

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinador: MSc. Ing. Alexander Opazo Vega

Profesores Comisión: MSc. Ing Franco Benedetti Leonelli

MSc. Ing. Gilda Espinoza Valenzuela

**PROPUESTA SIMPLIFICADA PARA EL CÁLCULO DEL
DESEMPEÑO VIBRATORIO DE PISOS DE MADERA
EN VIVIENDAS SOCIALES**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de Ingeniero Civil

DIEGO JOAQUÍN GUÍÑEZ TRUJILLO

Concepción, Julio 2017

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial mi madre, por apoyarme durante toda mi vida.

A mis compañeros y amigos, por acompañarme durante mi formación académica.

A la Universidad del Bío-Bío, en especial al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, por generar el ambiente propicio para mi formación universitaria y la de tantos otros.

A mi profesor guía, Alexander Opazo Vega, por guiarme en este proceso y por su gran calidad humana y profesional.

NOMENCLATURA

NCh: Norma Chilena.

VDV: valor dosis de vibración, en $[\text{m/s}^{1.75}]$.

BS: British Standard.

MEF: método de los elementos finitos.

ISO: International Organization for Standardization.

W_b : función ponderadora de acuerdo a la norma BS 6472.

$VDV_{wb,día/noche}$: valor dosis de vibración de la jornada (día o noche), en $[\text{m/s}^{1.75}]$.

$rVDV_w$: valor de dosis de vibración representativo, en $[\text{m/s}^{1.75}]$.

$eVDV_w$: valor de dosis de vibración de la jornada completa, en $[\text{m/s}^{1.75}]$.

w : deflexión central del modelo, debido a una carga de 1[kN], en [mm].

f_1 : frecuencia fundamental, en [Hz].

C16 y C24: calidades mecánicas de la madera aserrada de pino Radiata.

f_p : frecuencia de paso, en [Hz].

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	3
1.1.- Justificación del Problema	3
1.2.- Alcances	3
1.3.- Objetivos	4
1.4.- Metodología de Trabajo	4
2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1.- Técnica de Modelación Numérica para el Análisis Dinámico de Pisos.....	5
2.2.- Técnica de Modelación de Cargas de Caminatas	6
2.3.- Criterios de Evaluación de la Serviciabilidad Dinámica de Pisos de Madera	7
2.3.1.- Evaluación de la Serviciabilidad de acuerdo a la aceleración vertical	7
2.3.2.- Evaluación de la Serviciabilidad de acuerdo a la Deflexión Central y Frecuencia Fundamental	10
3.- PISOS DE MADERA EN ESTUDIO	11
3.1.- Tipología Constructiva de los Pisos de Madera	11
3.2.- Estrategia de Modelación de Pisos de Madera.....	12
4.- METODOLOGÍA	15
4.1.- Validación de la Metodología de Modelación de Pisos.....	15
4.1.1.- Modelación de las Cargas Dinámicas de Caminatas estudiadas por Montenegro (2016)	16
4.1.2.- Análisis Tiempo-Historia Modal.....	18
4.1.3.- Cálculo de Valor de Dosis de Vibración VDV	21
4.1.4.- Comparación de Resultados Numéricos y Experimentales	22
4.2.- Análisis de los Modelos de Piso en Estudio	23
4.2.1.- Análisis Tiempo-Historia Modal Para Cargas Dinámicas de Caminatas Validadas	23
4.2.2.- Cálculo de Valor de Dosis de Vibración VDV Para Caminatas Validadas	23
4.2.3.- Evaluación Detallada del Desempeño Vibratorio en Jornada Día	24
4.2.4.- Formulación de Propuestas Simplificadas Para el Cálculo del Desempeño Vibratorio	25
5.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	25
5.1.- Historial de Aceleraciones	25
5.2.- Comparación de Resultados Numéricos y Experimentales, Etapa de Validación.....	27
5.3.- Resultados del Análisis de los Sistemas de Piso en Estudio.....	29
5.4.- Propuesta Simplificada para el Cálculo del Desempeño Vibratorio.....	32
6.- CONCLUSIONES	36
7.- REFERENCIAS.....	38

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cargas verticales para distintas frecuencias de paso.....	7
Figura 2. Funciones ponderadas W_b , W_g y W_d	8
Figura 3. Factor de incremento k para el límite de deflexión finlandés	10
Figura 4. Tipología típica de pisos de madera en Chile.	11
Figura 5. Modelo de piso de elementos finitos (a). Estrategia de modelación (b)	13
Figura 6. Procedimiento Validación de la metodología de Modelación de Pisos	15
Figura 7. Funciones normalizadas tiempo-historia de fuerza de pisada vs f_p	17
Figura 8. Estrategia de modelación de las fuerzas de pisadas	18
Figura 9. Puntos de medición en el envigado de piso.....	21
Figura 10. Procedimiento Análisis de los Sistemas de Piso en Estudio.	23
Figura 11. Acelerogramas del modelo #6, para 1.75 [Hz] y posición 1.	26
Figura 12. Acelerogramas del modelo #6, para 1.75 [Hz] y 76 [kg].	26
Figura 13. Indicadores VDV_{W_b} experimentales (a). Indicadores VDV_{W_b} numéricos para 1.75 [Hz] (b).....	28
Figura 14. Evaluación del desempeño vibratorio $eVDV_{W_b,día}$, según Norma BS 6472:2008.....	31
Figura 15. Gráfico w numérico vs $eVDV_{W_b,día}$ numérico.....	33
Figura 16. Gráfico w simplificado vs w numérico	35
Figura 17. Gráfico $eVDV_{W_b,día}$ simplificado vs $eVDV_{W_b,día}$ numérico.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rango del indicador VDV [$m/s^{1.75}$] para distintos desempeños vibratorios.....	9
Tabla 2. Descripción de Estructuras de Piso Tradicional de Madera.	12
Tabla 3. Propiedades Físico-Mecánicas de los Elementos de los modelos de piso.....	14
Tabla 4. Masa Corporal y Frecuencia de Paso para los Eventos de Caminata.....	16
Tabla 5. Parámetros utilizados en el Análisis Dinámico de los 32 Modelos en SAP2000..	20
Tabla 6. Comparación de w y f_1 , Numérico vs Experimental.....	27
Tabla 7. Comparación de $VDV_{W_b,día}$ promedio, Numérico vs Experimental.....	28
Tabla 8. Ratio de evaluación del desempeño vibratorio R1. (Elaboración propia).	30

PROPUESTA SIMPLIFICADA PARA EL CÁLCULO DEL DESEMPEÑO VIBRATORIO DE PISOS DE MADERA EN VIVIENDAS SOCIALES

Autor: Diego Guíñez Trujillo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: dguinezt@gmail.com

Profesor patrocinante: Alexander Opazo Vega

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: aopazove@ubibio.cl

RESUMEN

Durante los últimos años, la madera se ha consolidado como un material constructivo de uso residencial. Sin embargo, los pisos de madera pueden presentar problemas vibratorios debido al caminar de las personas, por lo que es necesario prever posibles problemas de servicio.

La normativa nacional no incorpora requerimientos de diseño para asegurar un buen comportamiento vibratorio, por lo que esta investigación tiene por objetivo proponer un criterio simplificado que compense este déficit. Para validar la metodología empleada se calibran los modelos numéricos con resultados experimentales de estudios previos. Para evaluar el desempeño vibratorio se utiliza el indicador VDV (valor dosis de vibración), de acuerdo a criterios de serviciabilidad propuestos por la norma internacional BS 6472.

En base a los resultados se propone un criterio simplificado, el cual consiste en calcular el desempeño vibratorio de los pisos de madera conociendo la deflexión central del piso debido a una carga puntual de 1[kN] (w). La metodología validada permite calcular el indicador de desempeño en pisos complejos, utilizando la modelación numérica. Mientras que la propuesta simplificada permite calcular el indicador de desempeño con un alto índice de fiabilidad en pisos típicos, sin realizar modelos numéricos ni mediciones experimentales.

Palabras claves: pisos de madera, desempeño vibratorio, propuesta simplificada.

8339 Palabras Texto + 24 Figuras/Tablas*250 + 1 Figura*500 = 14839 Palabras aprox.

SIMPLIFIED PROPOSAL FOR THE CALCULATION OF VIBRATION PERFORMANCE OF TIMBER FLOORS IN SOCIAL HOUSING

Author: Diego Guíñez Trujillo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

E-mail: dguinezt@gmail.com

Professor Sponsor: Alexander Opazo Vega

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

E-mail: aopazove@ubibio.cl

ABSTRACT

During the last years, the timber has been consolidated as a constructive material of residential use. However, timber floors may experience vibration problems by human walking, so it is necessary predict possible serviceability problems.

The national standard does not incorporate design requirements to ensure good vibrational behavior, so this purpose of this investigation to propose a simplified approach to compensate for this deficit. To validate the methodology used, the numerical models are calibrated using experimental data of previous studies. To evaluate vibratory performance, the VDV (vibration dose value) indicator is used, according to the serviceability criteria proposed in the international standard BS 6472.

On the basis of the results a simplified criterion is proposed, which is to calculate the vibration performance of the timber floors knowing the central vertical deflection of the floor under a point load of 1 [kN] (w). The validated methodology allows to calculate the performance indicator in complex floors, using numerical modeling. While the simplified proposal allows to calculate the performance indicator with a high reliability index in typical floors, without numerical models or experimental measurements.

Keywords: timber floors, vibration performance, simplified criterion.

1.- INTRODUCCIÓN

La madera es uno de los componentes estructurales más utilizados para la construcción de viviendas sociales en Chile. Esto se debe a sus múltiples beneficios, entre los que destacan su bajo costo, sustentabilidad, rapidez de montaje y la sensación de confort que ofrece. A pesar de su considerable uso existe poco estudio sobre su serviciabilidad, por lo que los pisos de madera que constituyen estas viviendas son susceptibles a presentar problemas vibratorios.

Las vibraciones de piso pueden ser producidas por fuentes externas, como la acción del tráfico vehicular y maquinaria pesada. Sin embargo, las vibraciones producidas por fuentes internas son las más frecuentes y problemáticas, entre las que destacan caminar, correr y saltar, (Hu et al, 2001). Las vibraciones inducidas por fuentes internas no suelen presentar problemas de carácter estructural, pero si afectan la percepción del nivel de servicio, debido a que los usuarios se encuentran en contacto directo con el piso. Esto puede provocar incomodidad y molestias que afectan la calidad de vida de las personas.

1.1.- Justificación del Problema

Actualmente en Chile no existe una normativa que regule el nivel de vibraciones en los pisos de madera. La norma NCh 1198 of. 2014 aborda esta problemática de manera indirecta, limitando las deflexiones verticales producidas por el peso propio y la sobrecarga de la estructura. La práctica indica que estos límites no son siempre suficientes, por lo que esta investigación tiene como objetivo principal proponer criterios que simplifiquen el cálculo del desempeño vibratorio en pisos de madera, para la tipología de construcción típica de viviendas sociales en Chile.

1.2.- Alcances

Esta investigación propone criterios para calcular el desempeño vibratorio de envigados de piso de madera, sometidos a caminatas de personas. Esto se lleva cabo modelando pisos y caminatas en el programa de análisis y diseño estructural SAP2000, con el fin de analizar resultados numéricos validados por mediciones experimentales. Para evaluar el desempeño vibratorio se utiliza el indicador VDV (valor dosis de vibración) y el criterio de serviciabilidad propuesto por la norma internacional BS 6472:2008. Con estos resultados de desempeño vibratorio se pretende calibrar una fórmula de diseño simplificada en base a cargas estáticas puntuales.

1.3.- Objetivos

A continuación, se indican los objetivos de esta investigación.

Objetivo General:

- Proponer un criterio simplificado para calcular el desempeño vibratorio de pisos de madera sometidos a caminatas de personas, mediante modelación numérica.

Objetivos específicos:

- Sintetizar el estado del arte en la evaluación del desempeño vibratorio de pisos de madera.
- Implementar y validar una rutina programática en el programa SAP2000, que permita analizar el comportamiento vibratorio.
- Aplicar la rutina programática a pisos de madera con propiedades y dimensiones de uso frecuente.
- Obtener y registrar las vibraciones verticales y las principales variables que influyen en el comportamiento vibratorio de los sistemas de piso.
- Evaluar el desempeño vibratorio mediante la norma internacional BS 6472:2008.
- Formular y proponer un criterio simplificado para calcular el desempeño vibratorio de pisos de madera.

1.4.- Metodología de Trabajo

A continuación, se indican las etapas realizadas para llevar a cabo esta investigación.

- Revisión bibliográfica: esta etapa consiste en estudiar las investigaciones que se han hecho referentes a técnicas de modelación de pisos de madera, así como también modelación de caminatas de personas y evaluación del desempeño vibratorio.
- Desarrollo: se desarrolla una técnica de modelación a los pisos de madera, con el fin de representar correctamente el desempeño vibratorio, teniendo como punto de referencia resultados experimentales para los mismos. Se aplica la técnica de modelación a un mayor número de pisos de madera, con el fin de obtener un análisis representativo.
- Análisis y Discusión: se obtienen los indicadores VDV y otras variables importantes en el comportamiento vibratorio de los pisos, para así evaluar su desempeño y proponer un criterio que simplifique el cálculo del desempeño vibratorio.
- Conclusiones: se realiza una síntesis del desempeño de los pisos en estudio. Se discute la propuesta de cálculo de desempeño vibratorio y la falta de regulación en Chile en términos de serviciabilidad de pisos de madera.

2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo resume la técnica de modelación numérica, la técnica de modelación de caminatas y los enfoques de valuación de pisos de madera para prevenir vibraciones molestas utilizadas en esta investigación.

2.1.- Técnica de Modelación Numérica para el Análisis Dinámico de Pisos

El modelo numérico empleado para el análisis dinámico de sistemas lineales corresponde al sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden definido por la Ecuación 1. Este modelo permite calcular variables como la aceleración vertical debido al caminar de personas.

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = r(t) \quad \text{Ec. (1)}$$

Las ecuaciones de equilibrio dinámico rigen el movimiento de un sistema lineal elástico y han sido formuladas a partir de la Segunda Ley de Newton, la cual indica que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa. Los parámetros físicos que conforman el modelo son la masa $[M]$, el amortiguamiento $[C]$ y la rigidez $[K]$, ambos definidos en términos matriciales, estas matrices son simétricas y positivas. Las variables de estado o magnitudes físicas que caracterizan el estado del sistema en equilibrio son la aceleración \ddot{u} , la velocidad \dot{u} y el desplazamiento u , definidas en vectores.

Las fuerzas del modelo numérico, definidas en términos matemáticos son las fuerzas de inercia $fI=[M]\ddot{u}$ que se oponen a las aceleraciones y son proporcionales a la masa del sistema. Las fuerzas de amortiguación $fD=[C]\dot{u}$, representan las fuerzas de fricción entre elementos del piso que disminuyen la energía del movimiento, las fuerzas de amortiguamiento del modelo son del tipo viscosos, proporcionales a la velocidad del movimiento. Las fuerzas elásticas $fS=[K]u$, surgen de la deformación de los materiales producto de las fuerzas externas, estas fuerzas son proporcionales a la rigidez del sistema. El vector de fuerza externa $r(t)$, corresponde a la fuerza excitadora y representa las cargas que inducen las personas al caminar.

Para resolver el sistema de ecuaciones de equilibrio dinámico, se utiliza el método de elementos finitos (MEF), el cual provee una solución numérica aproximada. El MEF consiste básicamente en representar el cuerpo o estructura (de condiciones de contorno y geométricas ya definidas), mediante subdominios y funciones de interpolación llamados elementos finitos (EF), unidos por

nodos en los que se definen las variables de estado ($\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ y $u(t)$), y grados de libertad que definen la deformada de la estructura. La exactitud de los resultados depende del refinamiento del modelo y del número de EF (Fish y Belytschko, 2007). Las matrices de masa $[M]$ y rigidez del sistema $[K]$, se definen a partir de un proceso de ensamblaje de las matrices de cada EF. Estas matrices incorporan las propiedades mecánicas y geométricas de los materiales como inercia, módulo de elasticidad, módulo de corte, coeficiente de Poisson, densidad, etc. La matriz de amortiguamiento no es posible definirla en términos de geometría o módulo de elasticidad, dada su complejidad. Sin embargo, se han desarrollado variados métodos, entre los cuales destaca el método de Rayleigh, el cual propone que la matriz de amortiguamiento es una combinación lineal de la matriz de rigidez y la de masa, es decir $[C]=a_0[M]+a_1[K]$.

Los EF más usados en la modelación de pisos de madera son las barras (Frame) de dos nodos, los EF cáscara (Shell) de cuatro nodos, los EF Sólido (Solid) de 8 nodos, los EF resortes (Link) de dos nodos y 6GDL que permiten condiciones de rigidez de las conexiones. Estas familias de elementos finitos se encuentran incorporadas en programas de cálculo y diseño estructural como SAP2000, el cual es utilizado para el desarrollo de esta investigación.

2.2.- Técnica de Modelación de Cargas de Caminatas

Las cargas dinámicas inducidas por el caminar humano dependen principalmente de la frecuencia de paso y del peso del caminante. Las fuerzas de pisadas poseen componentes horizontales y verticales, siendo esta última la de mayor relevancia para el estudio de diafragmas de piso (Sedlacek, et al., 2006). Debido a que la causa más común de vibraciones en los envigados de pisos es el caminar de los propios usuarios, es necesario modelar estas funciones en base a las características étnicas del grupo en estudio. Para modelar cargas de caminata, Sedlacek, et al. propone un método para obtener historiales de carga en base a polinomios de alta frecuencia deducidos de mediciones experimentales y discretizados para distintos intervalos de frecuencia, según la Ecuación 2.

$$F(t) = G * (K_1 * t + K_2 * t^2 + K_3 * t^3 + K_4 * t^4 + K_5 * t^5 + K_6 * t^6 + K_7 * t^7 + K_8 * t^8)$$

Ec. (2)

Donde:

$F(t)$: fuerza vertical de pisada para un tiempo t .

G : peso del caminante.

K_n : coeficientes dependientes de la frecuencia de caminata (f_p).

t : paso de tiempo.

La forma típica de historial de carga es la llamada “butterfly” (mariposa en español), ver Figura 1.

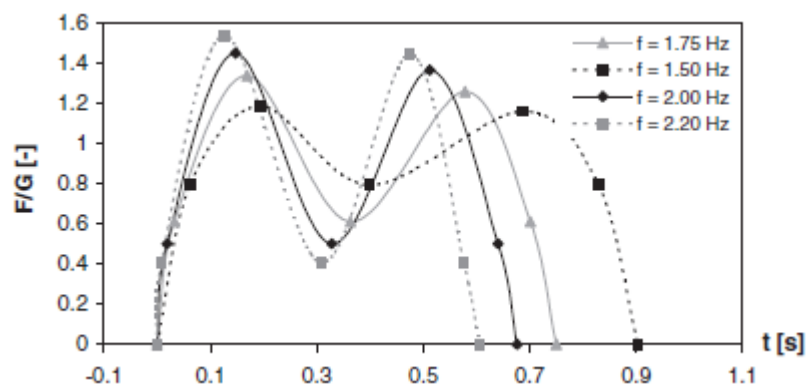


Figura 1. Cargas verticales para distintas frecuencias de paso. (Sedlacek, et al., 2006).

En la Figura 1 se aprecia que existen dos máximos en la amplitud de carga vertical de una pisada, el primero corresponde al contacto inicial del talón y el segundo al empuje del pie, además, los máximos aumentan a medida que crece la frecuencia de paso.

2.3.- Criterios de Evaluación de la Serviciabilidad Dinámica de Pisos de Madera

A continuación, se resumen criterios de evaluación de pisos de madera dependientes de la aceleración vertical, de la deflexión y de la frecuencia fundamental respectivamente, recomendados por distintas normas y códigos.

2.3.1.- Evaluación de la Serviciabilidad de acuerdo a la aceleración vertical

Según BS:2008, “Las vibraciones que se producen en los envigados de piso son detectadas por los usuarios y pueden afectar de muchas maneras su calidad de vida como su eficiencia en el trabajo. La primera señal evidente es cuando se generan comentarios negativos en cuanto a los envigados de piso”. Las normas BS 6472-1 e ISO 10137 contemplan el uso del indicador dosis de vibración, VDV (vibration dose value), para estimar la magnitud de las aceleraciones verticales producidas en un piso, además de permitir clasificar la percepción humana de las vibraciones en términos de probabilidad de comentarios adversos. Para ello, recomiendan el uso de funciones ponderadas de frecuencia (W_b , W_g y W_d), ver Figura 2.

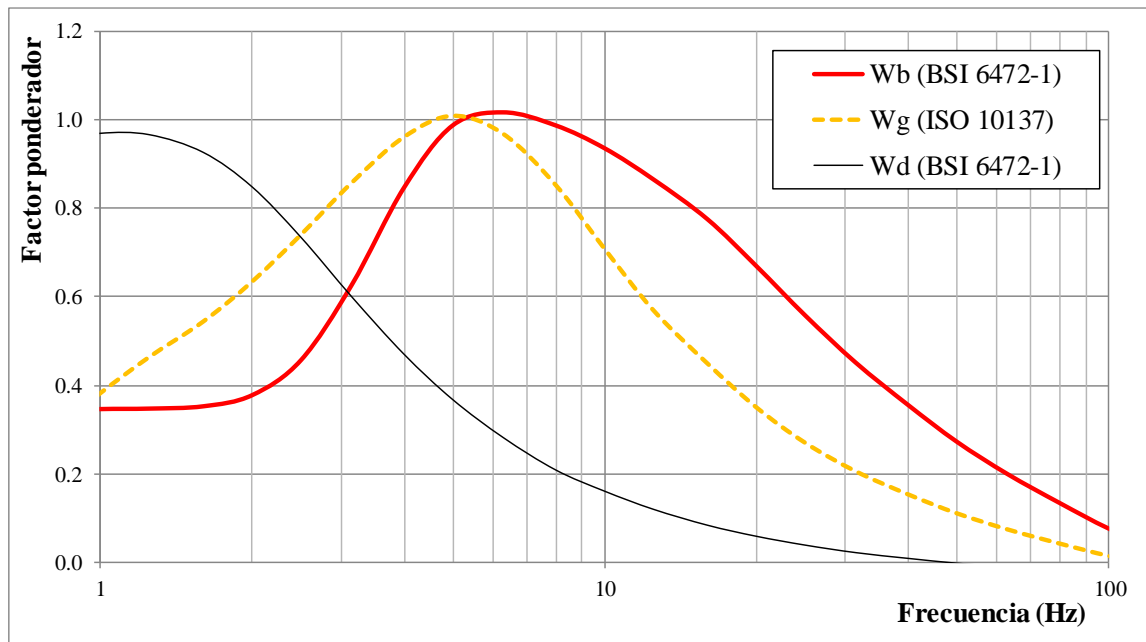


Figura 2. Funciones ponderadas W_b , W_g y W_d . (Elaboración propia).

Las funciones ponderadoras W_b y W_g representan el umbral de percepción de vibraciones de una población de personas en particular, ya sea expuestas de pie, sentadas o recostadas y se obtienen en condiciones de laboratorio (Griffin, 2008). La función W_g demuestra sensibilidad en un rango de frecuencia entre 3.15-8.0[Hz], esta función no tiene un origen claro, pero ha influido en estudios de incomodidad de vibraciones suficientemente grandes como para causar daños físicos. La función W_b representa mayor sensibilidad entre los 4.0-12.5[Hz], esta función fue definida para predecir la incomodidad de vibraciones verticales en conductores y provee mejores resultados que el ponderador W_g (Griffin, 2007), razón por la cual para esta investigación se utiliza esta función ponderada. En cambio, la función W_d es utilizada para evaluar las vibraciones en la dirección horizontal (BS 6472:2008) y es sensible en torno a una frecuencia de 1[Hz].

Según la norma BSI 6472-1, el indicador de desempeño vibratorio VDV produce una coherente relación entre los distintos tipos de vibraciones y las respuestas subjetivas de las personas. Este indicador de desempeño vibratorio se define según la Ecuación 3.

$$VDV_{w,día/noche} = \left(\int_0^T a(t)_w^4 dt \right)^{1/4} \quad Ec. (3)$$

Donde:

$VDV_{w,día/noche}$: valor dosis de vibración de la jornada (día o noche), en $[m/s^{1.75}]$.

$a(t)$: aceleración vertical medida en terrero y ponderada por una función de frecuencia, en $[m/s^2]$

T : duración de la vibración, en [s].

Para clasificar la percepción de los usuarios, la norma BSI 6472-1 categoriza el indicador VDV en los rangos indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango del indicador VDV [m/s^{1.75}] para distintos desempeños vibratorios. (BS 6472-1).

Ambiente	Baja probabilidad de comentarios adversos	Posibles comentarios adversos	Probables comentarios adversos
Exposición de 16 horas, jornada día.	0.2-0.4	0.4-0.8	0.8-1.6 (*)
Exposición de 8 horas, jornada noche.	0.1-0.2	0.2-0.4	0.4-0.8 (*)
(*) Un VDV mayor indica un desempeño claramente insatisfactorio.			

Para cada piso se debe obtener un solo valor de VDV que sea representativo de las caminatas realizadas en él (*rVDV*). Además, tal y como se indica en la Tabla 1, el indicador VDV se debe determinar a partir de una medición obtenida del tiempo total de exposición a vibraciones, ya sea jornada día o jornada noche (*eVDV*). De no ser posible tal medición, la norma BS 6472-1 define en las siguientes dos ecuaciones:

a) Cuando las condiciones de vibración son constantes o repetidas regularmente, es necesario contar con una muestra representativa de (*t*) segundos de duración de medición. De esta forma el indicador VDV de la exposición total se puede calcular con la Ecuación 4:

$$eVDV_{w,día/noche} = \left(\frac{t_{día,noche}}{t_t} \right)^{0.25} * rVDV_t \quad Ec. (4)$$

Donde:

t_{día/noche}: duración total del tiempo de exposición de la jornada (día o noche), en [s].

t_t: tiempo de duración de la medición representativa, en [s].

rVDV_t: valor del indicador VDV de la medición representativa, en [m/s^{1.75}]

(b) Cuando en un periodo de evaluación hay N periodos de distintas duraciones y magnitudes, el indicador de desempeño VDV se calcula a partir de la Ecuación 5:

$$eVDV_{w,día/noche} = \left(\sum_{n=1}^{n=N} VDV_n^4 \right)^{0.25} \quad Ec. (5)$$

Donde:

N : número de periodos de distintas magnitudes.

VDV_n : valor del indicador VDV del periodo “ n ”, en $[m/s^{1.75}]$.

2.3.2.- Evaluación de la Serviciabilidad de acuerdo a la Deflexión Central y Frecuencia Fundamental

Para evaluar la serviciabilidad de un piso de madera existen también métodos que limitan el desplazamiento vertical, los cuales se encuentran principalmente en Europa y pertenecen al Eurocódigo 5, además, cada país incorpora límites adicionales, siendo Finlandia el más exigente (Zhang, et al., 2013). Estos métodos se basan en calcular el desplazamiento vertical en el centro de una viga (w), producto de una carga puntual de 1 [kN]. El Anexo Finlandés define su límite de deflexión como $0.5k$ para luces menores a 6 [m], donde k es un coeficiente que depende de la luz de apoyo (ver Figura 3); mientras que para luces mayores a 6 [m], se exige que la deflexión no sea mayor a 0.5 [mm]. Además, se limita la frecuencia fundamental f_1 de la estructura, la cual debe ser mayor que 9 [Hz], ya que se ha estimado que las personas son sensibles a vibraciones de frecuencias en un rango entre 4-8 [Hz]. El límite de f_1 , asegura que la carga dinámica y sus armónicos no generen resonancia en el sistema de piso, dado que las personas caminan normalmente a una frecuencia de paso cercana a los 2 [Hz] (Hu et al, 2001).

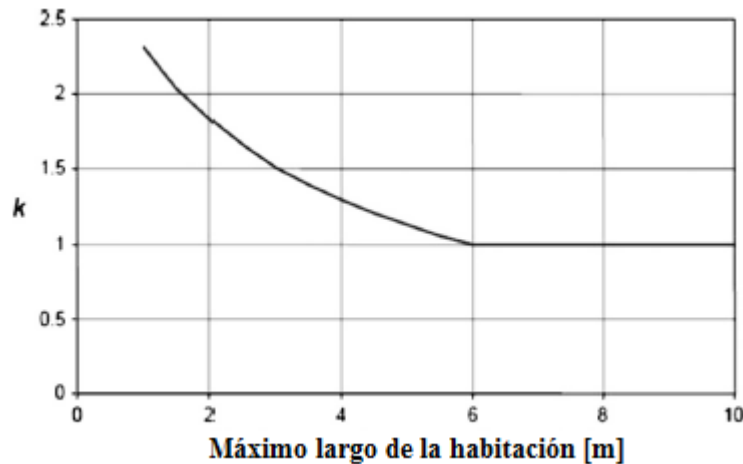


Figura 3. Factor de incremento k para el límite de deflexión finlandés. (Zhang, et al., 2013).

3.- PISOS DE MADERA EN ESTUDIO

En este capítulo se expone la tipología de los pisos en estudio y los modelos numéricos utilizados para la obtención de las vibraciones debido al caminar de personas.

3.1.- Tipología Constructiva de los Pisos de Madera

Los pisos en estudio se basan en configuraciones recomendadas por el Manual de Arauco (2012), llamados pisos tradicionales de madera. Esta tipología es la usada habitualmente en la construcción de viviendas sociales en Chile.

La Figura 4 muestra la tipología constructiva de los modelos de pisos. Su diseño consta de un entramado de vigas y cadenetitas de pino radiata, placas de terciado estructural y conectores metálicos del tipo clavo.

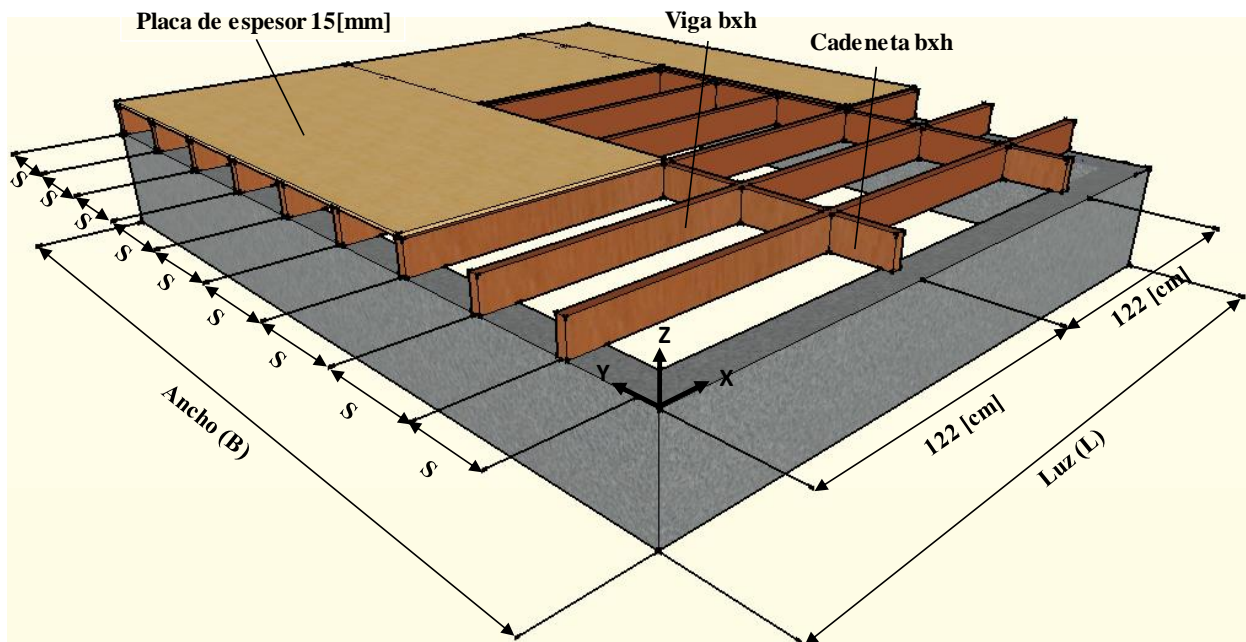


Figura 4. Tipología típica de pisos de madera en Chile. (Elaboración propia).

En la Tabla 2 se indican las propiedades y dimensiones de los modelos de pisos en estudio, incluyendo dimensiones del entramado, espaciamiento entre vigas, escuadrías y grado estructural de las piezas de madera.

Las configuraciones de pisos propuestas por el Manual de Arauco están sujetas a las siguientes condiciones de borde:

- Cargas de peso propio (PP) no mayores a 0,6 [kN/m²].
- Sobrecargas de uso (SC) no superiores a 2 [kN/m²].
- Deformación máxima limitada por la razón Luz/300 para una combinación de cargas PP y SC.
- Deformación máxima limitada por la razón Luz/360 para la acción de SC.

Los pisos a analizar se basan en 8 diseños propuestos por el Manual de Arauco. Resultados experimentales obtenidos por Montenegro (2016) indican que las luces de piso recomendadas no aseguran una adecuada respuesta vibratoria, por lo que se propone realizar reducciones de luces al caso original de un 90%, 80% y 70%. Con lo que se obtiene un total de 32 modelos de pisos.

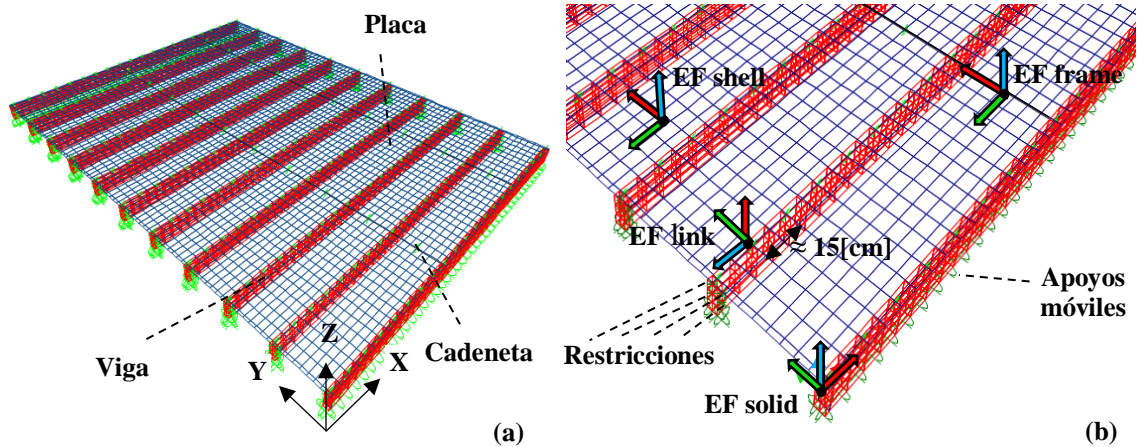
Tabla 2. Descripción de Estructuras de Piso Tradicional de Madera. (Elaboración propia).

Descripción	Escuadría (*)	Grado (*)	Separación [cm]	Ancho [cm]	Luz [cm]			
					(1)-277	(2)-249	(3)-221	(4)-193
2x6-C16-41	2x6"	C16	41	410	(5)-307	(6)-276	(7)-246	(8)-215
2x6-C24-41	2x6"	C24	41	410	(9)-372	(10)-335	(11)-299	(12)-260
2x8-C16-41	2x8"	C16	41	410	(13)-411	(14)-370	(15)-329	(16)-288
2x8-C24-41	2x8"	C24	41	410	(17)-305	(18)-275	(19)-244	(20)-214
2x6-C16-31	2x6"	C16	31	310	(21)-337	(22)-303	(23)-270	(24)-236
2x6-C24-31	2x6"	C24	31	496	(25)-408	(26)-367	(27)-326	(28)-286
2x8-C16-31	2x8"	C16	31	496	(29)-443	(30)-399	(31)-354	(32)-310
2x8-C24-31	2x8"	C24	31	496				

(*) **Escuadría de viga:** 2x6''= 41x138[mmxmm] y 2x8''=41x185[mmxmm].
 (*) **Grado de madera:** C16=7900[MPa] y C24=10200[MPa].
Espesor de terciado (t): t=15[mm].

3.2.- Estrategia de Modelación de Pisos de Madera

Para esta investigación se emplearon 32 modelos numéricos; dentro de los cuales #5, #6, #7 y #8 corresponden a la tipología de los pisos estudiados experimentalmente por Montenegro (2016). Los modelos fueron desarrollados en el programa de cálculo estructural SAP2000 v16, con el fin de simular las caminatas de las personas y la respuesta estructural de los pisos. La Figura 5(a) muestra la vista 3D de un modelo de piso en base al método de los elementos finitos (MEF). Mientras que la figura 5(b) muestra un detalle de la estrategia de modelación usada.



**Figura 5. Modelo de piso de elementos finitos (a). Estrategia de modelación (b).
(Elaboración propia).**

La estrategia de modelación de pisos de madera se basa en las recomendaciones de Glisovic y Stevanovic (2010), que a su vez fueron las utilizadas por Peña (2016). La placa de revestimiento de los modelos de piso se une de manera semirrígida a las vigas y cadenetas, con el fin de simular la acción compuesta entre estos elementos. El nivel de acción compuesta en las uniones placa-viga y placa-cadeneta está dado por la rigidez de los conectores. El comportamiento del revestimiento está condicionado fundamentalmente por las propiedades físico-mecánicas en los ejes de su plano principal (paralelo y perpendicular a las vigas), por lo que es modelada como un material ortotrópico y un EF de 4 nudos (Shell thin).

Los conectores corresponden a clavos modelados como EF de 2 nudos (Link), encargados de conectar la placa con las vigas y cadenetas. Poseen rigidez al corte y la rotación. Además, se asume que la relación de carga y deformación es del tipo lineal, dado que las deformaciones son pequeñas y afectan solo la serviciabilidad de la estructura. Los módulos de corrimiento de clavos están basados en recomendaciones de Filiatrault y Foschi (1990) y en valores utilizados por Fuentealba (2014) y Peña (2016).

La Tabla 3 resume las propiedades físico-mecánicas de los materiales que componen un piso tradicional de madera. Las direcciones de las propiedades mecánicas corresponden a las señaladas en los vectores de la figura 5(b) (Ejes locales: Rojo=1, Verde=2 y Celeste=3).

Tabla 3. Propiedades Físico-Mecánicas de los Elementos de los modelos de piso. (Elaboración propia).

Elemento		Vigas		Placa	Conector
Material		Pino Radiata		Terciado	Clavos
Propiedades	Dirección y Unidad	C16	C24	t = 15 [mm]	-
Módulo de Elasticidad	MOE ₁ [Mpa]	7900	10200	6300	-
Módulo de Elasticidad	MOE ₂ [Mpa]	7900	10200	1800	-
Módulo de Elasticidad	MOE ₃ [Mpa]	7900	10200	441	-
Densidad	ρ [kg/m ³]	476	476	537	-
Coefficiente de Poisson	ν_{12}	0.35	0.35	0.42	-
Coefficiente de Poisson	ν_{13}	0.35	0.35	0.47	-
Coefficiente de Poisson	ν_{23}	0.35	0.35	0.37	-
Módulo de Corte	G ₁₂ [Mpa]	2926	3778	378	-
Módulo de Corte	G ₁₂ [Mpa]	2926	3778	113	-
Módulo de Corte	G ₂₃ [Mpa]	2926	3778	473	-
Rigidez axial	k ₁ [N/mm]	-	-	-	441xE10
Rigidez corte	k ₂ =k ₃ [N/mm]	-	-	-	441
Rigidez giro	kr ₂ =kr ₃ [Nxm]	-	-	-	60

Las vigas están modeladas como EF de 8 nudos (Solid), con el fin de incluir efectos 3D. Están distribuidas paralelas al eje X como se muestra en la figura 5(a), con una separación y luz de apoyo correspondiente a las indicadas en la Tabla 2.

Las cadenas son modeladas como EF de 2 nudos (Frame), con liberaciones de M3 y M2 en sus extremos; debido a que, a diferencia de las vigas, las cadenas no son elementos continuos en todo el largo del piso que aporten gran rigidez a la estructura, sino más bien una serie de elementos cortos cuya principal función es evitar la deformación lateral de las vigas. Están orientadas perpendicular al eje X, cada 120 [cm] aproximadamente.

Las condiciones de restricción de los modelos consisten en el uso de apoyos móviles a lo largo de los 4 bordes externos de los modelos. Además, las vigas poseen restricciones de desplazamiento lateral y vertical en ambos extremos, simulando el uso de apoyos del tipo taco de madera.

La discretización de vigas, cadenas y placas del modelo permite el ensamble de todos los elementos finitos utilizados. La discretización de las vigas posee elementos de dimensiones aproximadas 20,5x7,5x61,3 [mm] y 20,5x7,5x46 [mm] (Ancho x Largo x Alto), dependiendo de la escuadría. Las cadenas están discretizadas en dos elementos de 205 [mm] o 155 [mm], según la separación entre vigas. Los elementos finitos de revestimiento poseen dimensiones de 75x75

[mm] aproximadamente. Cada elemento de clavo tiene un largo de 7,5 [mm] y se encuentran dispuestos cada 15[cm] aproximadamente, en vigas y cadenas.

4.- METODOLOGÍA

En este capítulo se explica el procedimiento llevado a cabo en esta investigación, el cual se divide en dos etapas: Validación de la Metodología de Modelación de Pisos y Análisis de los Sistemas de Piso en Estudio. A continuación, se detallan ambas etapas.

4.1.- Validación de la Metodología de Modelación de Pisos

La primera etapa tiene como objetivo comparar los resultados obtenidos experimentalmente por Montenegro (2016) con los resultados a obtener numéricamente, con el fin de validar la modelación propuesta. La Figura 6 muestra las sub-etapas de la Validación:

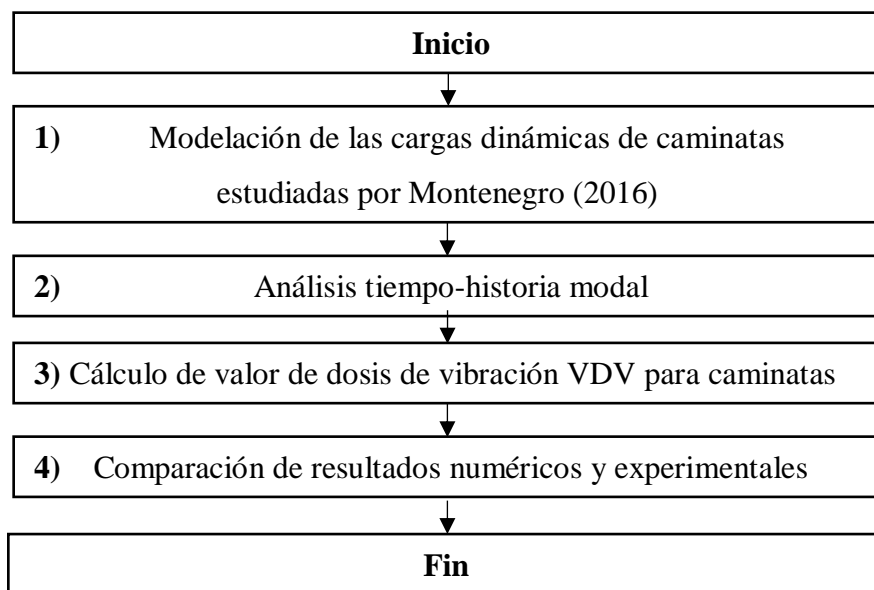


Figura 6. Procedimiento Validación de la metodología de Modelación de Pisos. (Elaboración propia).

A continuación, se detallan las sub-etapas correspondientes a la Figura 6.

4.1.1.- Modelación de las Cargas Dinámicas de Caminatas estudiadas por Montenegro (2016)

Para calcular los indicadores de desempeño VDV, es necesario obtener el registro de aceleraciones verticales producto de eventos de caminata cotidianos. Los eventos de caminata se definen en función del peso y la frecuencia de paso del caminante. Montenegro (2016) escogió en su estudio 4 pesos (56kg, 66kg, 76kg y 86 kg) y 3 frecuencias (1.4 Hz, 1.8 Hz y 2.2 Hz), correspondientes a valores representativos del grupo étnico existente en Chile, además, de acuerdo a Sepúlveda (2012) y Ríos (2013), la frecuencia de pasos promedio es 1.8[Hz] con una desviación estándar de 0.2[Hz] aproximadamente.

Para la etapa de Validación, se utilizan 12 eventos de caminatas, ver Tabla 4. Estos eventos de caminatas fueron basados en los valores escogidos por Montenegro (2016) y al método para obtener historiales de carga de pisadas propuestos por Sedlacek, et al., (2006).

Tabla 4. Masa Corporal y Frecuencia de Paso para los Eventos de Caminata. (Elaboración propia).

Peso del caminante [kg]	Frecuencia de paso f_p [Hz]		
	1.5	1.75	2.2
56	#1	#2	#3
66	#4	#5	#6
76	#7	#8	#9
86	#10	#11	#12

Para la modelación de las cargas dinámicas de caminatas en SAP2000 es necesario introducir un perfil de cargas para cada evento indicado en la Tabla 4, estos perfiles representan la fuerza de pisada de cada individuo en función de su frecuencia de paso. Para representar estos perfiles de carga se utilizaron funciones de polinomios de alto orden (Ec. (2)), con factores deducidos de las curvas experimentales de Sedlacek, et al., (2006), ver Anexo A La Figura 8 muestra las funciones de fuerza de pisadas utilizadas en la etapa de Validación. Estas funciones se encuentran discretizadas en intervalos de 0.001 [s] y están normalizadas en función del peso del caminante.

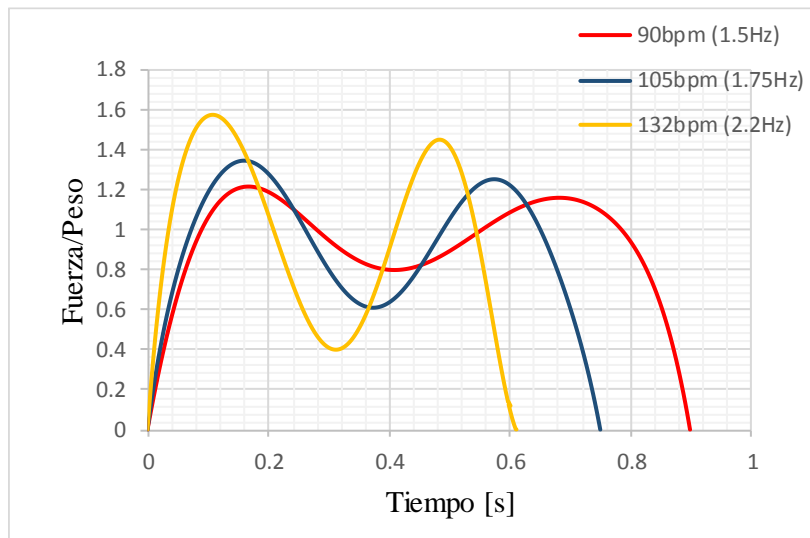


Figura 7. Funciones normalizadas tiempo-historia de fuerza de pisada. (Elaboración propia)

Para la modelación de las cargas dinámicas de caminatas en SAP2000 es necesario definir cargas puntuales P_i , en la dirección Z y a lo largo del eje Y, las cuales representan las pisadas de los caminantes. Estas cargas fueron aplicadas en nodos específicos cada 70 [cm], simulando una distancia de zancada promedio y en un tiempo t_i determinado en función de la frecuencia de paso. El recorrido de las caminas es de ida y vuelta a lo largo del eje Y y en el centro de la luz de las vigas (centro del eje X), debido a que esta condición es la más desfavorable al obtener un mayor número de pisadas y encontrarse perpendicular a la orientación de las vigas. Ver Figura 9.

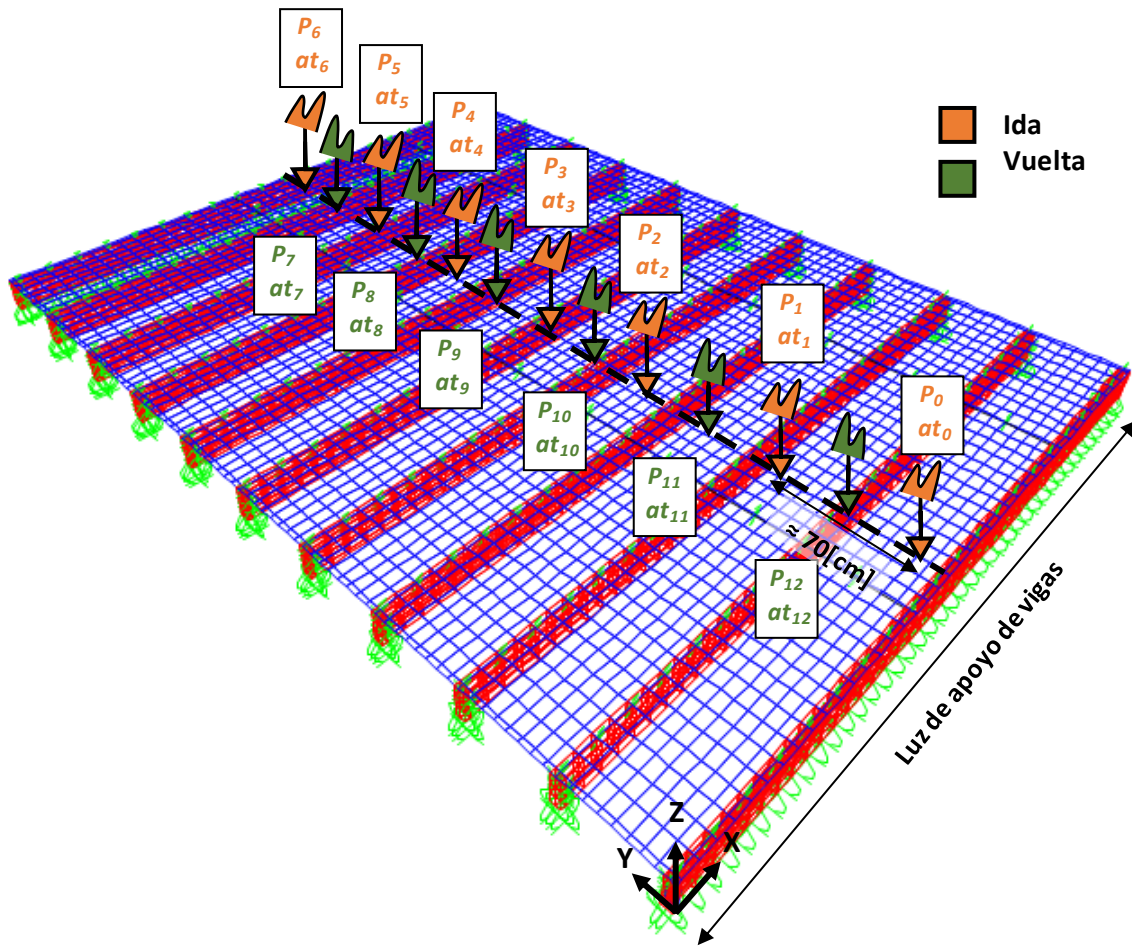


Figura 8. Estrategia de modelación de las fuerzas de pisadas. (Elaboración propia).

En el Anexo B se indican los valores de entrada para modelar las cargas de caminata en el programa SAP2000.

4.1.2.- Análisis Tiempo-Historia Modal

El programa SAP2000 utiliza el análisis modal para definir las propiedades modales de una estructura. Estas propiedades son utilizadas a su vez para entender su comportamiento estructural. También es utilizado como base para el análisis tiempo-historia modal, el cual obtiene las aceleraciones verticales $a(t) = \ddot{u}(t)$ mediante la Ecuación 6.

$$\ddot{u}(t) = \Phi \ddot{q}(t) = \sum_{n=1}^{n=N} \Phi_n \ddot{q}(t)_n \tag{Ec. (6)}$$

Los modos de vibrar son representados por los autovalores Φ_n , un modelo tiene tantos modos de vibrar como el número de grados de libertad que posea, lo cual define la forma que adquiere el modelo en condiciones de vibración libre. En otras palabras, una señal de vibración de un modelo de N grados de libertad se puede aproximar a la suma de las amplitudes modales definidas por las funciones $\ddot{q}(t)_n$.

Las funciones $\ddot{q}(t)_n$ determinan las amplitudes modales y se obtienen resolviendo las ecuaciones de equilibrio modal indicadas en la Ecuación 7.

$$\ddot{q}(t)_n + 2\xi_n\omega_n\dot{q}(t)_n + \omega_n^2q(t)_n = R(t) \quad Ec. (7)$$

Estas ecuaciones independientes se obtienen de un proceso de transformación de las ecuaciones de equilibrio dinámico, ver Ecuación 1. Donde las variables principales son las frecuencias naturales ω_n y las razones de amortiguamiento modal ξ_n .

Las propiedades modales ϕ_n y ω_n dependen de la masa M y rigidez K , que se encuentran en función de las rigideces y masas de las familias de elementos finitos utilizados.

Las razones de amortiguamiento ξ_n representan la tasa de decaimiento de la respuesta vibratoria en el tiempo. Los valores de ξ_n para pisos de madera están en un rango típico entre 1.5-4% (ISO 10137:2007).

Para resolver las ecuaciones de equilibrio modal, el programa SAP2000 utiliza un método numérico de pasos de tiempo basado en la interpolación de la excitación modal (t). Cada ecuación de equilibrio modal se resuelve en un intervalo de tiempo incremental pequeño Δt . Según Wilson (2000), el método de solución utilizado por SAP2000, es un método económico y exacto para resolver la ecuación de equilibrio modal en programas computacionales.

En la Tabla 5 se indican los parámetros utilizados en los análisis tiempo-historia modal de los 32 modelos en el programa SAP2000.

Tabla 5. Parámetros utilizados en el Análisis Dinámico de los 32 Modelos en SAP2000. (Elaboración propia).

Parámetro	Valor
Tipo de análisis	Lineal
Tipo de movimiento tiempo-historia	Transitorio
Tipo de solución	Modal
Condiciones iniciales	Reposo
Usar modos del caso de carga modal	Ritz
Número de modos de vibrar	50
Intervalo de tiempo	0.001 segundos
Número de pasos de tiempo de salida	12000
Tiempo total de análisis	12 segundos
Amortiguamiento modal	3%
Masa del sistema	PP

A continuación, se detallan los supuestos considerados en cada parámetro:

- Tipo de análisis: se asume que las deformaciones producto de las caminatas son pequeñas, por lo que los materiales de los modelos de piso se mantienen en su rango elástico.
- Tipo de movimiento tiempo-historia: se considera la ocurrencia de cada carga de pisada como un evento único en el tiempo.
- Tipo de solución: se elige la solución modal debido a que es el método más práctico y en el que se logran resultados precisos y en más corto tiempo que otros tipos de análisis, como el método de integración directa, Peña (2016).
- Condiciones iniciales: las caminatas parten desde una condición de vibración nula, es decir, de reposo.
- Uso de modos de carga modal: se considera el uso del vector Ritz según recomendaciones para análisis tiempo-historia mediante superposición modal de Wilson et al., (1982) y CSI (2013).
- Número de modos de vibrar: el uso de 50 modos de vibrar asegura un porcentaje de masa equivalente vertical mayor al 90%.
- Intervalo de tiempo: se considera un paso de tiempo de 0.001 menor al recomendado por SAP2000, el cual corresponde al cociente entre el periodo fundamental T_n y π (π).
- Número de pasos de tiempo de salida: corresponde al múltiplo del intervalo de tiempo y el tiempo total de análisis.

- Tiempo total de análisis: se considera que el estado de vibración de los pisos de madera no supera los 12 segundos, al igual que las mediciones experimentales de Montenegro (2016).
- Amortiguamiento modal: se considera una razón de amortiguamiento de 3%, la cual corresponde a un valor dentro del rango recomendado 1.5% a 5%, (ISO 10137).
- Masa del sistema: se utiliza el total del peso propio, con el fin de comparar los resultados numéricos con los obtenidos por Montenegro (2016), cuyos modelos experimentales no consideraban sobrecarga.

4.1.3.- Cálculo de Valor de Dosis de Vibración VDV

En esta sub-etapa se obtienen los registros de aceleraciones para cada modelo de piso, los cuales son almacenados en formato Excel. Estos acelerogramas se obtienen de 5 puntos representativos del modelo, los que corresponden al centro y a 1/4 y 3/4 de la mayor dimensión del piso para cada dirección, como se muestra en la Figura 11.

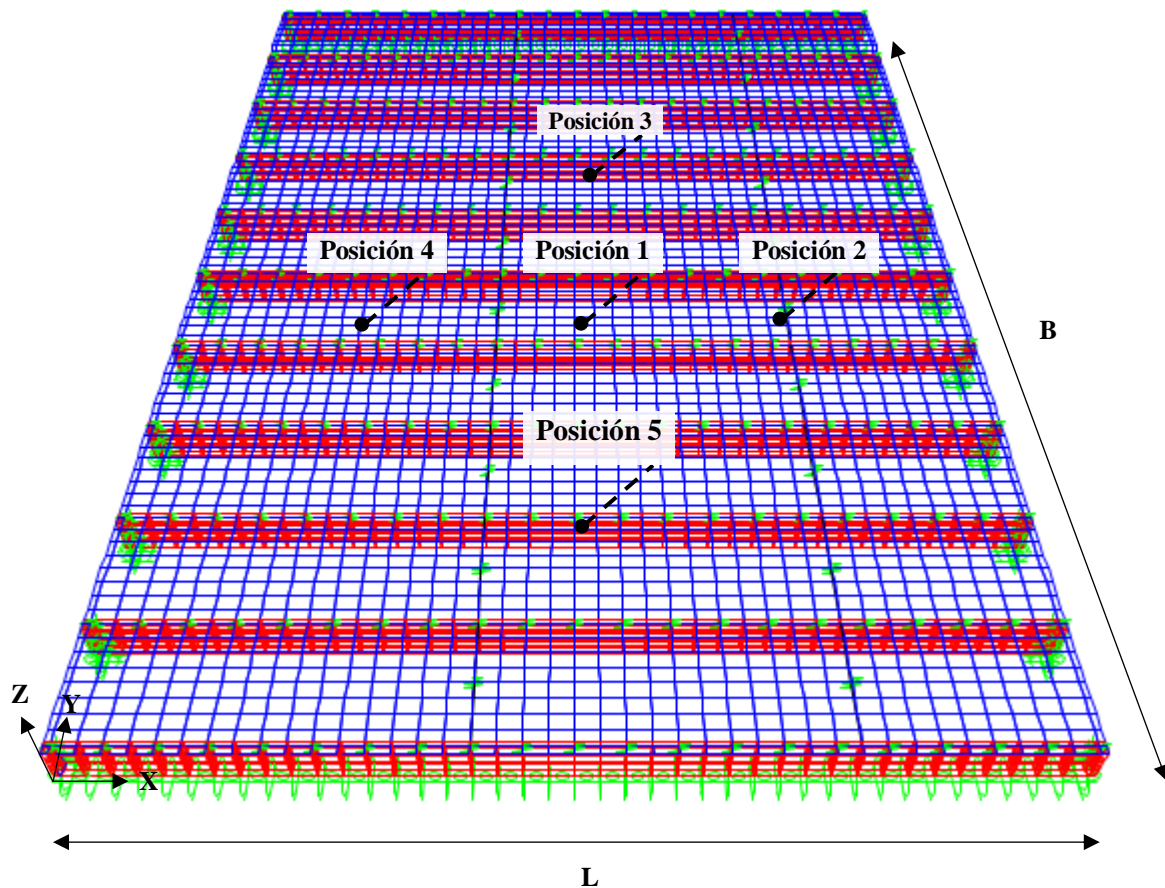


Figura 9. Puntos de medición en el envigado de piso. (Elaboración propia).

Para cada frecuencia de paso se obtienen 20 acelerogramas (4 pesos x 5 puntos de medición). Estos registros se almacenan en archivos de formato Excel, para posteriormente ser procesados en un programa MATLAB (ver Anexo C) y ponderados en frecuencia por la función W_b (ver Figura 1).

El procesamiento de los registros de aceleraciones consiste en transformar las señales de aceleración del dominio del tiempo $a_{n(t)}$ al dominio de la frecuencia $a_{n(f)}$, lo cual se realiza mediante la transformada de Fourier. Posteriormente, las aceleraciones $a_{n,W_b(f)}$ se transforman al dominio del tiempo con la transformada inversa de Fourier, con lo se obtiene la aceleración ponderada $a_{n,W_b(t)}$.

Los indicadores de desempeño para cada evento $VDV_{n,b}$ se calculan utilizando la Ecuación 8:

$$VDV_{n,W_b} = \left(\frac{1}{f} \sum_{i=1}^{k=12000} a_{i,W_b}^4 \right)^{1/4} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

- VDV_{n,W_b} : corresponde al valor de dosis de vibración de una jornada, del n-ésimo evento, ponderado por la función W_b , expresado en $[\text{m/s}^{1.75}]$.
- f : frecuencia de muestreo, de valor 1000.
- a_{i,W_b} : valor de aceleración ponderada por la función W_b , del i-ésimo tiempo, en unidades $[\text{m/s}^2]$.

4.1.4.- Comparación de Resultados Numéricos y Experimentales

Esta sub-etapa corresponde únicamente a Validación de la Metodología de Modelación de Pisos.

Luego de analizar los modelos numéricos de los pisos de Montenegro (2016), se registran para los 4 modelos la deflexión vertical w producida por una carga puntual de 1 [kN] (según el criterio de deflexión vertical propuesto por EN 1995-1-1), la frecuencia fundamental de cada modelo y los valores de los indicadores de desempeño VDV. Esto, con el fin de comparar los resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente por Montenegro (2016) e identificar los eventos de caminata que se ajustan de mejor manera con los valores experimentales, los cuales se indican en el ítem 5.2.

4.2.- Análisis de los Modelos de Piso en Estudio

En la segunda etapa de la metodología se realiza el análisis de los 32 modelos de piso en estudio con la metodología previamente validada. La Figura 10 indica las sub-etapas correspondientes a la etapa de Análisis de los Sistemas de Piso en Estudio.

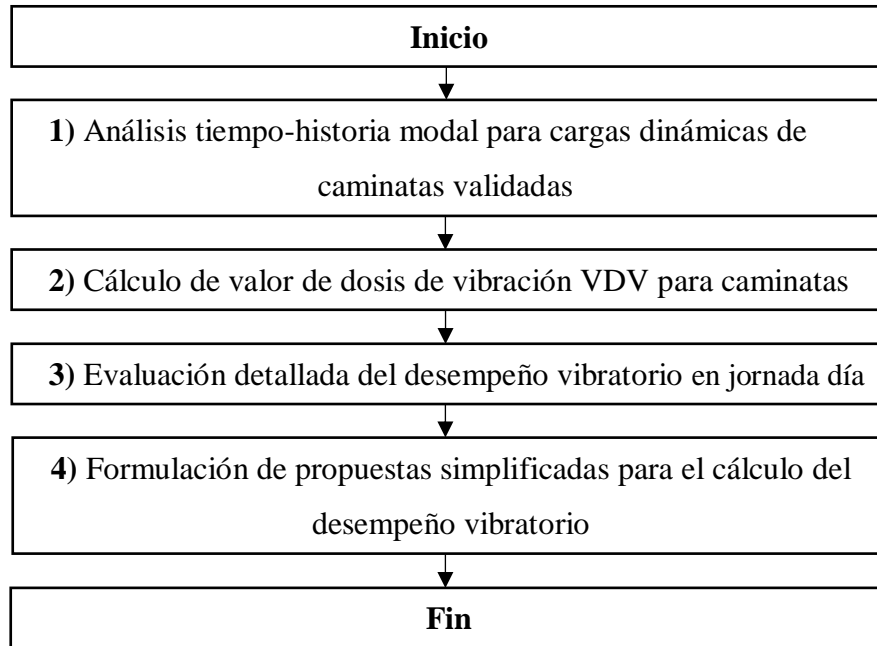


Figura 10. Procedimiento Análisis de los Sistemas de Piso en Estudio. (Elaboración propia).

A continuación, se detallan las sub-etapas correspondientes a la Figura 10.

4.2.1.- Análisis Tiempo-Historia Modal Para Cargas Dinámicas de Caminatas Validadas

Se ingresan a los modelos numéricos las cargas dinámicas de caminatas que fueron validadas en la etapa Validación de la Metodología de Modelación (ver resultados en ítem 5.2) y luego se realiza el análisis tiempo-historia para simular la respuesta estructural, el cual corresponde al mismo que es utilizado en la etapa de Validación (ver ítem 4.1.2).

4.2.2.- Cálculo de Valor de Dosis de Vibración VDV Para Caminatas Validadas

Para obtener los indicadores de desempeño VDV de cada modelo, se sigue el mismo procedimiento desarrollado en la etapa de Validación (ítem 4.1.3), con la diferencia de que solo se obtienen indicadores para las cargas dinámicas de caminatas validadas.

4.2.3.- Evaluación Detallada del Desempeño Vibratorio en Jornada Día

Para clasificar el desempeño vibratorio la norma BS 6472-1:2008 define rangos de valores para el indicador VDV (ver Tabla 1), con el fin de asignar una probabilidad de ocurrencia de comentarios adversos. Sin embargo, cada piso debe poseer un valor representativo de VDV ($rVDV$). Para lo cual se propone calcular este indicador como el percentil 80 (P_{80}), en otras palabras, el valor de VDV por debajo del cual se encuentra el 80% de los demás valores.

Los criterios indicados en la Tabla 1 se encuentran definidos para jornadas de exposición día y noche, para lo cual es necesario obtener el valor $eVDV$ calculado a partir de la Ecuación 9:

$$eVDV_{Wb,día/noche} = \left(\frac{t_{jorn}}{t} \right)^{0.25} \cdot rVDV \quad Ec. (9)$$

Donde:

- $eVDV_{Wb,día/noche}$: valor correspondiente a la jornada total de exposición a vibraciones, expresado en $[m/s^{1.75}]$.
- t_{jorn} : duración de la jornada, 16 [hrs] para día y 8 [hrs] para noche.
- t : duración de la caminata.
- $rVDV$: valor de dosis de vibración representativo.

El término $\frac{t_{jorn}}{t}$ indica el número de veces que se repite la caminata en la jornada completa de exposición. En un escenario tranquilo, como lo es un ambiente residencial, se puede estimar que la caminata se repite cada 30 [mín] (Ellis, 2001), resultando 32 pasadas en 16 [hrs] de jornada día. Por lo que el valor $eVDV_{b,día}$ corresponde a 2.38 $rVDV$.

Finalmente, para evaluar el desempeño vibratorio se define el siguiente ratio, donde un valor menor a 1 indica que el diseño cumple con la normativa exigida:

- Ratio 1: definido como $eVDV_{Wb,día}$ dividido por el límite de alta probabilidad de reclamos para la jornada día según BS 6472-1:2008:

$$R1 = \frac{eVDV_{Wb,día}}{1.6} \quad Ec. (10)$$

4.2.4.- Formulación de Propuestas Simplificadas Para el Cálculo del Desempeño Vibratorio

En esta sub-etapa se explica el procedimiento usado para formular propuestas simplificadas de cálculo del desempeño vibratorio, según los resultados obtenidos de los 32 modelos de pisos. Las propuestas tienen como finalidad simplificar el cálculo del indicador de desempeño $eVDV_{wb,día}$.

Según el estudio experimental de Montenegro (2016), es posible encontrar una relación lineal entre $eVDV_{wb,día}$ y la deflexión central para una carga unitaria de 1[kN] (w). Por tanto, se intenta encontrar una ecuación simplificada que incorpore la variable w .

Montenegro (2016) encontró esta relación con 8 pares de datos, obteniendo un coeficiente de correlación de 88,5%. En este estudio se intenta encontrar esta relación con un número mayor de casos de estudio (32). Finalmente, encontrando esta relación se pretende buscar formas más simplificadas para calcular el indicador de desempeño $eVDV_{wb,día}$, que no impliquen la necesidad de realizar modelos numéricos sofisticados, ni mediciones experimentales.

5.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos del análisis de los modelos de pisos, se evalúa el desempeño vibratorio y se propone un criterio que simplifique el procedimiento numérico llevado a cabo durante la investigación.

5.1.- Historial de Aceleraciones

Mediante al análisis tiempo-historia modal de cada modelo de piso, fue posible obtener los acelerogramas correspondientes a cada evento de caminatas. Los acelerogramas corresponden a 5 ubicaciones en el modelo de piso y 4 pesos de caminantes, con lo que se obtiene un total de 20 registros de aceleraciones para cada frecuencia de paso. La Figura 12 muestra los acelerogramas del modelo de piso #6, correspondientes al centro del modelo (posición 1), una frecuencia de 1.75 [Hz] y pesos de 56 [kg], 66 [kg], 76 [kg] y 86 [kg] respectivamente. Mientras que en la Figura 13 se observa los acelerogramas del modelo #6, para la frecuencia de paso 1.75, un peso de 76 [kg] y ubicados en los 4 puntos de medición restantes (ver ubicaciones en Figura 11).

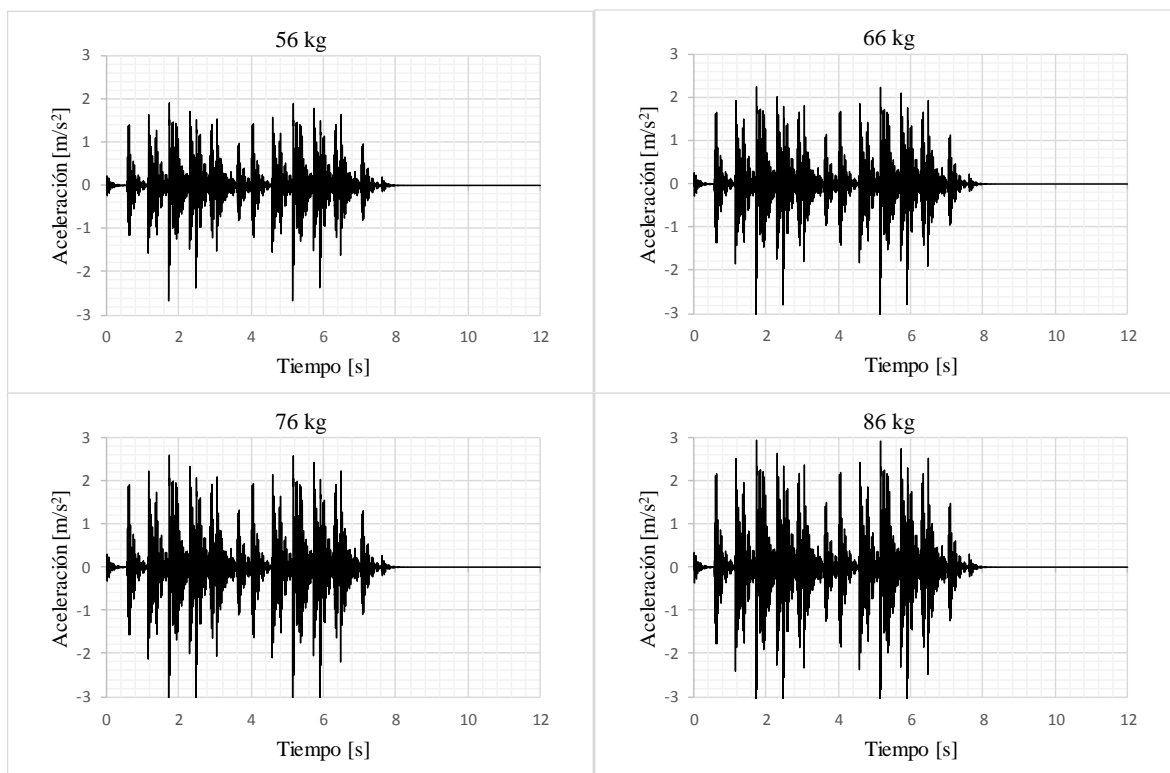


Figura 11. Acelerogramas del modelo #6, para 1.75 [Hz] y posición 1. (Elaboración propia).

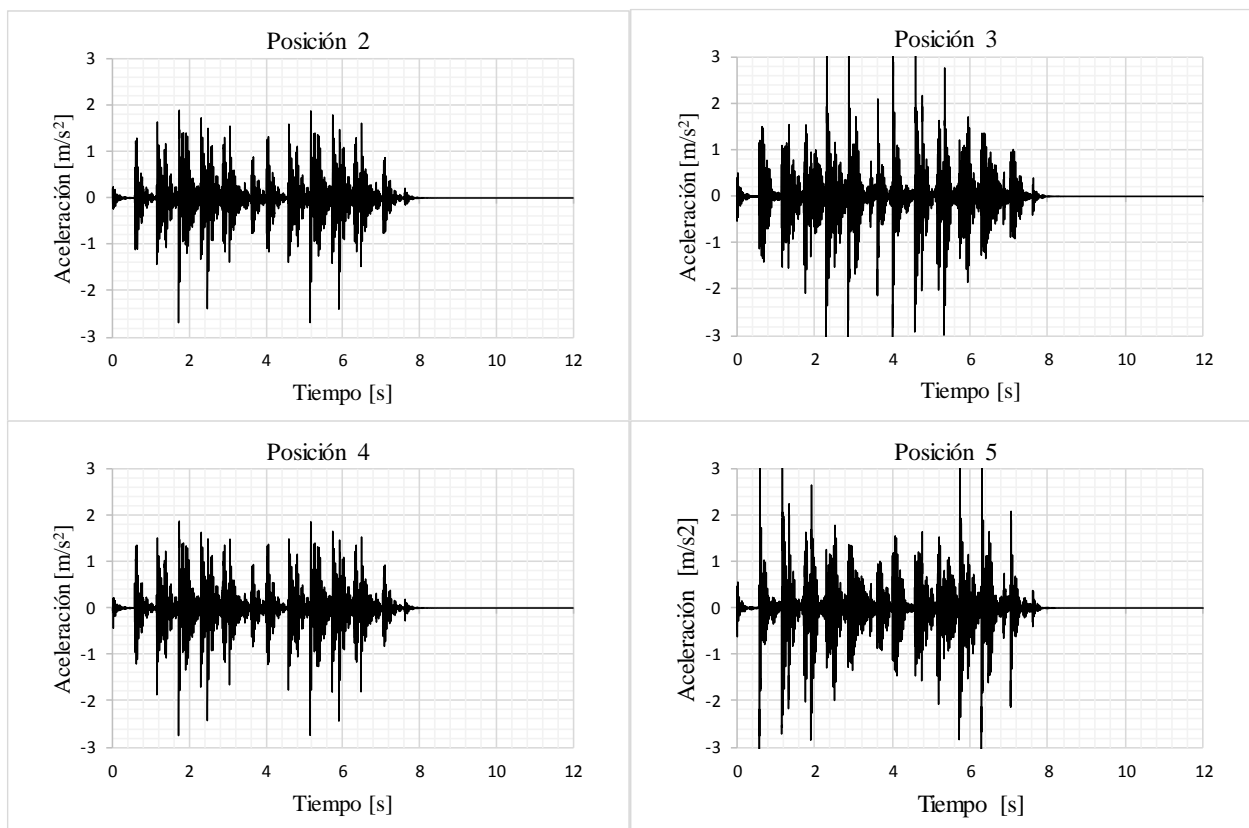


Figura 12. Acelerogramas del modelo #6, para 1.75 [Hz] y 76 [kg]. (Elaboración propia).

Los acelerogramas poseen peaks correspondientes al número de pisadas, los que decaen rápidamente producto del amortiguamiento. Según Hu, et al., (2006), esta respuesta es característica de los pisos de alta frecuencia y se denomina “respuesta transitoria”. Además, se diferencian 2 zonas, que corresponden al recorrido de caminata de ida y vuelta.

En la Figura 12, se observa el aumento de magnitud de las aceleraciones debido al aumento de peso. En cambio, en la Figura 13, se aprecia la acentuación de la respuesta vibratoria dependiendo de la ubicación del punto de medición. Estas características se repiten en todos los modelos de piso.

5.2.- Comparación de Resultados Numéricos y Experimentales, Etapa de Validación

Del análisis de los modelos #5, #6, #7 y #8 se obtuvieron valores de frecuencia fundamental y deflexión debido a carga unitaria. La Tabla 6 muestra los resultados numéricos y los valores experimentales de Montenegro (2016), además de ratios de comparación.

Tabla 6. Comparación de w y f_1 , Numérico vs Experimental. (Elaboración propia).

Modelo y Luz [m]	Numérico		Experimental		Ratio Num./Exp.	
	w [mm]	f_1 [Hz]	w [mm]	f_1 [Hz]	R_w	R_{f1}
#8, 2.1	0.93	45.30	0.98	39.50	0.95	1.15
#7, 2.4	1.19	35.63	1.14	34.00	1.04	1.05
#6, 2.7	1.42	28.51	1.30	28.00	1.09	1.02
#5, 3.0	1.71	23.57	1.67	21.50	1.02	1.10

En la Tabla 6 se observa que los valores numéricos son similares a los experimentales. Las razones (Valor numérico/Valor experimental) indican que los valores de deflexión obtenidos de los modelos son en un promedio 3% mayores, por otro lado, los valores de frecuencia son en un promedio 8% mayores.

Luego de procesar los acelerogramas obtenidos de los cuatro modelos de pisos, se obtuvieron los valores de dosis de vibración para cada evento de caminata. Los VDV_{wb} obtenidos numéricamente fueron comparados con valores experimentales sin puntos atípicos, obtenidos en pisos con taco de madera por Montenegro (2016); estos últimos corresponden a frecuencias de 1.4[Hz], 1.8[Hz] y 2.0[Hz] y pesos de 56[kg], 66[kg], 76[kg] y 86[kg]. Las caminatas numéricas que más se ajustan son las de 1.75 [Hz] (e iguales pesos), ver Figura 14.

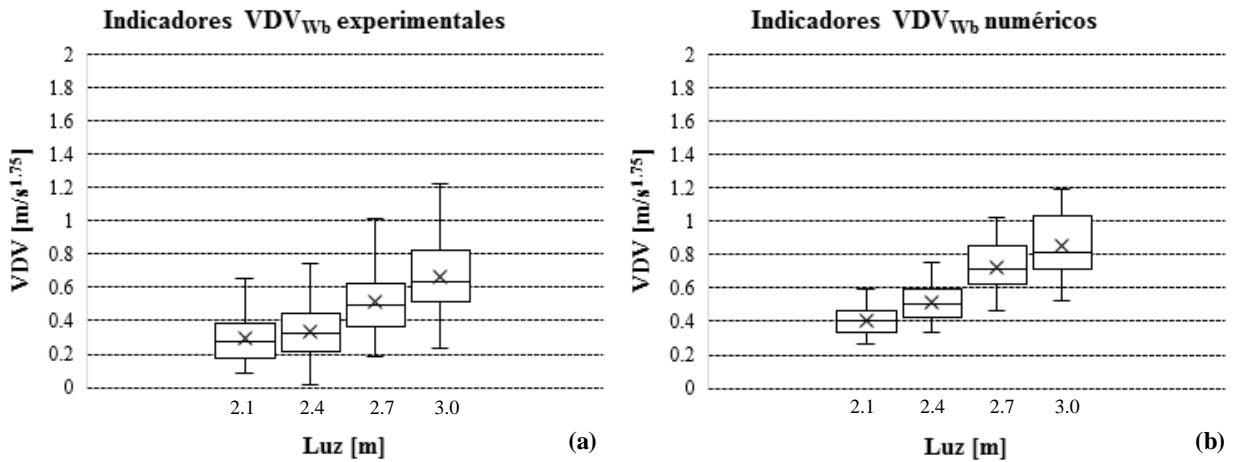


Figura 13. Indicadores VDV_{wb} experimentales (a). Indicadores VDV_{wb} numéricos para 1.75 [Hz] (b). (Elaboración propia).

La Figura 14(a) muestra los $VDV_{wb,día}$ obtenidos experimentalmente para el total de eventos de caminata. Mientras que en la Figura 14(b) se observan los resultados numéricos para la frecuencia de 1.75 [Hz]. Las cajas numéricas se encuentran dentro de los rangos experimentales, pero los promedios de VDV_{wb} numéricos son mayores, ver Tabla 7.

Tabla 7. Comparación de $VDV_{wb,día}$ promedio, Numérico vs Experimental. (Elaboración propia).

Modelo y Luz [m]	VDVwb promedio [m/s ^{1.75}]		Razón Num./Exp.
	Numérico	Experimental	
#8, 2.1	0.41	0.29	1.40
#7, 2.4	0.51	0.33	1.55
#6, 2.7	0.72	0.51	1.40
#5, 3.0	0.85	0.66	1.28

La Tabla 7 indica que los promedios de VDV_{wb} numéricos son entre 28% y 55% mayores a los experimentales, por tanto, son valores conservadores dentro de los rangos de datos experimentales. Se asumió este criterio como adecuado debido a que los promedios numéricos se encuentran dentro del cuartil superior de los valores experimentales.

Con estos análisis se concluye la etapa Validación de la Metodología de Modelación de Pisos, determinando que la estrategia de modelación es confiable y que los eventos de caminata para 1.75[Hz] se ajustan de manera razonable a los valores experimentales. Por lo que esta metodología validada será la empleada en el análisis del total de modelos de pisos.

5.3.- Resultados del Análisis de los Sistemas de Piso en Estudio

Después realizar el análisis numérico de los 32 modelos de pisos, se evalúa el desempeño vibratorio en función del ratio definido en el ítem 4.2.3, ver Tabla 8.

Además, se evaluó la deflexión vertical central de los modelos de piso según NCh 1198 of. 2014, dando como resultado un 100% de cumplimiento tanto para el estado límite debido a la acción de peso propio y sobrecarga de uso y el estado de únicamente acción de sobrecarga. También, se evaluó la deflexión vertical debido a una carga puntual de 1[kN] y la frecuencia fundamental, ambos según el Anexo finlandés del Eurocódigo 5. El Anexo D muestra el detalle de estos análisis complementarios.

Tabla 8. Ratio de evaluación del desempeño vibratorio R1. (Elaboración propia).

Modelo	Modelo	MOE	bxh	s	L	B	R1
#	Descripción	[MPa]	[mmxmm]	[cm]	[cm]	[cm]	BSI
1	2x6-C16-41	7900	41x138	41	277	410	1.54
2	2x6-C16-41	7900	41x138	41	249	410	1.20
3	2x6-C16-41	7900	41x138	41	222	410	0.93
4	2x6-C16-41	7900	41x138	41	194	410	0.69
5	2x6-C24-41	10200	41x138	41	307	410	1.54
6	2x6-C24-41	10200	41x138	41	276	410	1.27
7	2x6-C24-41	10200	41x138	41	246	410	0.88
8	2x6-C24-41	10200	41x138	41	215	410	0.69
9	2x8-C16-41	7900	41x185	41	372	410	1.50
10	2x8-C16-41	7900	41x185	41	335	410	1.16
11	2x8-C16-41	7900	41x185	41	298	410	0.90
12	2x8-C16-41	7900	41x185	41	260	410	0.64
13	2x8-C24-41	10200	41x185	41	411	410	1.37
14	2x8-C24-41	10200	41x185	41	370	410	1.18
15	2x8-C24-41	10200	41x185	41	329	410	0.92
16	2x8-C24-41	10200	41x185	41	288	410	0.68
17	2x6-C16-31	7900	41x138	31	305	310	1.59
18	2x6-C16-31	7900	41x138	31	275	310	1.28
19	2x6-C16-31	7900	41x138	31	244	310	0.92
20	2x6-C16-31	7900	41x138	31	214	310	0.74
21	2x6-C24-31	10200	41x138	31	337	496	1.64
22	2x6-C24-31	10200	41x138	31	303	496	1.18
23	2x6-C24-31	10200	41x138	31	270	496	0.93
24	2x6-C24-31	10200	41x138	31	236	496	0.65
25	2x8-C16-31	7900	41x185	31	408	496	1.31
26	2x8-C16-31	7900	41x185	31	367	496	1.11
27	2x8-C16-31	7900	41x185	31	326	496	0.89
28	2x8-C16-31	7900	41x185	31	286	496	0.64
29	2x8-C24-31	10200	41x185	31	443	496	1.43
30	2x8-C24-31	10200	41x185	31	399	496	1.16
31	2x8-C24-31	10200	41x185	31	354	496	0.85
32	2x8-C24-31	10200	41x185	31	310	496	0.64

Descripción: Escuadría-Grado Mecánico-Separación entre vigas; **MOE:** Módulo de Elasticidad; **bxh:** Escuadría de vigas y cadenas; **s:** Separación entre vigas; **L:** Luz de apoyo de vigas; **B:** Ancho del piso. **R1:** Ratio definido en ítem 4.5.

Para evaluar el indicador de desempeño, se muestra además la Figura 15, que grafica los resultados de la evaluación del desempeño vibratorio según la Norma BS 6472-1:2008, para los valores de VDV_{wb} jornada día ($eVDV_{wb,día}$), calculados a partir de la Ecuación 7. Los resultados se muestran en grupos de a 4 pisos, los cuales comparten dimensiones de escuadría (para madera

cepillada), grado estructural de la madera (clasificación mecánica) y separación entre vigas (cm), pero se diferencian en la luz de apoyo.

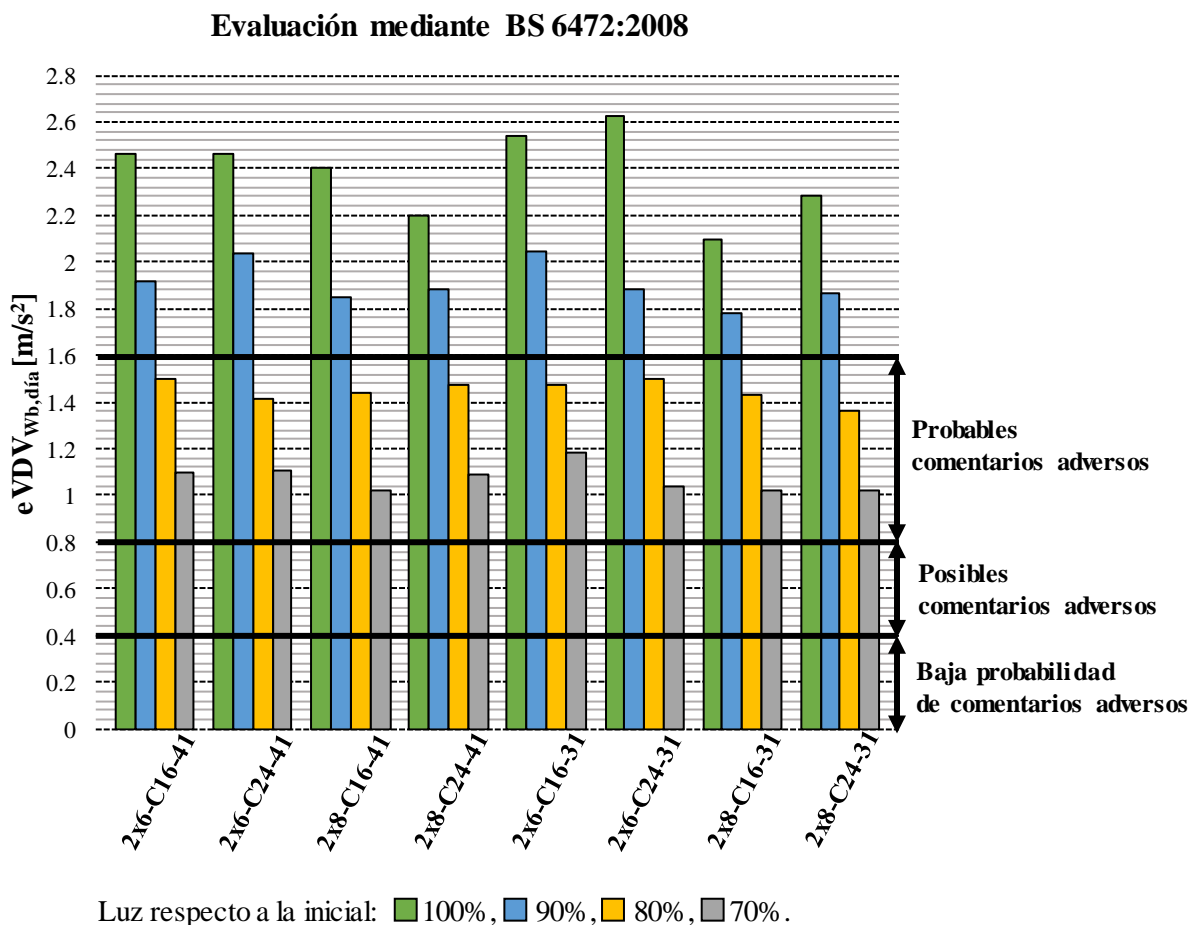


Figura 14. Evaluación del desempeño vibratorio $eVDV_{wb,día}$, según Norma BS 6472:2008. (Elaboración propia).

El detalle del indicador VDV_{wb} obtenido para cada modelo de piso se adjunta en el Anexo E.

De R1 y el gráfico de la Figura 15, se infiere que:

- Las vibraciones inducidas por los eventos de caminata generan un alto nivel de vibración en las estructuras de piso, debido a que 16 (50%) pisos se encuentran por sobre el límite establecido por la Norma BS 6472 para $eVDV_{wb,día}$ (R1 mayor a 1); mientras que los restantes 16 (50%) se encuentran en el rango más alto.
- Los 16 (50%) pisos que cumplen con la Norma (pero con probables comentarios adversos), son los que tienen reducciones de luz del 80% y 70% respectivamente. Las variables escuadría, grado estructural y separación entre vigas no tienen un impacto igual

de significativo en los resultados, por lo que la longitud de apoyo es la variable más determinante en el desempeño vibratorio de los pisos en estudio.

- Reducir la luz de apoyo de los modelos un 30%, mejora en promedio un 55% el indicador de desempeño vibratorio $eVDV_{Wb,día}$.
- Los pisos con escuadrías 2x6'' tuvieron un peor desempeño, con un valor promedio $eVDV_{Wb,día}$ de 1.77 [m/s^{1.75}], siendo un 8% mayor al valor promedio de escuadría 2x8'' ($eVDV_{Wb,día}$ de 1.64 [m/s^{1.75}]).
- Los grados estructurales C16 y C24 tuvieron ambos un valor promedio $eVDV_{Wb,día}$ de 1.70 [m/s^{1.75}]. Mientras que las separaciones de vigas de 31 [cm] y 41[cm] tuvieron en promedio un $eVDV_{Wb,día}$ de 1.71 [m/s^{1.75}] y 1.70 [m/s^{1.75}] respectivamente. Esto se debe probablemente a que los pisos en comparación no tienen iguales dimensiones (luz y ancho), por lo que no es posible calcular una proporción real en función de $eVDV_{Wb,día}$.
- Los pisos mejor evaluados fueron el #12 (de escuadría 2x8'', grado estructural C16 y separación de vigas 41cm), #28 (de escuadría 2x8'', grado estructural C16 y separación de vigas 41cm) y #32 (de escuadría 2x8'', grado estructural C24 y separación de vigas 31cm), todos con un $eVDV_{Wb,día}$ de 1.02 [m/s^{1.75}]. Los tres pisos con mejor desempeño corresponden a una reducción de luz del 70% con respecto a la inicial y a escuadrías de 2x8''.
- Los pisos peor evaluados fueron el #17 (de escuadría 2x6'', grado estructural C16 y separación de vigas 31cm) y el #21 (de escuadría 2x6'', grado estructural C24 y separación de vigas 31cm), con un $eVDV_{Wb,día}$ de 2.54 [m/s^{1.75}] y 2.63 [m/s^{1.75}] respectivamente. Ambos pisos corresponden a una luz inicial (sin reducción) y escuadrías de 2x6''.
- Por otro lado, los pisos que cumplen con el ratio de evaluación de VDV (R1) no presentan deflexiones mayores a 1.14[mm].

5.4.- Propuesta Simplificada para el Cálculo del Desempeño Vibratorio

De los resultados de la evaluación del desempeño vibratorio se observa que el indicador de desempeño $eVDV_{Wb,día}$ efectivamente posee una relación directa con la deflexión central para una carga puntual unitaria (w), tal como lo indica el estudio de Montenegro (2016), ver Figura 15.

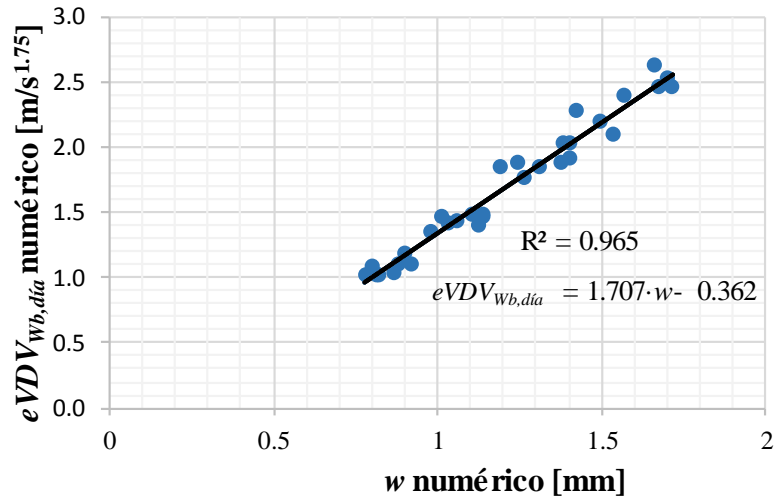


Figura 15. Gráfico w numérico vs $eVDV_{Wb,día}$ numérico. (Elaboración propia).

La Figura 15 muestra gráficamente la relación entre w y $eVDV_{Wb,día}$, ambos obtenidos numéricamente en cada modelo de piso. Se observa que la correlación es prácticamente lineal, con un coeficiente de determinación del 96,5%. El coeficiente de determinación obtenido es mayor al encontrado experimentalmente por Montenegro (2016), el cual corresponde a 88,5%, esto se debe probablemente a un número mayor de casos de estudio.

Además, se obtuvo una ecuación lineal que permite calcular $eVDV_{Wb,día}$ a partir de w (en milímetros), ver Ecuación 11. Esta propuesta simplificada posee un rango de confiabilidad para valores de $eVDV_{Wb,día}$ entre $1[m/s^{1.75}]$ y $2.6 [m/s^{1.75}]$, según los valores obtenidos del total de casos de estudio.

$$eVDV_{Wb,día} = 1.707 * w - 0.362 \quad Ec. (11)$$

Para calcular w de manera aproximada, sin modelar ni obtenerlo experimentalmente, se propone calcular w a partir de una ecuación de diseño modificada. Para lo que se recurrió a las ecuaciones de diseño del Eurocódigo 5 y sus respectivos Anexos Nacionales.

Existen tres ecuaciones para de cálculo de la deflexión vertical en pisos de madera, las cuales están presentes en el diseño de pisos de las Normas de Austria, Finlandia e Irlanda y Reino Unido respectivamente. Para este estudio se optó por utilizar la ecuación de diseño finlandés, la cual es similar a la austriaca.

La ecuación de diseño finlandesa considera el efecto de la rigidez transversal en la deflexión vertical w e incluye el efecto del espaciamiento entre vigas (s). Para introducir la ecuación de diseño finlandesa al contexto de la tipología nacional de pisos de madera, fue calibrada con los valores w obtenidos en este estudio, resultando en una calibración del aporte a la rigidez proporcionado por las cadenetas, reduciéndolo a un 21%. La Ecuación 12 corresponde a la ecuación de diseño finlandesa modificada:

$$w = \min \left\{ \frac{FL^2/[42k_{\delta}(EI)_L]}{FL^3/[48s(EI)_L]} \right\}, k_{\delta} = \sqrt[4]{(EI)_B/(EI)_L}, k_{\delta} \leq \frac{B}{L} \quad Ec. (12)$$

Donde:

- w : deflexión vertical debido a una carga puntual, en [mm/N].
- F : carga puntual, en este caso 1000[N].
- L : luz de apoyo máxima de vigas, en [m].
- $(EI)_L$: rigidez en el eje paralelo al largo de las vigas por metro lineal, [N m²/m].
- $(EI)_B$: rigidez en el eje perpendicular al largo de las vigas por metro lineal. Con un factor 0.21 para la rigidez aportada por las cadenetas. En [N m²/m].
- B : dimensión del piso perpendicular a la dirección de las vigas, en [m].
- s : separación entre vigas, en [m].

En el Anexo F se adjunta un ejemplo de cálculo de deflexión usando la Ecuación 12.

A continuación, se comparan los valores w obtenidos con la ecuación de diseño finlandés modificada (w simplificado) y los w obtenidos numéricamente en cada caso de estudio, ver Figura 16. La línea segmentada muestra una hipotética relación perfecta entre ambos conjuntos de valores.

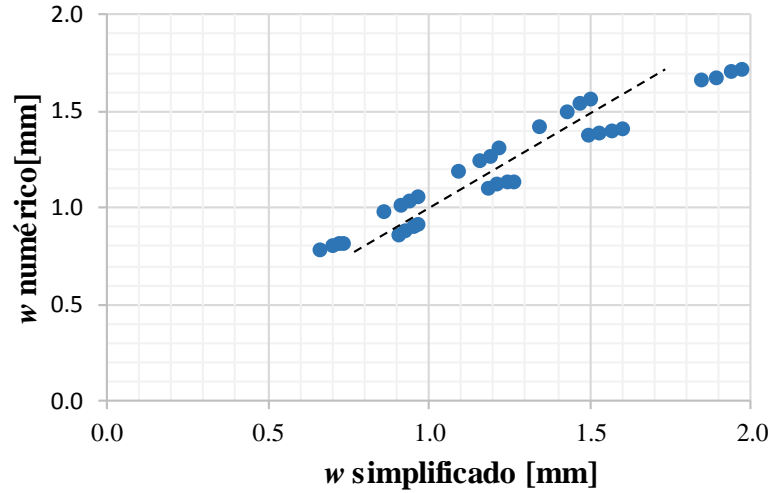


Figura 16. Gráfico w simplificado vs w numérico. (Elaboración Propia).

La Figura 16 muestra que los valores de w simplificados poseen una variación promedio de 0.11[mm] respecto a los valores de w numéricos.

Finalmente, se compara el indicador de desempeño $eVDV_{wb,día}$ calculado con la propuesta simplificada (Ec. 11 y a su vez w calculado con la Ec. 12) con el indicador $eVDV_{wb,día}$ obtenido numéricamente en cada caso de estudio, ver Figura 17. La línea segmentada muestra una hipotética relación perfecta entre ambos conjuntos de valores.

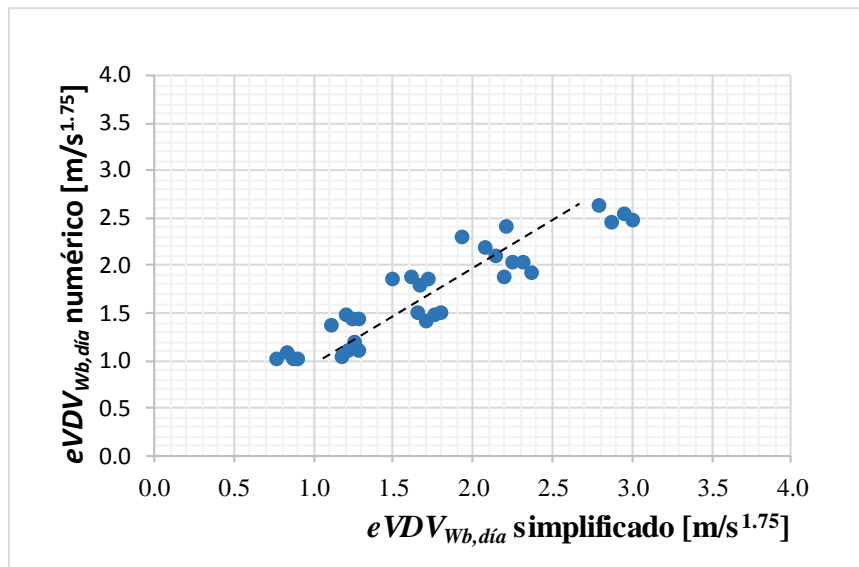


Figura 17. Gráfico $eVDV_{wb,día}$ simplificado vs $eVDV_{wb,día}$ numérico. (Elaboración Propia).

Los indicadores de desempeño $eVDV_{wb,día}$ calculados de manera simplificada poseen una variación promedio de $0.24[m/s^{1.75}]$ respecto al indicador de desempeño $eVDV_{wb,día}$ numérico.

De esta forma, la Ecuación 11 permite calcular $eVDV_{wb,día}$ en base a la deflexión central del piso w y la Ecuación 12 permite obtener el valor de w , sin la necesidad de realizar un modelo numérico ni mediciones experimentales; obteniendo en ambas ecuaciones un alto índice de fiabilidad.

6.- CONCLUSIONES

Al finalizar la investigación se concluye que:

- 1) Se logró proponer un criterio simplificado para calcular el desempeño vibratorio de pisos de madera pertenecientes a la tipología constructiva típica de viviendas sociales en Chile y sometidos a caminatas de personas, haciendo uso de la modelación numérica.
- 2) Se sintetizó el estado del arte en la evaluación del desempeño vibratorio de pisos de madera, seleccionando criterios internacionales para suplir la escasa normativa nacional.
- 3) Se logró implementar una rutina programática en el programa SAP2000, la cual simula la respuesta de los sistemas de pisos de manera compatible con los valores obtenidos experimentalmente para pisos de las mismas propiedades físico-mecánicas y dimensiones, validando la rutina.
- 4) Se aplicó la rutina programática validada a 32 sistemas pisos de madera, con diferentes propiedades y dimensiones correspondientes a pisos de uso tradicional en Chile.
- 5) Se obtuvieron y registraron las vibraciones verticales provenientes del análisis modal de cada piso en estudio, así como también la deflexión central para cada criterio de análisis y la frecuencia fundamental.
- 6) Se evaluó el desempeño vibratorio de los 32 modelos de pisos de madera, haciendo uso de la norma BS 6472:2008 para categorizar el indicador de desempeño VDV de cada uno. Además, se evaluó complementariamente el desempeño en términos de deflexión central y frecuencia fundamental utilizando las normas NCh 1198:2014 y el Eurocódigo 5.
- 7) Se formuló y propuso un criterio simplificado para calcular el desempeño vibratorio de pisos de madera, en base a la deflexión central del piso producto de una carga puntual de 1 [kN].
- 8) En base a los resultados de la evaluación del desempeño vibratorio se concluye que la tipología tradicional de pisos de madera en Chile posee un pobre desempeño vibratorio,

debido a que el 50% de los pisos en estudio sobrepasa el valor límite para el indicador de desempeño VDV sugerido por la norma BSI 6472:2008 ($1.6 \text{ m/s}^{1.75}$); mientras que, el otro 50% de los pisos se encuentra en el rango más desfavorable, es decir, su desempeño vibratorio tendría probables comentarios adversos.

- 9) Se confirma la necesidad de incorporar normativas nacionales que regulen el desempeño vibratorio en los pisos de madera, debido a que los límites de deflexión vertical propuestos por la norma NCh 1198:2014 no son suficientes para asegurar una adecuada serviciabilidad. Esto se evidencia en que el 100% de los pisos en estudio cumplen de manera holgada con la evaluación de deflexión central para PP+SC y SC, obteniendo ratios promedios de 0.49 y 0.54 respectivamente. Además, se observa que el criterio finlandés es mucho más exigente al limitar la deflexión vertical para una carga puntual de 1[kN], obteniendo en el total de modelos un ratio promedio de 1.65.
- 10) En cuanto a frecuencia fundamental, el 100% de los modelos superan el 9[Hz] mínimo propuesto por el Eurocódigo 5, siendo catalogados como pisos de alta frecuencia.
- 11) Se observó que la variable más influyente en el desempeño vibratorio es la luz de apoyo de vigas, en promedio, reducir la luz inicial un 30% mejora un 55% el indicador de desempeño VDV. Una vez construido un piso de madera es poco factible el cambiar sus dimensiones, por lo que es de suma importancia calcular su desempeño vibratorio con anterioridad.
- 12) Se propuso un criterio para calcular el indicador de desempeño vibratorio $eVDV_{wb, dia}$, simplificando el procedimiento llevado a cabo durante esta investigación y ofreciendo resultados con un alto índice de fiabilidad. Para utilizar la propuesta simplificada se necesita ingresar w , por lo cual se ofrece una fórmula de diseño modificada para obtener el indicador de desempeño de manera rápida y práctica, sin la necesidad de modelar numéricamente ni obtener valores experimentales.
- 13) La metodología validada permite calcular el indicador de desempeño vibratorio en pisos de madera en viviendas sociales en casos atípicos, con plantas irregulares, aberturas y/o casos complejos, utilizando la modelación numérica. Mientras que la propuesta simplificada permite calcular el indicador $eVDV_{wb, dia}$ con un alto índice de fiabilidad en casos típicos, donde la planta es regular y los envigados son repetitivos.

Como futuras líneas de investigación se propone:

- 14) Realizar mediciones de las fuerzas de pisadas en pisos de madera para modelar con mayor precisión las caminatas de personas.
- 15) Ampliar el universo de modelos de pisos, ampliando principalmente la cantidad de luces de vigas y probando el comportamiento en placas de otros espesores.

7.- REFERENCIAS

- ARAUCO (2012). Ingeniería y construcción en Madera. Cuarta edición, Chile. (http://www.arauco.cl/_file/libro_ingenieria/libro_ingenieria_y_construccion.html).
- British Standards Institution (BSI). (2008). “Guide to evaluation of human exposure to vibration in building, “Part 1: Vibration sources other than blasting.” BS 6472-1, London.
- CSI (2013). SAP2000—Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures—User’s Manual, Version 14. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California.
- Ellis, B. R. (2001). Serviceability evaluation of floor vibration induced by walking loads. *The Structural Engineer*. 79(21).30-36
- Filiatrault, A. y Foschi, R. O., (1990). Finite-strip free-vibration analysis of wood floors. *Journal of Structural Engineering*, 116(8), 2127-2141.
- Fuentealba, B. (2014). Modelación numérica de muros de corte de madera bajo cargas laterales monotónicas. Tesis de pregrado, Depto. Ing. Civil y Amb., Universidad del Bío-Bío, Chile.
- Glisovic, I. y Stevanovic, B., (2010). Vibrational behaviour of timber floors. World Conference on Timber Engineering.
- Griffin, M., (2007). Predicting the feeling of vibration in buildings, *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 29(2), Southampton UK.
- Hu L. J., Chui Y. H. and Onysko D. M. (2001). Vibration serviceability of timber floors in residential construction, *Progress in Structural Engineering and Material*, 3(3), 228-237. International Organization for Standardization (ISO). (2007). “Bases for design of structures-Serviceability of buildings and walkways against vibrations.” *ISO 10137*, 2nd Ed., Geneva.
- Montenegro, C. (2016). Evaluación de una configuración óptima de pisos de madera para el control de vibraciones en viviendas sociales. Tesis de pregrado, Depto. Ing. Civil y Amb., Universidad del Bío-Bío, Chile.

- Instituto Nacional de Normalización INN, (2014). “Madera - Construcciones en madera- Cálculo”. Norma chilena, NCh 1198, Chile. (2009). “Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso”. Norma chilena, NCh 1537, Chile
- Peña, J. (2016). Evaluación numérica del desempeño vibratorio de pisos de madera. Tesis de pregrado, Depto. Ing. Civil y Amb., Universidad del Bío-Bío, Chile.
- Ríos, R. (2013). Análisis y evaluación de vibraciones generadas por el tránsito de multitudes en pasarelas peatonales, Tesis de pregrado, Depto. Ing. Civil y Ambiental., Universidad del Bío-Bío, Chile.
- Sedlacek, G., Heinemeyer, C., Butz, C. & Völling, B., 2006. *Generalisation of criteria for floor vibration*. European Commission. Luxembourg.
- Sepúlveda, E. (2012). Evaluación in situ de vibraciones verticales inducidas por peatones en sistemas de piso , Tesis de pregrado, Depto. Ing. Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío, Chile.
- Wilson Edward L. (2000). Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. (<http://www.edwilson.org/Book/book.htm#Author>).
- Zhang, B., Rasmussen, B., Jorissen, A. & Harte, A. (2013). Comparison of vibrational comfort assessment criteria for design of timber floors among the European countries. *Elsevier Engineering Structures*, 52,592–607.

8.- ANEXOS

Índice del contenido de los Anexos

Anexo A.- Factores de Funciones de Polinomios de Alto Orden.....	41
Anexo B.- Valores de Entrada en SAP2000 Para la Modelación de las Cargas de Caminatas	41
Anexo C.- Código Matlab Para la obtención del Indicador VDV_{wb}	42
Anexo D.- Detalle de los Análisis Complementarios de los Modelos de Pisos	45
Anexo E. Detalle del indicador VDV_{wb} Para Cada Modelo de Piso	48
Anexo F. Ejemplo de Cálculo de w , Usando la Ecuación de Diseño Finlandés Modificada	49

Índice de Tablas de los Anexos

Tabla A1. Factores K_n , deducidos de las curvas experimentales de Sedlacek, et al., (2006)	41
Tabla D1. Ratios complementarios de evaluación de los modelos de piso.....	46
Tabla D2. Resultados y límites admisibles de la evaluación complementaria de los modelos de piso.....	47
Tabla E1. Detalle del indicador VDV_{wb} para los modelos de piso 1-16	48
Tabla E2. Detalle del indicador VDV_{wb} para los modelos de piso 16-32.....	49

Índice de Figuras de los Anexos

Figura B1. Valores de entrada para funciones tiempo-historia.	41
--	----

Anexo A.- Factores de Funciones de Polinomios de Alto Orden

Para modelar los perfiles de fuerza de pisadas, se utilizó el método de las funciones de polinomios de alto orden propuesto por Sedlacek, et al., (2006) y cuyos factores K_n fueron deducidos de sus curvas experimentales. La Tabla A1 muestra los factores deducidos para frecuencias de paso de 1.5[H], 2.0[Hz] y 2.2[hz].

Tabla A1. Factores K_n , deducidos de las curvas experimentales de Sedlacek, et al., (2006). (Elaboración propia).

f_p [Hz]	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
1.5	16.64	-64.98	27.71	156.30	132.50	-1071.75	1296.92	-497.29
1.75	22.88	-198.84	1487.75	-8207.63	25575.54	-42530.14	35540.46	-11785.09
2.2	40.81	-434.04	2910.84	-14658.11	45665.79	-76930.07	62689.35	-18682.95

Anexo B.- Valores de Entrada en SAP2000 Para la Modelación de las Cargas de Caminatas

La Figura B1 muestra los valores necesarios para ingresar las cargas de caminatas al modelo en SAP2000.

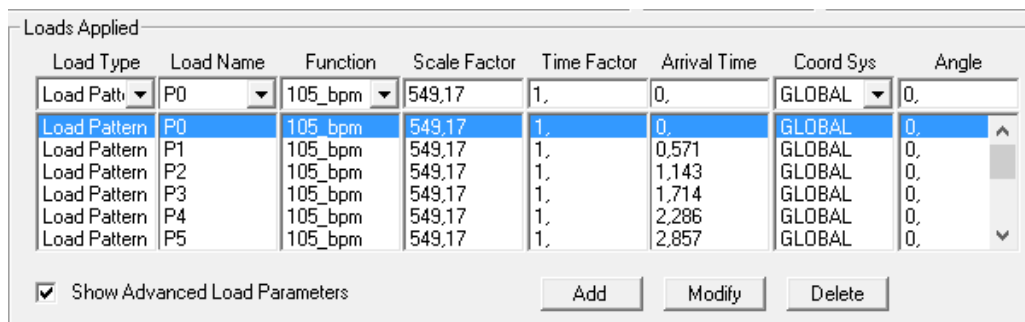


Figura B1. Valores de entrada para funciones tiempo-historia. (Elaboracion propia).

El término “Load name” corresponde a cada fuerza puntual P_i , la cual está asociada a una función o “Function” que representa el perfil de carga de pisada asociada a una frecuencia de paso, ver Figura X.

El factor de escala o “Scale Factor”, corresponde al peso del caminante, debido a que las funciones de fuerza de pisadas se encuentran normalizadas por el peso.

El tiempo de arribo o “Arrival Time”, representa el tiempo de aplicación t_n de una determinada función de fuerza de pisada, depende del número de pisada n y se calcula como $at_n = n / f_p$.

Los datos mostrados en la Figura B1 representan el evento de caminata #2, ver Tabla 4. En este caso la función de fuerza de pisadas corresponde a 105[bpm] (1,75Hz) y peso del caminante 55[kg] (549.17N).

Anexo C.- Código Matlab Para la obtención del Indicador VDV_{wb}

A continuación, se presenta el código en Matlab utilizado para encontrar el indicador de desempeño VDV de los pisos de madera en estudio.

```
%Algoritmo para calcular el indicador VDV (Alexander Opazo Vega)
tic; clear; clc; close all
%Lectura de aceleraciones desde Excel
n_aceler=4; %nro de acelerogramas por piso
factor_g=1; %colocar 9.81 si esta el acelerograma esta en g (m/s2)
nro_pisos=1;

%Lectura del historial de aceleraciones desde Excel.
a_brut_piso=zeros(12001,n_aceler,nro_pisos);
a_brut_piso(:,:,1)=factor_g*xlsread('Acelerogramas.xls','Hoja1','B8:E12008');
% a_brut_piso(:,:,2)=factor_g*xlsread('camila.xls','Hoja1','B8:E12008');

%Lectura de la función Wb desde Excel.
fw=xlsread('factoresW.xls','W','A3:A42');
wb=xlsread('factoresW.xls','W','D3:D42');
propdin=zeros(2,n_aceler,nro_pisos);

for piso=1:nro_pisos
    a_brut=a_brut_piso(:,:,piso);
    fs1=1000;
    dt1=1/fs1;
    np1=length(a_brut(:,1));
    t1=dt1*(0:np1-1)';
    N=length(t1)+10;
    ff=1/dt1*((-(N-1)/2):(N-1)/2)/N;
    if length(ff)/2==ceil(length(ff)/2)
        Numer=ceil(length(ff)/2+1);
    else
        Numer=ceil(length(ff)/2);
    end
    ff2=ff(Numer:length(ff));
    wbtot=zeros(length(ff2),1);
    cuenta=1;

    for ff2int=ff2
        wbtot(cuenta,1)=interp1(fw,wb,ff2int);
        cuenta=cuenta+1;
    end
    % figure
    % plot(t,a_brut)

a0=zeros(1,n_aceler);
```

```

a_brut_cent=zeros(length(t1),n_aceler);
a_cent_filt=zeros(length(t1),n_aceler);
acel_pon2=zeros(length(t1),n_aceler,2);
for i=1:n_aceler

%Centrado de señal
a0(i)=mean(a_brut(:,i));
a_brut_cent(:,i)=a_brut(:,i)-a0(i)*ones(np1,1);
% figure
% plot(t,[a_brut(:,i),a_brut_cent(:,i)])

%Filtrado de señal
Fnyquist1=(1/dt1)/2;
Wp1=40/Fnyquist1;Ws1=50/Fnyquist1;
Rp1=0.4;Rs1=15;
[Nn1,Wn1]=buttord(Wp1,Ws1,Rp1,Rs1);
[b1,a1]=butter(Nn1,Wn1);
% figure
% freqz(b,a,512,fs)

%Señal filtrada
a_cent_filt(:,i)=filtfilt(b1,a1,a_brut_cent(:,i));
%figure('Color','white')
%plot(t1,a_cent_filt(:,i))
%grid on
%xlabel('Tiempo (s)')
%ylabel('Aceleración (m/s2)')
%plot(t1,[a_brut_cent(:,i),a_cent_filt(:,i)])

%Transformada de Fourier del acelerograma

t=t1'; dt=dt1; a=(a_brut_cent(:,i))';
Amp_acelera=fft(a,N)/length(a);
Amp_aceler=(fftshift(Amp_acelera));%coloca el origen en el centro de la fft
Amp_acelera=2*Amp_aceler(Numer:length(ff));

%Cálculo de la las propiedades dinámicas de la estructura

%Frecuencia natural
ampfft=abs(Amp_acelera);
peakfft=max(ampfft);
fpeak=ff2(find(ampfft==peakfft));
fpeak_red=round(fpeak*100)/100;
propdin(1,i,piso)=fpeak;

figure('Color','white')
plot(ff2(1:length(ff)/10),ampfft(1:length(ff)/10))
title('Amplitud de la aceleración dominio de la frecuencia')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Amplitud FFT aceleración (m/s2)')

%Razón de amortiguamiento por el método de ancho de banda media potencia
cont1=peakfft/(2)^0.5;
ind1=find(ampfft==peakfft);
tramo2_frf=ampfft(1,ind1-15:ind1);
tramo3_frf=ampfft(1,ind1:ind1+15);

```



```

tramo2_ff2=ff2(1,ind1-15:ind1);
tramo3_ff2=ff2(1,ind1:ind1+15);
%Encuentro lado izquierdo
cont2=interp1(tramo2_frf,tramo2_ff2,cont1);
%Encuentro lado derecho
cont3=interp1(tramo3_frf,tramo3_ff2,cont1);
propdin(2,i,piso)=(cont3-cont2)/(2*fpeak);

%Ponderación de la aceleración por la función wb
Amp_acelera_pon(2,:)=Amp_acelera.*wbtot';

%Transformación de la aceleración ponderada al dominio del tiempo
Amp_a=Amp_acelera_pon;
for w=1:2
    if w==1
        acel_pon2(:,i,w)=a_cent_filt(:,i);
    else
        B=flipdim(Amp_a(w,:),2);
        B1=B(1:length(B)-1);
        Amp_a1=[conj(B1)./2 Amp_a(w,:)./2];
        acel_pon=ifft(ifftshift(Amp_a1))*length(Amp_a1);
        acel_pon=acel_pon(1:length(t));
        acel_pon2(:,i,w)=acel_pon';
    end
end
figure('Color','white')
plot(t1,a_cent_filt(:,i))
plot(t1,acel_pon2(:,i,2))
grid on
plot(t1,[a_brut_cent(:,i),acel_pon2(:,i,2)])
title('Señales de aceleración')
xlabel('Tiempo [s]')
xlim([1 15])
ylabel('Aceleración [m/s2]')

    cont_fin=length(acel_pon2(:,i,1))-fs1;
    for paso=1:cont_fin
acel_poncito1=acel_pon2(paso:paso+fs1,i,1);
acel_poncito2=acel_pon2(paso:paso+fs1,i,2);

    end
%Calculo de los indicadores de desempeño VDV
vdv(1,i,piso)=(sum((acel_pon2(:,i,1)).^4).^^(1/4))*((1./fs1).^^(1/4));
vdv(2,i,piso)=(sum((acel_pon2(:,i,2)).^4).^^(1/4))*((1./fs1).^^(1/4));
end
end
tiempo_min = toc;
fprintf('El proceso ha tardado %d minutos', tiempo_min/60);

```

Anexo D.- Detalle de los Análisis Complementarios de los Modelos de Pisos

Para evaluar el desempeño de los casos de estudio, se analizó complementariamente la deflexión vertical central de los modelos de piso y la frecuencia fundamental. El análisis consta de comparar la evaluación del desempeño vibratorio de las normas BS 6472:2008 y Eurocódigo 5 con las recomendaciones de diseño de la norma NCh 1198 of. 2014 y las tipologías típicas de construcción de viviendas en madera de Chile. Para esto se definieron las siguientes ratios, donde un valor de ratio menor a 1 indica que el diseño cumple con las exigencias de las normas:

- Ratio 2: se define como la deflexión w [mm] en el centro del modelo producto de una carga puntual de 1 [kN], dividido por el límite estático $0.5k$ (donde k es un factor obtenido de la Figura 3) propuesto por el Eurocódigo 5 y modificado en el Anexo Finlandés, siendo este el más exigente a nivel europeo:

$$R2 = \frac{w}{0.5k} \quad Ec. (13)$$

- Ratio 3: se define como la deflexión en el centro del modelo debido a la acción de peso propio y sobrecarga de uso (200kg/m^2 según NCh 1537 of 2009), dividido por el límite admisible ($L/300$) de la norma NCh 1198 of. 2014:

$$R3 = \frac{\Delta_{PP+SC}}{L/300} \quad Ec. (14)$$

- Ratio 4: se define como la deflexión en el centro del modelo debido a la acción de sobrecarga de uso, dividido por el límite admisible ($L/360$) de la norma NCh 1198 of. 2014:

$$R4 = \frac{\Delta_{SC}}{L/360} \quad Ec. (15)$$

- Ratio 5: se define como la frecuencia fundamental mínima (9Hz) exigida por el Anexo Finlandés del Eurocódigo 5, según Zhang et al., (2013), dividido por la frecuencia fundamental f_1 del modelo de piso:

$$R5 = \frac{9[\text{Hz}]}{f_1} \quad Ec. (16)$$

A continuación, la Tabla D1 indica los resultados de los ratios de evaluación complementarios para cada modelo de piso.

**Tabla D1. Ratios complementarios de evaluación de los modelos de piso.
(Elaboración propia).**

Modelo	Modelo	MOE	bxh	s	L	B	R2	R3	R4	R5
#	Descripción	[MPa]	[mmxmm]	[cm]	[cm]	[cm]	E5	NCh1198	NCh1198	E5
1	2x6-C16-41	7900	41x138	41	277	410	2.18	0.72	0.80	0.35
2	2x6-C16-41	7900	41x138	41	249	410	1.69	0.54	0.59	0.29
3	2x6-C16-41	7900	41x138	41	222	410	1.29	0.39	0.43	0.24
4	2x6-C16-41	7900	41x138	41	194	410	0.98	0.27	0.30	0.18
5	2x6-C24-41	10200	41x138	41	307	410	2.27	0.77	0.85	0.38
6	2x6-C24-41	10200	41x138	41	276	410	1.76	0.58	0.63	0.32
7	2x6-C24-41	10200	41x138	41	246	410	1.34	0.40	0.44	0.25
8	2x6-C24-41	10200	41x138	41	215	410	0.98	0.29	0.31	0.20
9	2x8-C16-41	7900	41x185	41	372	410	2.40	0.72	0.79	0.44
10	2x8-C16-41	7900	41x185	41	335	410	1.87	0.54	0.59	0.36
11	2x8-C16-41	7900	41x185	41	298	410	1.41	0.40	0.43	0.29
12	2x8-C16-41	7900	41x185	41	260	410	1.00	0.27	0.29	0.23
13	2x8-C24-41	10200	41x185	41	411	410	2.46	0.78	0.85	0.47
14	2x8-C24-41	10200	41x185	41	370	410	1.90	0.58	0.62	0.39
15	2x8-C24-41	10200	41x185	41	329	410	1.43	0.42	0.45	0.32
16	2x8-C24-41	10200	41x185	41	288	410	1.04	0.29	0.31	0.25
17	2x6-C16-31	7900	41x138	31	305	310	2.29	0.73	0.80	0.38
18	2x6-C16-31	7900	41x138	31	275	310	1.77	0.54	0.60	0.32
19	2x6-C16-31	7900	41x138	31	244	310	1.35	0.39	0.42	0.26
20	2x6-C16-31	7900	41x138	31	214	310	1.00	0.27	0.29	0.20
21	2x6-C24-31	10200	41x138	31	337	496	2.39	0.76	0.83	0.42
22	2x6-C24-31	10200	41x138	31	303	496	1.85	0.56	0.61	0.35
23	2x6-C24-31	10200	41x138	31	270	496	1.38	0.41	0.45	0.28
24	2x6-C24-31	10200	41x138	31	236	496	1.01	0.28	0.31	0.22
25	2x8-C16-31	7900	41x185	31	408	496	2.51	0.72	0.77	0.49
26	2x8-C16-31	7900	41x185	31	367	496	1.93	0.53	0.57	0.40
27	2x8-C16-31	7900	41x185	31	326	496	1.45	0.39	0.42	0.33
28	2x8-C16-31	7900	41x185	31	286	496	1.06	0.27	0.29	0.25
29	2x8-C24-31	10200	41x185	31	443	496	2.46	0.73	0.78	0.51
30	2x8-C24-31	10200	41x185	31	399	496	1.92	0.54	0.58	0.42
31	2x8-C24-31	10200	41x185	31	354	496	1.45	0.39	0.42	0.34
32	2x8-C24-31	10200	41x185	31	310	496	1.06	0.27	0.29	0.26

Descripción: Escuadría-Grado Mecánico-Separación entre vigas; **MOE:** Módulo de Elasticidad; **bxh:** Escuadría de vigas y cadenas; **s:** Separación entre vigas; **L:** Luz de apoyo de vigas; **B:** Ancho del piso.

La Tabla D2 indica los resultados y el límite admisible para cada modelo de piso según los criterios de evaluación complementarios.

Tabla D2. Resultados y límites admisibles de la evaluación complementaria de los modelos de piso. (Elaboración propia).

Modelo	Modelo	MOE	bxh	s	L	B	w	0.5k	$\Delta_{(PP+SC)}$	L/300	$\Delta_{(SC)}$	L/360	f_1
#	Descripción	[MPa]	[mmxmm]	[cm]	[cm]	[cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[Hz]
1	2x6-C16-41	7900	41x138	41	277	410	1.72	0.79	6.63	9.23	6.12	7.69	25.67
2	2x6-C16-41	7900	41x138	41	249	410	1.41	0.83	4.46	8.31	4.10	6.93	31.11
3	2x6-C16-41	7900	41x138	41	222	410	1.14	0.88	2.91	7.39	2.67	6.16	37.98
4	2x6-C16-41	7900	41x138	41	194	410	0.92	0.94	1.75	6.46	1.60	5.39	48.81
5	2x6-C24-41	10200	41x138	41	307	410	1.68	0.74	7.91	10.23	7.23	8.53	23.57
6	2x6-C24-41	10200	41x138	41	276	410	1.39	0.79	5.33	9.21	4.87	7.68	28.51
7	2x6-C24-41	10200	41x138	41	246	410	1.13	0.84	3.31	8.19	3.03	6.82	35.63
8	2x6-C24-41	10200	41x138	41	215	410	0.88	0.90	2.07	7.16	1.88	5.97	45.30
9	2x8-C16-41	7900	41x185	41	372	410	1.57	0.65	8.91	12.40	8.11	10.33	20.57
10	2x8-C16-41	7900	41x185	41	335	410	1.31	0.70	6.02	11.16	5.48	9.30	24.75
11	2x8-C16-41	7900	41x185	41	298	410	1.06	0.75	3.93	9.92	3.56	8.27	30.64
12	2x8-C16-41	7900	41x185	41	260	410	0.82	0.81	2.34	8.68	2.11	7.23	39.53
13	2x8-C24-41	10200	41x185	41	411	410	1.50	0.61	10.69	13.70	9.67	11.42	19.05
14	2x8-C24-41	10200	41x185	41	370	410	1.25	0.65	7.10	12.33	6.41	10.28	23.07
15	2x8-C24-41	10200	41x185	41	329	410	1.01	0.71	4.61	10.96	4.12	9.13	28.40
16	2x8-C24-41	10200	41x185	41	288	410	0.80	0.77	2.74	9.59	2.49	7.99	36.56
17	2x6-C16-31	7900	41x138	31	305	310	1.70	0.74	7.40	10.17	6.76	8.47	23.47
18	2x6-C16-31	7900	41x138	31	275	310	1.40	0.79	4.98	9.15	4.55	7.63	28.28
19	2x6-C16-31	7900	41x138	31	244	310	1.14	0.84	3.13	8.13	2.86	6.78	35.21
20	2x6-C16-31	7900	41x138	31	214	310	0.90	0.90	1.91	7.12	1.75	5.93	44.40
21	2x6-C24-31	10200	41x138	31	337	496	1.66	0.70	8.49	11.23	7.76	9.36	21.20
22	2x6-C24-31	10200	41x138	31	303	496	1.38	0.75	5.65	10.11	5.16	8.43	25.91
23	2x6-C24-31	10200	41x138	31	270	496	1.10	0.80	3.69	8.99	3.35	7.49	32.17
24	2x6-C24-31	10200	41x138	31	236	496	0.86	0.86	2.22	7.86	2.03	6.55	40.99
25	2x8-C16-31	7900	41x185	31	408	496	1.54	0.61	9.72	13.60	8.72	11.33	18.33
26	2x8-C16-31	7900	41x185	31	367	496	1.27	0.66	6.48	12.24	5.84	10.20	22.26
27	2x8-C16-31	7900	41x185	31	326	496	1.03	0.71	4.23	10.88	3.79	9.07	27.51
28	2x8-C16-31	7900	41x185	31	286	496	0.82	0.77	2.57	9.52	2.30	7.93	35.31
29	2x8-C24-31	10200	41x185	31	443	496	1.42	0.58	10.75	14.77	9.66	12.31	17.49
30	2x8-C24-31	10200	41x185	31	399	496	1.19	0.62	7.14	13.29	6.47	11.08	21.23
31	2x8-C24-31	10200	41x185	31	354	496	0.98	0.67	4.59	11.81	4.13	9.84	26.46
32	2x8-C24-31	10200	41x185	31	310	496	0.78	0.73	2.77	10.34	2.49	8.61	34.03

Descripción: Escuadría-Grado Mecánico-Separación entre vigas; **MOE:** Módulo de Elasticidad;
bxh: Escuadría de vigas y cadenas; **s:** Separación entre vigas; **L:** Luz de apoyo de vigas; **B:** Ancho del piso.

A continuación, se evalúa el desempeño de los modelos de pisos debido a los ratios complementarios.

- *Evaluación de Deflexión:* solo 3 (9%) de los modelos cumplieron con el criterio finlandés (R2), siendo estos los pisos #4, #8 y #20, en los cuales sus luces corresponden a la

reducción del 70%. En cambio, en los 32 (100%) modelos, los valores de deflexión respetan los límites establecidos por la norma NCh 1198 of. 2014, tanto en el estado límite de deflexión para PP+SC (R3) y el estado límite para SC (R4).

- *Evaluación de Frecuencia Fundamental:* la frecuencia fundamental mínima exigida por el Eurocódigo es de 9[Hz] (R5), valor que los 32 (100%) modelos de piso sobrepasan. Por tanto, los 32 pisos de madera se encuentran catalogados como pisos de alta frecuencia y no presentarían problemas de resonancia.

Anexo E.- Detalle del indicador VDV_{wb} Para Cada Modelo de Piso

Las tablas E1 y E2 indican los resultados del indicador de desempeño VDV ponderado por la función W_b (VDV_{wb}), representativo ($eVDV_{wb}$) y por jornada ($VDV_{wb,día}$) para cada evento de caminata del Análisis de los Sistemas de Piso en Estudio, los cuales corresponden a una frecuencia de paso de 1.75[Hz]) y para cada punto de medición.

Tabla E1. Detalle del indicador VDV_{wb} para los modelos de piso 1-16. (Elaboración propia).

Caso #	Posición #	Peso [kg]	# Modelo de Piso															
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	56	0.727	0.599	0.493	0.386	0.763	0.666	0.488	0.387	0.684	0.552	0.446	0.365	0.626	0.642	0.487	0.338
2	1	66	0.857	0.706	0.582	0.455	0.899	0.785	0.575	0.456	0.807	0.650	0.525	0.430	0.738	0.757	0.574	0.398
3	1	76	0.987	0.813	0.670	0.524	1.035	0.904	0.662	0.525	0.929	0.749	0.605	0.495	0.850	0.872	0.661	0.458
4	1	86	1.117	0.920	0.758	0.593	1.172	1.023	0.749	0.595	1.051	0.847	0.685	0.560	0.961	0.986	0.748	0.519
5	2	56	0.508	0.418	0.344	0.264	0.528	0.466	0.337	0.269	0.474	0.381	0.310	0.255	0.434	0.445	0.337	0.236
6	2	66	0.599	0.493	0.406	0.311	0.622	0.549	0.397	0.317	0.558	0.449	0.365	0.301	0.511	0.524	0.397	0.278
7	2	76	0.690	0.568	0.467	0.358	0.716	0.632	0.458	0.365	0.643	0.517	0.420	0.346	0.589	0.604	0.457	0.320
8	2	86	0.780	0.643	0.529	0.405	0.810	0.715	0.518	0.413	0.727	0.585	0.476	0.392	0.666	0.683	0.517	0.363
9	3	56	0.786	0.595	0.463	0.340	0.776	0.631	0.438	0.344	0.760	0.578	0.447	0.305	0.681	0.584	0.457	0.329
10	3	66	0.927	0.701	0.546	0.401	0.914	0.743	0.516	0.405	0.896	0.682	0.527	0.360	0.802	0.688	0.539	0.388
11	3	76	1.067	0.808	0.629	0.462	1.053	0.856	0.594	0.467	1.032	0.785	0.607	0.414	0.924	0.793	0.620	0.447
12	3	86	1.208	0.914	0.712	0.522	1.191	0.968	0.673	0.528	1.168	0.888	0.687	0.469	1.045	0.897	0.702	0.506
13	4	56	0.507	0.416	0.349	0.275	0.529	0.466	0.340	0.276	0.476	0.382	0.309	0.255	0.433	0.447	0.338	0.236
14	4	66	0.598	0.490	0.411	0.324	0.624	0.549	0.400	0.325	0.561	0.450	0.364	0.300	0.511	0.526	0.398	0.278
15	4	76	0.688	0.565	0.473	0.373	0.719	0.632	0.461	0.374	0.646	0.518	0.420	0.345	0.588	0.606	0.459	0.320
16	4	86	0.779	0.639	0.535	0.422	0.813	0.716	0.521	0.423	0.731	0.587	0.475	0.391	0.665	0.686	0.519	0.362
17	5	56	0.764	0.577	0.452	0.328	0.762	0.616	0.423	0.335	0.746	0.573	0.437	0.306	0.683	0.578	0.453	0.377
18	5	66	0.901	0.680	0.532	0.386	0.898	0.726	0.499	0.395	0.879	0.675	0.515	0.361	0.805	0.682	0.534	0.445
19	5	76	1.037	0.784	0.613	0.445	1.034	0.836	0.574	0.455	1.012	0.778	0.593	0.416	0.927	0.785	0.615	0.512
20	5	86	1.174	0.887	0.694	0.503	1.170	0.946	0.650	0.515	1.449	0.880	0.672	0.471	1.049	0.888	0.696	0.579
rVDV_{wb,día} (P₈₀)			1.037	0.808	0.629	0.462	1.035	0.856	0.594	0.467	1.012	0.778	0.605	0.430	0.924	0.793	0.620	0.458
eVDV_{wb,día}			2.466	1.921	1.496	1.098	2.462	2.035	1.413	1.110	2.406	1.849	1.439	1.022	2.197	1.885	1.475	1.090

Tabla E2. Detalle del indicador VDV_{wb} para los modelos de piso 16-32. (Elaboración propia).

Caso	Posición	Peso	# Modelo de Piso															
			17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1	1	56	0.770	0.676	0.457	0.366	0.747	0.537	0.409	0.306	0.617	0.533	0.409	0.289	0.771	0.520	0.381	0.291
2	1	66	0.907	0.797	0.538	0.431	0.881	0.633	0.482	0.360	0.727	0.628	0.482	0.341	0.909	0.613	0.450	0.343
3	1	76	1.044	0.918	0.620	0.496	1.014	0.729	0.555	0.415	0.837	0.724	0.555	0.392	1.047	0.706	0.518	0.396
4	1	86	1.182	1.039	0.702	0.561	1.147	0.825	0.629	0.470	0.947	0.819	0.628	0.444	1.184	0.798	0.586	0.448
5	2	56	0.529	0.466	0.315	0.249	0.521	0.374	0.284	0.213	0.429	0.370	0.285	0.201	0.535	0.362	0.267	0.185
6	2	66	0.624	0.549	0.371	0.293	0.614	0.441	0.335	0.251	0.506	0.436	0.335	0.237	0.631	0.427	0.314	0.218
7	2	76	0.718	0.632	0.428	0.338	0.707	0.508	0.386	0.289	0.583	0.502	0.386	0.273	0.727	0.492	0.362	0.251
8	2	86	0.813	0.715	0.484	0.382	0.800	0.574	0.437	0.328	0.659	0.569	0.437	0.309	0.822	0.556	0.409	0.284
9	3	56	0.793	0.627	0.455	0.366	0.816	0.583	0.465	0.322	0.650	0.551	0.442	0.316	0.707	0.578	0.421	0.316
10	3	66	0.935	0.739	0.536	0.432	0.962	0.687	0.548	0.379	0.766	0.650	0.521	0.373	0.834	0.681	0.496	0.372
11	3	76	1.076	0.850	0.617	0.497	1.108	0.791	0.631	0.437	0.882	0.748	0.600	0.429	0.960	0.784	0.571	0.428
12	3	86	1.218	0.962	0.698	0.563	1.254	0.895	0.714	0.494	0.999	0.847	0.679	0.486	1.086	0.887	0.647	0.485
13	4	56	0.530	0.470	0.317	0.255	0.521	0.375	0.286	0.213	0.431	0.372	0.284	0.202	0.536	0.363	0.266	0.187
14	4	66	0.624	0.554	0.374	0.300	0.614	0.442	0.337	0.251	0.508	0.439	0.335	0.238	0.632	0.428	0.313	0.220
15	4	76	0.719	0.638	0.431	0.346	0.707	0.509	0.388	0.289	0.584	0.505	0.386	0.274	0.727	0.493	0.361	0.253
16	4	86	0.813	0.722	0.487	0.391	0.800	0.576	0.439	0.328	0.661	0.572	0.437	0.310	0.823	0.558	0.408	0.287
17	5	56	0.788	0.633	0.460	0.370	0.814	0.587	0.470	0.331	0.656	0.553	0.444	0.326	0.709	0.577	0.424	0.324
18	5	66	0.929	0.746	0.542	0.436	0.960	0.692	0.554	0.390	0.773	0.652	0.524	0.384	0.835	0.680	0.499	0.382
19	5	76	1.069	0.859	0.624	0.502	1.105	0.797	0.638	0.449	0.890	0.750	0.603	0.442	0.962	0.783	0.575	0.440
20	5	86	1.210	0.972	0.706	0.568	1.250	0.902	0.722	0.508	1.007	0.849	0.682	0.501	1.089	0.886	0.651	0.498
rVDV_{wb,día} (P₈₀)			1.069	0.859	0.620	0.497	1.105	0.791	0.629	0.437	0.882	0.748	0.600	0.429	0.962	0.783	0.571	0.428
eVDV_{wb,día}			2.543	2.042	1.474	1.182	2.628	1.882	1.495	1.038	2.099	1.779	1.426	1.021	2.288	1.863	1.359	1.019

Anexo F.- Ejemplo de Cálculo de w , Usando la Ecuación de Diseño Finlandés Modificada

A continuación, se adjunta un ejemplo de cálculo de la deflexión vertical w , usando la ecuación de diseño finlandés modificada en el apartado 5.4.2 (Ecuación 12):

$$w = \min \left\{ \frac{FL^2/[42k_{\delta}(EI)_L]}{FL^3/[48s(EI)_L]} \right\}, k_{\delta} = \sqrt[4]{(EI)_B/(EI)_L}, k_{\delta} \leq \frac{B}{L}$$

Donde:

- w : deflexión vertical debido a una carga puntual, en [mm/N].
- F : carga puntual, en este caso 1000 [N].
- L : luz de apoyo máxima de vigas, en [m].
- $(EI)_L$: rigidez en el eje paralelo al largo de las vigas por metro lineal, [N m²/m].
- $(EI)_B$: rigidez en el eje perpendicular al largo de las vigas por metro lineal. Con un factor 0.21 para la rigidez aportada por las cadenetas. En [N m²/m].
- B : dimensión del piso perpendicular a la dirección de las vigas, en [m].
- s : separación entre vigas, en [m].

Para el ejemplo de cálculo se utilizarán las propiedades físico-mecánicas y dimensiones del modelo de piso #23, las cuales son:

- Módulo de elasticidad de las vigas y cadenas: 10200 [MPa].
- Escuadría de vigas y cadenas (bxh): 41x138[mm].
- Separación entre vigas (s): 31[cm].
- Luz de apoyo de vigas (L): 270[cm].
- Ancho (B): 496[cm].
- Espesor de la placa de terciado (t): 15[mm].
- Módulo de elasticidad de la placa: 6300 [MPa].

Por tanto:

$$k_{\delta} = \sqrt[4]{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}}$$

$$k_{\delta} = \sqrt[4]{\frac{0.21 * 10200 * 10^6 * \frac{1}{12} * 0.041 * 0.138^3 * \frac{1}{1.2} + 6300 * 10^6 * \frac{1}{12} * 1 * 0.015^3}{10200 * 10^6 * \frac{1}{12} * 0.041 * 0.138^3 * \frac{1}{0.31}}}$$

$$k_{\delta} = \sqrt[4]{\frac{17799.83}{295446.16}}$$

$$k_{\delta} = 0.49543, k_{\delta} \leq \frac{B}{L} = 1.837$$

Finalmente:

$$w = \min \left\{ \frac{FL^2/[42k_{\delta}(EI)_L]}{FL^3/[48s(EI)_L]} \right\}$$

$$w = \min \left\{ \frac{1000 * 2.7^2}{42 * 0.49543 * 295446.16} ; \frac{1000 * 2.7^3}{48 * 0.31 * 295446.16} \right\}$$

$$w = \min\{0.00118 ; 0.00447\} \text{ [m]}$$

$$w = \mathbf{1.18 [mm]}$$