

EVALUACIÓN DE LA SERVICIABILIDAD VIBRATORIA DE ENTREPISOS DE MADERA

ASSESSMENT OF VIBRATIONAL PERFORMANCE OF TIMBER FLOORS

Mario W. E. Toledo ⁽¹⁾ (P), **Liz G. Nallim** ⁽²⁾, **Facundo J. Bellomo** ⁽²⁾, **Marcelo Cruz** ⁽³⁾

(1) Magíster en Ing. Estructural, Profesor Adjunto, Fac. de Ingeniería, UNSa - CIUNSa, Salta, Argentina.

(2) Dr. en Ingeniería, Fac. de Ingeniería, UNSa- Investigadora/or CONICET, Salta, Argentina.

(3) Alumno Fac. de Ingeniería, UNSa- becario EVC-CIN 2017, Salta, Argentina.

Dirección de contacto: mwtoledo@unsa.edu.ar; (P) Presentador

Código de identificación: T6-43

Resumen

Los sistemas de entresijos de madera se utilizan en construcciones de edificios públicos y privados en la ciudad de Salta-Argentina. La tipología utilizada está integrada por un sistema machihembrado de tablas que apoyan sobre vigas de madera. La baja masa los hace sensibles a cargas dinámicas inducidas por actividades humanas. La evaluación de las características dinámicas es de fundamental importancia para la verificación y estudio de la serviciabilidad vibratoria. El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio comparativo de los criterios de serviciabilidad (estados límites de servicios) con los análisis de resistencia (estados límites de resistencia), establecidos en el Reglamento de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Para cumplir este objetivo se presentan una serie de resultados, tanto en forma gráfica como en tablas, que permiten comparar y establecer conclusiones en relación a la severidad de los criterios reglamentarios.

En trabajos previos se presentaron y evaluaron resultados experimentales obtenidos del estudio de entresijos de Pino Elliottis construidos en laboratorio con diferentes combinaciones de luces. Esto permitió calibrar un modelo numérico tridimensional que se utiliza en este trabajo. Partiendo de este modelo se realizaron diversos estudios paramétricos considerando como variables la luz y la escuadría de vigas de entresijo. A efectos de lograr una visualización adecuada de los resultados obtenidos se presentan gráficos tridimensionales que permiten apreciar cómo influyen las diferentes combinaciones de luces y escuadrías en las condiciones de serviciabilidad establecidas. A partir de este estudio se pueden inferir conclusiones interesantes en relación a los criterios establecidos por la normativa vigente.

Palabras clave: entresijos de madera; estados límites de servicio; serviciabilidad vibratoria

Abstract

Timber floors systems are widely used in public and private buildings in the city of Salta-Argentina. The typology used, in general, consists of a tongue and a groove system of boards that are supported by wooden beams. The low mass makes them sensitive to dynamic loads by human activities. The evaluation of dynamic characteristics has importance for the verification and study of vibration comfort. The objective of this work is to carry out a comparative study of vibration comfort criteria (serviceability limit state) with the resistance analyzes (ultimate limit state), they were established in the CIRSOC 601 Wood Structures Regulation. To meet this goal a series of results are presented both graphically and in tables, which allow to compare and establish conclusions regarding the severity of the regulatory criteria. In previous work, experimental results obtained from the study of timber floors systems constructed in the laboratory with different combinations of spans are presented. This allowed us to calibrate a three-dimensional numerical model that is used as the basis for this work. Starting from this model, several parametric studies were carried out considering as spans variables and the moment of inertia of beams. In order to obtain an adequate visualization of results, three-dimensional graphics are presented that allow appreciating how the different combinations of variable influence the conditions of serviceability. From this study can be inferred interesting conclusions in relation to the design criteria established by current regulations.

Keywords: timber floors; serviceability limit state; vibration comfort

1. INTRODUCCIÓN

Los entrepisos de madera en la ciudad de Salta – Argentina se utilizan en construcciones destinadas tanto a edificios públicos como privados. En ambos casos la tipología utilizada, en general, está integrada por un sistema machihembrado de tablas que apoyan sobre tirantes de madera. La baja masa de los entrepisos, los hace más sensibles a cargas dinámicas inducidas por actividades humanas tales como caminar o correr, frente a las típicas losas de hormigón o entrepisos de viguetas premoldeadas con capa de compresión. La particularidad mencionada para entrepisos de madera puede afectar sensiblemente la serviciabilidad estructural. Para resolver este problema resulta necesario adecuar y/o optimizar el comportamiento dinámicas de la estructura, ya sea modificando la masa, la rigidez o las propiedades de amortiguamiento. La solución más viable y técnicamente conducente, en general, es modificar la rigidez.

La sensibilidad humana a las vibraciones depende de la frecuencia de resonancia del sistema entrepiso-acción dinámica aplicada (persona caminando). El umbral de percepción humana está en un rango de entre 4 y 8 Hz, por lo que si se “ajusta” el límite de la primera frecuencia a un valor determinado (superior a 8 Hz, por ejemplo) se disminuye el nivel de percepción de este tipo de vibraciones por parte de las personas.

Las primeras propuestas de diseño en términos de serviciabilidad estaban dirigidas a controlar las deflexiones verticales estáticas. Básicamente, se establece una deflexión límite que es función, por ejemplo, de la luz del entrepiso ($L/600$). Otros métodos usaron diferentes parámetros límites, tal como la deflexión debida a una carga puntual unitaria. Trabajos posteriores, demostraron que los sistemas seguían generando problemas de vibraciones excesivas aún cumpliendo las condiciones de control de deflexiones. Luego, las investigaciones se enfocaron de tal manera que sea posible tener en cuenta también las propiedades dinámicas del sistema. Se puede mencionar la consideración de la deflexión por carga puntual unitaria en combinación con la respuesta (en velocidad) a un impulso unitario; frecuencia fundamental y aceleración; y deflexión por carga puntual en combinación con la frecuencia fundamental. Estos artículos dieron origen a diferentes criterios que sirvieron de base para distintas normativas [1]. Algunas de ellas, sólo abordan el problema limitando las deflexiones verticales provocadas por sobrecargas uniformes [2]. Las normas finlandesa y argentina, por ejemplo, adoptan criterios más globales [3]. El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601 [4] fija las condiciones de servicios y resistencia que éstas deben cumplir. Estas condiciones se basan en las recomendaciones de diseño de estructuras de maderas dadas por el EUROCODE 5 [5].

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio comparativo de los criterios de serviciabilidad (estados límites de servicios) con los análisis de resistencia (estados límites de resistencia), establecidos en el Reglamento CIRSOC 601. Para cumplir este objetivo se presentan una serie de resultados, tanto en forma gráfica como en tablas, que permiten comparar y establecer conclusiones en relación a la severidad de los criterios reglamentarios.

Este trabajo se enmarca en Proyectos de Investigación (CIUNSA 2219 y 2436), en el cual se evaluaron las características dinámicas y mecánicas de diferentes elementos estructurales, cuyos estudios sirvieron de base para el presente desarrollo.

2. METODOLOGÍA

2.1 Características de los entrepisos de madera analizados

Los entrepisos analizados corresponden a sistemas constructivos típicos en la zona. La estructura está conformada por vigas separadas entre sí $0,50\text{ m}$ de madera de Pino Elliottis de clase de resistencia tipo 1, según se detalla en la sección 2.2. Las vigas se encuentran conectadas a través de un sistema transversal de tablas que se conectan entre sí por un sistema tipo macho-hembra. Este

sistema machihembrado se une a las vigas a través de tornillos auto-perforantes de 6" x 1½" (3,6mm x 38mm). En la Figura 1 se muestra el esquema analizado.

Con el propósito de realizar un estudio paramétrico del comportamiento de entrepisos, se tomaron como variables el ancho, el alto y la luz de las vigas. Resultaron de esta manera 186 configuraciones diferentes, las cuales se obtienen considerando:

a) Seis (6) momentos de inercia diferentes que resultan de variar el ancho (b) y la altura (d) de la sección transversal de la viga (ver Tabla 1);

b) Treinta y un (31) longitudes diferentes que resultan de variar l desde 2 m hasta 5 m con una variación entre éstas de 0,1 m.

Tabla 1: Configuraciones analizadas

Escuadría vigas	Ancho b [mm]	Alto d [mm]	$I = \frac{bd^3}{12}$ [mm ⁴]
2" x 5"	50	125	8138020.83
2" x 6"	50	150	14062500.00
3" x 6"	75	150	21093750.00
4" x 6"	100	150	28125000.00
3" x 8"	75	200	50000000.00
4" x 8"	100	200	66666666.67

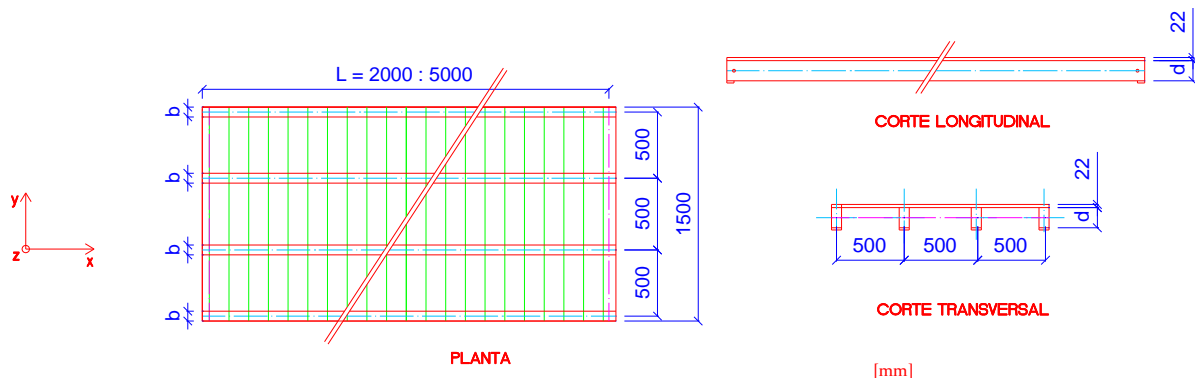


Figura 1: Características geométricas de los entrepisos

2.2 Material, condiciones de apoyo y de servicio, cargas consideradas.

En todos los casos el material considerado corresponde a Pino Elliottis procedente de Misiones (Argentina) caracterizadas con clase de resistencia tipo 1, considerando los valores de referencia dados por el suplemento 1 Tabla S.1.1.3-3 y Tabla S.1.1.3-4 [4]. En todos los casos se consideró un contenido de humedad en servicio que corresponde a los miembros estructurales ubicados en locales ventilados o espacios semicubiertos (estado seco-contenido de humedad promedio anual menor al 16%). La densidad considerada en estas condiciones se muestra en Tabla 2.

Las condiciones de apoyo del entrepiso son variables muy importantes a tener en cuenta al momento de evaluar la respuesta dinámica de este tipo de estructuras. En este trabajo se optó por considerar modelos simples, dejando para estudios posteriores el análisis más detallado de este aspecto. Las condiciones de apoyo propuestas para este análisis consisten en dos bordes paralelos con restricciones traslacionales a nivel de eje de tirantes y dos bordes libres.

Como condiciones de servicio se considera la viga colocada en estado seco en clima interior. Se adoptan las siguientes cargas actuantes $D=0.15$ a 0.26 kN/m^2 variando según la tipología,

sobrecarga de uso correspondiente a oficinas: $L = 2.5 \text{ kN/m}^2$. El borde superior comprimido de la viga se considera impedido de rotar y de desplazarse lateralmente en los extremos y en el centro.

En la Tabla 2 se resumen las características mecánicas consideradas.

Tabla 2: Valores de diseño de referencia Pino Elliottis – CIRSOC 601

Clase de resistencia	F_b [N/mm^2]	F_V [N/mm^2]	$F_{c\perp}$ [N/mm^2]	E [N/mm^2]	ρ [kg/m^3]
1	6.2	0.7	0.9	7700	420

3 CONDICIONES DE SERVICIO VERSUS CONDICIONES DE RESISTENCIA

El Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601, al analizar el comportamiento de los miembros flexionados, establece que para la verificación de las condiciones de servicio se deben controlar las deflexiones y las vibraciones, en tanto que para la verificación de las condiciones de resistencia se debe verificar la resistencia a la flexión, corte y resistencia a la compresión perpendicular a la dirección de las fibras en el apoyo.

3.1 Control de deflexiones

El Reglamento CIRSOC 601 recomienda que se deben cumplir dos condiciones:

a) Las deflexiones instantáneas originadas por las cargas variables $\Delta_{i(V)}$ no debe superar $l/360$:

$$\Delta_{i(V)} \leq l/360; \Delta_{i(L)} = \frac{5 \cdot L \cdot l^4}{384 \cdot E' \cdot I} \leq l/360; E' = E \cdot C_M \cdot C_t \quad (1)$$

Las deflexiones instantáneas, en este caso las debidas sólo a la sobrecarga de servicio L , se calcula con $\Delta_{i(L)}$, L es la sobrecarga de servicio, l es la luz de cálculo, E' es el módulo de elasticidad ajustado; $C_M = C_t = 1$ son los factores de condiciones de servicio y de temperatura los cuales se adoptan con valores unitarios por tratarse de viga en clima interior; I es el momento de inercia de la viga; E es el módulo de elasticidad (Tabla 2).

b) La deflexión final neta originada por la totalidad de las cargas Δ_{fnet} no debe superar $l/300$ y propone la siguiente ecuación para el cálculo de las deflexiones diferidas:

$$\Delta_{fnet} = K_{cr} \cdot \Delta_{i(LD)} + \Delta_{i(CD)} \leq l/300 \quad (2)$$

donde Δ_{fnet} es la deflexión neta final producida por la totalidad de las cargas; K_{cr} es el factor de deflexión dependiente del tiempo, se adopta en este caso $K_{cr} = 1,5$ (viga cargada en estado seco y con una condición de servicio que corresponde al estado seco); $\Delta_{i(LD)}$ y $\Delta_{i(CD)}$ son la deflexión instantánea producida por las cargas de larga duración y la deflexión por las cargas de corta duración, respectivamente. Las deflexiones instantáneas debidas al peso propio D se calculan con la siguiente expresión:

$$\Delta_{i(D)} = \frac{5 \cdot D \cdot l^4}{384 \cdot E' \cdot I} \quad (3)$$

En las Tablas 3 y 4 se muestran las deflexiones instantáneas originadas por las cargas variables $\Delta_{i(V)}$ y la deflexión final neta originada por la totalidad de las cargas. En ambas tablas se ha incluido una última fila que contiene los resultados límites calculados según lo establecido por el Reglamento CIRSOC 601 para cada luz analizada. Asimismo, es posible observar con otro color las tipologías de vigas que cumplen con la prescripción reglamentaria. En ambas tablas queda claro que las tipologías que se adecúan a los requerimientos límites se encuentran por debajo de la diagonal de estas tablas, lo cual es coherente desde el punto de vista conceptual.

Tabla 3: Deflexión instantánea debida a las acciones variables $\Delta_{i(v)}$ [mm] – CIRSOC 601

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	4.2	5.1	6.1	7.3	8.6	10.1	11.9	13.8	16.0	18.4	21.0	24.0	27.2	30.8	34.7	39.0	43.6	48.7	54.2	60.1	66.5	73.4	80.8	88.8	97.4	106.5	116.3	126.7	137.9	149.7	162.3
2"x6"	2.4	2.9	3.5	4.2	5.0	5.9	6.9	8.0	9.2	10.6	12.2	13.9	15.8	17.8	20.1	22.6	25.2	28.2	31.3	34.8	38.5	42.5	46.8	51.4	56.3	61.6	67.3	73.3	79.8	86.7	93.9
3"x6"	1.6	1.9	2.3	2.8	3.3	3.9	4.6	5.3	6.2	7.1	8.1	9.3	10.5	11.9	13.4	15.0	16.8	18.8	20.9	23.2	25.7	28.3	31.2	34.3	37.6	41.1	44.9	48.9	53.2	57.8	62.6
4"x6"	1.2	1.5	1.8	2.1	2.5	2.9	3.4	4.0	4.6	5.3	6.1	6.9	7.9	8.9	10.0	11.3	12.6	14.1	15.7	17.4	19.2	21.2	23.4	25.7	28.2	30.8	33.7	36.7	39.9	43.3	47.0
3"x8"	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.7	1.9	2.2	2.6	3.0	3.4	3.9	4.4	5.0	5.6	6.3	7.1	7.9	8.8	9.8	10.8	11.9	13.2	14.5	15.8	17.3	18.9	20.6	22.4	24.4	26.4
4"x8"	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	1.2	1.4	1.7	1.9	2.2	2.6	2.9	3.3	3.8	4.2	4.8	5.3	5.9	6.6	7.3	8.1	9.0	9.9	10.8	11.9	13.0	14.2	15.5	16.8	18.3	19.8
Condición: < l/360	5.6	5.8	6.1	6.4	6.7	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6	8.9	9.2	9.4	9.7	10.0	10.3	10.6	10.8	11.1	11.4	11.7	11.9	12.2	12.5	12.8	13.1	13.3	13.6	13.9

Tipologías que cumplen con la condición $\Delta_{i(v)} \leq l/360$

Tabla 4: Deflexiones neta final $\Delta_{fnet} = K_{cr} \cdot \Delta_{i(LD)}$ [mm]- CIRSOC 601

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	6.6	8.0	9.7	11.5	13.7	16.1	18.8	21.9	25.3	29.2	33.4	38.1	43.2	48.9	55.1	61.9	69.2	77.3	86.0	95.4	105.5	116.5	128.3	141.0	154.5	169.1	184.6	201.2	218.9	237.7	257.7
2"x6"	3.8	4.7	5.6	6.7	7.9	9.4	10.9	12.7	14.7	16.9	19.4	22.1	25.1	28.4	32.0	35.9	40.2	44.9	49.9	55.4	61.3	67.7	74.5	81.9	89.8	98.2	107.3	116.9	127.2	138.1	149.7
3"x6"	2.6	3.1	3.8	4.5	5.4	6.3	7.4	8.6	9.9	11.4	13.1	14.9	16.9	19.2	21.6	24.2	27.1	30.3	33.7	37.4	41.4	45.7	50.3	55.2	60.6	66.3	72.4	78.9	85.8	93.2	101.0
4"x6"	2.0	2.4	2.9	3.4	4.1	4.8	5.6	6.5	7.5	8.7	9.9	11.3	12.9	14.5	16.4	18.4	20.6	23.0	25.6	28.4	31.4	34.7	38.2	41.9	46.0	50.3	54.9	59.8	65.1	70.7	76.6
3"x8"	1.1	1.3	1.6	1.9	2.3	2.7	3.2	3.7	4.2	4.9	5.6	6.4	7.2	8.2	9.2	10.4	11.6	12.9	14.4	16.0	17.7	19.5	21.5	23.6	25.9	28.3	30.9	33.7	36.6	39.8	43.1
4"x8"	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	2.1	2.4	2.8	3.2	3.7	4.3	4.9	5.5	6.2	7.0	7.9	8.8	9.8	11.0	12.2	13.4	14.8	16.3	18.0	19.7	21.5	23.5	25.6	27.9	30.3	32.8
Condición: < l/300	6.7	7.0	7.3	7.7	8.0	8.3	8.7	9.0	9.3	9.7	10.0	10.3	10.7	11.0	11.3	11.7	12.0	12.3	12.7	13.0	13.3	13.7	14.0	14.3	14.7	15.0	15.3	15.7	16.0	16.3	16.7

Tipologías que cumplen con la condición $\Delta_{fnet} \leq l/300$

3.2 Control de Vibraciones inducidas por el tránsito humano

Para minimizar las vibraciones originadas por el tránsito humano el Reglamento CIRSOC 601 propone: a) controlar la rigidez del entrepiso a través de asegurar un valor mínimo de su frecuencia natural de vibración f_1 ; y b) limitar su deflexión instantánea bajo la acción de una carga concentrada de $1kN$.

a) De no emplearse métodos más precisos de cálculo, para entrepisos simplemente apoyados, se recomienda que la frecuencia natural de vibración sea superior a $8 Hz$, la que se puede calcular con la siguiente expresión:

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{E'I}{m_{ua}}} > 8 Hz \quad (4)$$

Donde l es la luz de cálculo, E' es el módulo ajustado Ec. (1); I es el momento de inercia de la sección transversal de los miembros existentes en una franja de entrepiso con ancho igual a $1 m$ y m_{ua} es la masa del entrepiso por unidad de área. En Tabla 5 se muestra las frecuencias fundamentales obtenidas utilizando este criterio.

Tabla 5: Frecuencia fundamental $f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{E'I}{m_{ua}}}$ [Hz] CIRSOC 601 (considerando D)

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	36.5	33.1	30.2	27.6	25.4	23.4	21.6	20.0	18.6	17.4	16.2	15.2	14.3	13.4	12.6	11.9	11.3	10.7	10.1	9.6	9.1	8.7	8.3	7.9	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.1	5.8
2"x6"	46.4	42.0	38.3	35.1	32.2	29.7	27.4	25.4	23.7	22.0	20.6	19.3	18.1	17.0	16.0	15.1	14.3	13.5	12.8	12.2	11.6	11.0	10.5	10.0	9.6	9.2	8.8	8.4	8.0	7.7	7.4
3"x6"	51.8	47.0	42.8	39.1	36.0	33.1	30.6	28.4	26.4	24.6	23.0	21.5	20.2	19.0	17.9	16.9	16.0	15.1	14.3	13.6	12.9	12.3	11.7	11.2	10.7	10.2	9.8	9.4	9.0	8.6	8.3
4"x6"	55.3	50.2	45.7	41.8	38.4	35.4	32.7	30.3	28.2	26.3	24.6	23.0	21.6	20.3	19.1	18.1	17.1	16.2	15.3	14.5	13.8	13.2	12.5	12.0	11.4	10.9	10.5	10.0	9.6	9.2	8.8
3"x8"	73.7	66.9	60.9	55.8	51.2	47.2	43.6	40.5	37.6	35.1	32.8	30.7	28.8	27.1	25.5	24.1	22.8	21.5	20.4	19.4	18.4	17.5	16.7	16.0	15.2	14.6	13.9	13.4	12.8	12.3	11.8
4"x8"	78.0	70.7	64.4	59.0	54.1	49.9	46.1	42.8	39.8	37.1	34.7	32.5	30.5	28.6	27.0	25.5	24.1	22.8	21.6	20.5	19.5	18.6	17.7	16.9	16.1	15.4	14.7	14.1	13.5	13.0	12.5

Tipologías que cumplen con la condición $f_1 > 8 Hz$

El cálculo que se muestra en Tabla 5 se realizó con la masa por unidad de área m_{ua} correspondiente a la carga permanente D , el Manual de Aplicación de los Criterios de Diseño adoptados en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera [6], recomienda estimar también

la frecuencia f_1 suponiendo que un porcentaje de la sobrecarga de uso L actúa en forma simultánea con el peso propio. En Tabla 6 se muestra el cálculo de la frecuencia fundamental considerando la presencia simultánea de $D+0,5L$.

Tabla 6: Frecuencia fundamental $f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{E'I}{m_{ua}}} [Hz]$ - CIRSOC 601 (considerando $D+0,5L$)

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	11.7	10.6	9.6	8.8	8.1	7.5	6.9	6.4	6.0	5.6	5.2	4.9	4.6	4.3	4.0	3.8	3.6	3.4	3.2	3.1	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.9
2"x6"	15.3	13.9	12.6	11.6	10.6	9.8	9.0	8.4	7.8	7.3	6.8	6.4	6.0	5.6	5.3	5.0	4.7	4.5	4.2	4.0	3.8	3.6	3.5	3.3	3.2	3.0	2.9	2.8	2.7	2.5	2.4
3"x6"	18.5	16.8	15.3	14.0	12.9	11.9	11.0	10.2	9.4	8.8	8.2	7.7	7.2	6.8	6.4	6.0	5.7	5.4	5.1	4.9	4.6	4.4	4.2	4.0	3.8	3.7	3.5	3.4	3.2	3.1	3.0
4"x6"	21.2	19.2	17.5	16.0	14.7	13.5	12.5	11.6	10.8	10.1	9.4	8.8	8.3	7.8	7.3	6.9	6.5	6.2	5.9	5.6	5.3	5.0	4.8	4.6	4.4	4.2	4.0	3.8	3.7	3.5	3.4
3"x8"	28.2	25.6	23.3	21.3	19.6	18.1	16.7	15.5	14.4	13.4	12.5	11.7	11.0	10.4	9.8	9.2	8.7	8.2	7.8	7.4	7.1	6.7	6.4	6.1	5.8	5.6	5.3	5.1	4.9	4.7	4.5
4"x8"	32.1	29.1	26.5	24.3	22.3	20.6	19.0	17.6	16.4	15.3	14.3	13.4	12.5	11.8	11.1	10.5	9.9	9.4	8.9	8.4	8.0	7.6	7.3	6.9	6.6	6.3	6.1	5.8	5.6	5.4	5.1

Tipologías que cumplen con la condición $f_1 > 8 [Hz]$

- b) La deflexión instantánea producida por una carga concentrada de $1kN$ ubicada en el centro del vano, $\Delta_{i(1kN)}$, no debe exceder los límites indicados:

$$\Delta_{i(1kN)} = \frac{(1kN)l^3}{48E'I} \leq \frac{7,5}{l^{1,2}} [mm] \leq 1,5 [mm] \quad (5)$$

En las Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 7: Deflexión instantánea por carga concentrada $1 kN: \Delta_{i(1kN)} [mm]$ - CIRSOC 601

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	1.33	1.54	1.77	2.02	2.30	2.60	2.92	3.27	3.65	4.05	4.49	4.95	5.45	5.97	6.53	7.13	7.76	8.42	9.12	9.86	10.64	11.46	12.32	13.22	14.16	15.15	16.18	17.26	18.38	19.56	20.78
2"x6"	0.77	0.89	1.02	1.17	1.33	1.50	1.69	1.89	2.11	2.35	2.60	2.87	3.15	3.46	3.78	4.12	4.49	4.87	5.28	5.71	6.16	6.63	7.13	7.65	8.19	8.77	9.36	9.99	10.64	11.32	12.03
3"x6"	0.51	0.59	0.68	0.78	0.89	1.00	1.13	1.26	1.41	1.56	1.73	1.91	2.10	2.30	2.52	2.75	2.99	3.25	3.52	3.80	4.10	4.42	4.75	5.10	5.46	5.84	6.24	6.66	7.09	7.55	8.02
4"x6"	0.38	0.45	0.51	0.59	0.66	0.75	0.85	0.95	1.06	1.17	1.30	1.43	1.58	1.73	1.89	2.06	2.24	2.44	2.64	2.85	3.08	3.32	3.56	3.82	4.10	4.38	4.68	4.99	5.32	5.66	6.01
3"x8"	0.22	0.25	0.29	0.33	0.37	0.42	0.48	0.53	0.59	0.66	0.73	0.81	0.89	0.97	1.06	1.16	1.26	1.37	1.48	1.60	1.73	1.86	2.00	2.15	2.30	2.47	2.63	2.81	2.99	3.18	3.38
4"x8"	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.40	0.45	0.49	0.55	0.60	0.66	0.73	0.80	0.87	0.95	1.03	1.11	1.20	1.30	1.40	1.50	1.61	1.73	1.85	1.98	2.11	2.24	2.39	2.54

Tipologías que cumplen con la condición $\Delta_{i(1kN)} < 1,5 [mm]$

3.2 Verificación de resistencias

El criterio de resistencia que establece CIRSOC 601 se basa en las verificaciones de flexión, corte paralelo a la dirección de las fibras y resistencia a la compresión perpendicular a la dirección de las fibras. Las Expresiones de diseño para la flexión son

$$f_b \leq F'_b; \quad f_b = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{S} = \frac{6M}{bd^2}; \quad F'_b = F_b \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \cdot C_L \cdot C_F \cdot C_r \quad (6)$$

f_b es la tensión producida por el momento flector actuante M . F'_b es la tensión de diseño en flexión ajustada, F_b es el valor de diseño de referencia (Tabla 2); $c_D = 1$ es el factor de duración de la carga, que se adopta unitario para la combinación de carga $D+L$; $C_M = C_t = 1$ ya que la viga se considera en clima interior; c_L es el factor de estabilidad lateral de la viga, se adopta como hipótesis $c_L = 1$ ya que el sistema de tablas machihembrado constituye un arriostramiento continuo del borde comprimido de las vigas con capacidad para prevenir el pandeo lateral y los apoyos extremos están impedidos de desplazarse y rotar; c_r es el factor de distribución lateral de cargas, se adopta $c_r = 1,1$ por ser vigas conectadas por medio de un sistema transversal continuo; C_F es el factor de tamaño dado por:

$$c_F = \left(\frac{150}{d}\right)^{0,2} \leq 1,3 \quad (7)$$

La verificación de la resistencia al corte paralelo a la dirección de las fibras establece:

$$f_v \leq F'_v; \quad f_v = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} = \frac{3 \cdot V}{2 \cdot b \cdot d}; \quad F'_v = F_v \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \quad (8)$$

F'_V y F_V son la tensión de diseño en corte paralelo a las fibras de referencia (Tabla 2) y ajustada, respectivamente; $C_D = C_M = C_t = 1$; V es la reacción o máximo esfuerzo de corte.

La verificación de la resistencia a la compresión perpendicular a la dirección de las fibras en el apoyo (artículo 3.6.2.) está dado por:

$$f_{c\perp} = \frac{V}{b \cdot z} \leq F'_{c\perp} F'_{c\perp} = F_{c\perp} \cdot C_D \cdot C_M \cdot C_t \quad (9)$$

donde $f_{c\perp}$ es la tensión perpendicular a la dirección de las fibras en el apoyo, V está distribuido en el área neta de contacto igual al producto deb (ancho viga) y z es la longitud de apoyo en cada extremo, en este trabajo se adopta $z = 100 \text{ mm}$; $F'_{c\perp}$ y $F_{c\perp}$ son las tensiones de diseño en compresión perpendicular a las fibras de referencia (Tabla 2) y ajustada, respectivamente.

En tablas 8, 9 y 10 se presentan los resultados. En todos los casos se ha resaltado con color verde las tipologías que cumplen con la prescripción reglamentaria.

Tabla 8: Resistencia a flexión $f_b [N/mm^2]$

F'_b	Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
7.1	2"x5"	5.1	5.6	6.1	6.7	7.3	7.9	8.6	9.3	10.0	10.7	11.4	12.2	13.0	13.8	14.7	15.6	16.5	17.4	18.3	19.3	20.3	21.3	22.4	23.5	24.6	25.7	26.9	28.1	29.3	30.5	31.7
6.8	2"x6"	3.5	3.9	4.3	4.7	5.1	5.5	6.0	6.5	6.9	7.4	8.0	8.5	9.1	9.6	10.2	10.8	11.5	12.1	12.8	13.5	14.2	14.9	15.6	16.4	17.1	17.9	18.7	19.6	20.4	21.3	22.1
6.8	3"x6"	2.4	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.4	4.7	5.0	5.4	5.7	6.1	6.5	6.9	7.3	7.7	8.2	8.6	9.1	9.6	10.0	10.5	11.0	11.6	12.1	12.6	13.2	13.8	14.3	14.9
6.8	4"x6"	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.2	5.6	5.9	6.2	6.5	6.9	7.3	7.6	8.0	8.4	8.8	9.2	9.6	10.0	10.4	10.9	11.3
6.4	3"x8"	1.4	1.5	1.6	1.8	2.0	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.2	5.4	5.7	6.0	6.3	6.6	6.9	7.2	7.5	7.8	8.2	8.5
6.4	4"x8"	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.8	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.7	2.8	3.0	3.2	3.4	3.5	3.7	3.9	4.1	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.5	5.7	6.0	6.2	6.5

Tipologías que cumplen con la condición $f_b \leq F'_b$

Tabla 9: Resistencia al corte $f_V [N/mm^2]$

Escuadría\Luz	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.60	4.70	4.80	4.90	5.00
2"x5"	0.32	0.33	0.35	0.37	0.38	0.40	0.41	0.43	0.44	0.46	0.48	0.49	0.51	0.52	0.54	0.56	0.57	0.59	0.60	0.62	0.63	0.65	0.67	0.68	0.70	0.71	0.73	0.75	0.76	0.78	0.79
2"x6"	0.27	0.28	0.29	0.31	0.32	0.33	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46	0.48	0.49	0.50	0.52	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.60	0.61	0.62	0.64	0.65	0.66
3"x6"	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45
4"x6"	0.14	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.27	0.28	0.29	0.29	0.30	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34
3"x8"	0.14	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.27	0.28	0.29	0.29	0.30	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34
4"x8"	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.22	0.23	0.23	0.24	0.24	0.25	0.25	0.26

Tipologías que cumplen con la condición $f_V \leq 0,7N/mm^2$

Tabla 10: Resistencia a la compresión perpendicular a las fibras $f_{c\perp} [N/mm^2]$

Escuadría\Luz	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.60	4.70	4.80	4.90	5.00
2"x5"	0.26	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.38	0.40	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46	0.48	0.49	0.50	0.52	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.60	0.61	0.62	0.63	0.65	0.66
2"x6"	0.27	0.28	0.29	0.31	0.32	0.33	0.35	0.36	0.37	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46	0.48	0.49	0.50	0.52	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.60	0.61	0.62	0.64	0.65	0.66
3"x6"	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45
4"x6"	0.14	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.27	0.28	0.29	0.29	0.30	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33	0.34
3"x8"	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.44	0.45
4"x8"	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17	0.18	0.19	0.19	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.23	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34	0.35

Tipologías que cumplen con la condición $f_{c\perp} \leq F'_{c\perp} = 0,9 N/mm^2$

4. MODELACIÓN NUMÉRICA

Toledo y colaboradores [4] realizaron modelaciones tridimensionales de entrepisos con tipologías y materiales similares, utilizando el programa comercial de elementos finitos SAP 2000 [7]. Las vigas fueron modelados utilizando elementos sólidos tipo "Solid 3D", en tanto que el sistema de tablas machimbradas se simuló con elementos lámina tipo "Shell thin". Las conexiones entre las tablas y los tirantes con tornillos fueron modeladas de acuerdo a lo propuesto por Glisovic *et al.* [8], empleando elementos de conexión tipo "Link 2 nodos" considerándolos como vínculos elásticos y cuyas características se resumen en la Tabla 11.

En la Figura 2 se muestran las formas modales asociadas a los dos primeros modos flexionales.

Tabla 11: Características mecánicas elementos de Conexión

Elemento	Rigidez axial [N/mm]	Rigidez al corte [N/mm]	Rigidez rotacional [N-mm]
Conectores Link	$1,2 \times 10^9$	$1,2 \times 10^3$	180

En las Tablas 12 a 16 se muestran los resultados obtenidos con la modelación tridimensional con elementos finitos. En todos los casos se ha resaltado en color verde las tipologías que cumplen con las prescripciones reglamentarias en cada caso.

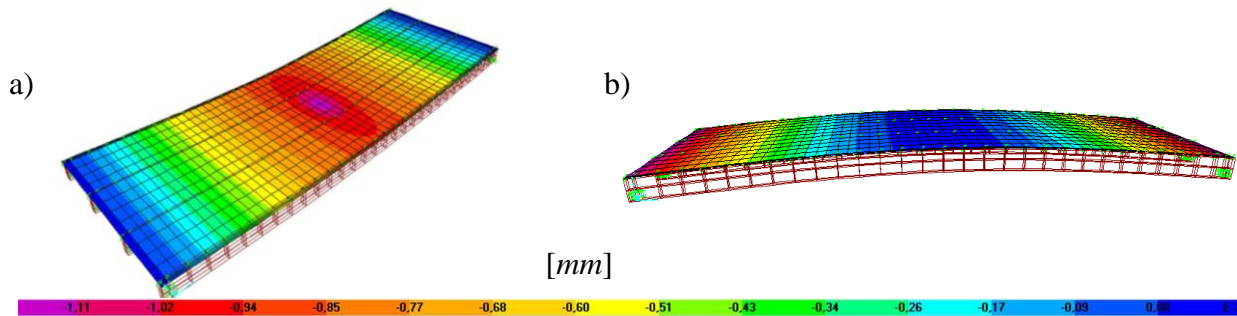


Figura 2: Campo de desplazamiento para entepiso de luz $l=4\text{ m}$, $b=50\text{ mm}$; $d=150\text{ mm}$.

a) Carga unitaria de 1 kN; b) Primer modo de vibración.

La Tabla 12 muestra las deflexiones máximas obtenidas cuando se aplica al modelo una sobrecarga uniformemente distribuida $L=2,5\text{ kN/m}^2$. La Tabla 13 presenta las deflexiones máximas debidas a la acción conjunta del peso propio y la sobrecarga L mayorada por el factor de deflexión dependiente del tiempo K_{cr} . Las Tablas 14 y 15 muestran las frecuencias fundamentales obtenidas considerando, respectivamente, la masa correspondiente al peso propio (D) y la masa debida al peso propio más una participación del 50% de la sobrecarga de servicio considerada (D+0.5L). Finalmente, la Tabla 16 muestra las deflexiones máximas debidas a la aplicación de una carga puntual de 1 kN en el centro de la luz.

Tabla 12: Deflexión instantánea debida a las acciones variables $\Delta_{i(V)} \leq l/360$ [mm] - SAP

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	4.2	5.2	6.1	7.3	8.5	10.1	11.7	13.7	15.7	18.7	21.7	24.2	26.6	30.2	33.8	38.2	42.5	47.6	52.7	58.7	64.6	71.6	78.5	86.5	94.5	103.8	113.1	123.4	133.7	145.5	157.4
2"x6"	2.6	3.1	3.6	4.4	5.1	6.0	6.9	8.1	9.2	10.7	12.1	13.9	15.6	17.8	19.9	22.4	24.9	27.9	30.9	34.4	37.9	42.0	46.0	50.7	55.4	60.9	66.3	72.3	78.3	85.2	92.1
3"x6"	1.8	2.1	2.5	3.0	3.5	4.1	4.7	5.5	6.3	7.2	8.2	9.4	10.5	12.0	13.4	15.1	16.8	18.8	20.8	23.1	25.4	28.2	30.9	34.0	37.2	40.9	44.6	48.6	52.5	57.2	61.8
4"x6"	1.4	1.6	1.9	2.3	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.5	6.2	7.1	8.0	9.0	10.1	11.4	12.7	14.2	15.7	17.4	19.2	21.2	23.3	25.6	28.0	30.8	33.6	36.6	39.6	43.1	46.5
3"x8"	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.1	2.4	2.8	3.2	3.6	4.1	4.6	5.2	5.8	6.5	7.2	8.1	8.9	9.9	10.9	12.1	13.2	14.6	15.9	17.5	19.2	20.8	22.4	24.4	26.4
4"x8"	0.7	0.8	0.9	1.1	1.2	1.4	1.6	1.9	2.1	2.4	2.7	3.1	3.5	3.9	4.4	4.9	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.0	11.0	12.0	13.2	14.5	15.7	16.9	18.4	19.9
Condición: < l/360	5.6	5.8	6.1	6.4	6.7	6.9	7.2	7.5	7.8	8.1	8.3	8.6	8.9	9.2	9.4	9.7	10.0	10.3	10.6	10.8	11.1	11.4	11.7	11.9	12.2	12.5	12.8	13.1	13.3	13.6	13.9

Tabla 13: Deflexión neta final totalidad de las cargas $\Delta_{fnet} = K_{cr} \cdot \Delta_{i(LD)} \leq l/300$ [mm] - SAP

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	6.7	8.2	9.6	11.6	13.5	16.0	18.5	21.7	24.8	29.5	34.3	38.2	42.1	47.9	53.6	60.4	67.3	75.4	83.5	92.9	102.4	113.4	124.4	137.0	149.7	164.4	179.2	195.5	211.7	230.5	249.2
2"x6"	4.1	4.9	5.8	6.9	8.1	9.5	11.0	12.9	14.7	17.0	19.3	22.1	24.9	28.3	31.6	35.7	39.7	44.4	49.2	54.7	60.3	66.8	73.2	80.7	88.1	96.9	105.6	115.1	124.6	135.6	146.6
3"x6"	2.8	3.4	4.0	4.8	5.6	6.6	7.6	8.8	10.06	11.6	13.2	15.1	17.0	19.3	21.6	24.3	27.1	30.3	33.5	37.3	41.1	45.5	49.9	55.0	60.0	66.0	72.0	78.4	84.9	92.4	99.9
4"x6"	2.2	2.7	3.1	3.7	4.3	5.1	5.8	6.8	7.8	8.5	9.3	11.2	13.0	14.8	16.5	18.6	20.7	23.2	25.7	28.5	31.4	34.8	38.1	42.0	45.9	50.5	55.1	60.0	64.8	70.5	76.3
3"x8"	1.4	1.6	1.9	2.2	2.6	3.0	3.4	4.0	4.5	5.2	5.9	6.7	7.5	8.5	9.5	10.7	11.8	13.2	14.6	16.3	17.9	19.8	21.7	23.9	26.0	28.7	31.3	34.0	36.8	40.0	43.2
4"x8"	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.4	2.7	3.1	3.5	4.0	4.6	5.2	5.8	6.6	7.3	8.2	9.1	10.2	11.3	12.5	13.8	15.2	16.7	18.3	20.0	22.1	24.1	26.2	28.2	30.7	33.1
Condición: < l/300	6.7	7.0	7.3	7.7	8.0	8.3	8.7	9.0	9.3	9.7	10.0	10.3	10.7	11.0	11.3	11.7	12.0	12.3	12.7	13.0	13.3	13.7	14.0	14.3	14.7	15.0	15.3	15.7	16.0	16.3	16.7

Tabla 14: Frecuencia fundamental $f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{E'I}{m_{ua}}} > 8 [Hz]$ - SAP (considerando D)

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	37.0	33.8	30.7	28.2	25.8	23.9	22.0	20.5	19.0	17.8	16.6	15.6	14.6	13.7	12.9	12.2	11.5	10.9	10.3	9.8	9.3	8.9	8.5	8.1	7.7	7.4	7.1	6.8	6.5	6.2	6.0
2"x6"	46.0	42.1	38.2	35.2	32.2	29.8	27.5	25.6	23.7	22.2	20.7	19.4	18.2	17.2	16.1	15.3	14.4	13.7	12.9	12.3	11.7	11.1	10.6	10.1	9.6	9.2	8.8	8.5	8.1	7.8	7.5
3"x6"	50.1	45.8	41.6	38.3	34.9	32.4	29.9	27.9	25.8	24.2	22.5	21.2	19.8	18.7	17.6	16.6	15.7	14.9	14.1	13.4	12.7	12.1	11.5	11.0	10.5	10.1	9.6	9.2	8.8	8.5	8.1
4"x6"	52.6	48.2	43.7	40.3	36.8	34.2	31.5	29.3	27.2	25.4	23.7	22.3	20.8	19.6	18.5	17.5	16.5	15.6	14.8	14.1	13.4	12.7	12.1	11.6	11.0	10.6	10.1	9.7	9.3	8.9	8.6
3"x8"	69.3	63.5	57.7	53.2	48.7	45.2	41.6	38.8	36.0	33.7	31.4	29.5	27.6	26.1	24.5	23.2	21.9	20.8	19.6	18.7	17.7	16.9	16.1	15.4	14.7	14.0	13.4	12.9	12.3	11.9	11.4
4"x8"	72.0	66.1	60.1	55.4	50.7	47.1	43.4	40.4	37.5	35.1	32.7	30.7	28.8	27.2	25.5	24.2	22.8	21.6	20.5	19.5	18.5	17.6	16.8	16.0	15.3	14.6	14.0	13.4	12.9	12.4	11.9

Tabla 15: Frecuencia fundamental $f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{E'I}{m_{ua}}} > 8 [Hz]$ - SAP (considerando $D+0,5L$)

Escuadría\Luz	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0
2"x5"	11.6	10.6	9.7	8.9	8.1	7.6	7.0	6.5	6.0	5.6	5.2	4.9	4.6	4.4	4.1	3.9	3.7	3.5	3.3	3.1	3.0	2.8	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	1.9
2"x6"	14.8	13.6	12.4	11.5	10.5	9.8	9.0	8.4	7.8	7.3	6.8	6.4	6.0	5.7	5.3	5.0	4.7	4.5	4.3	4.1	3.8	3.7	3.5	3.3	3.2	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5
3"x6"	17.6	16.2	14.8	13.7	12.6	11.7	10.8	10.1	9.4	8.8	8.2	7.7	7.2	6.8	6.4	6.0	5.7	5.4	5.1	4.9	4.6	4.4	4.2	4.0	3.8	3.7	3.5	3.4	3.2	3.1	3.0
4"x6"	20.0	18.4	16.7	15.5	14.2	13.3	12.3	11.5	10.6	9.9	9.3	8.7	8.2	7.7	7.3	6.9	6.5	6.2	5.8	5.5	5.3	5.0	4.8	4.6	4.4	4.2	4.0	3.8	3.7	3.5	3.4
3"x8"	25.3	23.4	21.6	20.0	18.5	17.2	16.0	15.0	13.9	13.1	12.2	11.5	10.8	10.2	9.6	9.1	8.6	8.2	7.7	7.4	7.0	6.7	6.3	6.1	5.8	5.5	5.3	5.1	4.9	4.7	4.5
4"x8"	28.0	26.0	24.1	22.4	20.7	19.4	18.0	16.8	15.7	14.7	13.8	13.0	12.2	11.5	10.8	10.3	9.7	9.2	8.7	8.3	7.9	7.5	7.2	6.9	6.6	6.3	6.0	5.8	5.5	5.3	5.1

Tabla 16: Deflexión instantánea por carga concentrada 1 kN: $\Delta_{i(1kN)} < 1,5 [mm]$ - SAP

Escuadría\Luz	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.10	3.20	3.30	3.40	3.50	3.60	3.70	3.80	3.90	4.00	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.60	4.70	4.80	4.90	5.00
2"x5"	1.03	1.16	1.29	1.46	1.62	1.81	2.00	2.21	2.43	2.69	2.95	3.24	3.53	3.85	4.18	4.54	4.91	5.33	5.76	6.22	6.67	7.14	7.62	8.21	8.80	9.54	10.28	10.82	11.35	12.06	12.77
2"x6"	0.70	0.78	0.85	0.95	1.04	1.15	1.26	1.39	1.51	1.67	1.82	1.99	2.16	2.35	2.54	2.75	2.96	3.21	3.46	3.73	4.00	4.29	4.58	4.91	5.24	5.72	6.20	6.47	6.73	7.14	7.55
3"x6"	0.54	0.59	0.65	0.71	0.77	0.85	0.92	1.00	1.09	1.19	1.29	1.41	1.52	1.65	1.78	1.92	2.06	2.23	2.39	2.57	2.75	2.95	3.15	3.37	3.59	3.95	4.30	4.45	4.59	4.86	5.12
4"x6"	0.46	0.50	0.54	0.59	0.64	0.69	0.75	0.81	0.87	0.95	1.03	1.11	1.20	1.29	1.39	1.50	1.60	1.73	1.85	1.99	2.13	2.27	2.42	2.59	2.75	3.05	3.35	3.43	3.51	3.72	3.93
3"x8"	0.36	0.38	0.40	0.43	0.46	0.49	0.52	0.56	0.59	0.64	0.68	0.73	0.78	0.83	0.88	0.94	1.00	1.08	1.15	1.22	1.30	1.38	1.47	1.56	1.65	1.87	2.08	2.08	2.08	2.20	2.32
4"x8"	0.33	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.45	0.47	0.50	0.53	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76	0.81	0.86	0.92	0.97	1.03	1.09	1.16	1.23	1.30	1.48	1.67	1.65	1.62	1.71	1.79

5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A fin de comparar los resultados, se realizaron representaciones gráficas en tres dimensiones (3D), tomando en el plano horizontal las variables empleadas para el estudio paramétrico, es decir la luz (l) y el momento de inercia (I). En el eje vertical se representa de manera adimensional la respuesta estudiada. La adimensionalización se llevó a cabo dividiendo la variable obtenida por el valor límite exigido por la prescripción reglamentaria. De esta forma se define claramente la superficie que limita el comportamiento que se encuentra dentro o fuera de los límites establecidos.

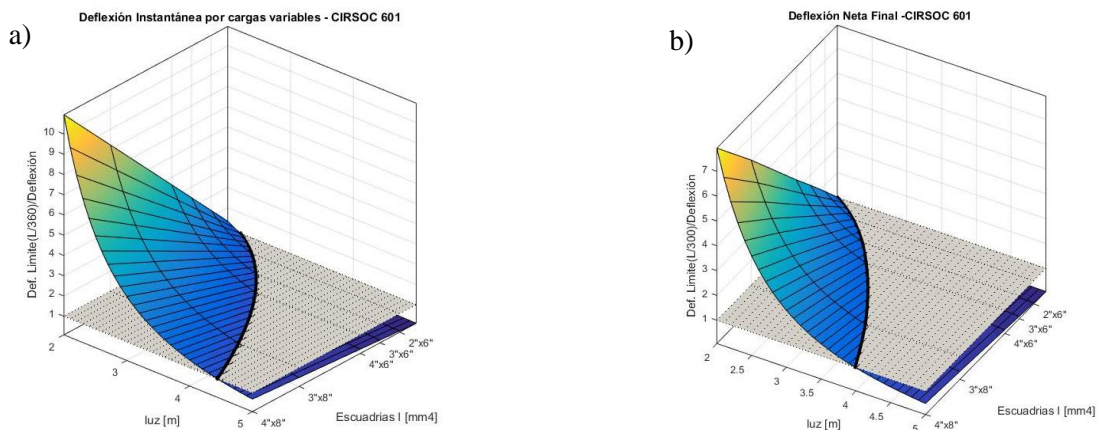


Figura 3: Control de deflexiones – CIRSOC 601: a) Deflexión instantánea por cargas variables variables $\Delta_{i(V)} \leq l/360$; b) Deflexión neta final $\Delta_{fnet} = K_{cr} \cdot \Delta_{i(LD)} \leq l/300$

A efectos de hacer comparables las distintas figuras en todos los casos la representación se ha llevado a cabo de manera que lo que se encuentre por encima del plano límite cumple con los requisitos reglamentarios.

En las Figuras 3 y 4 se muestran las condiciones de servicios: control de deflexión y de vibración, respectivamente, de acuerdo a lo propuesto por CIRSOC 601.

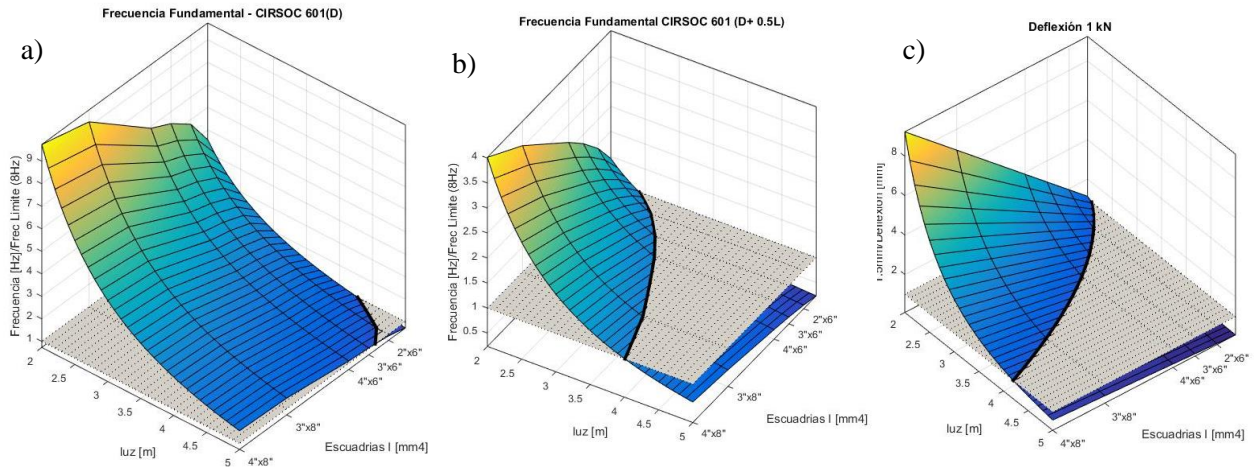


Figura 4: Control de vibraciones – CIRSOC 601: a) Frecuencia fundamental $f_1 > 8 [Hz]$ considerando solo peso propio (D); b) Frecuencia fundamental f_1 considerando (D+0,5L); c) Deflexión instantánea por carga concentrada 1 kN: $\Delta_{i(1kN)} < 1,5 [mm]$.

En la Figura 5 se presentan las condiciones de resistencias. Se observa que tanto la condición de resistencia al corte como de compresión perpendicular a la fibra no son determinantes, en tanto que la condición de flexión es la más importante.

En la Figura 6 se presentan de manera unificada las curvas que se obtienen de la intersección de las superficies de las Figuras 3, 4 y 5 con la superficie de comportamiento límite de las condiciones prescriptas tanto para las condiciones de servicio como de resistencia. En la misma se puede apreciar claramente que el diseño es controlado por las condiciones de servicios a través de la deflexión neta final (Tabla 4). Para el tipo de material y condiciones de contorno estudiadas en este trabajo, las restricciones reglamentarias que más influencia tienen y que por lo tanto son determinantes en el diseño, son la deflexión neta final, la deflexión por carga unitaria 1 kN y la frecuencia debida a D+0.5L. Se observa también, que las condiciones de resistencia (Tabla 8, 9 y 10) para las hipótesis mencionadas, no condicionan el diseño estructural de los entresijos.

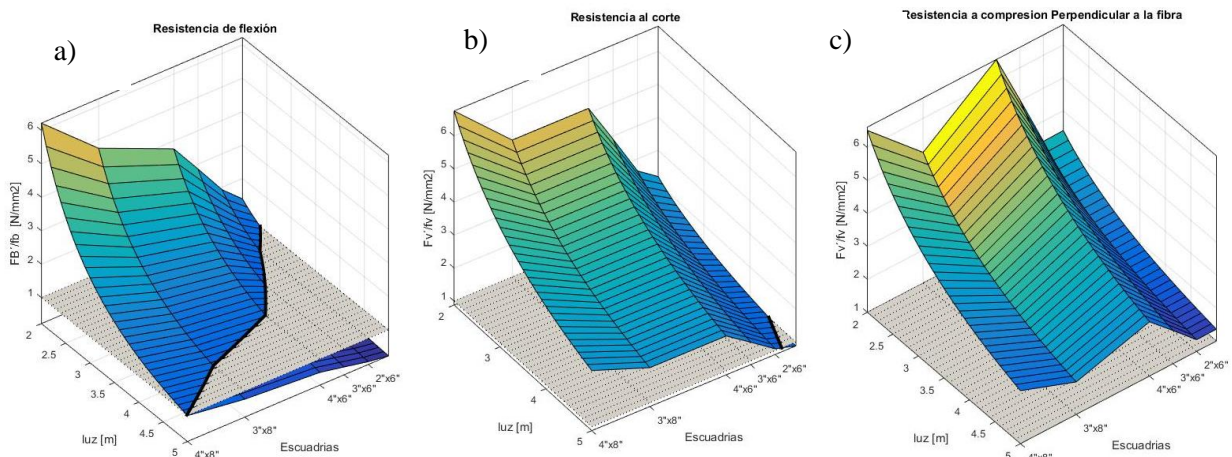


Figura 5: Verificación de resistencias – CIRSOC 601: a) Resistencia a flexión; b) Resistencia al corte; c) Resistencia perpendicular a la fibra

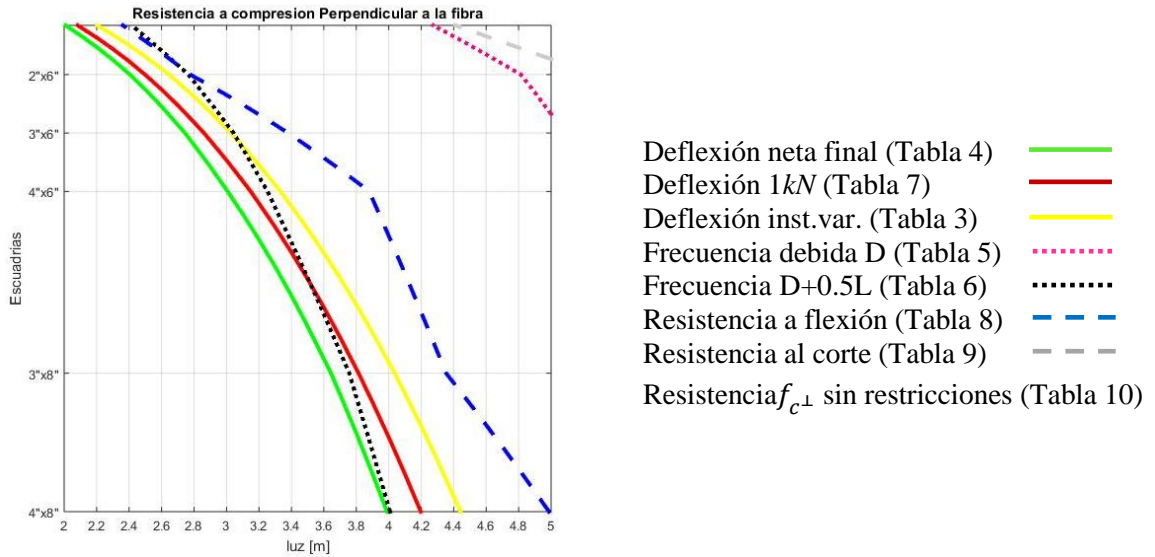


Figura 6: Condiciones de servicio versus condiciones de resistencia – CIRSOC 601

Por último, en las Figuras 7 y 8 se representan las superficies correspondientes al control de deflexiones (Fig.7) y control de frecuencias (Fig.8) obtenidas con los modelos tridimensionales de elementos finitos y aquellas obtenidas empleando las expresiones propuestas en la reglamentación. Se observa una buena concordancia en los resultados obtenidos aplicando ambas metodologías. También es posible notar una mayor dispersión en el caso de la determinación de las deflexiones, lo cual es esperable ya que se trata de la obtención de una respuesta local, mientras que las frecuencias fundamentales corresponden a respuestas globales de la estructura.

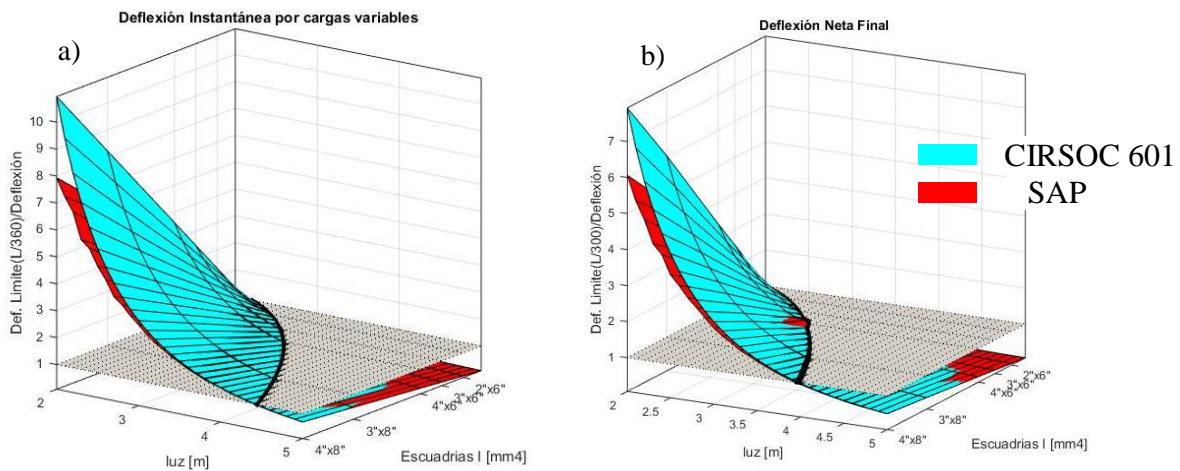


Figura 7: Comparación de resultados CIRSOC – SAP: Control de deflexiones: a) Deflexión instantánea por cargas variables variables; b) Deflexión neta final $\Delta_{fnet} = K_{cr} \cdot \Delta_i(LD) \leq l/300$

6. CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se lleva a cabo un estudio comparativo de los criterios de serviciabilidad vibratoria, deflexiones límites y estados límites de resistencia, establecidos en el Reglamento de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Se presentan una serie de resultados, tanto en forma gráfica como en tablas, que permiten comparar y establecer conclusiones en relación a la severidad y aplicabilidad de los criterios reglamentarios.

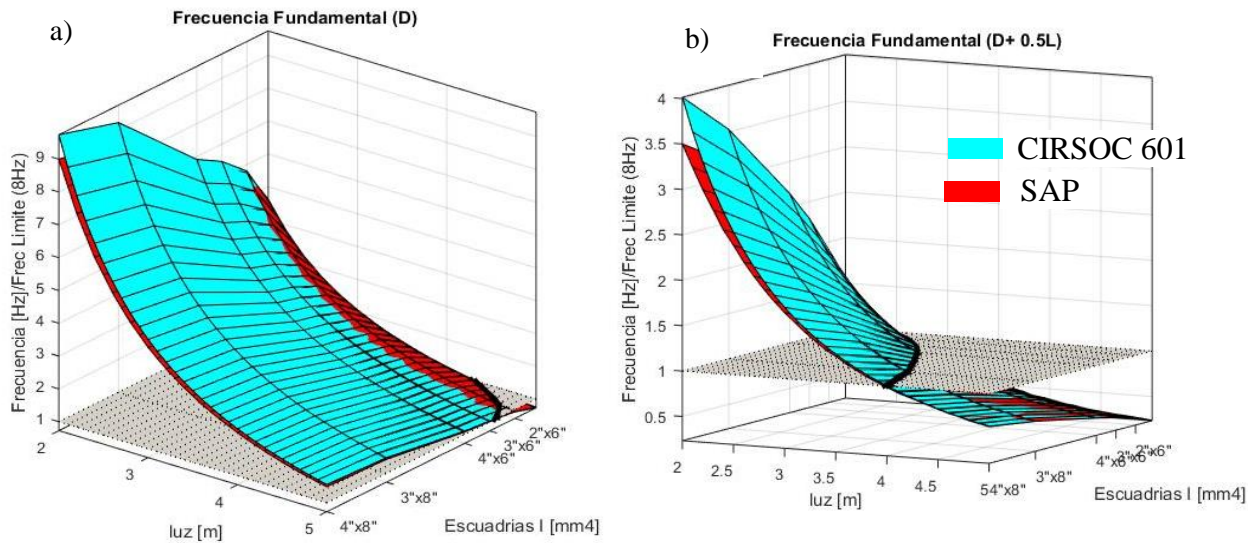


Figura 8: Comparación de resultados CIRSOC – SAP: Control de vibraciones: a) Frecuencia fundamental f_1 considerando (D); b) Frecuencia fundamental f_1 considerando (D+0,5L);

Se realizaron diversos estudios paramétricos considerando como variables la luz y la escuadría de vigas de entrepiso de material y condiciones de contorno fijas, lo que permitió establecer conclusiones respecto a la influencia de las diferentes combinaciones de luces y escuadrías en las condiciones de serviciabilidad establecidas. Los resultados obtenidos demuestran que el diseño es controlado por las condiciones de servicios a través de la deflexión neta final.

En futuros trabajos, se plantea analizar mediante estudios paramétricos similares diferentes condiciones de contorno y tipologías de material.

REFERENCIAS

- [1] Zhang B., Rasmussen B., Jorissen A., Harte, A., ‘Comparison of vibrational serviceability criteria for design of timber floors among the European Union countries’. *Engineering Structures*. **52** (2013) 592-607.
- [2] Opazo A. I., Donoso D. y Benedetti F., ‘Evaluación de la serviciabilidad vibratoria de pisos de madera en viviendas de interés social’. *XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Noviembre 2014, Uruguay. (2014)
- [3] Toledo M.W.E., Nallim L.G., Bellomo F., ‘Evaluación de las características dinámicas y serviciabilidad vibratoria de entresijos de madera’, *XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Noviembre 2016, Asunción, Paraguay.
- [4] Reglamento Argentino de Estructuras de Madera. Reglamento CIRSOC 601. Edición julio 2013. INTI – CIRSOC. www.inti.gov.ar/cirsoc.
- [5] The European Committee for Standardization (CEN), EN 1995-1-1 (2004). EUROCODE 5: Design of timber structures. General – Common rules and rules for buildings.
- [6] Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera CIRSOC 601. Con ejemplos desarrollados y comentados y Tablas auxiliares para el cálculo. Edición julio 2013. INTI-CIRSOC. www.inti.gov.ar/cirsoc.
- [7] CSI. SAP 2000 Versión 14. “Linear and Non-linear static and Dynamic Analysis and Design of Three - Dimensional Structures”. Computers and Structures, Inc. Berkeley, USA. (2014).
- [8] Glisovic I., Stevanovic B. ‘Vibrational behavior of timber floors’. *Proceeding of 11th World Conference on Timber Engineering*, Trentino, June. (2010).