada una de las actividades rítmicas evaluadas, tanto bajo los criterios de Faisca como los de Millán, como se explicó en el apartado 2.4.

Las funciones dinámicas se definieron para una duración de 30.00 segundos, la cual se definió al observar que, con este valor, el espectro de aceleraciones que se obtuvo abarcaba todos los picos de aceleración máximos y mínimos alcanzables, por lo que duraciones mayores no alterarían la respuesta estructural pero sí tendrían un efecto importante en la duración del análisis. En la **Fig. 51** se muestra, a manera de ejemplo, la definición de la función dinámica para el ritmo de Reggeatón.

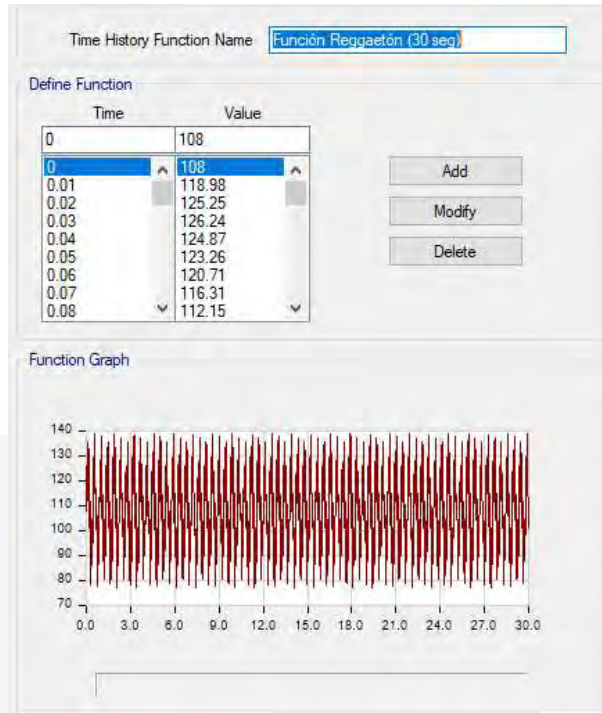


Fig. 51 Definición de función tiempo-historia para el ritmo de Reggaetón. Fuente: Elaboración propia.

3.12.2.5 DEFORMACIONES. Debido a que los tres tipos de vigas ya incluyen las propiedades de sección compuesta, se calculó la deformación real de los elementos (Δ_R), la cual se define como la diferencia entre la deformación al centro del claro del elemento investigado y la deflexión medida en el apoyo de dicho elemento (por ejemplo, la deflexión del centro del claro de una viga que sirve de apoyo a otra de menor jerarquía, en ese punto).

3.12.2.6 FRECUENCIAS NATURALES. En este apartado se calcularon las frecuencias naturales bajo 2 enfoques: el primero fue sustituyendo las deformaciones calculadas en los apartados previos, en la Ecuación 42.0.

Aprovechando las ventajas del software de elementos finitos, el segundo método de obtención de la frecuencia natural del sistema fue a través de un análisis modal del entrepiso. Para complementa el análisis de la información, se establecieron los porcentajes de participación de masa para los primeros modos de vibrar, a fin de encontrar formas de vibrado que no tuvieran relevancia en el análisis.

3.12.2.7 ACCELERACIONES DE ENTREPISO. La última fase del análisis con el modelo de elemento finito fue muy relevante ya que consistió en la determinación de las historias de aceleración para los 2 nodos de control definidos para este modelo. (Ver **Fig. 48**), con las cuales fue posible estudiar las aceleraciones pico asociadas a cada actividad rítmica tanto en la pista de baile, así como en la zona de comensales, lo que constituyó una de las grandes ventajas de realizar este tipo de modelos: el efecto de la transmisión de vibraciones rítmicas hacia diferentes zonas de la edificación.





CAPÍTULO IV

RESULTADOS

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los pasos que se definieron en el capítulo anterior, de acuerdo con el caso de estudio.

4.1 ÁREA DE LA PISTA DE BAILE

De acuerdo con la Fig. 19, sabemos que:

$$B_p = 12.00 \text{ m}$$

$$L_p = 20.00 \text{ m}$$

Sustituyendo los valores en la Ecuación 8.0, la superficie de la pista de baile (A_p), se calcula como:

$$A_p = (12.00 \text{ m})(20.00 \text{ m}) = 240.00 \text{ m}^2$$

4.2. ESTIMACIÓN DE POBLACIÓN REALIZANDO ACTIVIDADES RÍTMICAS EN PISTA DE BAILE

4.2.1 POBLACIÓN MÁXIMA ($N_{m\acute{a}x}$)

El área habitable mínima definida en el CMA (A_h) para salas de reunión es:

$$A_h = 1.00 \frac{\text{m}^2}{\text{persona}}$$

Por lo tanto, ingresando los datos en la Ecuación 9.0, se estima el número máximo de personas que pudieran llegar a estar participando al mismo tiempo sobre la losa ($N_{m\acute{a}x}$):

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{240 \text{ m}^2}{1.00 \frac{\text{m}^2}{\text{persona}}} = 240.00 \text{ personas}$$

En la Fig. 52 se muestra un esquema que muestra, físicamente, este caso de carga.

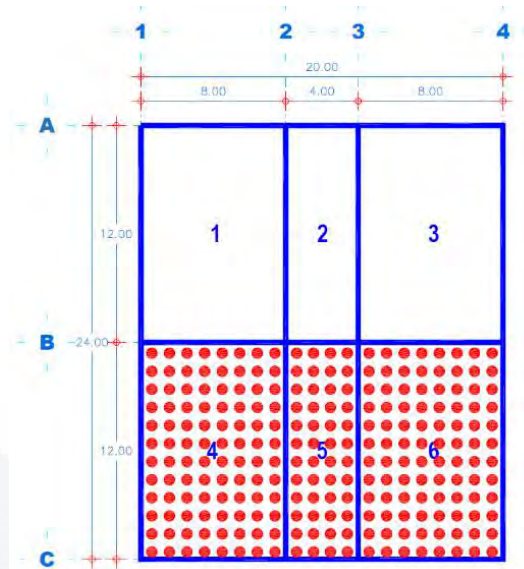


Fig. 52 – Pista de baile ocupada con 240 personas. Fuente: Elaboración Propia

4.2.2 POBLACIÓN MÍNIMA (N_{min})

Sustituyendo el valor de la población máxima en la Ecuación 10.0, tenemos:

$$N_{min} = (0.50)(240.00 \text{ personas}) = 120.00 \text{ personas}$$

En la Fig. 53 se muestra un esquema que muestra, físicamente, este caso de carga.

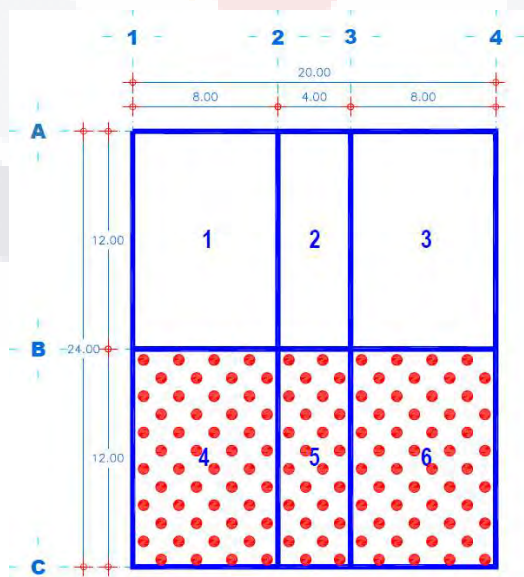


Fig. 53 – Pista de baile cargada con 120 personas. Fuente: Elaboración propia.

4.3 DEFINICIÓN DE CARGAS

4.3.1 CARGA VIVA MÁXIMA EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDAD RÍTMICA (CV_{MAX}).

Definiendo el peso promedio de cada individuo (P_{IND}) actuando en 80.00 kg y sustituyendo los datos obtenidos en la Ecuación 11.0, tenemos que:

$$CV_{MAX} = \frac{(240.00 \text{ personas}) \left(80.00 \frac{kg}{\text{persona}}\right)}{240.00 \text{ m}^2} = 80.00 \frac{kg}{\text{m}^2}$$

4.3.2 CARGA VIVA MÍNIMA EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDAD RÍTMICA (CV_{MIN}).

Tomando el valor anterior y sustituyéndolo en la Ecuación 12.0, tenemos:

$$CV_{MIN} = (0.50) \left(80.00 \frac{kg}{\text{m}^2}\right) = 40.00 \frac{kg}{\text{m}^2}$$

4.4 MATERIALES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

4.4.1. CONCRETO EN CAPA DE COMPRESIÓN

4.4.1.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO (E_c). Sustituyendo los valores de f'_c definidos en el apartado 3.8.3.3, en la Ecuación 13.0, se calculó el módulo de elasticidad estático del concreto:

$$E_c = 14,000 \sqrt{250.00 \frac{kg}{\text{cm}^2}} = 221,359.44 \frac{kg}{\text{cm}^2}$$

4.4.1.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (E_{CM}). Con el resultado anterior y aplicándolo en la Ecuación 15.0, se obtuvo el valor del módulo de elasticidad dinámico de la capa de compresión (E_{CM}), como:

$$E_{CM} = (1.35) \left(221,359.44 \frac{kg}{\text{cm}^2}\right) = 298,835.24 \frac{kg}{\text{cm}^2}$$

4.5. PROPIEDADES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DE PISO TRABAJANDO COMO SECCIÓN COMPUESTA

4.5.1. RELACIÓN MODULAR (n)

Se calculó la relación modular (n), sustituyendo los valores del módulo de elasticidad del acero (E_s), definido en 3.8.1, así como el del módulo de elasticidad dinámico del concreto (E_{CM}), definido en el apartado 3.8.3.4, en la Ecuación 8.0:

$$n = \frac{2,040,000.00 \frac{kg}{cm^2}}{298,835.24 \frac{kg}{cm^2}} = 6.83$$

4.5.2. ANCHO EFECTIVO (B)

El ancho efectivo (B) se particularizó para cada viga del tablero de estudio, siguiendo la metodología del apartado 3.10.2.

4.5.2.1 ANCHO EFECTIVO DE VIGAS TERCIARIAS (B_{VT})

De los apartados 3.4 y 3.5 sabemos que:

$$L_{VT} = 4.00 \text{ m}$$

$$s_{VT} = 2.00 \text{ m}$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación 17.0:

$$B_{VT} = \text{mín} [2.00 \text{ m}, (0.4)(4.00 \text{ m})] = \text{mín} [2.00 \text{ m}, 1.60 \text{ m}]$$

$$B_{VT} = 1.60 \text{ m}$$

4.5.2.2 ANCHO EFECTIVO DE VIGAS SECUNDARIAS (B_{VS}).

De los apartados 3.4 y 3.5 sabemos que:

$$L_{VS} = 8.00 \text{ m}$$

$$s_{VS} = 4.00 \text{ m}$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación 17.0

$$B_{VS} = \text{mín} [4.00 \text{ m}, (0.4)(8.00 \text{ m})] = \text{mín} [4.00 \text{ m}, 3.20 \text{ m}]$$

$$B_{VS} = 3.20 \text{ m}$$

4.5.2.3. ANCHO EFECTIVO DE VIGAS PRINCIPALES (B_{VP})

Sabemos que:

$$L_{VP} = 12.00 \text{ m}$$

$$s_{VP} = 4.00 \text{ m}$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación 17.0:

$$B_{VP} = \text{mín} [4.00 \text{ m}, (0.4)(12.00 \text{ m})] = \text{mín} [4.00 \text{ m}, 4.80 \text{ m}]$$

$$B_{VP} = 4.00 \text{ m}$$

4.5.3. ANCHO EFECTIVO TRANSFORMADO

Con la relación modular (n) y los anchos efectivos particulares para cada elemento del tablero (B), calculados antes, se estimaron los correspondientes anchos efectivos transformados (B_T), sustituyendo los datos en la Ecuación 18.0:

4.5.3.1 ANCHO EFECTIVO TRANSFORMADO DE VIGAS TERCIARIAS ($B_{t(VT)}$)

$$B_{t(VT)} = \frac{B_{VT}}{n} = \frac{1.60 \text{ m}}{6.83} = 0.234 \text{ m}$$

4.5.3.2 ANCHO EFECTIVO TRANSFORMADO DE VIGAS SECUNDARIAS ($B_{t(VS)}$)

$$B_{t(VS)} = \frac{B_{VS}}{n} = \frac{3.20 \text{ m}}{6.83} = 0.469 \text{ m}$$

4.5.3.3 ANCHO EFECTIVO TRANSFORMADO DE VIGAS PRINCIPALES ($B_{t(VP)}$)

$$B_{t(VP)} = \frac{B_{VP}}{n} = \frac{4.00 \text{ m}}{6.83} = 0.586 \text{ m}$$

4.5.4. CENTROIDE DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (\bar{y}_t)

Con los resultados del punto anterior se calculan los centroides de la sección transformada para cada viga en particular, mediante la Ecuación 20.0:

4.5.4.1 CENTROIDE DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA - VIGAS TERCIARIAS ($\bar{y}_{t(VT)}$)

$$\bar{y}_{t(VT)} = \frac{(23.44 \text{ cm})(8.00 \text{ cm}) \left(\frac{8.00 \text{ cm}}{2}\right) - (30.40 \text{ cm}^2) \left(\frac{30.50 \text{ cm}}{2} + 6.35 \text{ cm}\right)}{(23.44 \text{ cm})(8.00 \text{ cm}) + 30.40 \text{ cm}^2}$$

$$\bar{y}_{t(VT)} = 0.43 \text{ cm}; ; (\text{por debajo de la interfaz lámina – capa de compresión})$$

4.5.4.2 CENTROIDE DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA - VIGAS SECUNDARIAS ($\bar{y}_{t(VS)}$)

$$\bar{y}_{t(VS)} = \frac{(46.85 \text{ cm})(8.00 \text{ cm}) \left(\frac{8.00 \text{ cm}}{2}\right) - (94.80 \text{ cm}^2) \left(\frac{45.70 \text{ cm}}{2} + 6.35 \text{ cm}\right)}{(46.85 \text{ cm})(8.00 \text{ cm}) + 94.80 \text{ cm}^2}$$

$$\bar{y}_{t(VS)} = 2.70 \text{ cm}; ; (\text{por debajo de la interfaz lámina – capa de compresión})$$

4.5.4.3 CENTROIDE DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA - VIGAS PRINCIPALES ($\bar{y}_{t(VP)}$)

$$\bar{y}_{t(VP)} = \frac{(58.57 \text{ cm})(8.00 \text{ cm}) \left(\frac{8.00 \text{ cm}}{2}\right) - (200.70 \text{ cm}^2) \left(\frac{47.60 \text{ cm}}{2} + 6.35 \text{ cm}\right)}{(58.57 \text{ cm})(8.00 \text{ cm}) + 200.70 \text{ cm}^2}$$

$$\bar{y}_{t(VP)} = 6.20 \text{ cm}; ; (\text{por debajo de la interfaz lámina – capa de compresión})$$

4.5.5. MOMENTO DE INERCIA DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (I_t)

Con los valores estimados en los apartados previos procedimos a calcular la inercia transformada para cada una de las vigas que componen el sistema de piso, sustituyendo los datos en la Ecuación 22.0:

4.5.5.1 INERCIA COMPUESTA DE VIGAS TERCIARIAS ($I_{t(VT)}$)

$$I_{t(VT)} = \frac{(23.44 \text{ cm})(8.00 \text{ cm})^3}{12} + [(23.44 \text{ cm})(8.00 \text{ cm})] \left(\frac{8.00 \text{ cm}}{2} - 0.43 \text{ cm} \right)^2 + 4,287.00 \text{ cm}^4 + (30.40 \text{ cm}^2) \left(\frac{30.50 \text{ cm}}{2} + 6.35 \text{ cm} + 0.43 \text{ cm} \right)^2$$

$$I_{t(VT)} = 22,430.50 \text{ cm}^4$$

4.5.5.2 INERCIA COMPUESTA DE VIGAS SECUNDARIAS ($I_{t(VS)}$)

$$I_{t(VS)} = \frac{(46.85 \text{ cm})(8.00 \text{ cm})^3}{12} + [(46.85 \text{ cm})(8.00 \text{ cm})] \left(\frac{8.00 \text{ cm}}{2} - (-2.70 \text{ cm}) \right)^2 + 33,298.00 \text{ cm}^4 + (94.80 \text{ cm}^2) \left(\frac{45.70 \text{ cm}}{2} + 6.35 \text{ cm} + (-2.70 \text{ cm}) \right)^2$$

$$I_{t(VS)} = 118,705.50 \text{ cm}^4$$

4.5.5.3 INERCIA COMPUESTA DE VIGAS PRINCIPALES ($I_{t(VP)}$)

$$I_{t(VP)} = \frac{(58.57 \text{ cm})(8.00 \text{ cm})^3}{12} + [(58.57 \text{ cm})(8.00 \text{ cm})] \left(\frac{8.00 \text{ cm}}{2} - (-6.20 \text{ cm}) \right)^2 + 79,500.00 \text{ cm}^4 + (200.70 \text{ cm}^2) \left(\frac{47.60 \text{ cm}}{2} + 6.35 \text{ cm} + (-6.20 \text{ cm}) \right)^2$$

$$I_{t(VP)} = 245,869.99 \text{ cm}^4$$

4.6 METODOLOGÍA DE LA GUÍA 11 DEL AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION

4.6.1 CARGA TOTAL DEL SISTEMA PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL

Utilizando los datos de la TABLA 8, en la Ecuación 23.0, se definió la carga total (C_T) como:

$$C_T = 425.25 \frac{kg}{m^2}$$

4.6.2 MASA TOTAL DEL SISTEMA ESTRUCTURAL (M_T)

De acuerdo con apartado 4.1, el área de la pista de baile (A_T) es:

$$A_T = 96.00 \text{ m}^2$$

Sustituyendo el resultado anterior en la Ecuación 24.0:

$$M_T = \left(425.25 \frac{kg}{m^2} \right) (96.00 \text{ m}^2) = 40,824.00 \text{ kg}$$

4.6.3 DEFORMACIONES EN LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PISO

4.6.3.1 DEFORMACIÓN EN VIGAS TERCIARIAS (Δ_{VT}). Considerando los datos generales de las secciones usadas, sabemos que, el peso propio de estas vigas (PP_{VT}) es:

$$PP_{VT} = 23.90 \frac{kg}{m}$$

La carga efectiva total (C_{TEF}) del sistema se calculó sustituyendo los datos de la **TABLA 8** en la Ecuación 27.0 de la siguiente forma:

$$C_{TEF} = 425.25 \frac{kg}{m^2} - 69.25 \frac{kg}{m^2} = 356.00 \frac{kg}{m^2}$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación 26.0 se obtuvo:

$$w_{VT} = \left(356.00 \frac{kg}{m^2} \right) (2.00 \text{ m}) + 23.90 \frac{kg}{m} = 735.90 \frac{kg}{m}$$

Con el resultado anteriores, se procedió a calcular la deformación para las vigas terciarias (Δ_{VT}), sustituyendo los datos en la Ecuación 28.0:

$$\Delta_{VT} = \left(\frac{5}{384}\right) \left[\frac{\left(7.359 \frac{kg}{cm}\right) (400.00 \text{ cm})^4}{\left(2'040,000.00 \frac{kg}{cm^2}\right) (22,430.50 \text{ cm}^4)} \right] = 0.054 \text{ cm}$$

4.6.3.2 DEFORMACIÓN EN VIGAS SECUNDARIAS (Δ_{VS}). Considerando los datos generales de las secciones usadas, sabemos que, el peso propio de estas vigas (PP_{VS}) es:

$$PP_{VS} = 74.50 \frac{kg}{m}$$

Se calculó la densidad de vigas terciarias, definido en el apartado 3.11.3.2, de acuerdo con los siguientes datos tomados de los datos generales del caso de estudio y los resultados obtenidos antes:

$$N_{VT} = 12 \text{ piezas}$$

$$L_{VT} = 4.00 \text{ m}$$

$$PP_{VT} = 23.90 \frac{kg}{m}$$

$$A_T = 96.00 \text{ m}^2$$

Sustituyendo los valores anteriores en la Expresión 30.0:

$$D_{VT} = \frac{(12.00) (4.00 \text{ m}) \left(23.90 \frac{kg}{m}\right)}{96.00 \text{ m}^2} = 11.95 \frac{kg}{m^2}$$

De la Fig. 21 se observa que:

$$s_{VS} = L_{VT} = 4.00 \text{ m}$$

Con la Ecuación 29.0 se obtuvo el valor de la carga lineal actuando sobre las vigas secundarias:

$$w_{VS} = \left(356.00 \frac{kg}{m^2} + 11.95 \frac{kg}{m^2} \right) (4.00 m) + 74.50 \frac{kg}{m} = 1,546.30 \frac{kg}{m}$$

Con los resultados anteriores, procedimos a determinar la deformación para las vigas secundarias (Δ_{VS}), sustituyendo los datos en la Ecuación 31.0, como se muestra, a continuación:

$$\Delta_{VS} = \left(\frac{5}{384} \right) \left[\frac{\left(15.463 \frac{kg}{cm} \right) (800.00 cm)^4}{\left(2'040,000.00 \frac{kg}{cm^2} \right) (118,705.50 cm^4)} \right] = 0.34 cm$$

4.6.3.3 DEFORMACIÓN EN VIGAS PRINCIPALES (Δ_{VP}). Considerando los datos generales de las secciones usadas, sabemos que, el peso propio de estas vigas (PP_{VP}) es:

$$PP_{VT} = 157.50 \frac{kg}{m}$$

De la Fig. 32 se tomaron las dimensiones de las vigas secundarias del tablero crítico (L_{VS}), así como las correspondientes con el tablero aledaño (L_{VS-a}), así como la distancia a:

$$L_{VS} = 8.00 m$$

$$L_{VS-a} = 4.00 m$$

$$L_{VP} = 12.00 m$$

$$a = s_{VS} = 4.00 m$$

Del apartado 4.5.5.3, sabemos:

$$I_{t(VP)} = 245,869.99 cm^4$$

En el apartado anterior se calculó el valor de la carga uniforme w_{VS} :

$$w_{VS} = 1,546.30 \frac{kg}{m}$$

Sustituyendo todos los resultados anteriores en la Ecuación 37.0, obtuvimos la deformación provocada por las reacciones de las vigas secundarias (Δ_{P1}):

$$\Delta_{P1} = \left[\frac{\left(15.46 \frac{kg}{cm}\right) (800.00 \text{ cm} + 400.00 \text{ cm})}{(24) \left(2'040,000.00 \frac{kg}{cm^2}\right) (245,869.99 \text{ cm}^4)} \right] [(3)(1,200.00 \text{ cm})^2 - (4)(400.00 \text{ cm})^2]$$

$$\Delta_{P1} = 1.10 \text{ cm}$$

Después, se estimó con la Ecuación 38.0, la deformación provocada por las reacciones de las vigas secundarias (Δ_{P2}):

$$\Delta_{P2} = \left(\frac{5}{384}\right) \left(\frac{\left(1.575 \frac{kg}{cm}\right) (1,200.00 \text{ cm})^4}{\left(2'040,000.00 \frac{kg}{cm^2}\right) (255,010.63 \text{ cm}^4)} \right)$$

$$\Delta_{P2} = 0.08 \text{ cm}$$

Se sumaron los dos efectos, como lo indica la Ecuación 39.0 para obtener la deformación máxima de las vigas principales:

$$\Delta_{VP} = 1.10 \text{ cm} + 0.08 \text{ cm}$$

$$\Delta_{VP} = 1.18 \text{ cm}$$

4.6.4. CÁLCULO DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL SISTEMA DE PISO (f_n)

Para el caso que nos atañe, y sustituyendo los valores de las deformaciones obtenidas antes en la Ecuación 42.0, tenemos que:

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{981.00 \frac{cm}{s^2}}{0.054 cm + 0.34 cm + 1.18 cm}}$$

$$f_n = 4.49 Hz$$

4.6.5. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL (β)

Para el caso que nos atañe en esta investigación, se optará por utilizar el valor de amortiguamiento de 6%, indicado en la DG11

$$\beta = 0.06$$

4.6.6. CÁLCULO DE LAS ACELERACIONES PICO DE ENTREPISO

En los siguientes apartados se resumen los parámetros usados en la Ecuación 5.0 para cada tipo de actividad evaluada, tanto para el caso con 240 personas en la pista como para el de 120 individuos:

4.6.6.1. PISTA DE BAILE CON 240 PERSONAS

TABLA 15. PARÁMETROS PARA CÁLCULO DE ACELERACIÓN EN PISTA DE BAILE CON 240 PERSONAS

Actividad	Armónico	Frecuencia Forzada, f (Hz)	Carga de participantes w_p (kg/m ²)	Carga total w_T (kg/m ²)	Coficiente Dinámico α_i
Cena/Baile	1.00	3.00	80.00	505.25	0.50
Concierto/Evento	1.00	3.00	80.00	505.25	0.25
Deportivo	2.00	5.00	80.00	505.25	0.05
Saltos	1.00	2.75	80.00	505.25	1.50
	2.00	5.50	80.00	505.25	0.60
	3.00	8.25	80.00	505.25	0.10

Nota: La carga total w_T se define como la suma de la carga total (C_T) y la carga de los participantes (w_p).

Con los parámetros definidos en la **TABLA 15**, así como con los resultados anteriormente obtenidos, aplicamos la Ecuación 5.0 para la estimación de las aceleraciones pico para cada evento rítmico:

a) CENA/BAILE

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.50) \left(\frac{80.00 \frac{kg}{m^2}}{505.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{3.00 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{3.00 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.082$$

b) CONCIERTO/EVENTO DEPORTIVO

Para el primer armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.25) \left(\frac{80.00 \frac{kg}{m^2}}{505.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{3.00 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{3.00 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.041$$

Para el segundo armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.05) \left(\frac{80.00 \frac{kg}{m^2}}{505.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{5.00 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{5.00 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.047$$

c) SALTOS

Para el primer armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (1.50) \left(\frac{80.00 \frac{kg}{m^2}}{505.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{2.75 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{2.75 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.184$$

Para el segundo armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.60) \left(\frac{80.00 \frac{kg}{m^2}}{505.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{5.50 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{5.50 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.355$$

Para el tercer armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.10) \left(\frac{80.00 \frac{kg}{m^2}}{505.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{8.25 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{8.25 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.029$$

4.6.6.1.1 CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN EFECTIVA MÁXIMA (a_m)

Aplicando la Ecuación 43.0 para los tres tipos de actividad rítmica, la aceleración efectiva máxima, se obtuvieron los siguientes resultados:

a) CENA/BAILE

$$\frac{a_m}{g} = \frac{[(0.082)^{1.5}]^{\frac{1}{1.5}}}{g} = 0.082$$

b) CONCIERTO/EVENTO DEPORTIVO

$$\frac{a_m}{g} = \frac{[(0.041)^{1.5} + (0.047)^{1.5}]^{\frac{1}{1.5}}}{g}$$

$$\frac{a_m}{g} = 0.070$$

c) SALTOS

$$\frac{a_m}{g} = \frac{[(0.184)^{1.5} + (0.355)^{1.5} + (0.029)^{1.5}]^{\frac{1}{1.5}}}{g}$$

$$\frac{a_m}{g} = 0.444$$

4.6.6.1.2 COMPARACIÓN CONTRA LÍMITES DE ACCELERACIÓN PERMISIBLES $\left(\frac{a_0}{g}\right)$

a) CENA/BAILE

$$\frac{a_m}{g} = 0.082 > \left(\frac{a_0}{g}\right)_{\text{máx}} = 0.019 \therefore \text{No Cumple}$$

b) CONCIERTO/EVENTO DEPORTIVO

$$\frac{a_m}{g} = 0.070 > \left(\frac{a_0}{g}\right)_{\text{máx}} = 0.050 \therefore \text{No Cumple}$$

c) SALTOS

$$\frac{a_m}{g} = 0.444 \gg \left(\frac{a_o}{g}\right)_{m\acute{a}x} = 0.050 \therefore \text{No Cumple}$$

4.6.6.2 PISTA DE BAILE CON 120 PERSONAS

TABLA 16. PARÁMETROS PARA CÁLCULO DE ACELERACIÓN EN PISTA DE BAILE CON 120 PERSONAS

Actividad	Armónico	Frecuencia Forzada, f	Carga de participantes w_p	Carga total w_T	Coefficiente Dinámico
		(Hz)	(kg/m ²)	(kg/m ²)	α_i
Cena/Baile	1.00	3.00	40.00	465.25	0.50
Concierto/Evento Deportivo	1.00	3.00	40.00	465.25	0.25
	2.00	5.00	40.00	465.25	0.05
Saltos	1.00	2.75	40.00	465.25	1.50
	2.00	5.50	40.00	465.25	0.60
	3.00	8.25	40.00	465.25	0.10

Nota: La carga total w_T se define como la suma de la carga total (C_T) y la carga de los participantes (w_p).

Con los parámetros definidos en la TABLA 16, así como con los resultados anteriormente obtenidos, aplicamos la Ecuación 5.0 para la estimación de las aceleraciones pico para cada evento rítmico:

a) CENA/BAILE

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.50) \left(\frac{40.00 \frac{kg}{m^2}}{465.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{3.00 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{3.00 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.045$$

b) CONCIERTO/EVENTO DEPORTIVO

Para el primer armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.25) \left(\frac{40.00 \frac{kg}{m^2}}{465.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{3.00 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{3.00 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

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

Para el segundo armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.05) \left(\frac{40.00 \frac{kg}{m^2}}{465.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{5.00 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{5.00 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.025$$

c) SALTOS

Para el primer armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (1.50) \left(\frac{40.00 \frac{kg}{m^2}}{465.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{2.75 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{2.75 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.100$$

Para el segundo armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.60) \left(\frac{40.00 \frac{kg}{m^2}}{465.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{5.50 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{5.50 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.193$$

Para el tercer armónico:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(1.30) (0.10) \left(\frac{40.00 \frac{kg}{m^2}}{465.25 \frac{kg}{m^2}} \right)}{\sqrt{\left[\left(\frac{4.49 \text{ Hz}}{8.25 \text{ Hz}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[\frac{(2.00)(0.06)(4.49 \text{ Hz})}{8.25 \text{ Hz}} \right]^2}}$$

$$\frac{a_p}{g} = 0.016$$

4.6.6.2.1 CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN EFECTIVA MÁXIMA (a_m)

Aplicando la Ecuación 43.0 para los tres tipos de actividad rítmica, la aceleración efectiva máxima, se obtuvieron los siguientes resultados:

a) CENA/BAILE

$$\frac{a_m}{g} = \frac{[(0.045)^{1.5}]^{\frac{1}{1.5}}}{g} = 0.045$$

b) CONCIERTO/EVENTO DEPORTIVO

$$\frac{a_m}{g} = \frac{[(0.022)^{1.5} + (0.025)^{1.5}]^{\frac{1}{1.5}}}{g}$$

$$\frac{a_m}{g} = 0.037$$

c) SALTOS

$$\frac{a_m}{g} = \frac{[(0.100)^{1.5} + (0.193)^{1.5} + (0.016)^{1.5}]^{\frac{1}{1.5}}}{g}$$

$$\frac{a_m}{g} = 0.240$$

4.6.6.2 COMPARACIÓN CONTRA LÍMITES DE ACELERACIÓN PERMISIBLES $\left(\frac{a_o}{g}\right)$

a) CENA/BAILE

$$\frac{a_m}{g} = 0.045 > \left(\frac{a_o}{g}\right)_{\text{máx}} = 0.019 \therefore \text{No Cumple}$$

b) CONCIERTO/EVENTO DEPORTIVO

$$\frac{a_m}{g} = 0.037 > \left(\frac{a_o}{g}\right)_{\text{máx}} = 0.050 \therefore \text{Cumple}$$

c) SALTOS

$$\frac{a_m}{g} = 0.24 \gg \left(\frac{a_o}{g}\right)_{\text{máx}} = 0.050 \therefore \text{No Cumple}$$

4.7 RESULTADOS DE LOS MODELOS REFINADOS EN SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

4.7.1 MODELO CON ELEMENTOS TIPO DECK

4.7.1.1 PROPIEDADES DE SECCIÓN COMPUESTA. En las siguientes tablas, se remarcaron los valores de sección compuesta que fueron calculadas, automáticamente, por el software para los tres tipos de vigas:

TABLA 17. PROPIEDADES DE SECCIÓN TRANSFORMADA DE VIGAS TERCIARIAS EN MODELO CON DECKS

Section Properties					
	PNA (cm)	Area (cm ²)	S _{bot} (cm ³)	I (cm ⁴)	ΦM _n (tonf-m)
Steel fully braced	15.2	30.4	281.3	4287.2	10.421
Vibrations Check (E _c = 4034)	7.6	283.7	N/A	23405.1	N/A

TABLA 18. PROPIEDADES DE SECCIÓN TRANSFORMADA DE VIGAS SECUNDARIAS EN MODELO CON DECKS

Section Properties					
	PNA (cm)	Area (cm ²)	S _{bot} (cm ³)	I (cm ⁴)	ΦM _n (tonf-m)
Steel (L _o = 2 m C _o = 1.157)	22.9	94.8	1456.6	33298.5	52.3641
Steel fully braced	22.9	94.8	1456.6	33298.5	52.3641
Steel (L _o = 2 m C _o = 2.177)	22.9	94.8	1456.6	33298.5	52.3641
Vibrations Check (E _c = 4034)	4.7	764	N/A	125796.1	N/A

TABLA 19. PROPIEDADES DE SECCIÓN TRANSFORMADA DE VIGAS PRINCIPALES EN MODELO CON DECKS

Section Properties					
	PNA (cm)	Area (cm ²)	S _{bot} (cm ³)	I (cm ⁴)	ΦM _n (tonf-m)
Steel fully braced	23.7	200.6	3347.5	79500.2	119.2449
Steel (L _o = 4 m C _o = 2.079)	23.7	200.6	3347.5	79500.2	119.2449
Vibrations Check (E _c = 4034)	2.1	833.8	N/A	260035.4	N/A

4.7.1.2 EVALUACIÓN POR ESTADO LÍMITE DE DISEÑO Y DEFORMACIONES. Con el modelo de elementos tipo Deck, se validaron las secciones propuestas en el proyecto estructural del caso de estudio, al verificar que cumplen para los estados límite de diseño y deformaciones cuando los tableros son sometidas a las cargas estáticas, tanto vivas como muertas. Como se aprecia en la Fig. 54, todos los elementos estructurales tienen relaciones de esfuerzo menores que 1.00 para la combinación de esfuerzos más desfavorable.

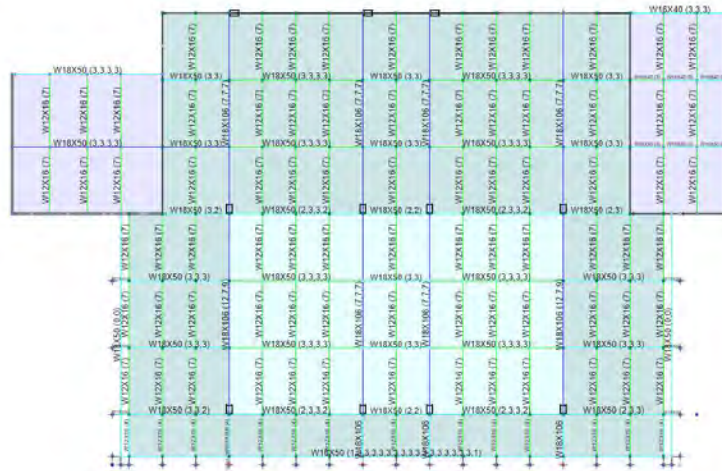


Fig. 54 Relación de esfuerzos de elementos en modelo estructural ante cargas gravitacionales. Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes imágenes vemos un resumen del reporte que emite el software para cada uno de los elementos evaluados:

TABLA 20. RELACIÓN DE ESFUERZOS EN VIGAS TERCIARIAS PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE

Strength Checks						
	Combo	Loc.	Factored	Design	Ratio	Pass
Shear at Ends (kgf)	1.5CM+1.7CV	0 m	5363.3238	33469.6760	0.160	✓
Construction Bending (tonf-m)	1.5CM+1.7CV	2 m	5.3633	10.4210	0.515	✓
Positive Bending (tonf-m)	1.5CM+1.7CV	2 m	5.3633	10.4210	0.515	✓

TABLA 21. RELACIÓN DE ESFUERZOS EN VIGAS SECUNDARIAS PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE

Strength Checks						
	Combo	Loc.	Factored	Design	Ratio	Pass
Shear at Ends (kgf)	1.5CM+1.7CV	8 m	16850.6379	78837.9879	0.214	✓
Construction Bending (tonf-m)	1.5CM+1.7CV	4 m	28.3442	52.3641	0.541	✓
Positive Bending (tonf-m)	1.5CM+1.7CV	4 m	28.3442	52.3641	0.541	✓
Negative Bending (tonf-m)	1.5CM+1.7CV	8 m	-22.3948	52.3641	0.428	✓

TABLA 22. RELACIÓN DE ESFUERZOS EN VIGAS PRINCIPALES PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE

Strength Checks						
	Combo	Loc.	Factored	Design	Ratio	Pass
Shear at Ends (kgf)	1.5CM+1.7CV	11.695 m	40894.1802	150134.5485	0.272	✓
Neg. Constr. Bending (tonf-m)	1.5CM+1.7CV	11.695 m	-91.0813	119.2449	0.764	✓
Positive Bending (tonf-m)	1.5CM+1.7CV	5.5 m	75.9994	119.2449	0.637	✓
Negative Bending (tonf-m)	1.5CM+1.7CV	11.695 m	-91.0813	119.2449	0.764	✓

Se observó que las deformaciones máximas las cuales se producen, tal como se esperaba, en el centro de los tableros, están dentro de las limitantes marcadas en el Código Municipal de Aguascalientes (Ver Fig. 55)

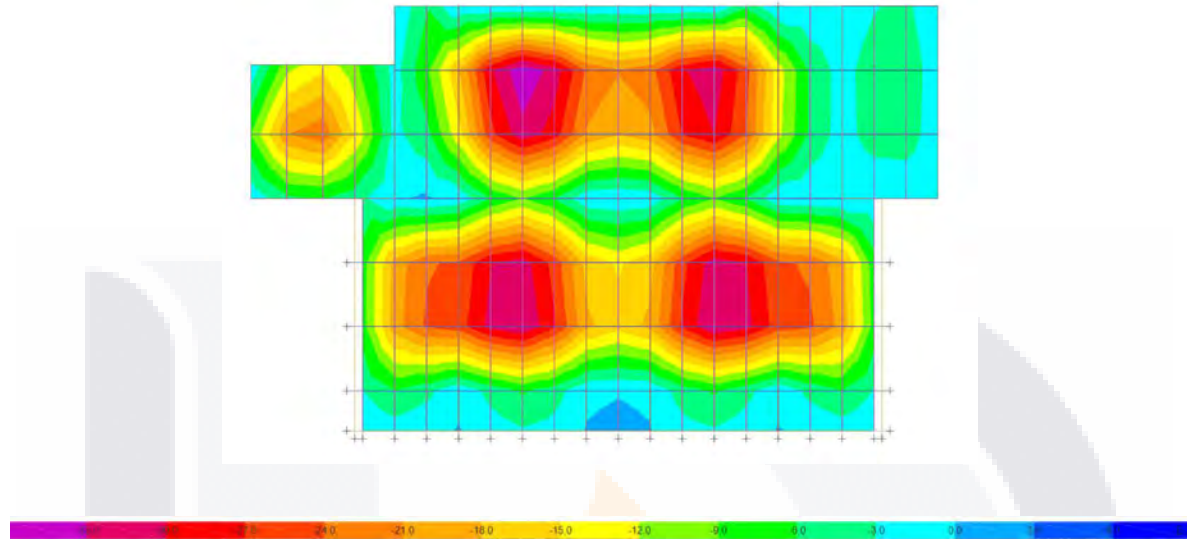


Fig. 55 Deformaciones globales de tableros en modelo estructural con Decks. Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes párrafos vemos un resumen del reporte de deformaciones que emite el software para cada uno de los elementos evaluados, así como una revisión particular de acuerdo con los límites de deflexión marcados por la normativa local aplicable:

TABLA 23. REVISIÓN POR DEFORMACIONES EN VIGAS TERCIARIAS PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE

	Actual	Allowable	Ratio
Constr. Dead Defl. (cm)	0.3	No Limit	N/A
Post-concrete Defl. (cm)	0.3	1.7	0.203
Live Load Defl. (cm)	0.3	1.1	0.305
Total Defl. (cm)	0.6	1.7	0.377

La deformación real de las vigas terciarias calculada por el modelo (Δ_{Act-VT}) es:

$$\Delta_{Act-V} = 0.60 \text{ cm}$$

Vemos que el elemento cumple en la deformación máxima para los criterios del A.I.S.C.

Aplicando la Ecuación 45.0, para validar la deformación ante la normativa local, tenemos:

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{240} + 0.50 \quad (45.0)$$

Sustituyendo valores para el caso de estudio:

$$L = L_{VT} = 400.00 \text{ cm}$$

Así:

$$\Delta_{m\acute{a}x-VT} = \frac{400.00 \text{ cm}}{240.00} + 0.50 \text{ cm} = 2.17 \text{ cm}$$

$$\Delta_{m\acute{a}x-VT} = 2.17 \text{ cm} \geq \Delta_{Act-VT} = 0.60 \text{ cm} \therefore \text{CUMPLE}$$

TABLA 24. REVISIÓN POR DEFORMACIONES EN VIGAS SECUNDARIAS PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE

	Actual	Allowable	Ratio
Constr. Dead Defl. (cm)	0.5	No Limit	N/A
Post-concrete Defl. (cm)	1	3.3	0.302
Live Load Defl. (cm)	1	2.2	0.453
Total Defl. (cm)	1.5	3.3	0.444

La deformación real de las vigas secundarias calculada por el modelo (Δ_{Act-VT}) es:

$$\Delta_{Act-VS} = 1.50 \text{ cm}$$

Vemos que el elemento cumple en la deformación máxima para los criterios del A.I.S.C.

Aplicando la Ecuación 45.0, para validar la deformación ante la normativa local, tenemos:

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{240} + 0.50 \quad (45.0)$$

Sustituyendo valores para el caso de estudio:

$$L = L_{VS} = 800.00 \text{ cm}$$

Así:

$$\Delta_{m\acute{a}x-VS} = \frac{800.00 \text{ cm}}{240.00} + 0.50 \text{ cm} = 3.83 \text{ cm}$$

$$\Delta_{m\acute{a}x-VS} = 3.83 \text{ cm} \geq \Delta_{Act-V} = 1.50 \text{ cm} \therefore \text{CUMPLE}$$

TABLA 25. REVISIÓN POR DEFORMACIONES EN VIGAS PRINCIPALES PARA COMBINACIÓN MÁS DESFAVORABLE

	Actual	Allowable	Ratio
Constr. Dead Defl. (cm)	0.9	No Limit	N/A
Post-concrete Defl. (cm)	2.7	5	0.530
Live Load Defl. (cm)	2.7	3.3	0.796
Total Defl. (cm)	3.6	5	0.716

La deformación real de las vigas secundarias calculada por el modelo (Δ_{Act-VT}) es:

$$\Delta_{Act-} = 3.60 \text{ cm}$$

Vemos que el elemento cumple en la deformación máxima para los criterios del A.I.S.C.

Aplicando la Ecuación 45.0, para validar la deformación ante la normativa local, tenemos:

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{240} + 0.50 \quad (45.0)$$

Sustituyendo valores para el caso de estudio:

$$L = L_{VP} = 1,200.00 \text{ cm}$$

Así:

$$\Delta_{m\acute{a}x-VP} = \frac{1,200.00 \text{ cm}}{240.00} + 0.50 \text{ cm} = 5.50 \text{ cm}$$

$$\Delta_{m\acute{a}x-VP} = 3.60 \text{ cm} \geq \Delta_{Act-V} = 5.00 \text{ cm} \therefore \text{CUMPLE}$$

4.7.1.3 DEFORMACIONES CALCULADAS PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL. El software, al estar programado de acuerdo con la Normativa Americana, específicamente con los criterios de la

Guía 11 del A.I.S.C., calcula la deformación de los elementos trabajando como una viga simplemente apoyada, con carga uniforme, distribuida. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de ETABS, correspondientes con el trabajo de cada viga como elemento simplemente apoyado:

TABLA 26. DEFORMACIONES EN VIGAS TERCIARIAS PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL.

Vibration Frequency Values

Element	L (m)	b _{eff} (m)	Loading	I _{eff} (cm ⁴)	D (cm ⁴ /m)	B (m)	W (kgf)	Δ (cm)	f _n (Hz)
Slab	26.5	1.6	383.89+19.53+53.71kgf/m ²	4912.1	4912.1/1.6	32			
Beam	4	1.6	914.247kgf/m	23405.1	23405.1/2	2*2.8627	1.5*10468.8722	0.1	22.446

TABLA 27. DEFORMACIONES EN VIGAS SECUNDARIAS PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL.

Vibration Frequency Values

Element	L (m)	b _{eff} (m)	Loading	I _{eff} (cm ⁴)	D (cm ⁴ /m)	B (m)	W (kgf)	Δ (cm)	f _n (Hz)
Slab	32	3.2	408.7+19.53+53.71kgf/m ²	2701.5	2701.5/3.2	26.5			
Beam	8	3.2	294.15kgf/m	125196.1	125196.1/4	2*3.2421	1.5*24999.4852	0.1	14.668

TABLA 28. DEFORMACIONES EN VIGAS PRINCIPALES PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL.

Vibration Frequency Values

Element	L (m)	b _{eff} (m)	Loading	I _{eff} (cm ⁴)	D (cm ⁴ /m)	B (m)	W (kgf)	Δ (cm)	f _n (Hz)
Slab	26.5	2	426.87+19.53+53.71kgf/m ²	6140.1	6140.1/2	43			
Beam	12	2	1237.807kgf/m	223985	223985/2	2*4.8828	1*58606.7636	0.4	9.064

4.7.1.4 FRECUENCIA NATURAL DEL TABLERO

4.7.1.4.1. APLICANDO METODOLOGÍA DE LA DG11 CON LAS DEFORMACIONES DE MODELO

(DECKS). Del apartado anterior tenemos que:

$$\Delta_{VT} = 0.10 \text{ cm}$$

$$\Delta_{VS} = 0.10 \text{ cm}$$

$$\Delta_{VP} = 0.40 \text{ cm}$$

Con los datos de deformación calculada en el modelo con decks en el apartado anterior, se aplicó la Ecuación. 42.0, para obtener la frecuencia natural del tablero:

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{981.00 \frac{cm}{s^2}}{0.10 cm + 0.10cm + 0.40 cm}}$$

$$f_n = 7.27 Hz$$

4.7.1.4.2. APLICANDO RELACIÓN DE DUNKERLEY A ESTIMACIONES DEL MODELO. Las siguientes tablas muestran los valores de frecuencia natural obtenidas, por tablero, para cada para de vigas conectadas entre sí, calculadas por ETABS:

TABLA 29. FRECUENCIA NATURAL DE PANEL COMPUESTO POR VIGAS Terciarias y Vigas Secundarias.

Vibration Frequency Values

Element	L (m)	b _{eff} (m)	Loading	I _{eff} (cm ⁴)	D (cm ⁴ /m)	B (m)	W (kgf)	Δ (cm)	f _n (Hz)
Slab	26.5	1.6	383.89+19.53+53.71kgf/m ²	4912.1	4912.1/1.6	32			
Beam	4	1.6	914.247kgf/m	23405.1	23405.1/2	2*2.8627	1.5*10468.8722	0.1	22.446
Girder B99	8	3.2	3*3656.9833kgf	125196.1	125196.1/4	1.8*6.2557	1*43414.0389	0.1	14.598
Panel							35177.7034	0.2	12.37

$$f_1 = 12.24 Hz$$

TABLA 30. FRECUENCIA NATURAL DE PANEL COMPUESTO POR VIGAS Secundarias y Vigas Secundarias.

Vibration Frequency Values

Element	L (m)	b _{eff} (m)	Loading	I _{eff} (cm ⁴)	D (cm ⁴ /m)	B (m)	W (kgf)	Δ (cm)	f _n (Hz)
Slab	32	3.2	408.7+19.53+53.71kgf/m ²	2701.5	2701.5/3.2	26.5			
Beam	8	3.2	294.15kgf/m	125196.1	125196.1/4	2*3.2421	1.5*24999.4852	0.1	14.668
Girder B316	12	2	2*11347.6041kgf + 1038.519kgf/m	223985.1	223985.1/8	2/3*32	1*126846.6186	0.5	7.689
Panel							107588.2822	0.7	6.81

$$f_2 = 6.81 Hz$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la Ecuación 46.0, tenemos:

$$f_n = \frac{(12.24 \text{ Hz})(6.81 \text{ Hz})}{\sqrt{(12.24 \text{ Hz})^2 + (6.81 \text{ Hz})^2}}$$

$$f_n = 5.95 \text{ Hz}$$

4.7.2 MODELO CON ELEMENTOS TIPO SHELL

4.7.2.1 DEFORMACIONES CALCULADAS PARA ESTIMACIÓN DE FRECUENCIA NATURAL.

4.7.2.1.1 DEFORMACIÓN EN VIGAS PRINCIPALES. En la Fig. 56 se muestra la deformación máxima de las vigas principales, la cual es igual a la deformación real ya que, al estar apoyada en las columnas, se considera el desplazamiento vertical de los apoyos igual a cero.

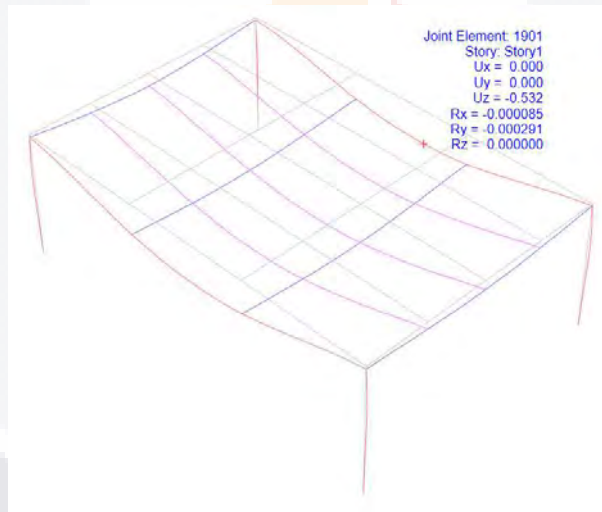


Fig. 56- Desplazamiento máximo de nodo central de vigas principales de modelo con Shells. Fuente: Elaboración propia.

$$\Delta_{VP} = \Delta_{R(VP)} = 0.53 \text{ cm}$$

4.7.2.1.2 DEFORMACIÓN EN VIGAS SECUNDARIAS. En la Fig. 57 se muestra la deformación máxima de las de las vigas secundarias; por su parte, en la Fig. 58 se aprecia el desplazamiento máximo vertical del apoyo de las vigas secundarias, ubicado a un tercio de las vigas principales. La deflexión real de los elementos secundarios será la diferencia entre ambas:

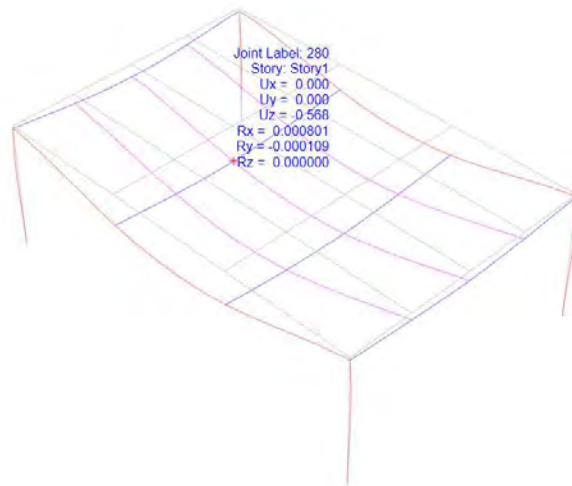


Fig. 57- Desplazamiento de nodo central de vigas secundarias de modelo con Shells. Fuente: Elaboración propia.

$$\Delta_{0.5VS} = 0.57 \text{ cm}$$

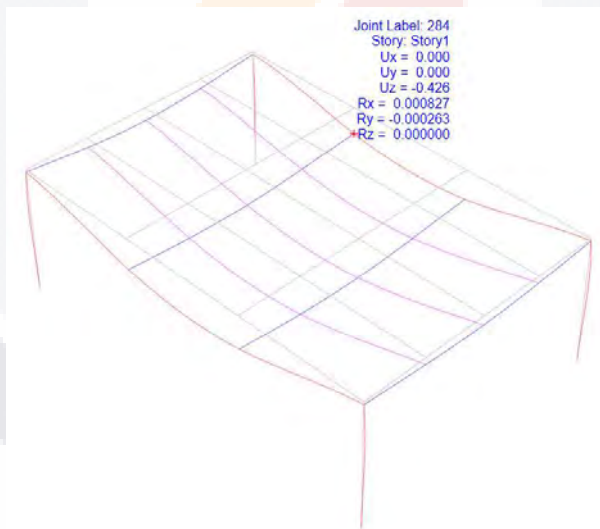


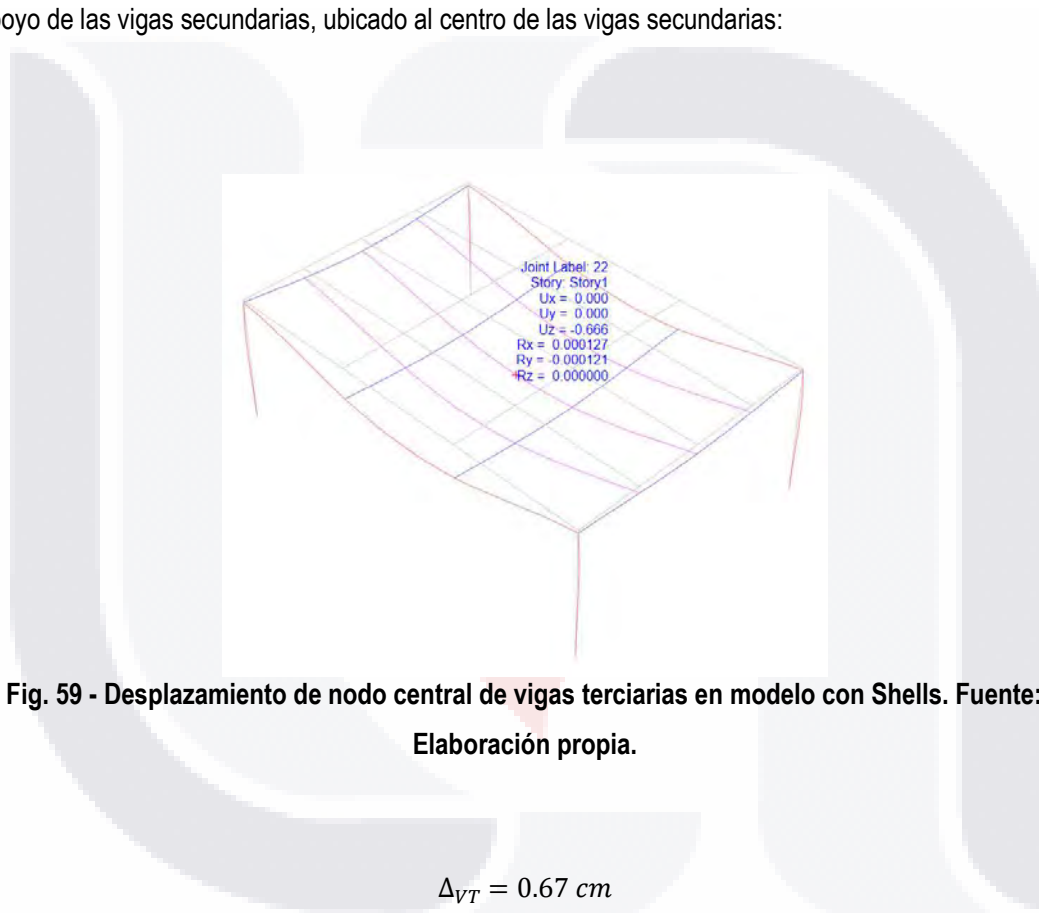
Fig. 58- Desplazamiento a un tercio del claro de vigas principales de modelo con Shells. Fuente: Elaboración propia.

$$\Delta_{0.33VP} = 0.43 \text{ cm}$$

Con los datos anteriores, calculamos la deformación real de las vigas secundarias ($\Delta_{R(VS)}$), como:

$$\Delta_{R(VS)} = \Delta_{0.50VS} - \Delta_{0.33VP} = 0.57 \text{ cm} - 0.43 \text{ cm} = 0.14 \text{ cm}$$

4.7.2.1.3 DEFORMACIÓN EN VIGAS TERCIARIAS. En la **Fig. 59** se muestra la deformación máxima de las de las vigas secundarias; por su parte, en la **Fig. 57** se mostró el desplazamiento máximo vertical del apoyo de las vigas secundarias, ubicado al centro de las vigas secundarias:



Con los datos anteriores, calculamos la deformación real de las vigas terciarias ($\Delta_{R(VT)}$) como:

$$\Delta_{R(VT)} = \Delta_{0.50VT} - \Delta_{0.50VS} = 0.67 \text{ cm} - 0.57 \text{ cm} = 0.10 \text{ cm}$$

4.7.2.2 FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA DE PISO. En este apartado se calcularon las frecuencias naturales bajo 2 enfoques: el primero fue sustituyendo las deformaciones calculadas en los apartados previos, en la Ecuación 42.0; aprovechando las ventajas del software de elementos finitos, el segundo método de obtención de la frecuencia natural del sistema fue a través de un análisis modal del entrepiso. A

4.7.2.2.1 APLICANDO METODOLOGÍA DE LA DG11 CON LAS DEFORMACIONES DE MODELO

(SHELLS)

Del apartado anterior tenemos que:

$$\Delta_{VT} = 0.10 \text{ cm}$$

$$\Delta_{VS} = 0.14 \text{ cm}$$

$$\Delta_{VP} = 0.53 \text{ cm}$$

Con los datos de deformación calculada en el modelo con decks en el apartado anterior, podemos aplicar la Ecuación 42.0 y sustituir los valores obtenidos para obtener la frecuencia natural del tablero:

$$f_n = 0.18 \sqrt{\frac{981.00 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}}{0.10 \text{ cm} + 0.14 \text{ cm} + 0.53 \text{ cm}}}$$

$$f_n = 6.42 \text{ Hz}$$

4.7.2.2.2 FRECUENCIA NATURAL OBTENIDA CON UN ANÁLISIS MODAL

En este apartado se presentan las frecuencias naturales, para los 8 primeros modos de vibrar, del sistema que se obtuvieron del modelo elaborado con elementos tipo Shell:

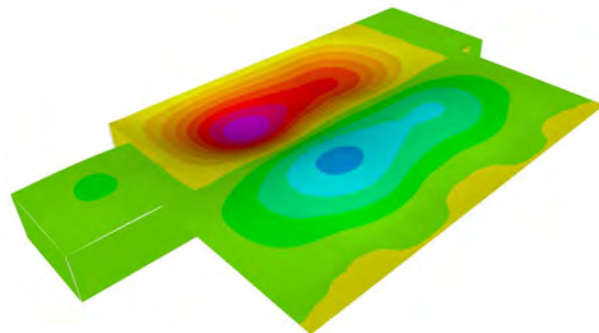


Fig. 60 Modo de vibrar No. 1 (Frecuencia = 5.66 Hz). Fuente: Elaboración propia.

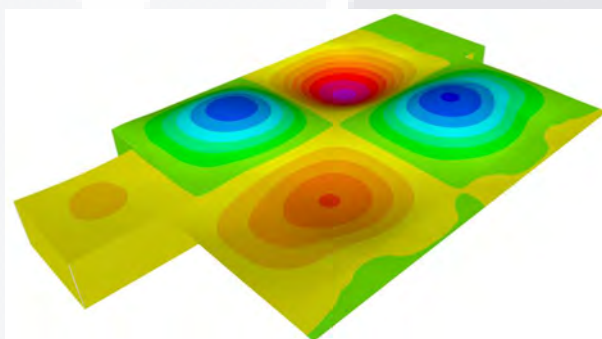


Fig. 61 Modo de vibrar No. 2 (Frecuencia = 6.10 Hz). Fuente: Elaboración propia.

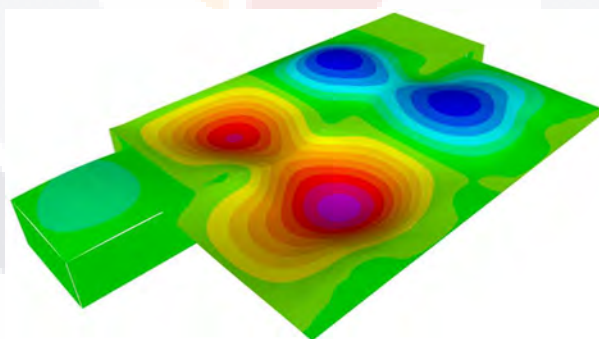


Fig. 62 Modo de vibrar No. 3 (Frecuencia = 7.08 Hz). Fuente: Elaboración propia.

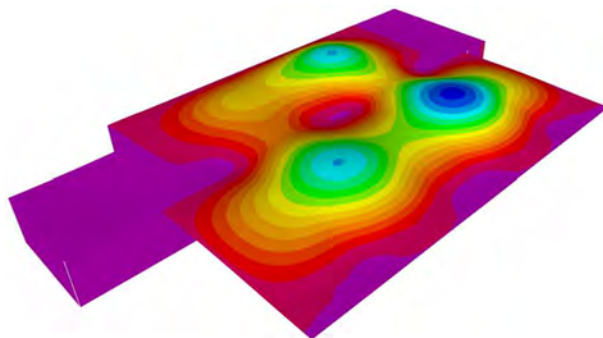


Fig. 63 Modo de vibrar No. 4 (Frecuencia = 7.14 Hz). Fuente: Elaboración propia.

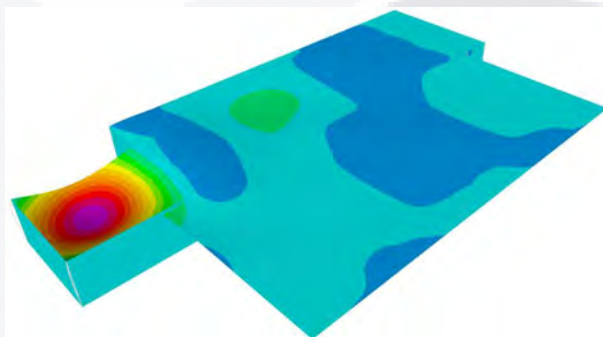


Fig. 64 Modo de vibrar No. 5 (Frecuencia = 8.03 Hz). Fuente: Elaboración propia.

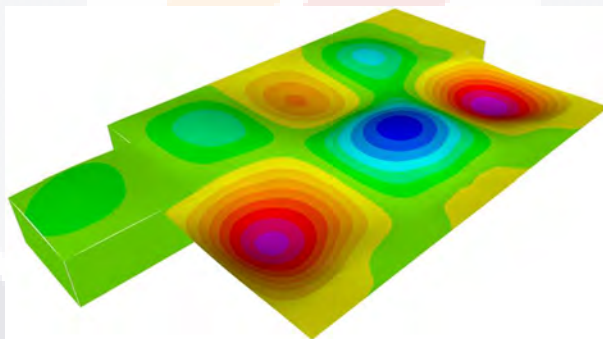


Fig. 65 Modo de vibrar No. 6 (Frecuencia = 9.35 Hz). Fuente: Elaboración propia.

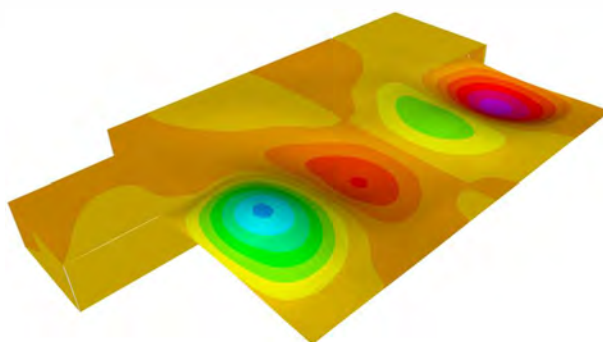


Fig. 66 Modo de vibrar No. 7 (Frecuencia = 10.56 Hz). Fuente: Elaboración propia.

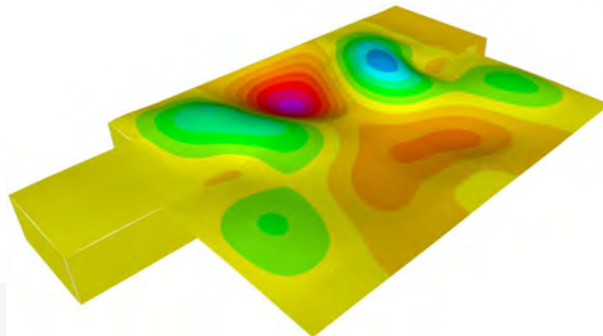


Fig. 67 Modo de vibrar No. 8 (Frecuencia = 11.76 Hz). Fuente: Elaboración propia.

La TABLA 31 muestra un resumen de las frecuencias y porcentajes para los primeros modos de vibrar:

TABLA 31. FRECUENCIAS Y PORCENTAJES DE PARTICIPACIÓN MODAL PARA LOS PRIMEROS 10 MODOS

Modo	Frecuencia (Hz)	Participación de participación modal (%)
1	5.66	1.14%
2	6.10	0.03%
3	7.08	45.05%
4	7.14	0.24%
5	8.03	6.61%
6	9.35	0.00%
7	10.56	1.72%
8	11.76	0.03%
9	12.22	5.16%
10	13.05	0.04%

4.7.2.2 ACCELERACIONES DE TABLEROS DE CONTROL

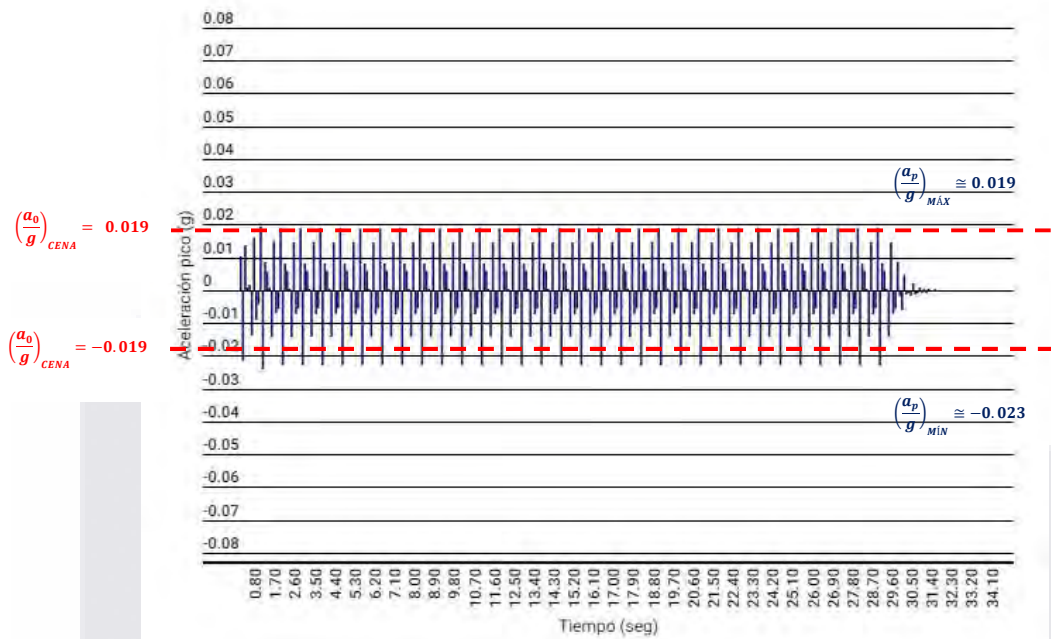


Fig. 68 Aceleración en zona de comensales con 120 personas realizando aerobics. Fuente: Elaboración propia.

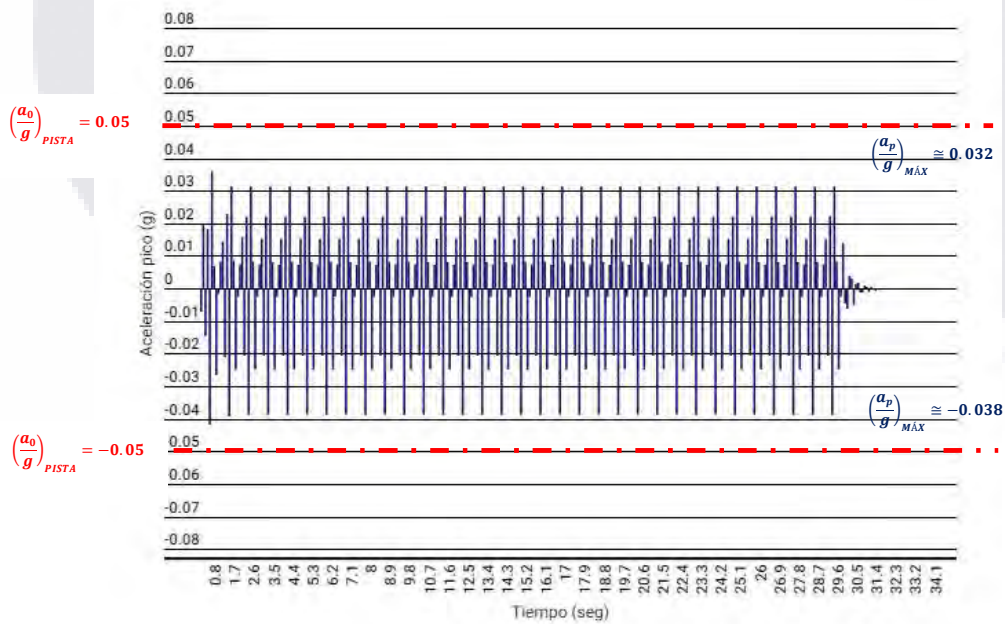


Fig. 69 Aceleración en pista de baile con 120 personas realizando aerobics. Fuente: Elaboración propia.

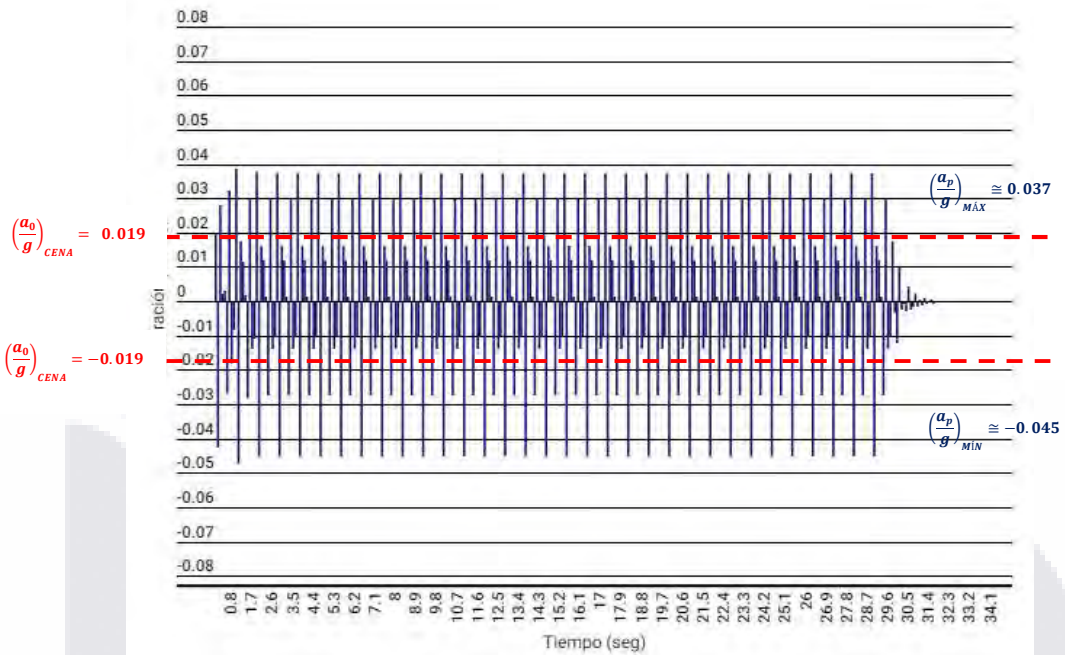


Fig. 70 Aceleración en zona de comensales con 240 personas realizando aerobics. Fuente: Elaboración propia.

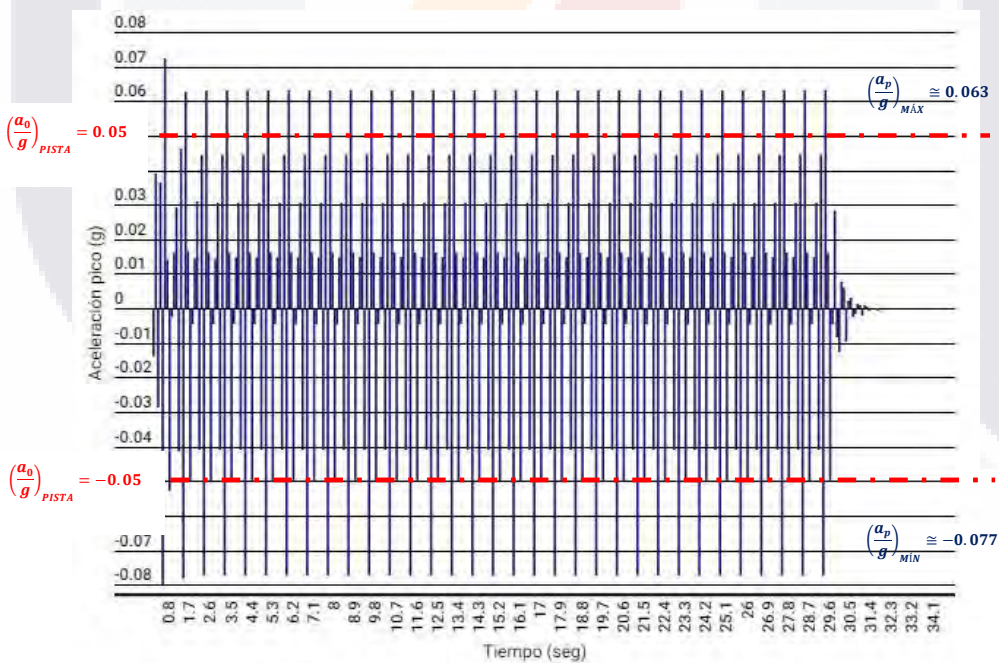


Fig. 71 Aceleración en pista de baile con 240 personas realizando aerobics. Fuente: Elaboración propia.

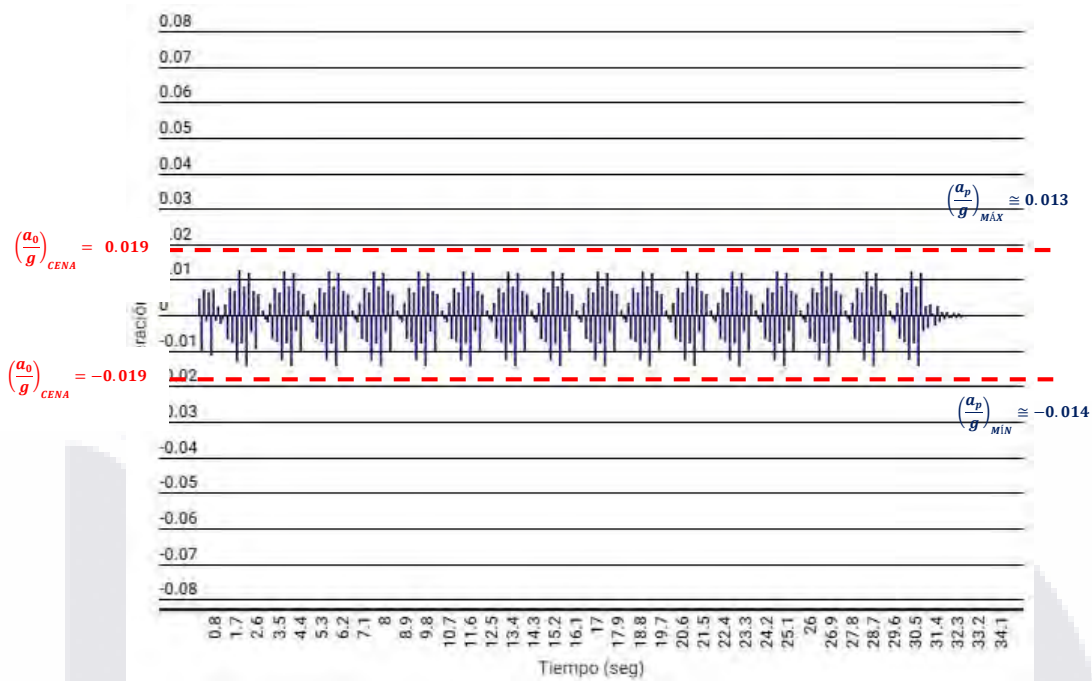


Fig. 72 Aceleración en zona de comensales con 120 personas moviéndose como multitud. Fuente: Elaboración propia.

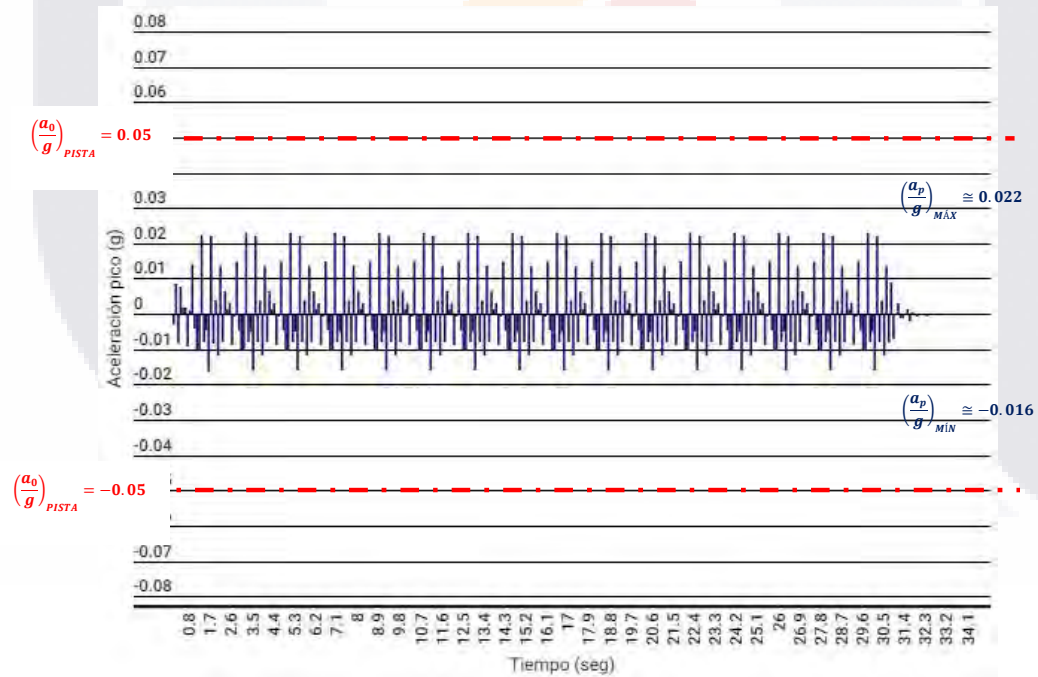


Fig. 73 Aceleración en pista de baile con 120 personas realizando movimientos como multitud. Fuente: Elaboración propia.

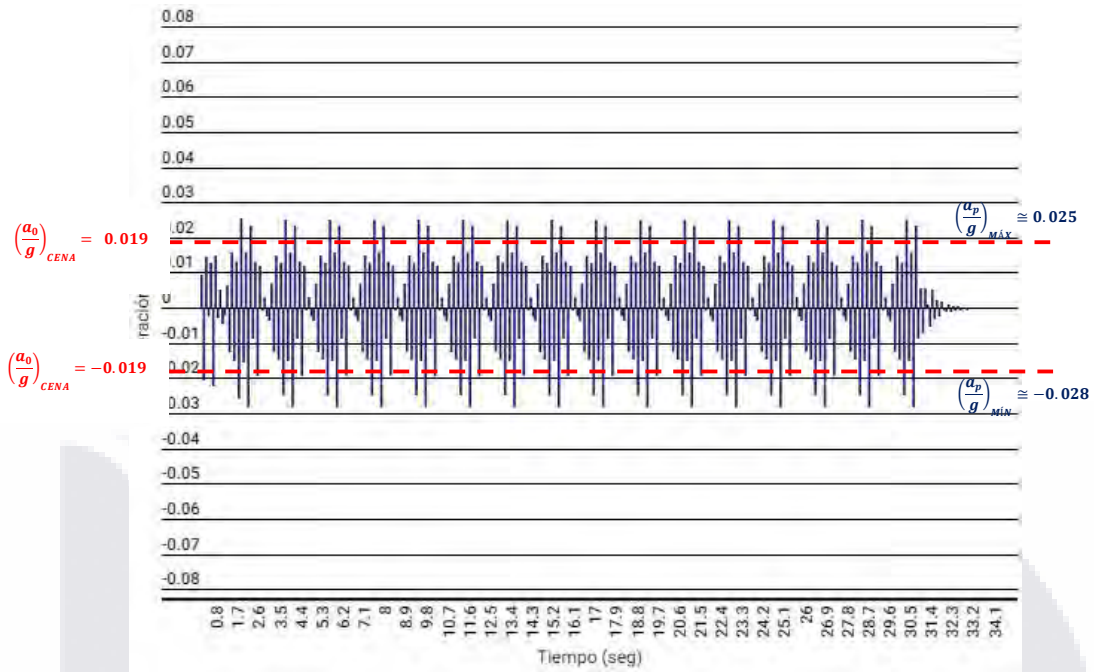


Fig. 74 Aceleración en zona de comensales con 240 personas moviéndose como multitud. Fuente: Elaboración propia

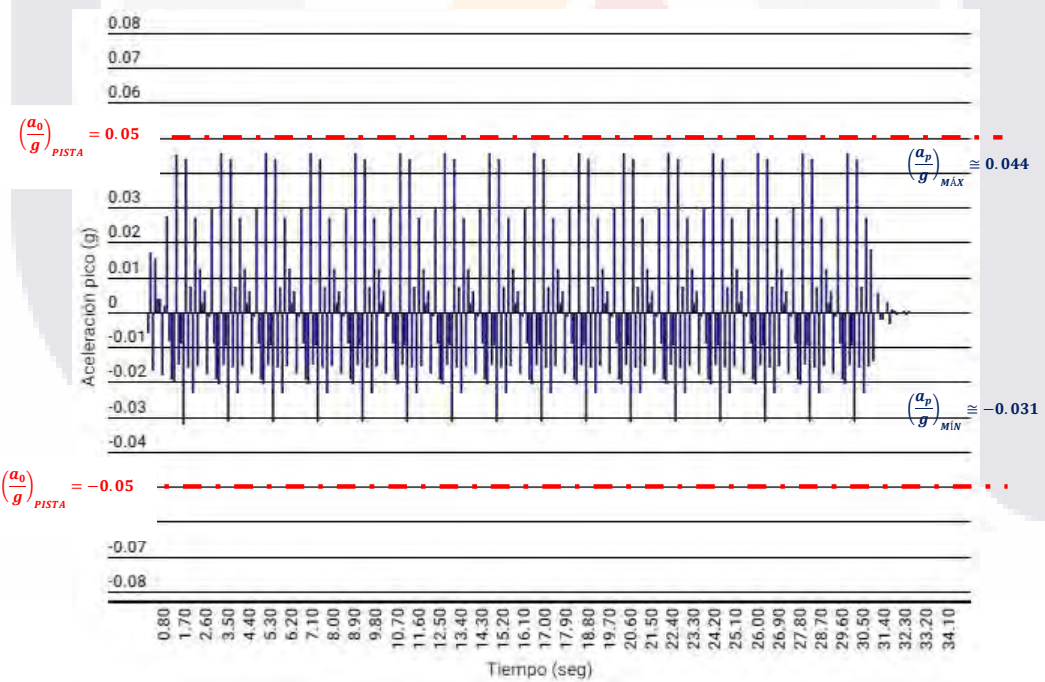


Fig. 75 Aceleración en pista de baile con 240 personas realizando movimientos como multitud. Fuente: Elaboración propia.

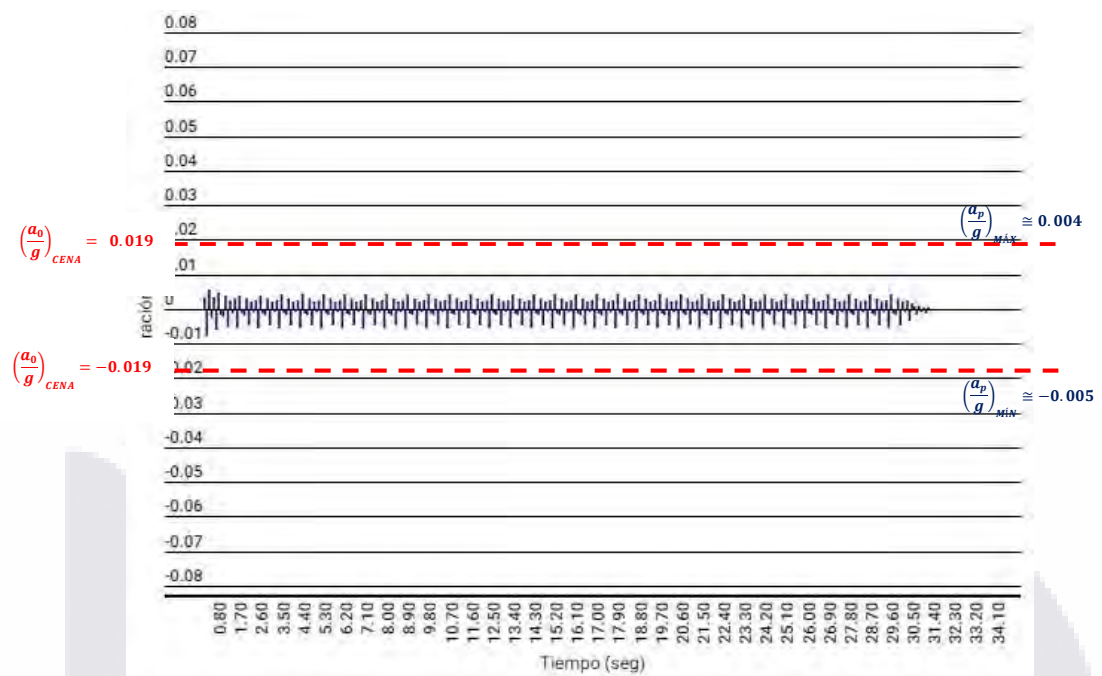


Fig. 76 Aceleración en zona de comensales con 120 personas saltando. Fuente: Elaboración propia.

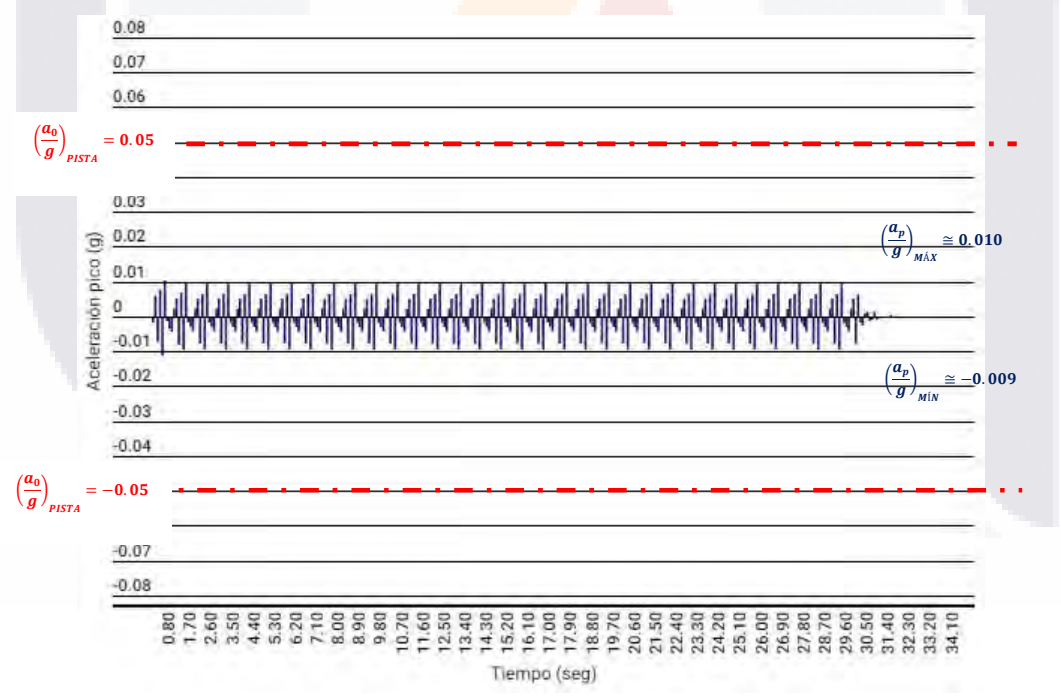


Fig. 77 Aceleración en pista de baile con 120 personas saltando. Fuente: Elaboración propia.

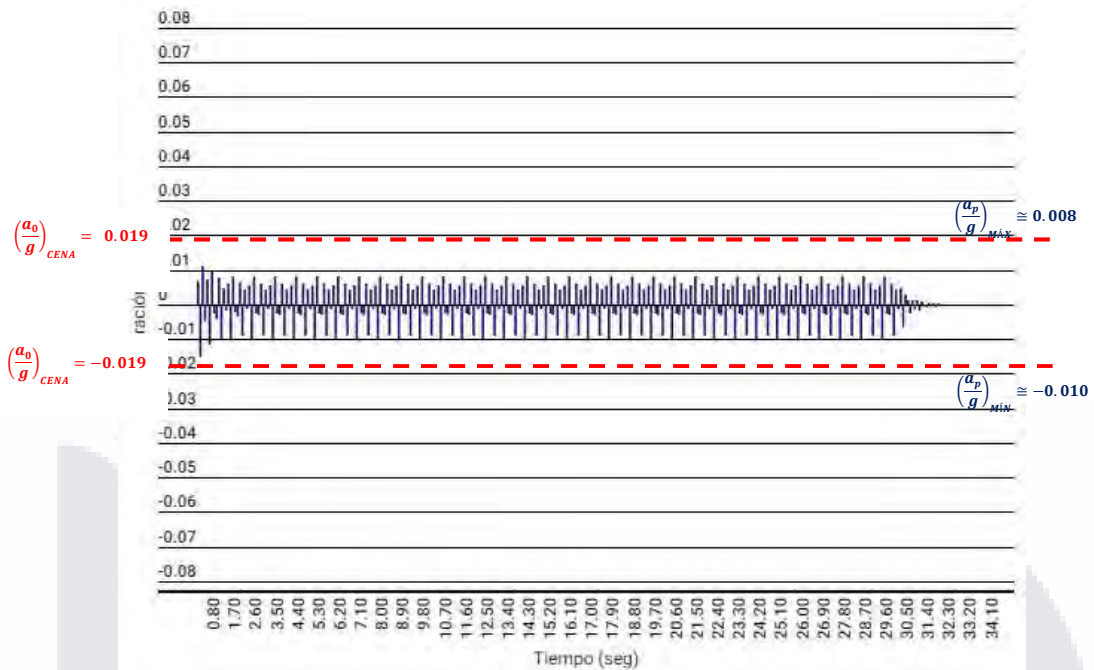


Fig. 78 Aceleración en zona de comensales con 240 personas saltando. Fuente: Elaboración propia.

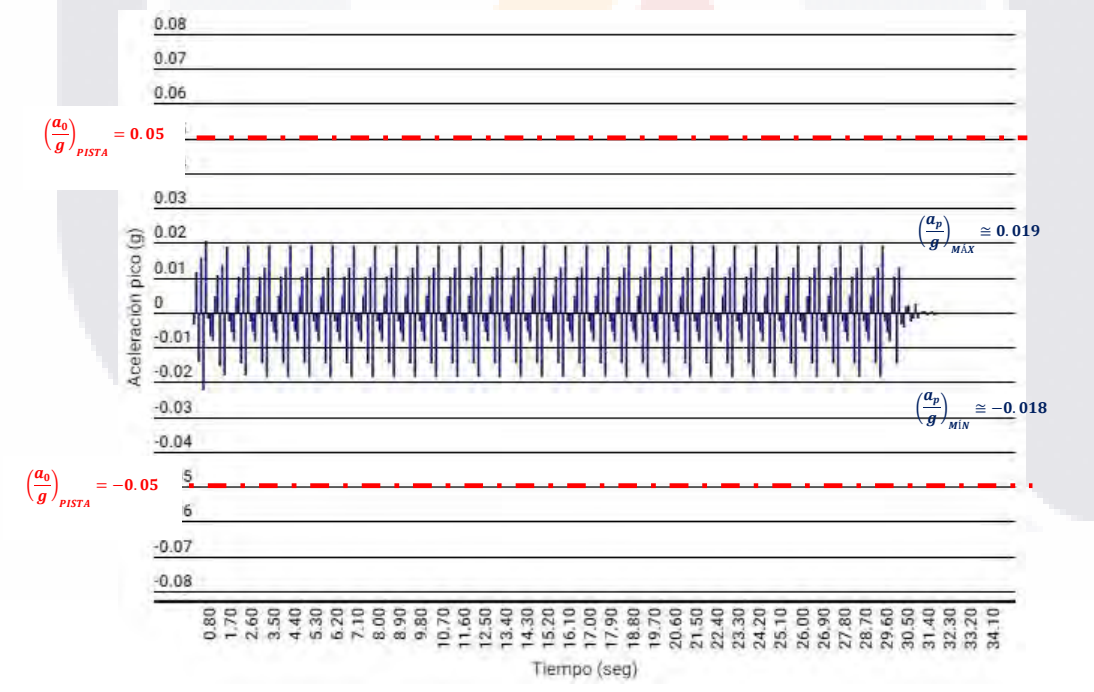


Fig. 79 Aceleración en pista de baile con 240 personas saltando. Fuente: Elaboración propia.

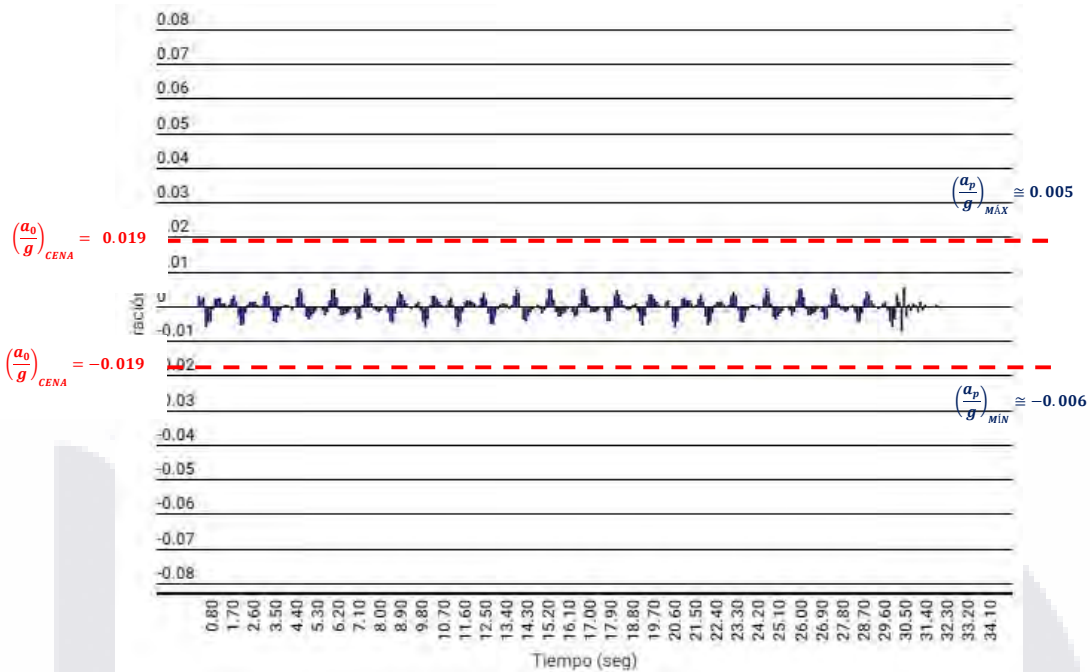


Fig. 80 Aceleración en zona de comensales con 120 personas bailando Bachata. Fuente: Elaboración propia.

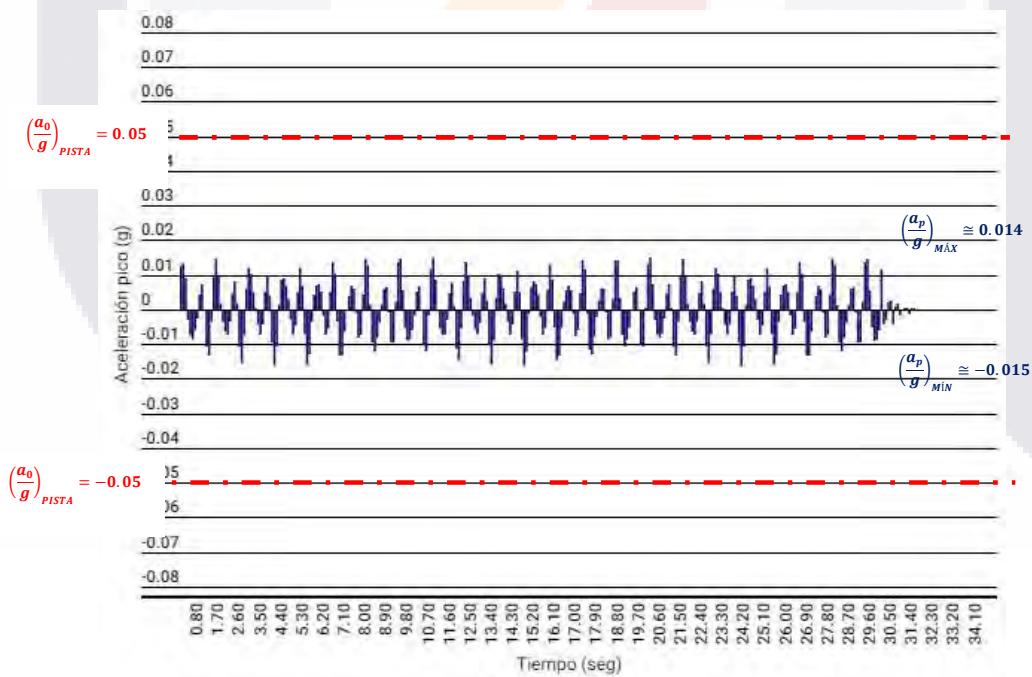


Fig. 81 Aceleración en pista de baile con 120 personas bailando Bachata. Fuente: Elaboración propia.

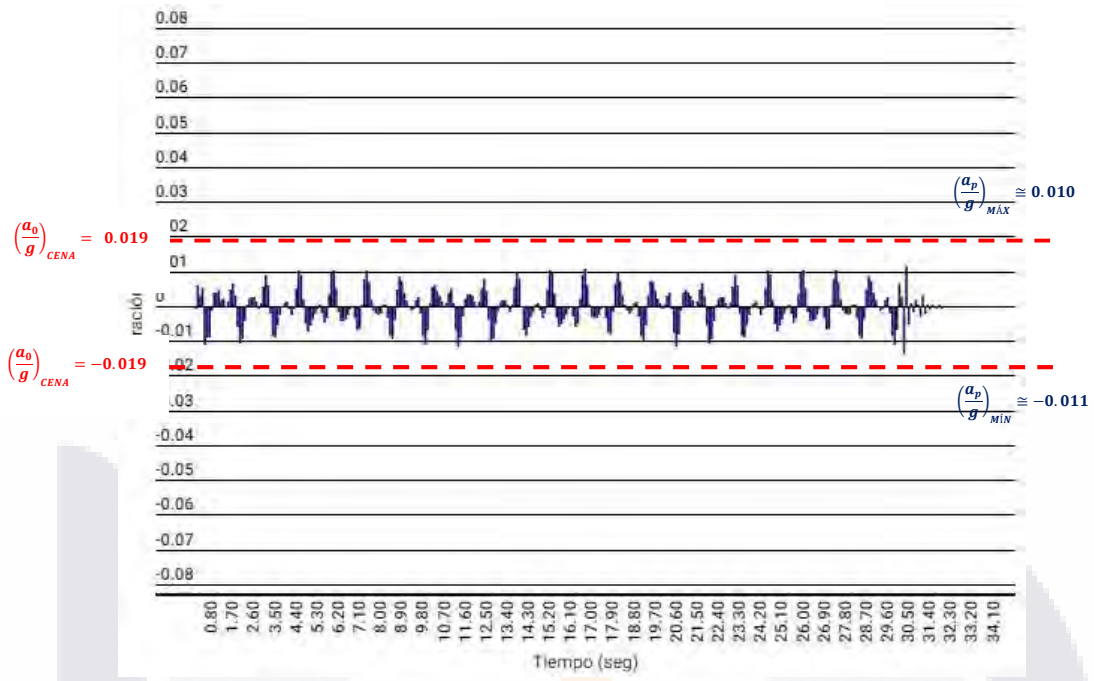


Fig. 82 Aceleración en zona de comensales con 240 personas bailando Bachata. Fuente: Elaboración propia.

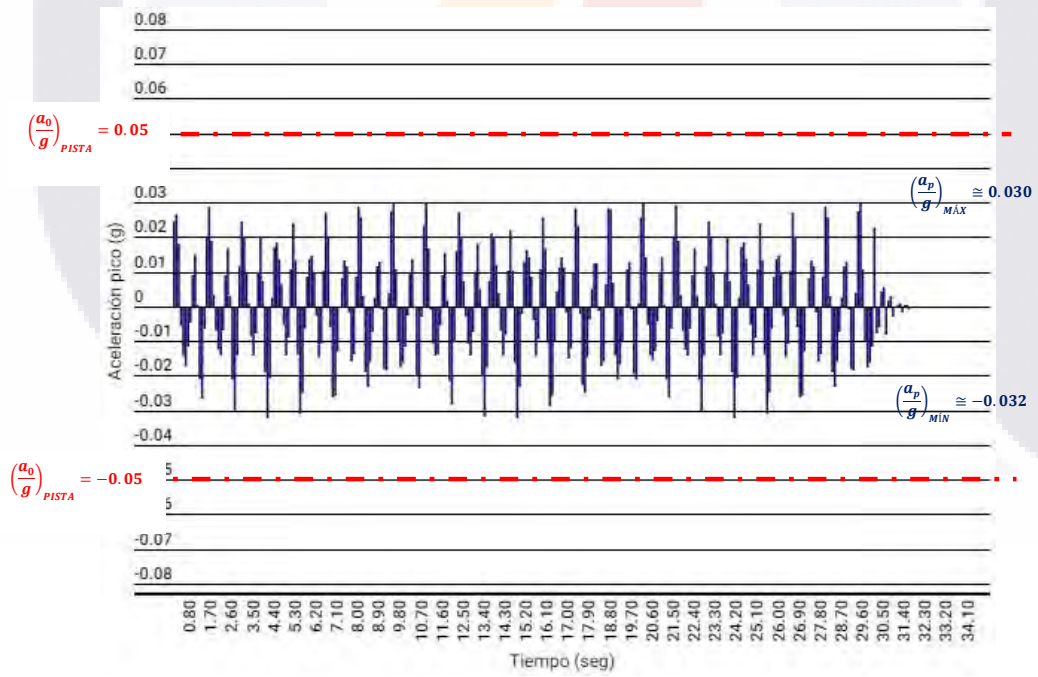


Fig. 83 Aceleración en pista de baile con 240 personas bailando Bachata. Fuente: Elaboración propia.

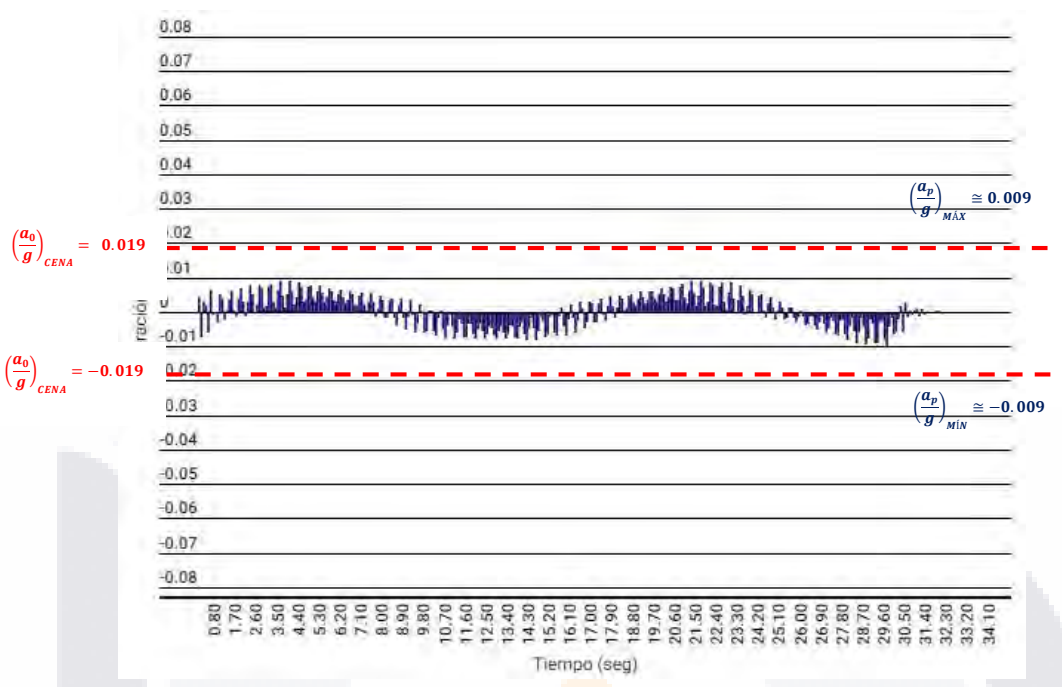


Fig. 84 Aceleración en zona de comensales con 120 personas bailando Merengue. Fuente: Elaboración propia.

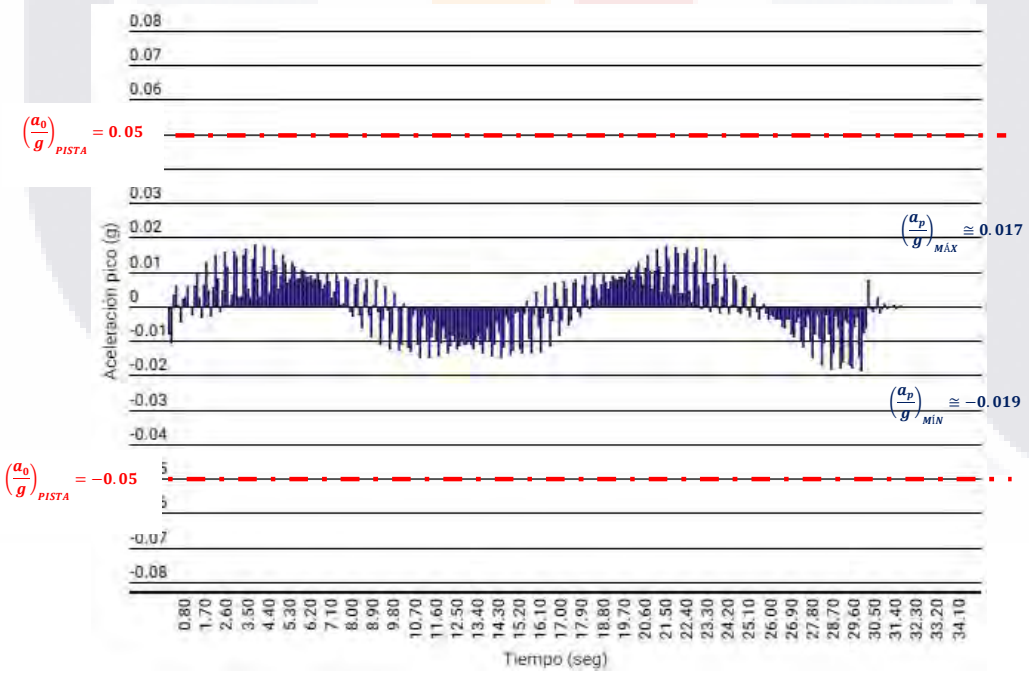


Fig. 85 Aceleración en pista de baile con 120 personas bailando Merengue. Fuente: Elaboración propia.

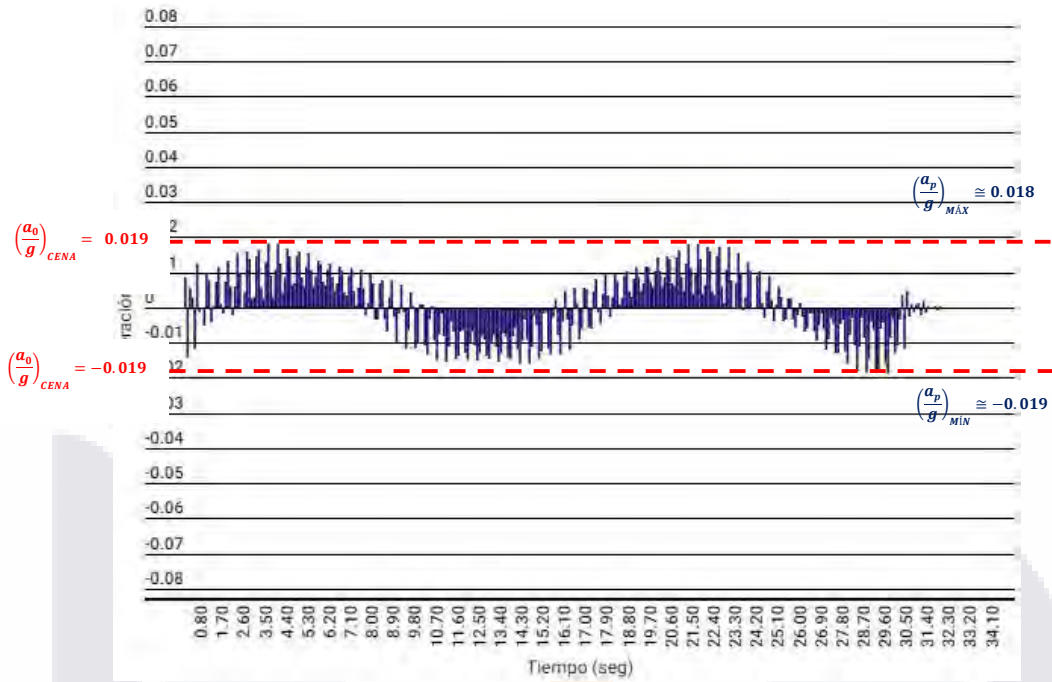


Fig. 86 Aceleración en zona de comensales con 240 personas bailando Merengue. Fuente: Elaboración propia.

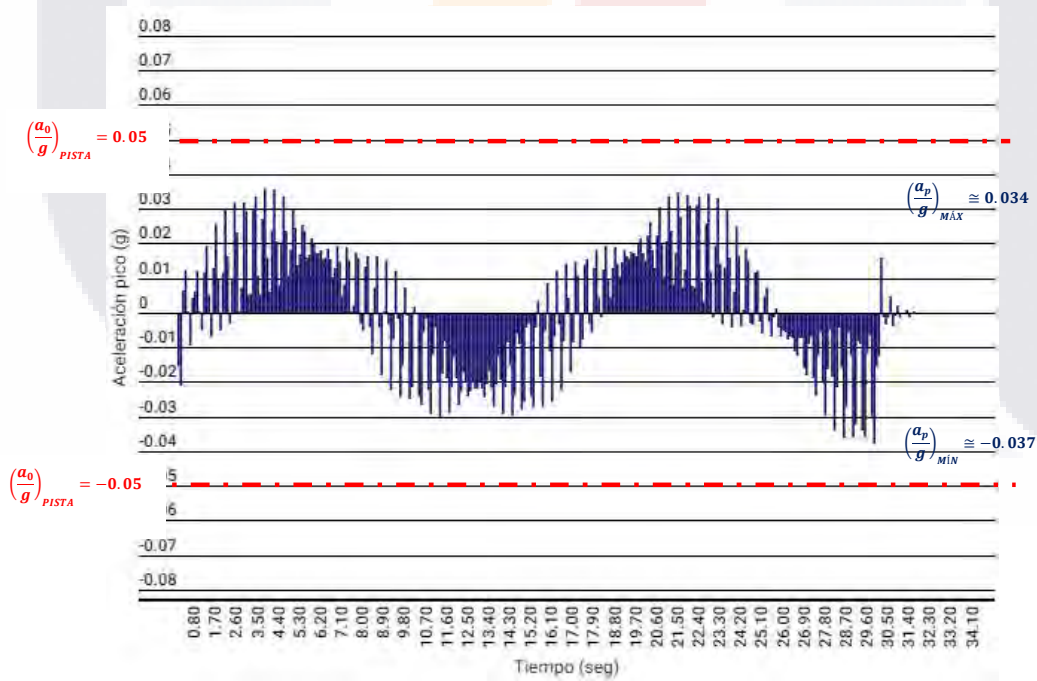


Fig. 87 Aceleración en pista de baile con 240 personas bailando Merengue. Fuente: Elaboración propia.

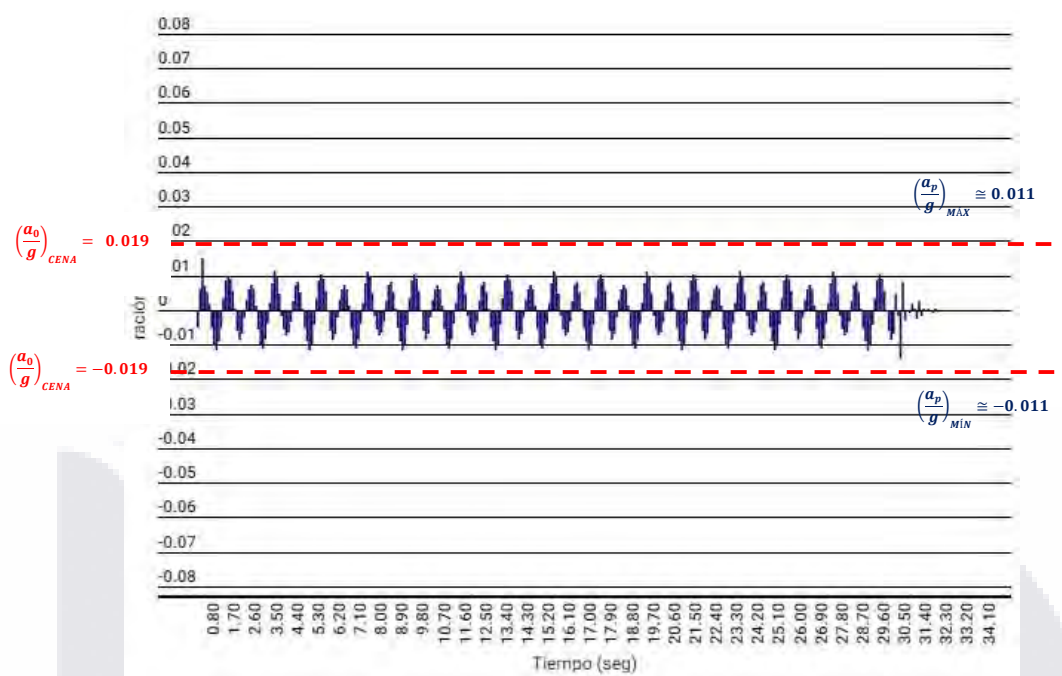


Fig. 88 Aceleración en zona de comensales con 120 personas bailando Reggaetón. Fuente: Elaboración propia.

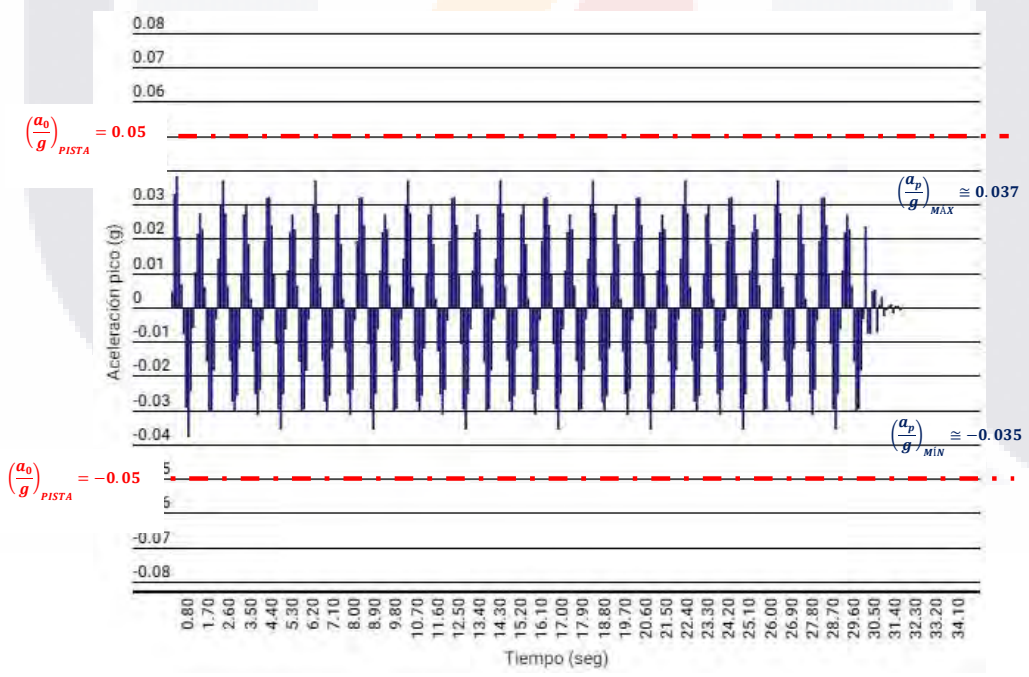


Fig. 89 Aceleración en pista de baile con 120 personas bailando Reggaetón. Fuente: Elaboración propia.

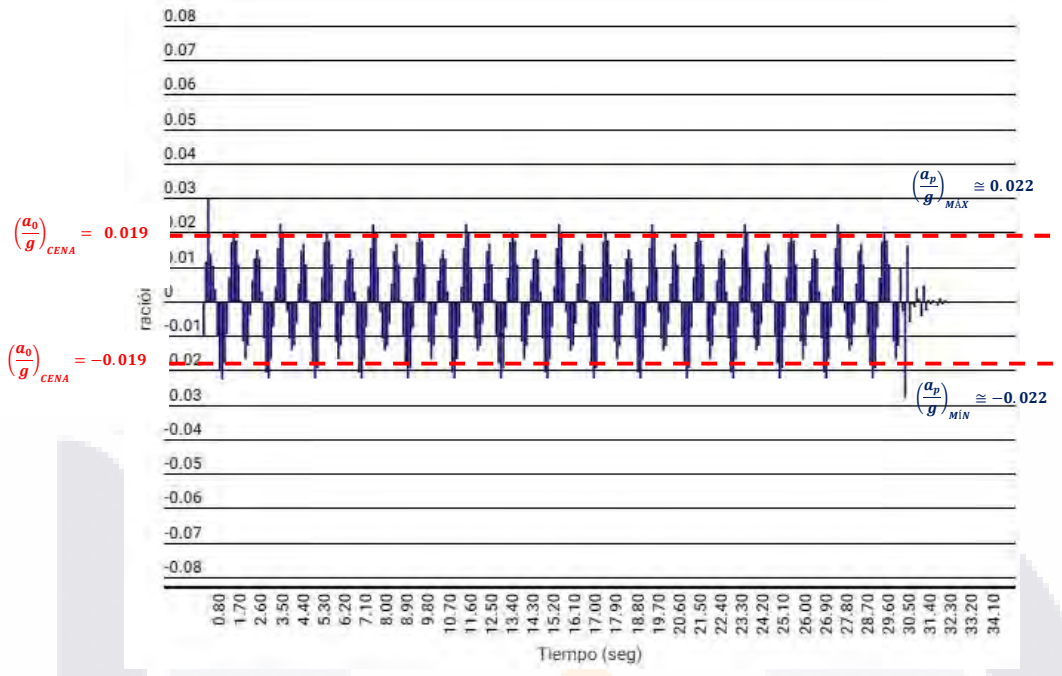


Fig. 90 Aceleración en zona de comensales con 240 personas bailando Reggaetón. Fuente: Elaboración propia.

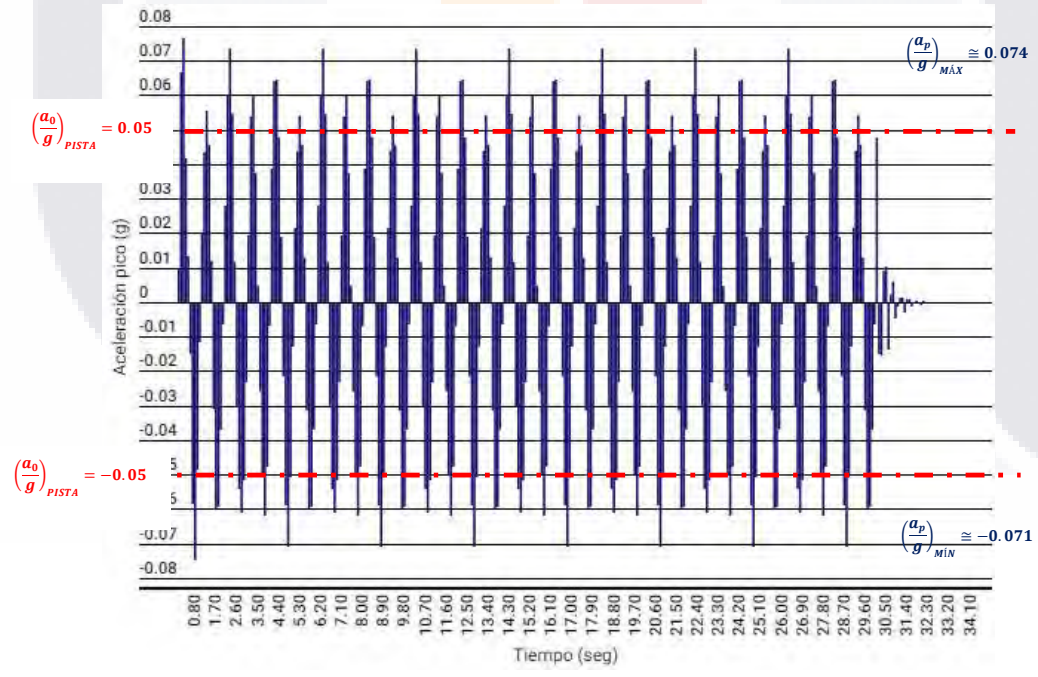


Fig. 91 Aceleración en pista de baile con 240 personas bailando Reggaetón. Fuente: Elaboración propia.

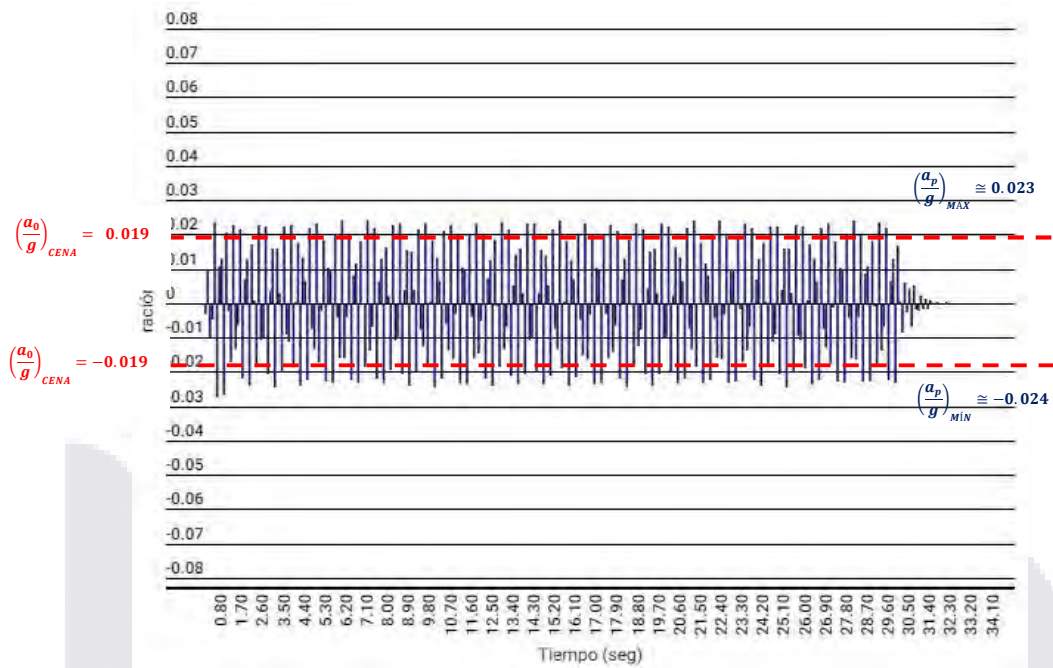


Fig. 92 Aceleración en zona de comensales con 120 personas bailando Salsa. Fuente: Elaboración propia.

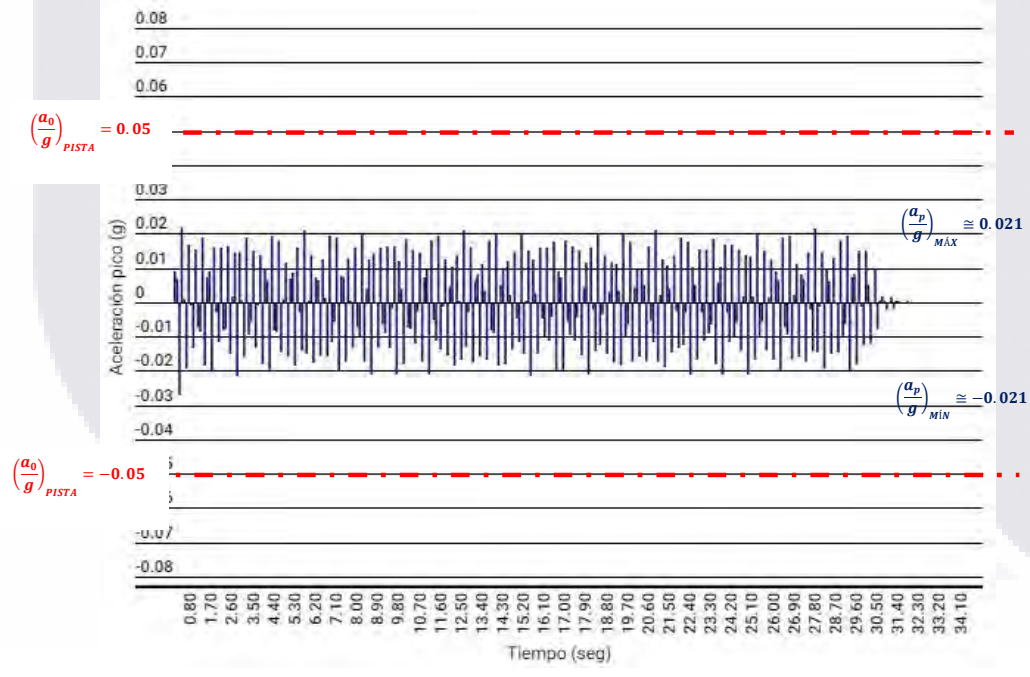


Fig. 93 Aceleración en pista de baile con 120 personas bailando Salsa. Fuente: Elaboración propia.

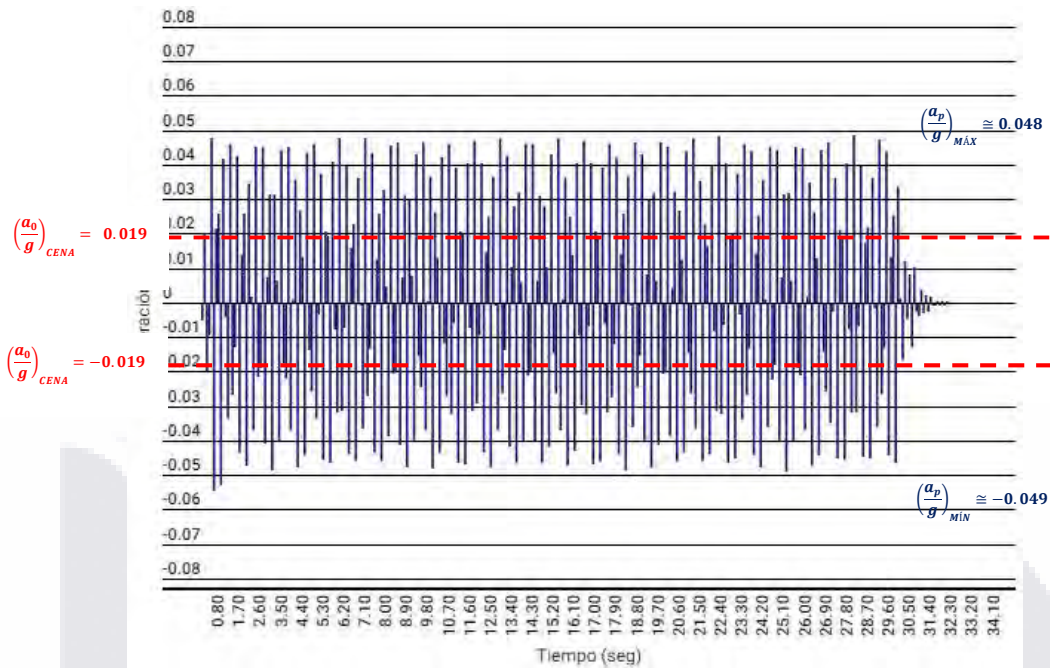


Fig. 94 Aceleración en zona de comensales con 240 personas bailando Salsa. Fuente: Elaboración propia.

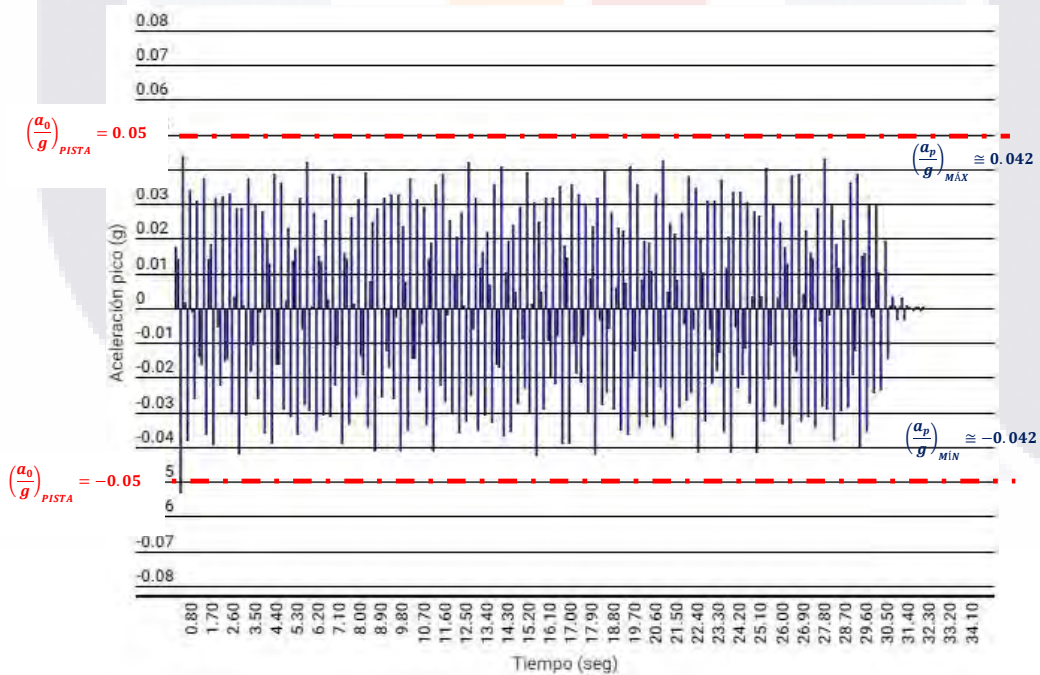
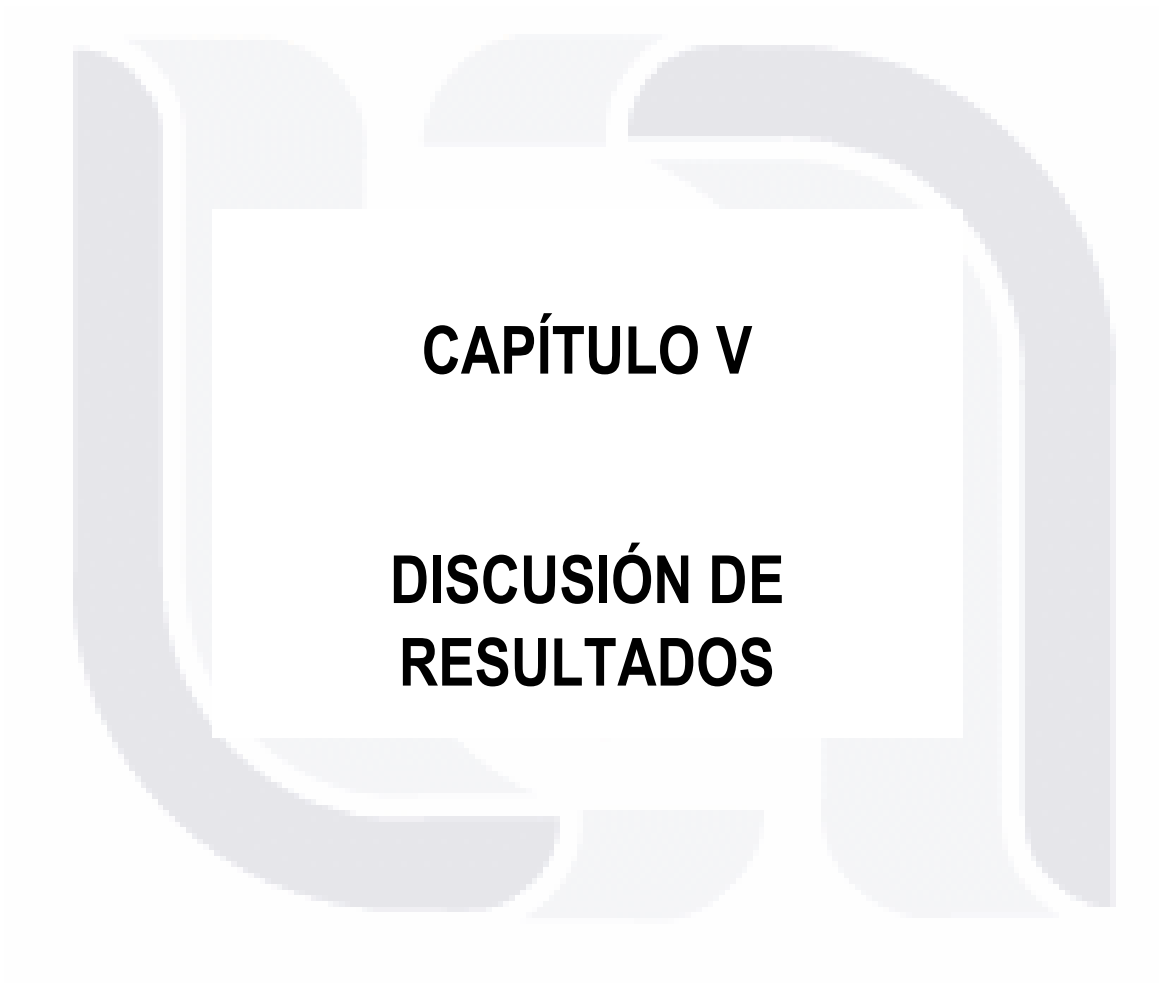


Fig. 95 Aceleración en pista de baile con 240 personas bailando Salsa. Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO V

**DISCUSIÓN DE
RESULTADOS**

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 PROPIEDADES DE LA SECCIÓN COMPUESTA

Como el lector se puede dar cuenta al estudiar el contenido de esta investigación, la flexibilidad del sistema de piso, que es directamente proporcional con las deformaciones propias de los elementos que lo componen, es muy relevante al momento de estudiar el fenómeno de vibraciones. Debido a que el momento de inercia de una sección modifica exponencialmente la tendencia de una viga a deformarse, cobra gran relevancia el contar con estructuras de piso con la mayor inercia posible, reduciendo la tendencia de estas a vibrar ante los fenómenos rítmicos.

Las secciones compuestas, en donde los perfiles metálicos trabajan en conjunto con la capa de compresión de concreto, poseen momentos de inercia considerablemente mayores que resultan favorables para la rigidez de los sistemas de piso, particularmente aquellos con dimensiones considerables.

La **TABLA 32** nos permite darnos una idea de la aportación que la sección compuesta brinda a las secciones metálicas simples. Vemos por ejemplo que, para la revisión de las vigas secundarias, se tiene un aumento del orden de casi 5 veces respecto a la inercia simple de la viga; conforme la jerarquía de los elementos evaluados es mayor, el efecto de la inercia compuesta disminuye pero incluso para las viga principales, la diferencia es de casi 3 veces a la alza.

TABLA 32. DIFERENCIAS ENTRE INERCIA DE SECCIÓN DE ACERO SIMPLE CONTRA INERCIA COMPUESTA

	Inercia de sección	Inercia Transformada	Incremento
Elemento	$I_s (cm^4)$	$I_t (cm^4)$	(%)
Vigas terciarias	4,287.20	22,430.50	+523
Vigas secundarias	33,298.50	118,705.50	+357
Vigas principales	79,500.20	245,869.99	+282

Al tratarse de una propiedad tan importante, cobra relevancia la obtención certera de este parámetro. Considerando el hecho de que esta investigación pretende demostrar que la modelación numérica ayuda a los estructuristas a evaluar de una manera certera el fenómeno de vibraciones, se debe validar la información

obtenida del software, previo a su uso en el diseño de los sistemas de piso. En la **TABLA 33** se muestra una comparativa entre el valor del momento de inercia calculado con el teorema de Steiner contra el obtenido del modelo con elementos tipo Deck.

TABLA 33. COMPARACIÓN ENTRE MOMENTOS DE INERCIA COMO LA SECCIÓN COMPUESTA (I_T)

Elemento	Teorema de Steiner I_t (cm⁴)	Modelo ETABS (Decks) I_t (cm⁴)	Variación (%)
Vigas terciarias	22,430.50	23,405.10	+4.34
Vigas secundarias	118,705.50	125,196.10	+5.47
Vigas principales	245,869.99	260,035.40	+5.76

Como se aprecia, los valores calculados de momento de inercia compuesta son muy similares en vigas terciarias y secundarias, en las cuales el software presenta un valor del orden de entre 4% y un 5%, mayor, respectivamente. Vale la pena mencionar que, para el caso específico de la viga principal, el programa arrojaba por default un valor casi 10% por debajo del calculado con el teorema de los ejes paralelos. Al revisar los reportes de ETABS, se encontró que el ancho efectivo que estaba tomando para el cálculo de la sección compuesta era de 1.00 m, sin que tenga una explicación certera; al introducir, manualmente, el valor del ancho efectivo calculado, se obtuvo el valor indicado en la tabla, con una variación de casi 6% por encima del resultado teórico. Esto, si bien para este caso nos resultaba en un resultado conservador, nos recuerda la importancia de aplicar siempre un criterio ingenieril basado en el entendimiento profundo de los conceptos de cualquier problema que pretendamos resolver.

5.2 DEFORMACIONES

Posiblemente, el parámetro más relevante en la revisión por vibraciones es la deformación de los miembros que componen los sistemas de piso. La **TABLA 34** muestra un resumen de las deformaciones obtenidas tanto con la metodología propuesta por el A.I.S.C y los dos modelos numéricos; así también, se incluyen dos columnas en las cuales se calcula la relación entre las deformaciones obtenidas con la DG11 y cada uno de los modelos computacionales, con el objeto de determinar la diferencia entre la deflexión considerando a los elementos como simplemente apoyados, tal como sugieren las normativas mexicana y la americana, contra las obtenidas modelando las conexiones rígidas que se tienen en el caso de estudio.

TABLA 34. DEFORMACIONES EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DEL SISTEMA DE PISO

Elemento	Guía 11 del	Modelo con	Modelo con	$\frac{\Delta_{A.I.S.C.}}{\Delta_{DECKS}}$	$\frac{\Delta_{A.I.S.C.}}{\Delta_{SHELLS}}$
	A.I.S.C.	Decks	Shells		
	(cm)	(cm)	(cm)		
Vigas terciarias	0.05	0.10	0.10	-- 0.50	-0.50
Vigas secundarias	0.34	0.10	0.14	3.40	2.42
Vigas principales	1.22	0.40	0.53	3.05	2.30

Al revisar los valores de las deformaciones de los 3 enfoques bajo los que se estudió la respuesta del sistema de piso, es evidente que, con excepción de las vigas secundarias, la metodología de la Guía 11 del A.I.S.C., al igual que las NTC-DCEA (2020), donde las deformaciones se calculan asumiendo el comportamiento de las vigas como simplemente apoyadas, resultan en valores de deflexión mucho más conservadoras respecto a los modelos numéricos.

Otro punto para destacar tiene que ver con el hecho de que los modelos, tanto con la losa modelada con Decks como con la losa representada con Shells, brindan resultados de deformación muy similares, siendo ligeramente más críticas en el modelo con Shells. Lo anterior sugiere que, para fines de evaluar este parámetro, cualquiera de los dos enfoques es adecuado, siendo mucho más sencilla la modelación con Decks.

Para entender, de mejor manera, las dos últimas columnas es necesario explicar que los valores positivos indican el número de veces que el valor de referencia (en este caso, el obtenido con la DG11) es más grande respecto al obtenido con cada uno de los 2 modelos; por su parte, los negativos muestran la relación a la baja entre la deformación del A.I.S.C con respecto a la modelación computacional.

De estos datos vemos que, para las vigas secundarias y las principales, las deformaciones calculadas con la DG11 son entre 3.0 y 3.4 veces más grandes las obtenidas con el modelo computacional construido con elementos tipo Deck; así mismo son más del doble que las deflexiones en el modelo con Shells, para los mismos elementos.

Estos resultados parecen encontrar una explicación en el efecto de la continuidad en las conexiones de elementos secundarios. así como en la influencia de las conexiones viga-columna, a momento, con las que se modelaron las vigas principales.

5.3 FRECUENCIA NATURAL

En la TABLA 35, se resumen los valores de frecuencias naturales obtenidas con las diferentes metodologías desarrolladas en el documento:

TABLA 35. FRECUENCIAS NATURALES DE TABLERO CRÍTICO BAJO LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS.

Metodología	Frecuencia natural f_n (Hz)
Guía 11 del A.I.S.C.	4.49
Deformaciones de modelo con Decks	7.27
Módulo de diseño de sección compuesta ETABS 20	5.95
Deformaciones de modelo con Shells	6.42
Análisis modal (modelación con elementos tipo Shell)	5.63

Tal como se podría anticipar de acuerdo con los resultados de deformaciones discutidos en el apartado anterior, de todos los valores calculados de frecuencia natural para el sistema de piso evaluado, el más conservador de todos es que se calcula con la Metodología de la Guía 11 del A.I.S.C, con un valor de 4.49 Hz.

Loa 2 valores más altos son las frecuencias naturales calculadas a partir de sustituir las deformaciones obtenidas directamente de los 2 modelos numéricos en la Ecuación 42.0, siendo de 7.27 Hz y 6.42 Hz para los modelos con Decks y con Shells, respectivamente.

Por su parte, los valores intermedios de frecuencia natural que se calcularon son muy similares entre sí y son los que fueron estimados con la aplicación de la ley de Dunkerley a los valores de frecuencia natural calculados por el software en el modelo con Decks, con un resultado de 5.95 Hz y la frecuencia fundamental de 5.66 Hz tomada de los datos del análisis modal desempeñado computacionalmente en el modelo de elementos finitos con la capa de compresión simulada por elementos tipo Shell, con valores de 5.95 y 5.63, respectivamente.

Si definimos el valor base de frecuencia natural como el más bajo de los 2 valores intermedios, discutidos en el párrafo anterior, es decir, los 5.66 Hz del análisis modal, y lo comparamos con el resultado de la DG11, de 4.49 Hz, vemos que este último es apenas el 80% del valor base lo que, como se estudiará más adelante, tiene importantes consecuencias en las aceleraciones medidas para el tablero crítico.

Como el lector podrá notar en este punto, las frecuencias naturales de un sistema de piso compuesto están intrínsecamente relacionadas con las deformaciones de los elementos que lo componen; como se explicó en el apartado anterior, la suposición de la normativa de evaluar sus deformaciones como vigas simplemente apoyadas, sin tomar en cuenta la aportación a la rigidez de las conexiones a momento, reducen enormemente el valor de la frecuencia natural respecto a los modelos computacionales donde se toman en cuenta las condiciones de apoyo.

Es importante discutir un aspecto relevante de los resultados del análisis modal. Para ello, se replica a continuación la **TABLA 31**, la cual resume las frecuencias de vibrado y los porcentajes de participación de masas asociadas al sistema estructural estudiado.

Tabla 31. FRECUENCIAS Y PORCENTAJES DE PARTICIPACIÓN MODAL PARA LOS PRIMEROS 10 MODOS

Modo	Frecuencia (Hz)	Participación de participación modal (%)
1	5.66	1.14%
2	6.10	0.03%
3	7.08	45.05%
4	7.14	0.24%
5	8.03	6.61%
6	9.35	0.00%
7	10.56	1.72%
8	11.76	0.03%
9	12.22	5.16%
10	13.05	0.04%

De los valores mostrados se puede notar como la participación de masa para buena parte de los primeros modos es relativamente baja, pero no es así para todos los casos. Entendiendo al porcentaje de participación modal como la razón de masa que es excitada durante la ejecución de los eventos rítmicos, entre más grande sea este valor, se requiere de más energía en el sistema para poder excitar dicho modo; en otras palabras, es poco probable que la estructura de piso se comporte con la forma modal asociada a porcentajes de participación modal muy altos, como es el caso del modo 3.

Similarmente, hay algunos modos con una participación de masa tan baja que podría considerarse como cero; esto significa que tales formas de vibrar son matemáticamente posibles, pero físicamente no tienen relevancia, por lo que no deben tomarse en cuenta. (Ver Modo 6).

Excluyendo a los dos casos anteriormente desarrollados, una de las grandes ventajas que nos da un análisis modal de modelos tridimensionales es la posibilidad de detectar modos superiores que pudieran provocar un efecto adverso en la respuesta estructural del sistema de piso, y no sólo concentrarnos en la frecuencia más baja o fundamental. Esto es particularmente relevante para actividades rítmicas en las cuales, pueden estar involucrados armónicos de nivel 3, que pudieran llegar a provocar resonancia para modos altos.

Para este caso en particular vemos que el modo 5, tiene una frecuencia de 8.03 Hz, el cual bien podría empatarse con el tercer armónico de la actividad de saltos propuesta por la DG11, y provocar efectos adversos. Este valor de frecuencia natural es el que la normativa mexicana establece como seguro para sistemas de piso sometidos a vibraciones, pero es evidente que esto no es aplicable para este tipo de solicitaciones.

5.4 ACELERACIONES PICO

Como se puede dar cuenta el lector, el nivel de percepción de vibraciones en un sistema de piso compuesto está determinado por la capacidad del ser humano para encontrar confort para determinado nivel de aceleraciones. En los siguientes párrafos, se muestra un compendio de los resultados de aceleración obtenidos con la metodología de la Guía 11 del A.I.S.C. así como de los valores obtenidos de aceleraciones pico máximas en los nodos de control que nos brinda el software, a partir de la definición de las funciones dinámicas asociadas a cada actividad evaluada.

El lector debe recordar que en la metodología propuesta por el A.I.S.C., las actividades rítmicas que se evalúan se engloban en 3 grandes grupos: saltos, cena/baile y conciertos/eventos deportivos. Faisca evaluó las mismas actividades, con ligeras variaciones en algunas de las nomenclaturas de los eventos rítmicos siendo estos: saltos a voluntad, gimnasia aeróbica y multitud/espectáculo (Faisca, 2013); lo anterior es relevante porque nos permite realizar una comparación directa de aceleraciones entre las mismas actividades.

En lo que respecta a la evaluación de los diferentes ritmos de baile, de acuerdo con los parámetros establecidos por Millán, estos son estudiados de manera particular, dado que se conoce el comportamiento para cada ritmo, algo que no está desarrollado a ese nivel en la metodología tradicional de la DG11, sin embargo, para poder realizar una comparación razonables entre la metodología planteada en la normativa y los resultados de los modelos numéricos, se tomará como referencia el nivel de aceleración obtenido con la Guía para actividades de cena/baile, siendo este tipo de evento rítmico el que coincide con el tipo de actividad estudiado por la investigadora colombiana.

5.4.1 ACTIVIDADES RÍTMICA DE LA DG11

En la **TABLA 36** se muestran las aceleraciones de entrepiso para las actividades propuestas por la Guía 11, tanto para 120 personas, como para 240:

TABLA 36. ACELERACIONES PICO EN PISTA DE BAILE CON ACTIVIDADES PROPUESTAS EN LA DG11.

Armónico	Aceleración pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$					
	Cena /Baile		Concierto/Evento Deportivo		Saltos	
	120	240	120	240	120	240
1	0.045	0.082	0.022	0.041	0.100	0.184
2	-	-	0.025	0.047	0.193	0.355
3	-	-	-	-	0.016	0.029

Del apartado 3.11.6.3 de este documento sabemos que el límite de aceleración permisibles en zona en donde se lleven actividades rítmicas multitudinarias es del orden de 0.05g; Como se puede apreciar, la actividad de saltos, sin importar la población, genera aceleraciones muy altas, completamente fuera del nivel permisible. Por lo anterior, los perfiles propuestos no son aptos para satisfacer este estado límite de servicio.

Es importante notar que, particularmente para el 2 armónico asociado a los saltos, la aceleración perceptible es del orden del 35.5% de la gravedad, lo que provocaría una sensación de muy alta incomodidad a los usuarios y potenciales daños a la estructura, derivados de las altas deformaciones que se esperan.

Una de las grandes limitaciones que se tienen con esta metodología es que no se puede determinar, con claridad, el valor de aceleración en zonas aledañas al tablero en donde se desarrollan los movimientos rítmicos. Para esto, la norma recomienda limitar las aceleraciones hasta niveles que sean tolerados para el uso más sensible de una estructura. Esto quiere decir que, si se quisiera garantizar que las vibraciones provocadas por actividades en la pista de baile no afectaran la zona de comensales, deberíamos rigidizar el entrepiso de tal forma que los valores de aceleración pico no rebasen las aceleraciones permisibles para lugares de cena o baile que rondan los 0.019 g.

5.4.2 ACTIVIDADES RÍTMICAS DE FAISCA

La TABLA 37 muestra un resumen similar al que se usó en el apartado anterior. La diferencia radica en que esta tabulación presenta los resultados obtenidos para las actividades investigadas por Faisca, tanto en la pista de baile como en la zona de comensales.

TABLA 37. ACELERACIONES PICO PROVOCADAS POR ACTIVIDADES PROPUESTAS POR FAISCA.

Ubicación	Aceleración pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$					
	Saltos a voluntad		Multitud/Espectáculo		Gimnasia Aeróbica	
	120	240	120	240	120	240
Pista de baile	0.010	0.019	0.022	0.046	0.032	0.077
Comensales	0.005	0.010	0.014	0.028	0.023	0.045

Estudiando los valores de aceleración calculados en la pista de baile es claro que son, en lo general, mucho menores que los obtenidos con la metodología del A.I.S.C.

Concentrando la atención en el valor de aceleración para eventos rítmicos de multitud o espectáculo de Faisca contra el de concierto o evento deportivo de la metodología del A.I.S.C, vemos que la aceleración medida para la población máxima esperada en la pista, es del orden del 2.8% de la gravedad, según la investigación del equipo brasileño, mientras que con la DG11 se calcula un valor del 4.70 % para el 2º armónico, lo que representa una deferencia de casi un 40% a la baja.

Comparando las actividades que se denominan saltos entre las dos metodologías, vemos una diferencia considerable entre ambas, siendo la DG11 la que para el 2ª armónico provoca aceleraciones del orden del 35.5% g, contra el 1.9% g que se estiman con la actividad propuesta por Faisca. La explicación a esto tiene que ver con el coeficiente de variación (CD), definido por Faisca, el cual se reduce exponencialmente conforme el número de personas aumenta, sugiriendo que entre más individuos existan sobre la losa, menor será la posibilidad de un comportamiento sincronizado de los participantes.

En lo que concierne a la actividad de gimnasia aeróbica, se observa que, si la actividad se lleva a cabo por 240 personas, de manera simultánea, se rebasan los niveles de percepción aceptable para actividades masiva, lo que nos indica que, pese a ser valores mucho menores respecto a los calculados con la metodología americana, no permite considerar a la configuración estructural del proyecto como apta para la pista de baile.

Una de las grandes ventajas que tiene una modelación tridimensional como la que se desarrolló en esta investigación es la posibilidad de evaluar las aceleraciones que se transmiten de una zona de la estructura a otra. Gracias a esto, podemos analizar los datos de la **TABLA 37** y ver, por ejemplo, que si tomamos en cuenta los niveles de percepción de aceleraciones marcados por la normativa mexicana para restaurantes, el cual es de 1.9% de la gravedad, hay actividades como la gimnasia aeróbica que, ni para una densidad de carga de 40 kg/m², equivalentes a sólo la mitad de la máxima población esperada (120 personas), cumple para garantizar confort a los comensales que estuvieran sentados en las cercanías a la mitad del tablero.

Lo anterior cobra relevancia cuando analizamos más a detalles este tipo de actividad. Vemos que, para 120 personas ocupando el tablero crítico de la pista, la aceleración perceptible en dicho punto es de 0.032 g, lo que cumple para el límite marcado por el reglamento mexicano, ya que no rebasa los 0.050 g para actividades rítmicas; sin embargo, como se discutió en el párrafo anterior, para esa cantidad de personas se rebasa el límite de percepción para comensales cenando, lo que obligaría al diseñador a rigidizar dicho tablero para estar dentro de los parámetros de confort aceptables. Se hace evidente la necesidad de no enfocar la atención, únicamente, en los tableros en donde se desarrollan las actividades rítmicas, ya que se puede estar subestimando la respuesta estructural de pisos contiguos.

5.4.3. RITMOS DE BAILE DE MILLÁN

En lo que atañe a la evaluación de los diferentes ritmos de baile, tenemos en la **TABLA 38**, el resumen de los datos de aceleraciones pico obtenidas:

TABLA 38. ACCELERACIONES PICO PROVOCADAS POR RITMOS DE BAILE DE MILLÁN

Ubicación	Aceleración pico ($\frac{a_p}{g}$)							
	Bachata		Merengue		Reggaetón		Salsa	
	120	240	120	240	120	240	120	240
Pista de baile	0.015	0.032	0.019	0.037	0.037	0.074	0.021	0.042
Comensales	0.006	0.011	0.009	0.019	0.011	0.022	0.024	0.049

Revisando los datos de la tabla anterior, en casi todos los casos, a excepción del ritmo de la salsa el cual se discutirá más adelante, la aceleración pico máxima obtenida es linealmente proporcional al valor de la población efectuando la actividad rítmica para cada zona encontrando que, para 240 personas, los valores son cercanos al doble de las aceleraciones medidas para 120 ocupantes.

Los ritmos de bachata y merengue se encuentran dentro de los parámetros límite, tanto en la pista de baile como en la zona de comensales, incluso para la ocupación máxima; por su parte, el reggaetón bailado por 240 personas rebasa los límites de percepción en ambos tableros, por lo que el sistema de piso propuesto no cumple para este estado límite de diseño.

El caso específico de la salsa presenta valores inesperados ya que, si bien comparten la relación lineal mencionada en el párrafo anterior, relacionada con el número de ocupantes, sus magnitudes son, prácticamente, las mismas entre la zona de comensales y la pista de baile, pese a que en la primera no se modela ninguna actividad rítmica. Este comportamiento parece sugerir la aparición de un fenómeno de resonancia en el sistema de piso para alguna de las frecuencias asociadas con el ritmo de salsa, la cual pudiera estar muy cercana a alguno de los modos de vibrar característicos del sistema de piso; pese a lo anterior, el nivel de aceleración en la pista de baile está dentro de los parámetros, pero la percepción en la zona de mesas rebasa el nivel máximo marcado en la normativa.

5.4.4 NIVELES DE PERCEPCIÓN DE ACELERACIÓN Y SENSACIÓN DE CONFORT DE LOS USUARIOS

Como se ha mencionado antes, la evaluación del estado límite de servicio por vibraciones en la normativa mexicana, así como en la DG11, se mide en función del nivel de aceleración perceptible y de la frecuencia natural del sistema de piso evaluado. En este apartado se comparan, más detalladamente, las aceleraciones pico calculadas con el software contra los límites de aceleración marcados por las N.T.C. Acero 2020.

5.4.4.1 ACTIVIDADES PROPUESTAS POR LA DG11

TABLA 39. EVALUACIÓN DE NIVELES ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE SEGÚN LA METODOLOGÍA DE LA GUÍA 11 DEL A.I.S.C PARA 120 PERSONAS

Actividad Rítmica	Armónico	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Límite de Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Cena/Baile	1	0.045	0.050	0.90	Cumple
Concierto/Evento	1	0.022	0.050	0.44	Cumple
Deportivo	2	0.025	0.050	0.50	Cumple
Saltos	1	0.100	0.050	2.00	No Cumple
	2	0.193	0.050	3.86	No Cumple
	3	0.016	0.050	0.32	Cumple

TABLA 40. EVALUACIÓN DE NIVELES ACCELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE SEGÚN LA METODOLOGÍA DE LA GUÍA 11 DEL A.I.S.C PARA 240 PERSONAS.

Actividad Rítmica	Armónico	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Cena/Baile	1	0.082	0.050	1.64	No Cumple
Concierto/Evento	1	0.041	0.050	0.82	Cumple
Deportivo	2	0.047	0.050	0.94	Cumple
Saltos	1	0.221	0.050	4.42	No Cumple
	2	0.395	0.050	7.90	No Cumple
	3	0.033	0.050	0.66	Cumple

Evaluando la TABLA 39 y la TABLA 40, notamos que según la metodología del A.I.S.C, la configuración estructural propuesta para el caso de estudio, para la máxima población esperada de 240 personas, provocaría niveles de aceleración muy peligrosas y una pérdida de confort total en caso de que se presentaran actividades relacionados con saltos coordinados en la pista de baile. Así también, se espera una percepción de vibración asociada a actividades de baile sobre la pista.

Evaluando el caso de carga con 120 personas sobre el tablero, el sistema de piso cumpliría para evitar sensación en caso de una condición de baile ejecutado coordinadamente para ese número de personas, sin embargo, para la actividad de saltos, no sería suficiente y las aceleraciones serían muy altas.

Enfatizando el análisis en la actividad de saltos, dado que es la que más aceleración produce, vale la pena mencionar que para este caso de estudio se tomó una carga uniforme de las personas ejecutando la actividad rítmica (w_p) de 40.00 kg/m² (120 personas) y de 80.00 kg/m² (240 personas); la Guía 11, en su Tabla 5.2, presenta un valor de carga para esta actividad específica de 20.00 kg/m² de acuerdo con lo que este documento considera como valores máximos, normales, esperados para este tipo de eventos. Se observa que es considerablemente menor a los usados en las 2 condiciones de carga de esta investigación, por lo que cobra relevancia el criterio que el diseñador estructural utilice al momento de evaluar esta y cada una de las actividades bajo los criterios de esta normativa, buscando siempre que las condiciones de carga sean lo más apegadas a la realidad posible, según el espacio en donde se presentarán las sollicitaciones rítmicas y los niveles de ocupación esperados.

5.4.4.2 ACTIVIDADES PROPUESTAS POR FAISCA

TABLA 41. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDADES DE FAISCA (240 PERSONAS).

Actividad Rítmica	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Aerobics	0.077	0.050	1.44	No Cumple
Multitud/Evento	0.046	0.050	0.92	Cumple
Saltos	0.019	0.050	0.38	Cumple

TABLA 42. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE PARA ACTIVIDADES DE FAISCA (120 PERSONAS).

Actividad Rítmica	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Aerobics	0.032	0.050	0.64	Cumple
Multitud/Evento	0.022	0.050	0.44	Cumple
Saltos	0.010	0.050	0.20	Cumple

En la TABLA 41, TABLA 42 se muestra la comparativa entre las aceleraciones pico de la pista de baile y los límites de aceptación para actividades rítmicas investigadas por Faisca; vemos que en este tablero, sólo el caso de un evento relacionado con los aerobics, que fuera llevado a cabo de manera simultánea por una población de 240 personas, rebasaría el nivel de percepción de vibraciones de los participantes en la actividad, al registrarse un nivel del orden del 44% por encima del tope máximo. Por esta razón, la estructura del sistema de piso no podría validarse para cumplir con la normativa y tendría que buscarse una propuesta que rigidizara el sistema de piso.

Complementando el párrafo anterior, podemos deducir de la TABLA 42 que, si se tuviera alguna posibilidad de reglamentar el uso del salón de baile, para que en ningún momento rebasara una ocupación de 120 personas, específicamente para alguna actividad relacionada con los aerobics, podría considerarse a la configuración de vigas actual como adecuada, únicamente en la zona de la pista, para los criterios de Faisca.

TABLA 43. ACCELERACIÓN PERCEPTIBLE EN ZONA DE COMENSALES PARA ACTIVIDADES DE FAISCA (240 PERSONAS).

Actividad Rítmica	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Aerobics	0.045	0.019	2.37	No Cumple
Multitud/Evento	0.028	0.019	1.47	No Cumple
Saltos	0.010	0.019	0.53	Cumple

TABLA 44. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN ZONA DE COMENSALES PARA ACTIVIDADES DE FAISCA (120 PERSONAS).

Actividad Rítmica	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Aerobics	0.023	0.019	1.21	No Cumple
Multitud/Evento	0.014	0.019	0.74	Cumple
Saltos	0.005	0.019	0.26	Cumple

La TABLA 43 y la TABLA 44 indican que el efecto de las actividades rítmicas propuestas por Faisca en la zona de comensales es más relevante que en la misma pista ya que se obtienen aceleraciones perceptibles importantes para los usuarios si llegaran a ejecutarse por 240 personas, actividades aeróbicas sincronizadas o la gente se comportara así como si los ocupantes de la pista de baile tuvieran un comportamiento similar al esperado en un evento multitudinario como los que se presentan en un estadio o un concierto.

Aun cuando se limitara la población al 50% para el desarrollo de actividades relacionadas con los aerobics en la pista de baile, la configuración estructural propuesta no sería adecuada para evitar una pérdida de confort por parte de los usuarios que se encontraran cenando.

Enfatizando la actividad que Faisca denomina saltos, vemos que, a diferencia del criterio de la DG11, para la misma actividad, provoca aceleraciones mucho menores; como se mencionó antes, esto se debe en parte al coeficiente de variación que los investigadores brasileños proponen para casos masivos de carga, que reducen de manera muy importante los efectos dinámicos de este tipo de eventos rítmicos.

5.4.4.3 RITMOS DE BAILE INVESTIGADOS POR MILLÁN

TABLA 45. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE PARA RITMOS DE MILLÁN (240 PERSONAS).

Ritmo de baile	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
----------------	---	--	---	---------

Bachata	0.032	0.050	0.64	Cumple
Merengue	0.037	0.050	0.74	Cumple
Reggaetón	0.074	0.050	1.48	No Cumple
Salsa	0.042	0.050	0.84	Cumple

TABLA 46. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN PISTA DE BAILE PARA RITMOS DE MILLÁN (120 PERSONAS).

Ritmo de baile	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Bachata	0.015	0.050	0.30	Cumple
Merengue	0.019	0.050	0.38	Cumple
Reggaetón	0.037	0.050	0.74	Cumple
Salsa	0.021	0.050	0.42	Cumple

Estudiando el contenido de la **TABLA 45** y la **TABLA 46**, vemos que, específicamente en la pista de baile, el único caso de carga que provoca que se rebasen los límites de aceleración perceptible es el que se asocia a un ritmo de reggaetón bailado coordinadamente por 240 personas.

TABLA 47. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN ZONA DE COMENSALES PARA RITMOS DE MILLÁN (240 PERSONAS).

Ritmo de baile	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Bachata	0.011	0.019	0.58	Cumple
Merengue	0.019	0.019	1.00	Cumple
Reggaetón	0.022	0.019	1.16	No Cumple
Salsa	0.049	0.019	2.58	No Cumple

TABLA 48. ACELERACIÓN PERCEPTIBLE EN ZONA DE COMENSALES PARA RITMOS DE MILLÁN (120 PERSONAS).

Ritmo de baile	Aceleración Pico $\left(\frac{a_p}{g}\right)$	Aceleración Perceptible $\left(\frac{a_0}{g}\right)$	$\frac{\left(\frac{a_p}{g}\right)}{\left(\frac{a_0}{g}\right)}$	Estatus
Bachata	0.006	0.019	0.32	Cumple
Merengue	0.009	0.019	0.47	Cumple
Reggaetón	0.011	0.019	0.58	Cumple
Salsa	0.024	0.019	1.26	No Cumple

Al revisar los datos de la **TABLA 47** así como de la **TABLA 48**, correspondientes con los niveles de aceleración en la zona de mesas, vemos que los comensales sentados en el centro de los tableros aledaños a la pista de baile sufrirían de efectos contraproducentes relacionados con la percepción de vibración provocada por bailes sincronizados de reggaetón y salsa, si la pista de baile estuviera ocupada en su máxima capacidad.

Incluso con la mitad de la población esperada, la salsa parece generar un fenómeno de resonancia con algunos modos superiores del entrepiso, lo que provoca que, para este ritmo, las aceleraciones en la pista de baile, así como en la zona de comensales tengan, prácticamente, el mismo valor medido para el mismo número de usuarios efectuando el baile. La razón de que, para la pista de baile, este tipo de baile no genere pérdida de confort por parte de los usuarios localizados sobre ella es el nivel de percepción de aceleración más alto que se tiene cuando una persona realiza la actividad; es por esto que el tablero crítico de la zona de comensales se vuelve el caso que rige el diseño, tanto para los criterios de Faisca como para los de Millán.

Por lo anterior, queda claro que se deben realizar modificaciones a la rigidez global del sistema de piso evaluado, a fin de lograr aumentar a la frecuencia natural de la estructura, con el objetivo de lograr reducir los niveles de aceleración de entrepiso y cumplir con las consideraciones de confort aceptados por la normativa aplicable.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

El fenómeno de vibraciones en sistemas de piso es un tema que requiere, no sólo de un conocimiento sólido de las bases y conceptos de la dinámica estructural que rigen el movimiento sino, además, del entendimiento global de los proyectos que pudieran ser propensos a ser sometidos a vibraciones rítmicas, como lo son los gimnasios, los salones de baile y los graderíos en estadios.

En muchas ocasiones, como en el caso de estudio que se tomó como referencia para este trabajo, no se cuenta con una delimitación clara de los espacios destinados para el desarrollo de las actividades rítmicas humanas para las que son proyectadas este tipo de obras. Esto obliga al diseñador estructural a aplicar criterios y su experiencia, en la determinación del número de configuraciones de carga que pudieran presentarse en la estructura, de las cuales depende, en gran medida, tanto la jerarquización de elementos estructurales como la consecuente respuesta estructural de la obra.

Tradicionalmente, se han considerado los estados límites de deformación marcadas en las diversas reglamentaciones como la condición que, de cumplirse, garantizarán un buen comportamiento de los sistemas de piso; queda claro, con los resultados obtenidos para el caso de estudio en la que la configuración estructural y los perfiles seleccionados cumplen, satisfactoriamente, para los estados límite de falla y por deflexiones, que no son suficientes para garantizar el confort de los ocupantes de este tipo de proyectos sometidos a actividades rítmicas en los cuales, el estado límite por vibraciones rige el diseño estructural.

La hipótesis general sobre la que se planteó el desarrollo de este trabajo involucra comparar la metodología planteada en la normativa mexicana que, a su vez, remite a la Guía 11 del American Institute for Steel Construction con los parámetros y datos que los programas computacionales modernos, permiten obtener, con el objetivo de poder confirmar a los modelos de elementos finitos como una herramienta que sea de gran utilidad para diseñar sistemas de piso muy grandes, de una forma más eficiente.

De acuerdo con los resultados obtenidos con los dos tipos de modelos que se construyeron en el software de elementos finitos, es una realidad que estos brindan resultados menos conservadores que los que se obtuvieron con la metodología de la DG11; esto se confirma al analizar los valores de deformación calculados por el programa, los cuales son congruentes entre los dos modelos y de los cuales depende uno de los parámetros más relevantes asociados a la evaluación de vibraciones en entresijos como lo es la frecuencia natural del sistema.

Hablando específicamente sobre la frecuencia de vibración del sistema de piso, notamos que la calculada por el software es considerablemente mayor a la que se obtuvo con la aplicación de las ecuaciones de la Guía 11 que al mismo tiempo es la que se incluye en las NTC-DCEA (2020); los datos que se obtuvieron sugieren que

la aportación a la rigidez que se relaciona con las conexiones a momento que existen entre los elementos principales, es alta, contrario a lo marcado en la normativa americana que indica que, el efecto de la continuidad en vigas o de las conexiones a momento en los marcos principales, no parece aportar de manera relevante al mejoramiento de la respuesta estructural ante vibraciones.

Uno de los objetivos que se tenían al iniciar con la investigación tenía que ver con el hecho de poder ofrecer al lector una metodología que permitiera clarificar la modelación tridimensional que, si bien se recomienda en los comentarios del reglamento mexicano, así como en la DG11, no se detalla a profundidad en ninguno de los documentos. A este respecto, podemos concluir que para cualquier profesional con un manejo básico de los softwares comerciales que se tienen hoy día, la elaboración del modelo no es compleja por sí misma pero sí requiere del entendimiento de los conceptos que se explicaron en el desarrollo del contenido para poder incluir las modificaciones en las propiedades de los perfiles usados en la modelación, necesarias para obtener resultados confiables. Un ejemplo de esto es la modificación a la inercia del modelo con elementos tipo Shell que, de no considerarse, resultaría en datos como sección simple los cuales, contrario a brindar la posibilidad de encontrar una solución económica para un tablero sometido a eventos rítmicos, podría conducirnos a resultados muy conservadores.

De manera personal considero que el apartado correspondiente con la revisión por vibraciones de la norma mexicana debería ser revisado para particularizar los tipos de actividad rítmica para los que son aplicables los valores de frecuencia natural mínima recomendada para tableros de piso, el cual es de 8.00 Hz, asociados a deformaciones máximas globales del tablero de piso del orden de 5.00 mm. Esta idea parte surge del desarrollo de la investigación, en la cual se ha visto que algunas actividades rítmicas desarrolladas por los humanos pueden llegar a alcanzar frecuencias muy similares a 8.00 Hz, como el caso del tercer armónico para saltos sincronizados, situación que, de producirse, pudiera llegar a provocar una respuesta resonante de un tablero de piso.

Uno de los resultados más relevantes a los que se llegó fue al hecho de que de entre los dos tableros de control definidos, la zona de comensales sufriera más efectos adversos en los valores de aceleraciones pico que la misma pista de baile. Si bien esto tiene que ver con el límite de aceleración para un uso como restaurant, nos habla que la transmisión de vibraciones en sistemas de piso no puede tomarse a la ligera ya que la afectación para zonas de edificaciones sobre las que no se realizarán las actividades rítmicas puede llegar a ser crítica; en otras palabras, los resultados aquí mostrados nos deben obligar a revisar los entresijos como un todo y no simplificar el análisis estudiando únicamente a la zona en donde se llevarán a cabo los eventos multitudinarios.

La determinación de los resultados de aceleración en tableros aledaños no hubiera sido posible sin la construcción del modelo tridimensional con elementos tipo Shell por lo que, si no se tiene la experiencia

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

suficiente para prevenir este tipo de efectos adversos, el concentrar el análisis en el tablero que se someterá a vibración puede llevar a omisiones graves que pongan en riesgo el confort de todos los usuarios de este tipo de inmuebles y no sólo de aquellos que participan activamente en las actividades. Los modelos, entonces, se pueden convertir en herramientas valiosas que, de usarse correctamente, pueden reducir la posibilidad de subestimar la vibración en cualquier punto de un sistema de piso.

Algunas de las investigaciones recientes en el área de las vibraciones, se han enfocado en la obtención de nuevos enfoques y parámetros que permitan una caracterización más apegada a la realidad de la forma de moverse de los humanos, al realizar actividades rítmicas. Con las estimaciones realizadas vemos que, tanto con las 3 actividades definidas por Faisca y los 4 ritmos de baile investigados por Millán, se obtienen resultados menos conservadores que para algunas actividades de la DG11, por ejemplo, la relacionada con saltos, que para la normativa americana resulta en aceleraciones de entrepiso completamente fuera de los límites de aceleración perceptible.

La modelación de este tipo de funciones es relativamente simple y pueden ser programadas en cualquier lenguaje para después incluirlas en cualquier software de elemento finito que permita la definición de funciones dinámicas.

Dentro de las posibles líneas de investigación que pueden desprenderse a partir de este trabajo, están por mencionar algunas, continuar con la comparación de las metodologías aquí expuestas hasta encontrar la configuración estructural óptima que garantice el cumplimiento del estado límite por vibraciones para todos los casos de carga aquí definidos para el procedimiento tradicional con la DG11, así como para el modelo computacional. De ese modo, se puede confirmar la hipótesis en términos de la densidad de estructura, que se traduce directamente en el costo del sistema de piso.

Así mismo, se podría investigar el efecto de los dispositivos de disipación de vibraciones como por ejemplo los amortiguadores de masa sintonizados sobre la estructura que se propone en el caso de estudio y establecer, en función de los costos asociados la solución más económica para los tableros críticos ya sea con la instalación de este tipo de sistemas o bien, con la modificación de la configuración estructural.

De manera general, podemos concluir que la aplicación de la metodología de la DG11 para la evaluación de vibraciones rítmicas puede servir como una revisión preliminar para cualquier tablero de interés, de tal forma que se puedan identificar las propiedades generales de los elementos básicos de los tableros de interés. Sin embargo, específicamente para el caso de actividades rítmicas, es altamente recomendable basar el diseño final en los resultados obtenidos de una modelación tridimensional que, si bien involucra la inversión de tiempo para la construcción de un modelo refinado, una vez terminado, brinda al calculista la posibilidad de realizar análisis menos conservadores que pueden traducirse en sistemas de piso mucho más económicos, y más

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

importante aún, resultados que permiten la detección de aceleraciones globales del entrepiso, y no sólo en los tableros donde se efectuarán las actividades, las cuales pueden llegar a regir el diseño como fue el caso de esta investigación.

Específicamente, nos referimos a un modelo refinado al que se construye con elementos tipo Shell y sobre el cual se puede modelar de manera precisa, diferentes configuraciones estructurales según el proyecto y el tipo de eventos para el que fue diseñado; particularmente, es ideal que el software que se utilice permita la obtención de historias de aceleración en el tiempo para funciones dinámicas de manera simple, como el caso de ETABS, pero, como se desarrolló en el contenido del documento, no es una limitante ya que se puede proceder a obtener estos valores de aceleración pico a partir de las deformaciones y los valores de frecuencias naturales que, la mayoría de programas comerciales permiten.

En lo que respecta a lo que respecta al módulo de diseño como sección compuesta de ETABS, brinda resultados muy confiables en lo que concierne a la evaluación de los estados límites de servicio y de diseño por cargas gravitacionales así como en la estimación de las inercias compuestas y la frecuencia natural global de un sistema, siempre y cuando se interpreten de manera adecuada los datos obtenidos, sin embargo, este tipo de modelación no permite llegar a las conclusiones que sólo se logran con el modelo de losa con elementos membrana.



CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA

- Allen, D. E. (1990). Floor vibrations from aerobics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 17(5), 771-787.
<https://doi.org/10.1139/l90-090>
- Boam, J. D. (2007). *CRITICAL ANALYSIS OF THE LONDON MILLENNIUM FOOTBRIDGE*. 10.
- Borelli, G. A. (2015). *Borelli's On the Movement of Animals—On the Natural Motions Resulting from Gravity* (Vol. 38). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08536-4>
- Chung, L., Park, T., & Woo, S. S. (2016). Vertical Shaking Accident and Cause Investigation of 39-story Office Building. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 15(3), 619-625.
<https://doi.org/10.3130/jaabe.15.619>
- Ellis, B. R., & Ji, T. (1994). Floor vibrations induced by dance type loads—Verification. *Structural Engineer*, 72, 45-50.
- Faisca, R. G. (2013). *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Fernández, C. S. (2014a, enero 9). Colapsos estructurales históricos. Parte 3: Del año 1500 al 1831. *Construcción Patología Rehabilitación*. <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/01/colapsos-estructurales-historicos-parte-3-del-ano-1500-al-1831/>
- Fernández, C. S. (2014b, abril 22). Colapsos estructurales históricos. Parte 5: Año 1850. *Construcción Patología Rehabilitación*. <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/04/colapsos-estructurales-historicos-parte-5-ano-1850/>
- Flores, J., Novaro, O., & Seligman, T. H. (1987). Possible resonance effect in the distribution of earthquake damage in Mexico City. *Nature*, 326(6115), 783-785. <https://doi.org/10.1038/326783a0>
- Gaspar, C. M. R., Santos Da Silva, J. G., & Costa-Neves, L. F. (2016). Multimode vibration control of building steel–concrete composite floors submitted to human rhythmic activities. *Computers & Structures*, 165, 107-122. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.12.010>

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Klette, R., & Tee, G. (2008). Understanding Human Motion: A Historic Review. En B. Rosenhahn, R. Klette, & D. Metaxas (Eds.), *Human Motion* (Vol. 36, pp. 1-22). Springer Netherlands.

https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6693-1_1

Millán Yusti, D. C., Valenzuela, P., Universidad del Valle, Thomson, P., & Universidad del Valle. (2013).

Caracterización de cargas de baile en una plataforma experimental. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(23), 47-58. <https://doi.org/10.22395/rium.v12n23a4>

Murray, T., Ellen, D., & Ungar, E. (2003). *Design Guide 11 -Floor Vibrations due to Human Activity*. American Institute of Steel Construction. United States of America.

Reiher, H., & Meister, F. J. (1931). Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, 2(11), 381-386. <https://doi.org/10.1007/BF02578773>

Van Der Wijk, V., & Herder, J. L. (2012). The Work of Otto Fischer and the Historical Development of His Method of Principal Vectors for Mechanism and Machine Science. En T. Koetsier & M. Ceccarelli (Eds.), *Explorations in the History of Machines and Mechanisms* (Vol. 15, pp. 521-534). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4132-4_36