

CAPÍTULO 4

FACTOR DE MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL PARA EDIFICIO HÍBRIDO ESTRUCTURADO EN HORMIGÓN ARMADO Y ELEMENTOS DE MADERA LAMINADA Y CONTRALAMINADA

Fecha de aceptación: 01/07/2024

B. Romero

Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

S. Silva

Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

P. González

Académica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

J. Vielma

Académico, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

RESUMEN: En este trabajo se presenta la determinación del factor de modificación de la respuesta sísmica, R , de un edificio híbrido de 9 pisos, estructurado con dos núcleos de hormigón armado, columnas de madera laminada y losas de madera contralaminada. Cada núcleo está conformado por tres muros de sección transversal en forma de C. Se utiliza el programa computacional ETABS para realizar el análisis sísmico del modelo estructural. El factor R se determina empleando el método contenido en el ATC-19, y se utiliza el método de los coeficientes para determinar el punto de desempeño

de la estructura, como se especifica en FEMA-356. En el análisis se considera que las deformaciones no-lineales se producen en los muros de hormigón armado y que los elementos de madera, así como las conexiones entre elementos de madera y entre elementos de madera y de hormigón armado, se mantienen en el rango lineal-elástico de deformación. Como resultado del estudio, se obtienen valores para R de 5.3, 5.5 y 6; además, se verifica que el edificio satisface las limitaciones de desplazamiento relativo de entrepisos que prescribe la norma chilena de diseño sísmico de edificios NCh 433.

PALABRAS-CLAVE: edificios híbridos en madera, factor R , diseño sísmico, madera contralaminada, madera laminada

ABSTRACT: In this work determination of modification factor of seismic response, R , of a 9 stories hybrid building is presented. The building is structured with two reinforced concrete nucleuses, glued laminated timber columns and cross laminated timber slabs. Each reinforced concrete nucleus is made of three walls of transverse sections in C shape. ETABS computer program is used to carry out seismic analysis of the structural model. Factor R is determined using ATC-19

method and the method of coefficients to determine the point of performance of the structure, as specified in FEMA-356. In the analysis, it is considered that non-linear deformations are produced in reinforced concrete walls, and that the timber elements, as well as connections between timber elements and between timber elements and reinforced concrete, are kept in the elastic-linear deformation rank. As a result of this study, values gotten for R are 5 and 6; moreover, it is verified that the building satisfies limitations of stories drift, prescribed by the Chilean code of buildings seismic design NCH 433.

KEYWORDS: hybrid timber buildings, R factor, seismic design, cross laminated timber, glued laminated timber

INTRODUCCIÓN

La construcción de edificios utilizando el sistema constructivo en madera contralaminada (CLT) se ha incrementado en los últimos 20 años debido a las ventajas que presenta la madera y el sistema CLT; entre ellas, se puede mencionar su capacidad de aislación térmica, que permite ahorro de energía para mantener ambientes confortables en las viviendas, su buen comportamiento sísmico, debido a su alta relación resistencia- peso en comparación con materiales de construcción tradicionales y a su característica de material ecológicamente sustentable y con una baja huella de carbono. [1, 2, 3]. Además, este sistema permite la prefabricación y es industrializable [2] de tal manera que los tiempos de construcción resultan inferiores a aquellos que se requiere en las construcciones con materiales tradicionales. Sin embargo, el sistema CLT solo puede ser utilizado en edificios de mediana altura, particularmente en países que presentan alta sismicidad; por lo tanto, con el objeto de lograr mayores alturas, se debe incorporar en el diseño otros materiales que aporten mayor rigidez al sistema sismorresistente del edificio, como hormigón armado o acero [Quintana 4]. Entonces, en atención a que el sistema CLT así como los sistemas híbridos son innovadores y que su introducción en Chile se encuentra en estudio [5, 6, 7, 8, 9, 10] para generar la normativa que facilite su utilización, en este trabajo se determina el valor del factor de reducción de la respuesta sísmica, R, de un edificio de 9 pisos, conformado por muros de hormigón armado, columnas de madera laminada y losas de madera contralaminada.

MODELO ESTRUCTURAL

El primer piso del edificio analizado, cuya planta se muestra en la Fig. 1, contempla muros y losa de cielo de hormigón armado que se representan con elementos finitos tipo shell-thick. Las losas de los pisos 2 a 9 son de CLT las cuales se modelan como membranas unidireccionales y los elementos perimetrales corresponden a columnas de madera laminada modeladas como elementos tipo frame. En la Fig. 2 se muestra la planta tipo de los pisos 2 a 9 y en la Fig. 3 se presenta una vista estereométrica del edificio.

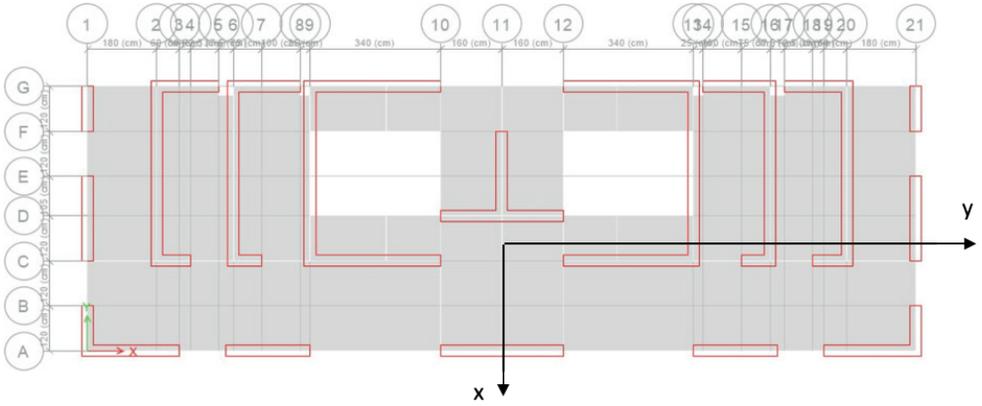


Fig. 1 - Planta del primer piso del edificio

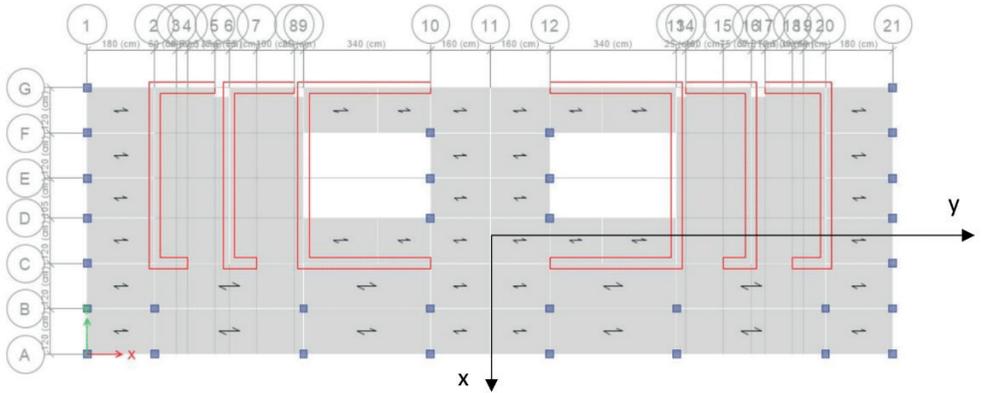


Fig. 2 - Planta tipo de los pisos 2 a 9 del edificio

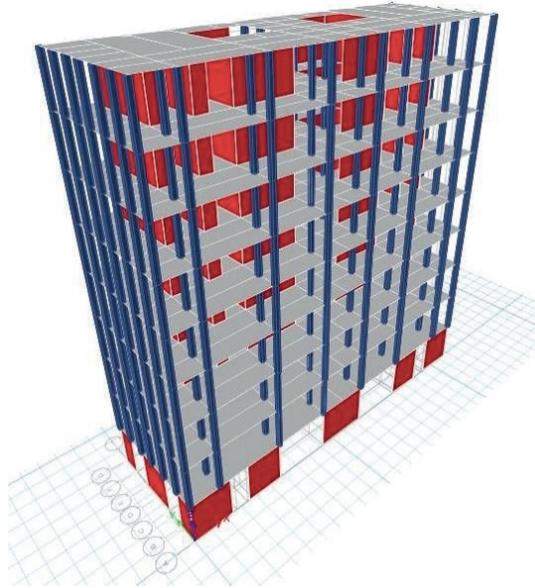


Fig. 3 – Vista estereométrica del edificio

La determinación de las propiedades dinámicas del edificio se realiza considerando comportamiento lineal-elástico del modelo.

Para el cálculo del valor del factor de modificación de la respuesta sísmica se incluye la no-linealidad en los 6 muros de los dos núcleos de hormigón armado del modelo estructural.

FACTOR DE MODIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA

Para determinar el factor de modificación de la respuesta sísmica, R , se utiliza el método descrito en el documento ATC-19 [11], de acuerdo con la Ec. (1)

$$R = R_s R_\mu R_R \quad (1)$$

Donde:

R_s : Factor de resistencia, que depende de los cortes basales último y de diseño.

R_μ : Factor de ductilidad, que depende del período natural del edificio.

R_R : Factor de redundancia que, en este caso, se considera unitario.

En conformidad con ATC-19, el factor de resistencia se determina aplicando la Ec. (2)

$$R_s = \frac{V_0}{V_d} \quad (2)$$

Los términos de la Ec. (2) corresponden a lo que se indica [11]:

V_0 : Corte basal máximo en el estado límite de respuesta del edificio en un análisis no-lineal estático.

V_d : Corte basal de diseño.

El factor de ductilidad depende del valor del período natural, de acuerdo con las expresiones de la Ec. (3) que se muestran a continuación [11]:

$$R_\mu = \begin{cases} 1.0 & T_n \leq 0.03 \\ \sqrt{2\mu - 1} & 0.12 \leq T_n \leq 0.5 \\ \mu & T_n \geq 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

Donde T_n es el período natural del edificio, medido en segundos.

Los valores intermedios del factor de ductilidad se obtienen por interpolación lineal entre los valores límite de los rangos especificados en la Ec. (3).

Para determinar los valores de los factores R_s y R_μ se realiza un análisis no-lineal mediante el método estático incremental y el método de las áreas equivalentes para obtener la curva de capacidad del edificio [12]. En las Fig. 4, 5 y 6 se muestran las curvas de capacidad idealizadas del edificio, en las direcciones x, y positivo e y negativo, respectivamente.

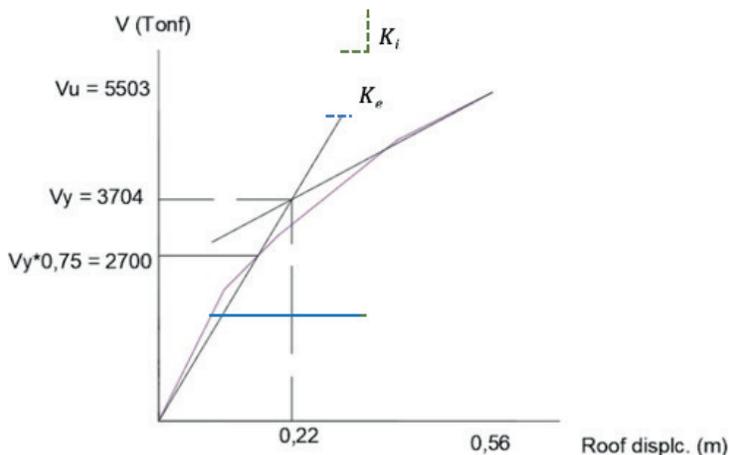


Fig. 4 – Curva idealizada de desempeño en la dirección x del edificio.

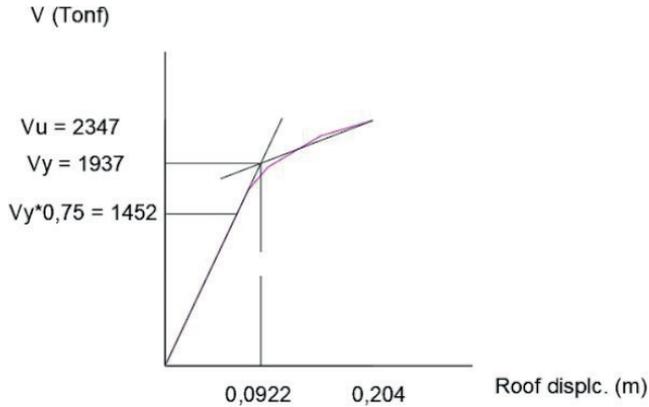


Fig. 5 – Curva idealizada de desempeño en la dirección y positiva del edificio.

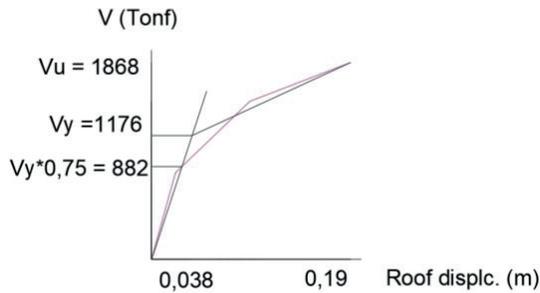


Fig. 6 – Curva idealizada de desempeño en la dirección y negativa del edificio.

El punto de desempeño de la estructura se determina empleando el método de los coeficientes [12]. En este procedimiento, se determina el desplazamiento objetivo con la expresión siguiente [12], Ec. (4):

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (4)$$

Donde:

$C_0 = 1.3$: Factor que relaciona el desplazamiento espectral de un sistema de un grado de libertad con el desplazamiento de techo del edificio.

$C_1 = 1.4$: Factor que relaciona el desplazamiento no lineal máximo esperado con el desplazamiento de la respuesta lineal elástica del edificio.

$C_2 = 1.0$: Factor que representa el efecto de la degradación de rigidez y de la pérdida de resistencia del sistema.

$C_3 = 1.0$: Factor que representa el incremento de desplazamiento debido al efecto dinámico $P - \Delta$.

S_a : Valor del espectro de respuesta de aceleraciones para el período efectivo del edificio en la dirección de análisis.

T_e : Período efectivo fundamental del edificio en la dirección de análisis, según Ec. (5) [12].

g : Aceleración de gravedad.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (5)$$

T_i : Período fundamental de un modelo lineal-elástico del edificio.

K_i : Rigidez lateral elástica del edificio obtenido de la curva corte basal-deformación de techo del edificio en la dirección de análisis. Ver Fig. 4.

K_e : Rigidez lateral efectiva del edificio obtenido de la curva corte basal-deformación de techo del edificio en la dirección de análisis. Ver Fig. 4.

En la Tabla 1 se muestran los valores de los parámetros del edificio que se obtienen de las curvas de capacidad, Figs. 4, 5 y 6 y de la aplicación de las ecuaciones 4 y 5 [13].

Los valores de los factores de resistencia y de ductilidad, así como los valores de los parámetros que permiten su cálculo, obtenidos de las curvas de capacidad idealizadas y de las Ecs. 1, 2 y 3, se incluyen en la Tabla 2 [13].

Parámetro	Dirección x	Dirección y positiva	Dirección y negativa
T_i	0,35	0,27	0,27
K_e	16836	21000	30947
K_i	20300	21008	35780
T_e	0,38	0,27	0,29
T_S	1,04	1,04	1,04
$S_d(T_e)$	13,66	11,79	11,90
δ_t	0,093	0,037	0,035

Tabla 1 – Períodos equivalentes y desplazamientos objetivo del edificio [13].

Parámetro	Dirección x	Dirección y positiva	Dirección y negativa
V_0 (tonf)	5503	2347	1868
V_d (tonf)	1860	777	1058
R_S	2,96	3,02	1,76
δ_{max} (m)	0,56	0,20	0,19
δ_y (m)	0,22	0,092	0,038
R_μ	2,02	1,83	3,00
R	6,0	5,5	5,3

Tabla 2 – Factores de resistencia, de ductilidad y de modificación de la respuesta sísmica [13].

ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL

El análisis modal espectral se realiza empleando la norma chilena NCh 433 [14]. Los parámetros asociados a las características de sitio y al sistema estructural del edificio se muestran en la Tabla 3. Las propiedades del modelo lineal y los parámetros globales de diseño del edificio se incluyen en la Tabla

En las Figs. 7 y 8 se exponen los espectros de aceleraciones, determinados en conformidad con las disposiciones de la norma chilena NCh 433 [14], en las direcciones x e y, respectivamente.

Parámetro	Concepto o valor	Parámetro	Valor
Sistema y material estructural	Sin clasificación	R	5,3 ⁽¹⁾
		R_0	5,3 ⁽²⁾
Categoría del edificio	II	I	1
Zona sísmica	3	A_0	0,4 g
Tipo de suelo	D	S	1,2
		T_0	0,75
		T'	0,85
		n	1,8
		p	1

(1) Se utiliza el valor menor de R obtenido en el análisis estático incremental

(2) Para determinar los espectros de aceleraciones de diseño se asigna a R_0 el mismo valor obtenido para R

Tabla 3 – Parámetros de sitio de emplazamiento y de uso del edificio.

Parámetro	Valor
Peso sísmico (tonf)	1659
T_x^*	0,35
T_y^*	0,27
R_x^*	3,4
R_y^*	3,2

Tabla 4 – Propiedades dinámicas del edificio [13].

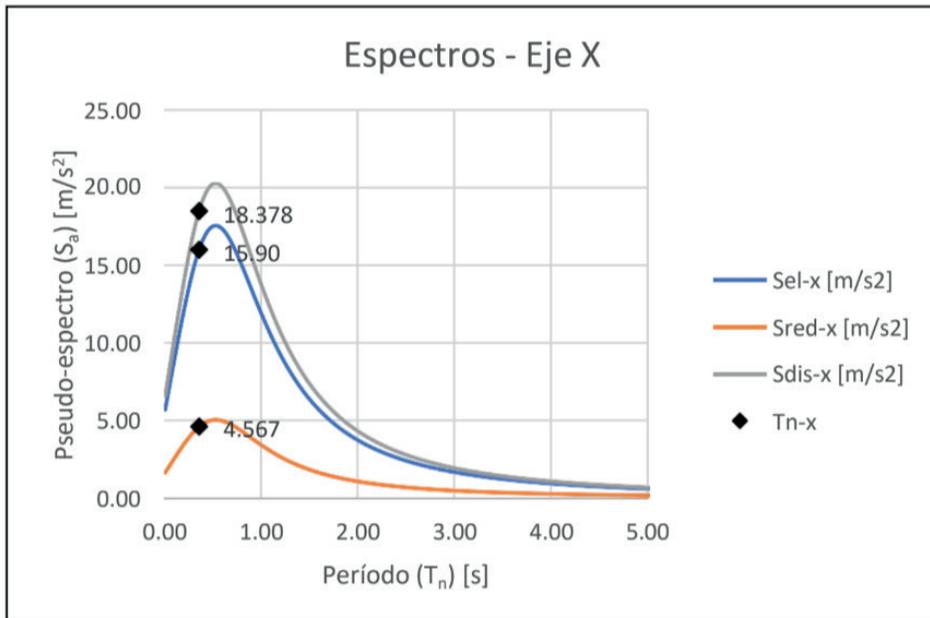


Fig. 7 – Espectros en la dirección x [13].

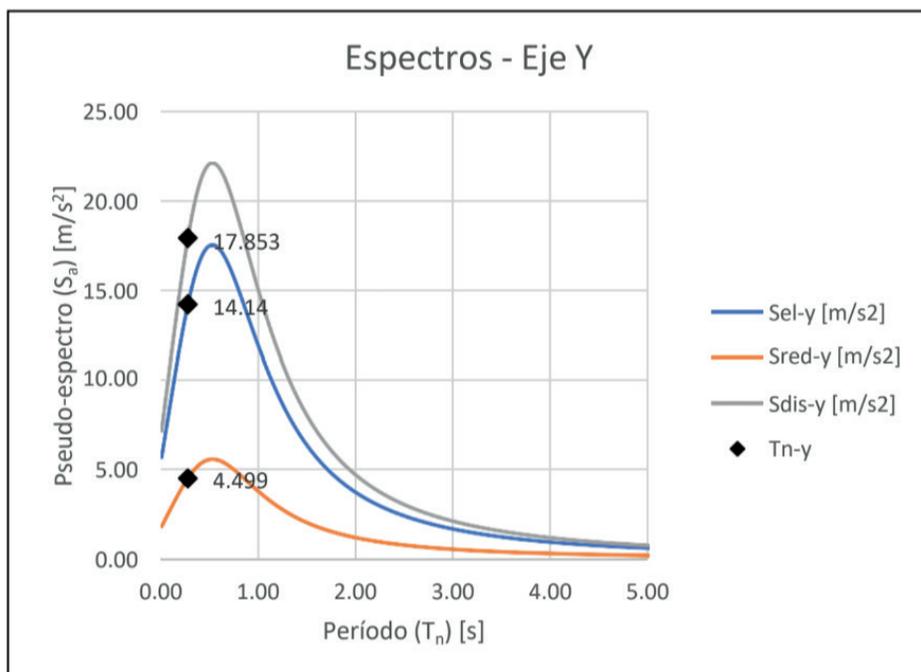


Fig. 8 – Espectros en la dirección y [13].

En la Tabla 5 se muestran los resultados del análisis modal espectral, cortes basales y las derivas máximas de entrepiso del edificio. Con estos resultados, se verifica que el edificio de 23,4 m de altura total y de 2,6 m de altura de entre-piso satisface los valores máximos de desplazamiento relativo que establecen las disposiciones de la norma chilena NCh 433 [14].

Parámetro	Dirección x	Dirección y
Corte basal (tonf)	408	411
Δ_{max} entre piso, centro de masa (mm)	3,3	2,1
Δ_{max} entre piso, centro de masa NCh433, (mm)	5,2	5,2
Δ_{max} entre piso, rotacional (mm)	0,41	0,03
Δ_{max} entre piso, rotacional NCh433, (mm)	2,6	2,6

Tabla 5 – Resultados del análisis modal espectral del edificio [13].

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado el análisis no-lineal estático de un edificio híbrido madera-hormigón armado de 9 pisos para obtener valores del factor de reducción de la respuesta sísmica, R. Se ha utilizado la metodología del ATC-19 y del FEMA-356, determinándose valores de 5.3, 5.5 y 6.0 para este factor. Además, en atención a que se trata de un sistema estructural innovador para Chile, se efectúa el análisis modal espectral utilizando un modelo lineal-elástico del edificio y las disposiciones de la norma chilena NCh433. La aplicación de esta norma determina valores de R^* menores a 4.0 para obtener los espectros de diseño. Los resultados del análisis modal espectral permiten concluir que el edificio satisface los valores máximos admisibles de desplazamientos contenidos en las disposiciones de esta norma.

REFERENCIAS

1. Izzi M, Casagrande D, Bezzi S, Pasca D, Follesa M, Tomasi R. Seismic behaviour of cross-laminated timber structures: A state-of-the-art review. *Engineering Structures* 2018; 170: 42-52.
2. Brandner R, Flatscher G, Ringhofer A, Schickhofer G, Thiel A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. *Eur. J. Wood Prod.* 2016; 74: 331-351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>.
3. FPIInnovations. Canadian CLT Handbook. Ed by Karacabeyli E, Gagnon S. 2019. Digital Format ISBN 978-0-86488-592-0. www.fpinnovations.ca.
4. Quintana G, Carradine D, Bazaev R. State of the art and practice of seismic-resistant hybrid timber structures. *Eur. J. of Wood and Wood Prod.* Published online: 15 October 2020; <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01556-3>.

5. González P, Saavedra E, Pérez E, Burgos C, Piña F, Wagner M. 2015. Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios. Ed. Universidad de Santiago de Chile. <https://documentcloud.adobe.com/link/review?uri=urn:aaid:scds:US:ff289480-573c-4d0d-9d72-75162972456e>
6. González P, Burgos C, Saavedra E, Burgos C, Valdivieso D, Wagner M. 2019. Sistema constructivo en madera contralaminada para edificios. Ed. Universidad de Santiago de Chile. <https://documentcloud.adobe.com/link/review?uri=urn:aaid:scds:US:ebdb215c-dc61-4513-bee0-2a26a2db1ceb>
7. Ulloa C, Valdivieso D, González P, Burgos C. 2019. Diseño de edificio de mediana altura en madera contralaminada (CLT) de pino Oregón mediante el uso de normas chilenas y manuales americanos. *Proceedings XII Congreso chileno de sismología e Ingeniería antisísmica*. Valdivia, Chile.
8. Valdivieso D, Ulloa C, Ríos L, González P, Pérez E, Burgos C. 2019. Determinación del factor de modificación de la respuesta estructural para edificio estructurado con muros y losas de madera contralaminada (CLT). *Proceedings XII Congreso chileno de sismología e Ingeniería antisísmica*. Valdivia, Chile.
9. Rojas X. 2020. Estado del arte de edificios híbridos de hormigón armado y madera contralaminada. Proyecto de título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
10. Ávila F, Dechent P, Opazo A. 2021. Seismic Behaviour evaluation of CLT horizontal diaphragms on hybrid buildings with reinforced concrete shear walls. *Engineering Structures*. 244. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112698>.
11. ATC-19. 1995. Structural response modification factors. National Science Foundation. National Center of Earthquake Engineering Research. Redwood City, California, USA.
12. FEMA – 356. 2000. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia, USA.
13. Romero B, Silva S. 2022. Prediseño y estimación del factor de modificación de respuesta R de un edificio híbrido madera contralaminada – hormigón armado. Proyecto de título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
14. Instituto Nacional de Normalización (INN). 2012. NCh433.Of 96. Modificada en 2012. Diseño sísmico de edificios.