

SIMPLIFIED METHOD TO MODELING TIMBER MID-RISE BUILDINGS PLATFORM FRAME SYSTEM USING A FINITE ELEMENTS PROGRAM.

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA MODELACIÓN DE EDIFICIOS EN MEDIA ALTURA TIPO MARCO-PLATAFORMA DE MADERA UTILIZANDO UN PROGRAMA COMPUTACIONAL DE ELEMENTOS FINITOS

Ignacio González (1), Jorge Vargas (2)

(1) Ingeniero Civil, IGR Structural Engineering, Santiago, Chile. email: ignacio@igr-se.cl
(1) Ingeniero Civil, Santiago, Chile. email: jvargasparada@gmail.com

Resumen

El presente estudio consiste en la elaboración de una metodología simplificada de modelación computacional para el diseño sísmico de edificios en media altura compuestos de muros de corte de madera utilizando el sistema marco-plataforma, aplicando factores de modificación de las rigideces que actúan en el plano del muro de corte. Para ello, se considera un análisis lineal que cumple con las formulaciones presentadas por Euler-Bernoulli y la teoría de vigas de Timoshenko. La aplicación de estos coeficientes de modificación de rigidez a los distintos muros estructurales de corte modelados, permiten disminuir considerablemente los tiempos de proceso computacional al optar por un modelo lineal; en contraste con el modelo no-lineal e iterativo.

Posteriormente, a partir de los resultados obtenidos del proceso de formulación y modelación, se crearon tablas de coeficientes de modificación de rigideces para distintas configuraciones de muros de corte respecto al sistema de muro marco-plataforma de madera.

Palabras-Clave: Edificios de madera, Muros de corte, sistema marco-plataforma de madera

Abstract

The present study consists of the elaboration of a simplified methodology of computational modeling for the seismic design of middle rise buildings composed of timber shear walls using the platform-frame system, applying factors of modification of the rigidities that act in the plane of the shear walls. To do this, it is considered a linear analysis that complies with the formulations presented by Euler-Bernoulli and Timoshenko's beam theory. The application of these coefficients of modification of rigidity to the different structural shear walls modeled, allow to reduce considerably the computational process times when opting for a linear model; in contrast to the non-linear and iterative model.

Subsequently, from the results obtained from the formulation and modeling process, tables of coefficients of modification of rigidities were created for different configurations of shear walls with respect to the timber platform-frame system.

Keywords: Timber buildings, Shear walls, Platform frame system

1 Introducción

El sistema marco-plataforma de madera está dentro de los sistemas constructivos más utilizados en los países productores de madera, como Canadá y Estados Unidos. Dentro de los atributos de este sistema se encuentran la prefabricación, velocidad de construcción, eficiencia energética y en general su versatilidad ayuda a potenciar soluciones sustentables con el medio ambiente.

Uno de los problemas que deben enfrentar los ingenieros que desarrollan sus proyectos con este sistema constructivo, es saber aplicar correctamente todas las variables que se involucran en un muro de corte tales como; la cantidad de pies derecho, espaciamento de clavos, sistema de anclaje, placas de OSB, etc. Adaptar todas las variables antes mencionadas en un modelo estructural de elementos finitos resulta complejo ya que se deben realizar modelos no-lineales, lo que involucra un mayor gasto de recursos para desarrollar este tipo de proyectos.

Esta investigación apunta a facilitar el desarrollo de proyectos con el sistema marco-plataforma, para ello se presenta una metodología que se adapta a las prácticas más utilizadas de las oficinas de ingeniería para el diseño sísmico en media altura y que a su vez sea confiable para la verificación de las exigencias normativas de la NCh433 [1].

2 Objetivos

2.1. Objetivo General

Encontrar una metodología simplificada para facilitar la modelación computacional de paneles de madera aserrada del tipo sistema marco-plataforma, aplicado principalmente a muros de corte segmentados y muros perforados donde se considere de manera intrínseca las propiedades de los distintos elementos que componen el sistema estructural.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar y comprender las hipótesis de verificación y diseño de la norma americana de muros estructurales de corte [2], utilizando el sistema marco-plataforma.
- Proponer una metodología simplificada como análisis racional de ingeniería para la aplicación de un modelo estructural utilizando el programa de elementos finitos ETABS para muros de corte del sistema marco-plataforma.
- Desarrollar ábacos con coeficientes de modificación de rigidez de un elemento finito tipo área para generar un modelo representativo de la estructura.

3. Modelación simplificada utilizando elementos finitos tipo área

3.1. Metodología de cálculo utilizada

La deformación total del sistema marco-plataforma según el código de diseño SDPWS, está gobernada por la deformación de flexión, la deformación por cortante y la deformación de los conectores. Mientras tanto, la deformación lineal total para un elemento barra o un elemento área, está constituida básicamente por la deformación por corte y la deformación por flexión.

Para realizar una modelación simplificada, se utilizarán coeficientes de modificación para la rigidez en elementos tipo área. Estos coeficientes vienen especificados en cada programa computacional y afectan básicamente a la rigidez en el plano y fuera de este.

Como se aprecia en el estudio realizado Cárcamo [3], la metodología más simple para realizar un modelo simplificado resulta de la igualación de la rigidez lateral total del sistema marco-plataforma entregado por la American Wood Council, y representado por la ecuación (1), con la rigidez total lateral de un muro en voladizo representado por la ecuación (1). Posteriormente se procede a la obtención de coeficientes para muros marco-plataforma con distintas configuraciones o propiedades entregadas:

$$\frac{1}{K_{SDPWS}} = \frac{2h^3}{3EAL^2} + \frac{h}{G_\alpha L} + \frac{h^2}{K_{HD}LL'} \quad (1)$$

Donde:

KHD : Rigidez del anclaje.

L' : Distancia entre el anclaje traccionado y el centroide de los pies derechos de borde.

$$\frac{1}{K} = \frac{h^3}{3EI} + \frac{\alpha h}{GA} \quad (1)$$

Donde:

α : Factor de forma de Timoshenko.

Asimismo, en el estudio de Cárcamo, se utiliza la rigidez vertical del sistema para obtener una rigidez representativa, obviando el peso proporcionado por el muro tipo Shell.

La ecuación (2) representa la rigidez axial del sistema SDPWS, siendo esta:

$$K_{AXIAL_SDPWS} = \frac{E'A'}{h} \quad (2)$$

Donde:

A' : Área proporcionada por la totalidad de los pies derechos.

E' : Módulo de elasticidad de los pies derechos.

La ecuación (3) representa la rigidez axial de un elemento tipo barra, y esta queda definida como sigue:

$$K_{AXIAL} = \frac{EA}{h} \quad (3)$$

Dónde:

A : Área de la sección transversal del elemento área.

E : Módulo de elasticidad del modelo computacional.

3.2. Obtención de coeficientes de modificación para elementos área

La obtención de coeficientes de modificación se realizará igualando las distintas rigideces del muro de corte, es decir, igualando la rigidez vertical y horizontal del sistema SDPWS con la rigidez total de un muro en voladizo. Para ello, se definen tres coeficientes a obtener:

λ : Coeficiente de modificación que se aplica a la rigidez en dirección x e y del elemento tipo área que en el programa computacional se aplica en f11 y f22.

Ψ : Coeficiente de modificación que se aplica a la rigidez por cortante del elemento tipo área que en el programa computacional se aplica en f12.

ρ : Coeficiente de modificación que se aplica a la masa y peso del elemento tipo área.

Ya definidos los coeficientes λ , Ψ y ρ se procede a la obtención de estos en los siguientes capítulos.

3.3. Coeficiente de rigidez λ en dirección x e y

Para la obtención del coeficiente de rigidez λ , se igualan las rigideces producto de la carga axial indicada en las ecuaciones (2) y (3), incorporando el factor λ en la ecuación que representa la rigidez axial de un elemento tipo barra, obteniéndose escrita la siguiente igualdad:

$$K_V = \frac{E' A'}{h} = \lambda \frac{EA}{h} \quad (4)$$

Luego, despejando λ se tiene:

$$\lambda = \frac{E' A'}{EA} \quad (5)$$

Donde λ representa la razón entre el producto del módulo de elasticidad con el área de los pies derechos del sistema marco-plataforma, y el producto del módulo de elasticidad por el área transversal del elemento tipo área. Este es el coeficiente más simple de obtener, ya que sólo basta con igualar la deflexión axial de ambos sistemas.

3.4. Coeficiente de rigidez Ψ producto de las tensiones de corte.

Para la obtención del coeficiente de rigidez Ψ , se iguala la rigidez lateral del sistema marco-plataforma con la rigidez total para una barra en voladizo. Estas rigideces se entregan en las ecuaciones (1) y (1) incorporando los factores de modificación λ y Ψ que actúan en la rigidez por flexión y corte, respectivamente. La ecuación (6) representa la igualdad descrita anteriormente.

$$\frac{1}{K_{SDPWS}} = \frac{h^3}{\lambda 3EI} + \frac{\alpha h}{\Psi GA} \quad (6)$$

Considerando que el módulo de corte se puede escribir respecto al módulo de elasticidad y el factor de Timoshenko igualarlo a uno, la ecuación anterior se puede escribir como sigue:

$$\frac{1}{K_{SDPWS}} = \frac{h^3}{\lambda 3EI} + \frac{2h(1+\nu)}{\Psi EA} \quad (7)$$

Luego, al desarrollar la ecuación anterior, se denomina K_{SDPWS} como K_H y se despeja el coeficiente Ψ , obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\Psi = \frac{6hIK_H\lambda(1+\nu)}{A(3EI\lambda - h^3K_H)} \quad (8)$$

Reemplazando λ de la ecuación (4) en la ecuación (8), podemos escribir la siguiente ecuación:

$$\Psi = \frac{6hIK_H \frac{K_v h}{EA} (1+\nu)}{A \left(3EI \frac{K_v h}{EA} - h^3 K_H \right)} \quad (9)$$

Ahora, se considera lo siguiente:

$$\eta = \frac{K_v}{K_H} \quad (10)$$

$$A = Lb \quad (11)$$

$$\xi = \frac{L}{h} \quad (12)$$

Dadas las ecuaciones (10), (11) y (12), se puede simplificar la ecuación (9) tanto en términos del módulo de elasticidad mostrada en la ecuación (13), como en términos del módulo de corte de la ecuación (14).

$$\Psi = \frac{\xi}{b(\eta\xi^2 - 4)} \frac{2K_v(1+\nu)}{E} \quad (13)$$

$$\Psi = \frac{\xi}{b(\eta\xi^2 - 4)} \frac{K_v}{G} \quad (14)$$

Donde:

K_v : Rigidez axial del muro marco-plataforma.

K_H : Rigidez lateral total del muro marco-plataforma.

E : Módulo de elasticidad del elemento tipo área modelado.

G : Módulo de corte del elemento tipo área modelado.

3.5. Coeficiente ρ de peso y masa sísmica

Debido a que la sección transversal es una sección que posee vacíos entre pies derechos, es necesario realizar un ajuste entre el peso del muro y el peso de la sección de modelación. Este factor de ajuste se obtiene de la razón entre el peso del muro marco-plataforma y el peso del muro modelado

mediante elementos finitos. En la ecuación (15) se presenta el valor del coeficiente de modificación relativo al peso y masa sísmica.

$$\rho = \frac{A_{TPD} \gamma_{PR} + n A_{OSB} \gamma_{OSB}}{A \gamma_{DR}} \quad (15)$$

Donde:

A_{TD} : Área total de los pies derechos en el muro.

γ_{PR} : Peso específico pino radiata considerado.

n : Número de placas de OSB.

A_{OSB} : Área de placas de OSB.

γ_{OSB} : Peso específico placas OSB.

4. Aplicación de la metodología desarrollada a un modelo computacional

Para el desarrollo y obtención de la rigidez total lateral y la rigidez axial, se utiliza la ecuación (17), conocida como la ley de Hooke, la cual relaciona la fuerza ejercida en un medio elástico con el producto de la rigidez por la deformación [4].

$$F = k\delta \quad (17)$$

De la ecuación (17) se puede dilucidar que, si se aplica una fuerza igual a la rigidez del sistema SDPWS por una deformación unitaria, el resultado de la deformación esperada en el modelo computacional será igual a dicha deformación unitaria.

Para analizar la variable de la subdivisión de los elementos finitos, se consideran modelos computacionales mallados de 30, 40 y 60 cm (Fig.1); esto hace referencia a la posible disposición de pies derechos o división del elemento por un número múltiplo cercano a 122 cm.

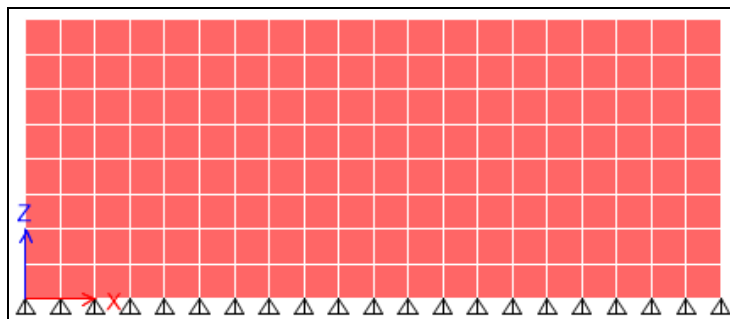


Fig. 1 - Subdivisión de la modelación del muro de corte a 30 cm

4.1. Evaluación de la rigidez lateral total usando factores de modificación

A continuación se presentan los parámetros elegidos de forma aleatoria para distintas longitudes de muros, siempre que sean múltiplo de 122 cm.

- Pino radiata G1, E : 100000 kg/cm².
- Pino radiata G1, γ : 450 kg/m³.
- Pies derechos, 2x4 : 41mm x 90mm @ 300 mm
- Área pie derecho tramo, ATr : 110.7cm.
- Pies derechos de esquina : 4
- Área pie derecho tramo, AEsq : 147.6cm.
- Placa OSB, e : 11.1 mm. x 2
- Placa OSB, γ : 721 kg/m³
- Placa OSB, Ga : 2678.7 kg/cm
- Fijación : 8d@15 cm.
- Rigidez del anclaje, KHD : 7920.5 kg/cm.
- Distancia anclaje, L' : 105.6 cm.

Cabe destacar que el módulo de corte aparente G_a , se obtiene de la norma SDPWS. Además, es necesario definir las propiedades geométricas y de los materiales utilizadas por el elemento tipo placa a modelar en el programa ETABS. Estas propiedades son:

- Módulo de elasticidad, E : 100000 kg/cm².
- Coeficiente de poisson, ν : 0.2
- Ancho de la sección, b : 12 cm.
- Alto de la sección, h : 244 cm.
- Longitud de la sección, L : múltiplo de 122 cm.

Para realizar la evaluación de los diferentes modelos, se extraen las deformaciones laterales, donde se puede apreciar que existe una diferencia menor entre la rigidez del modelo representativo y la rigidez teórica de la metodología indicada en el SPDWS.

También se puede dilucidar el aumento del error a medida que la longitud del muro de corte se incrementa. El orden de magnitud de los errores porcentuales para cada una de las rigideces laterales se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1- Porcentaje de error de la rigidez horizontal aplicando factores a un modelo computacional

L [cm]	K _{TEORICO} [kg/cm]	K _{30x30} [kg/cm]	K _{40x40} [kg/cm]	K _{60x60} [kg/cm]	Error porcentual malla [cm]		
					30x30	40x40	60x60
122	999.2	961.7	978.7	1012.4	3.7	2.0	1.3
244	3002.7	2835.1	2861.4	2910.9	5.6	4.7	3.1
366	5316.8	4995.0	5024.7	5084.2	6.1	5.5	4.4
488	7767.3	7343.0	7375.0	7440.3	5.5	5.1	4.2
610	10289.6	9779.5	9812.3	9881.6	5.0	4.6	4.0
732	12854.5	12308.9	12342.7	12414.9	4.2	4.0	3.4
854	15446.7	14859.4	14894.2	14968.2	3.8	3.6	3.1
976	18057.4	17552.8	17588.4	17665.0	2.8	2.6	2.2
1098	20681.2	19945.8	19981.0	20057.9	3.6	3.4	3.0
* Promedio del error porcentual					4.47	3.94	3.18

Si bien el error porcentual promedio para cada tipo de mallado es inferior al 5 por ciento, se recomienda aplicar un factor de corrección a la rigidez lateral del sistema; esto debido a las prácticas de ingeniería por aceptar factores de utilización menores al 1.05 por ciento, lo cual produciría una suma de errores. De la tabla 1 se puede extraer el promedio de error de todas las modelaciones computacionales, siendo este de 3.86 por ciento.

4.2. Evaluación de la rigidez vertical usando factores de modificación

Utilizando la misma metodología indicada en el punto anterior, se puede apreciar en la Fig.3 que existe una diferencia despreciable en la rigidez del modelo representativo y la rigidez teórica de la metodología indicada en el SPDWS; esto significa que las curvas se encuentran superpuestas hasta una longitud de 732 cm.

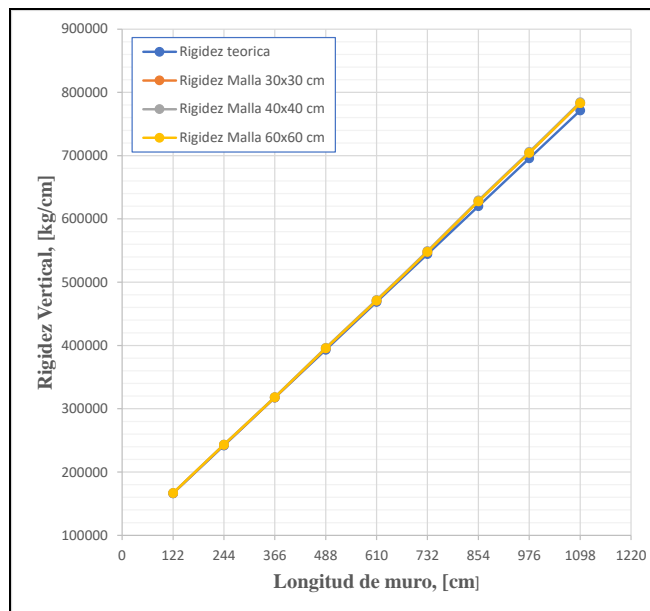


Fig. 2 - Evaluación de la rigidez vertical total respecto a la rigidez teórica.

También se puede observar un leve incremento del error a medida que aumenta la longitud del muro de corte. El orden de magnitud de los errores porcentuales para cada una de las rigideces laterales se puede apreciar en la Tabla .

Otro punto para destacar es el porcentaje de error inferior al 1 por ciento, por lo cual no se recomienda aplicar un factor de corrección al coeficiente de rigidez axial.

Tabla 2 - Porcentaje de error de la rigidez vertical aplicando factores a un modelo computacional

L [cm]	K _{TEORICO} [kg/cm]	K _{30x30} [kg/cm]	K _{40x40} [kg/cm]	K _{60x60} [kg/cm]	Error porcentual malla [cm]		
					30x30	40x40	60x60
122	166352.5	166498.7	166855.9	166798.8	0.1	0.3	0.3
244	241967.2	242868.5	243502.8	243253.9	0.4	0.6	0.5
366	317582.0	317736.0	318601.9	318075.2	0.0	0.3	0.2
488	393196.7	395342.5	396415.1	395611.8	0.5	0.8	0.6
610	468811.5	470880.9	472127.7	471082.2	0.4	0.7	0.5
732	544426.2	547968.0	549364.3	548123.2	0.7	0.9	0.7
854	620041.0	627793.8	629315.9	627933.2	1.3	1.5	1.3
976	695655.7	704327.5	705946.9	704463.7	1.2	1.5	1.3
1098	771270.5	782862.7	784551.4	783023.8	1.5	1.7	1.5
* Promedio del error porcentual					0.68	0.93	0.76

4.3. Factor de corrección asociado a la rigidez por tensiones de corte

Como se vio en el acápite 4.1, es necesario aplicar un factor de corrección al coeficiente de modificación que afecta a la rigidez por tensiones de corte. Si se supone que el factor de corrección es lineal respecto al incremento de la rigidez lateral total, y siendo la rigidez del modelo computacional menor que rigidez teórica entonces se tiene que incrementar el coeficiente de modificación utilizando la siguiente ecuación:

$$\varphi = \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right) \quad (18)$$

De la ecuación (18) se puede obtener el factor de corrección de la rigidez considerando que φ equivale a 3.86 por ciento, siendo ϕ un factor de 1.04 aplicable a todos los tipos de mallado de los elementos finitos. Luego de aplicar este valor se obtienen nuevos factores de modificación los cuáles se presentan en la tabla 3.

Tabla 3 - Coeficientes de modificación corregidos para modelación de muros de corte.

L	$K_{lateral}$	K_{axial}	λ	$\phi\Psi$	ρ
[cm]	[kg/cm]	[kg/cm]	f11, f22	f12	
122	999.2	166352	0.2773	0.0046	0.5736
244	3002.7	241967	0.2016	0.0066	0.4979
366	5316.8	317582	0.1764	0.0076	0.4727
488	7767.3	393197	0.1638	0.0082	0.4601
610	10289.6	468811	0.1563	0.0087	0.4526
732	12854.5	544426	0.1512	0.0090	0.4475
854	15446.7	620041	0.1476	0.0093	0.4439
976	18057.4	695656	0.1449	0.0095	0.4412
1098	20681.2	771270	0.1428	0.0096	0.4391

Luego de aplicar los nuevos coeficientes a los muros de corte y una vez procesado los modelos computacionales, se extraen las deformaciones de los muros de corte para obtener las rigideces globales modificadas utilizando la ecuación (17) para luego mostrar las rigideces asociadas a la tensión de corte en la Fig. 4.

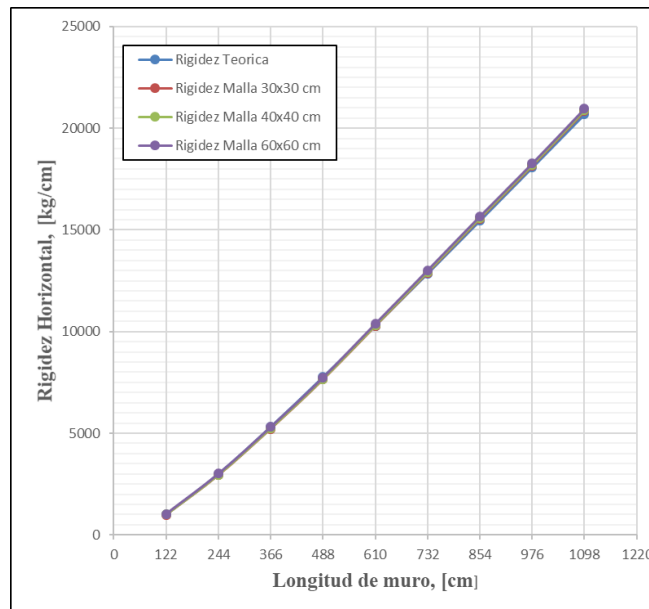


Fig. 3 - Evaluación de la rigidez lateral total respecto a la rigidez teórica.

De la figura anterior se puede apreciar a simple vista que las rigideces se encuentran superpuestas, es decir, tienen un pequeño error de modelación. El error asociado a la rigidez lateral global se puede apreciar de manera cuantitativa en la tabla 4

Tabla 4 - Porcentaje de error de la rigidez horizontal aplicando factores corregidos a un modelo computacional

L [cm]	K _{TEÓRICO} [kg/cm]	K _{30x30} [kg/cm]	K _{40x40} [kg/cm]	K _{60x60} [kg/cm]	Error porcentual malla [cm]		
					30x30	40x40	60x60
122	999.2	985.7	1003.3	1038.2	1.3	0.4	3.9
244	3002.7	2932.6	2960.0	3011.7	2.3	1.4	0.3
366	5316.8	5216.6	5247.6	5310.2	1.9	1.3	0.1
488	7767.3	7640.0	7673.2	7741.5	1.6	1.2	0.3
610	10289.6	10275.7	10310.0	10383.2	0.1	0.2	0.9
732	12854.5	12905.3	12940.6	13016.6	0.4	0.7	1.3
854	15446.7	15556.2	15592.5	15670.1	0.7	0.9	1.4
976	18057.4	18150.4	18187.2	18266.5	0.5	0.7	1.2
1098	20681.2	20843.1	20879.7	20960.1	0.8	1.0	1.3
* Promedio del error porcentual					1.08	0.87	1.20

Dado que el promedio de error porcentual asociada a la rigidez horizontal total es de aproximadamente 1.05 por ciento, se considera un valor aceptable y no se itera nuevamente.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos se concluye que, si la razón entre la altura y la longitud del muro aumenta, la rigidez a flexión controla el diseño en base a condiciones de servicio. Por otro lado, si dicha razón decrece, la rigidez por cortante es fundamental para controlar los límites de deformaciones indicadas en la norma de diseño sísmico NCh433.

De igual manera, se pudo observar que la magnitud de la rigidez de los elementos finitos disminuye a medida que se aumenta el mallado del elemento modelado. Para representar la rigidez teórica indicada por el código SPDWS, se deben aplicar factores de corrección a los coeficientes de modificación de las propiedades brutas del elemento área, siendo este factor de 1.04 aproximadamente, y aplicado a la rigidez lateral por cortante.

Asimismo, del estudio realizado se puede apreciar que sólo es necesario modificar las propiedades del elemento modelado aplicando sólo tres factores de modificación de las rigideces a un elemento del tipo membrana; estas afectan básicamente a la rigidez axial, la rigidez a cortante y al peso asociado a cada uno de los elementos modelados.

Este trabajo significa un aporte para la modelación computacional, ya que reduce significativamente el proceso de diseño y verificación de muros de corte. Esto se logra debido a que no se incursiona en modelos no lineales, modificaciones complejas de cada elemento, cálculos de propiedades de los elementos e iteraciones de verificación de cada uno de los elementos que componen el sistema marco-plataforma.

El procedimiento descrito en este estudio permitirá a los profesionales de las oficinas de ingeniería estructural desarrollar de manera práctica proyectos con el sistema marco-plataforma de madera. Esto marca un hito en el desarrollo de este tipo de proyectos, debido a que es una herramienta que facilitará el análisis y desarrollo de las edificaciones con este sistema constructivo.

6. Referencias

- [1] NCh433. (1996 mod 2009). Instituto Nacional de Normalización. Diseño Sísmico de Edificios.
- [2] American Wood Council. (2015). Special Design Provisions for Wind and Seismic. SDPWS.
- [3] Cárcamo, S. I. (Julio de 2017). Modelo de muros marco plataforma para un programa de elementos finitos mediante elementos área. Universidad Técnica Federico Santa María, Obras Civiles, Valparaíso.
- [4] Lebedev, L. P., & Cloud, M. J. (2009). Introduction to Mathematical Elasticity. New Jersey, United States: World Scientific.