



CONCURSO

# INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN

La VIII versión del concurso, tiene como objetivo destacar a aquellos alumnos de las carreras de Ingeniería y construcción civil que hayan desarrollado o se encuentren desarrollando **Memorias / Investigaciones / Proyectos de título / Patentes de Ingeniería y Construcción.**





EQUIPO ING2616

**Modelamiento de diafragmas  
de piso de entramado ligero  
de madera para representar su  
comportamiento estructural**

# Introducción

La madera es posible aplicarla en áreas como la construcción en la cual, a pesar de la magnitud del recurso forestal disponible en el país, no es un material predilecto para edificaciones, especialmente en mediana altura, donde no es competencia del hormigón y el acero, situación distinta a la ocurrida en otros países del mundo con un gran recurso forestal.

Este material permite implementar sistemas constructivos como el marco plataforma, que junto a diafragmas de piso de entramado ligero, destaca por sus características térmicas, acústicas y nivel de prefabricación.

Se debe tener en cuenta que la implementación de todo sistema constructivo involucra un previo conocimiento teórico sobre su funcionamiento, capacidades y el comportamiento que este pueda tener frente a la acción de cargas, como por ejemplo laterales, presentes en un país sísmico como Chile.

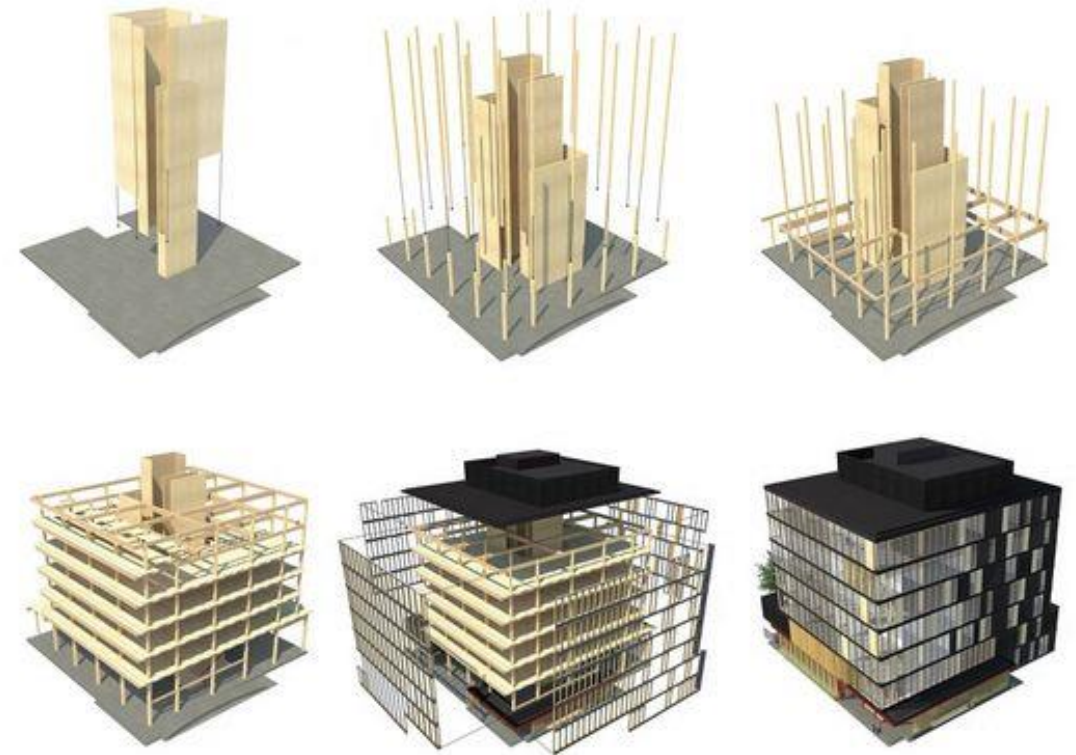


Figura 1: Wood Innovation and Design Centre  
Fuente: [www2.unbc.ca](http://www2.unbc.ca)

# Objetivos

El objetivo general de esta tesis es modelar la respuesta estructural de un diafragma de piso de entramado ligero de madera, tomando las consideraciones dispuestas en las metodologías norteamericanas SDPWS y APA – The Engineered Wood Association.

Como objetivos específicos se tiene:

- Estudiar las consideraciones de diseño para diafragmas de piso de entramado ligero, utilizando las metodologías norteamericanas.
- Analizar y determinar las rigideces equivalentes que influyen en el comportamiento dentro y fuera del plano del diafragma.
- Estimar los parámetros necesarios para modelar un diafragma de piso de entramado ligero de madera, mediante el método de macroelemento.
- Analizar las implicancias que tendría en el diseño del diafragma su idealización como rígido o flexible determinando las deflexiones experimentadas y su influencia en la respuesta de un edificio.

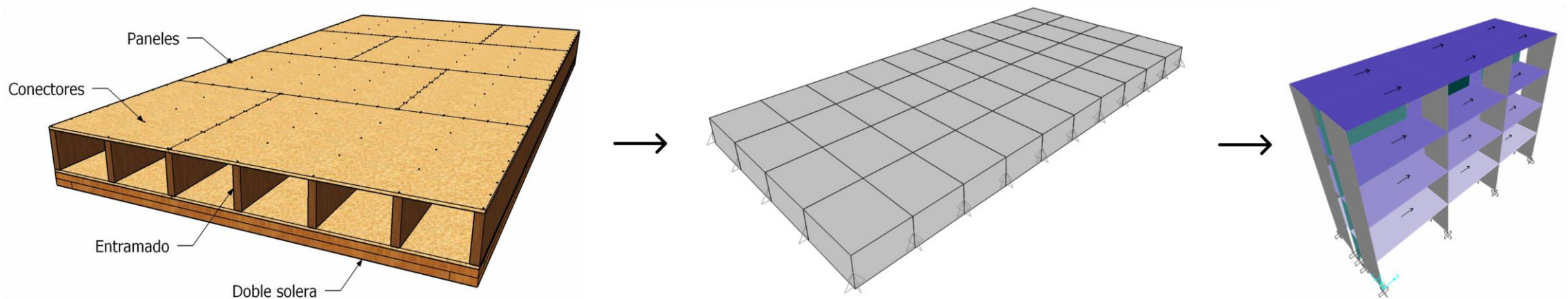


Figura 2: Imagen representativa del estudio

# Diafragmas de piso de entramado ligero

Son protagonistas importantes dentro de la estructura de un edificio, siendo parte de los componentes encargados de resistir cargas gravitacionales y laterales como sismos o viento.

Los diafragma de piso de entramado ligero están compuestos por:

- Entramados longitudinales
- Tableros de terciado u OSB
- Uniones mecánicas
- Bloqueos

El diafragma, además de resistir cargas gravitacionales, debe recibir las cargas laterales, distribuyéndolas hacia los colectores (figura 3) para posteriormente ser llevadas a los elementos resistentes verticales y así dirigirlas óptimamente a las cimentaciones de la edificación.

Dado lo anterior, es importante conocer el comportamiento que los diafragmas tienen frente a la acción de las cargas laterales y gravitacionales, y así conocer como influyen dentro de una edificación.

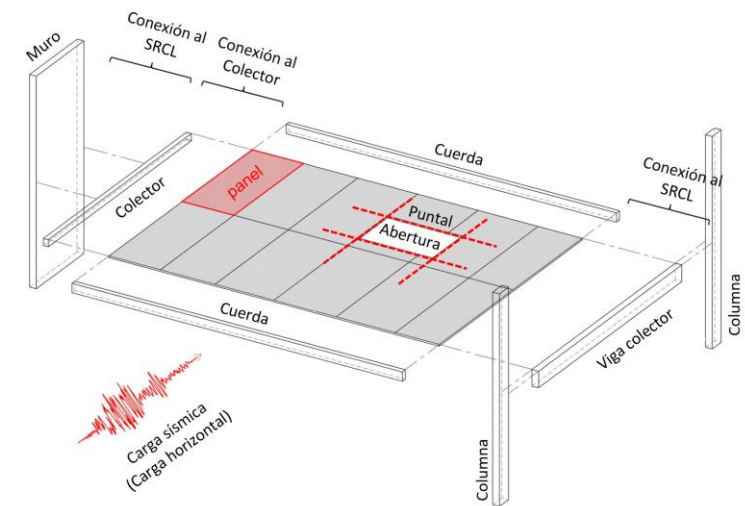


Figura 3: Definición de los componentes del diafragma  
Fuente: Moroder D. 2016

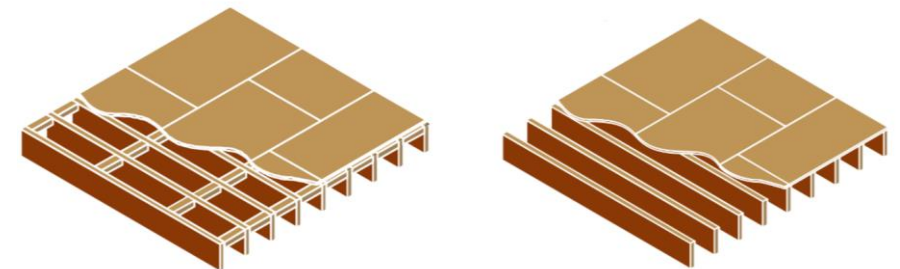


Figura 4: Diafragma de entramado ligero bloqueado y desbloqueado  
Fuente: AWC, Diaphragm Basics Using SDPWS, 2015

# Análisis de comportamiento en el plano

## Formulaciones

Ecuación de deflexión APA y SDPWS

Ecuaciones de rigidez equivalente

$$K_{eq\ APA, diaf} = \left( \underbrace{\frac{5L^3}{16W^2EA}}_{\text{Flexión de cuerdas}} + \underbrace{\frac{L}{8 \cdot n_p \cdot Gt \cdot W}}_{\text{Corte del panel}} + \underbrace{\frac{0,188 \cdot L}{n_p \cdot n \cdot K_{clavo} \cdot W}}_{\text{Corrimiento de conectores}} + \underbrace{\frac{L \cdot \sum X_i}{16 \cdot W^2 \cdot k}}_{\text{Corrimiento de empalme de cuerda}} \right)^{-1}$$

Donde:  
 n : Clavos por unidad de longitud  
 n<sub>p</sub> : Número de paneles

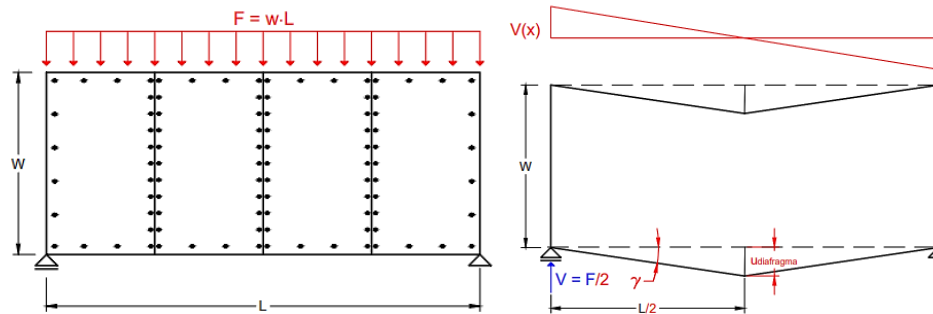
$$K_{eq\ SDPWS, diaf} = \left( \frac{5L^3}{16W^2EA} + \underbrace{\frac{0,125 \cdot L}{n_p \cdot 1000G_a \cdot W}}_{\text{Corte de panel y corrimiento de conectores}} + \frac{L \cdot \sum X_i}{16 \cdot W^2 \cdot k} \right)^{-1}$$

Teoría de placas de Kirchhoff

Matriz de rigidez del macroelemento

$$\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_y \\ \eta_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}_{66} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_{77} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{D}_{88} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

■ Rigidez membranal



$$E' = E_{cuerdas}$$

$$G' = \frac{L \cdot K_{eq\ teórica, diaf}}{8 \cdot W \cdot e}$$

Figura 5: Diafragma en estudio.

# Análisis de comportamiento en el plano

## Modelo de validación

Se considera el ejemplo de la figura 6 para la validación de las formulaciones anteriores y estudio de la sensibilidad frente al mallado.

El espesor del macroelemento es una variable influyente en la expresión del módulo de corte equivalente, por lo tanto, se analiza la influencia de este término utilizando valores de 1 [in] a 20 [in] que conllevan al cálculo de diferentes valores de  $G'$ .

Para validar la metodología, se modela nuevamente el macroelemento considerando el espesor real del elemento, es decir, la suma de la altura del entramado y el espesor del panel.

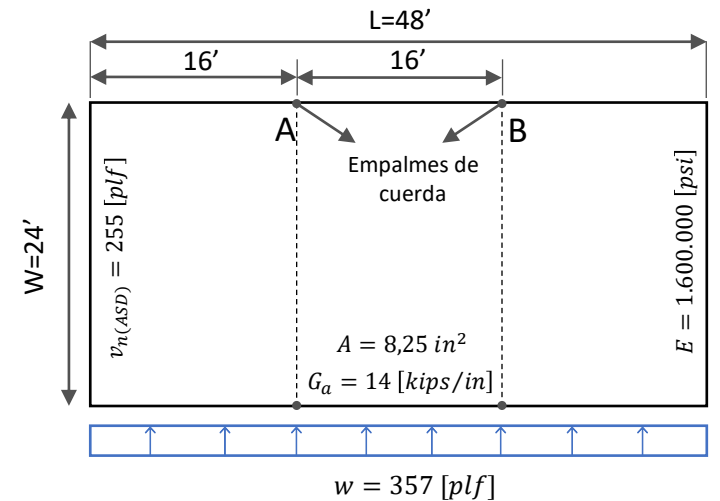


Figura 6: Configuración de diaphragma ejemplo de cálculo SDPWS  
Fuente: Comentarios SDPWS, 2015

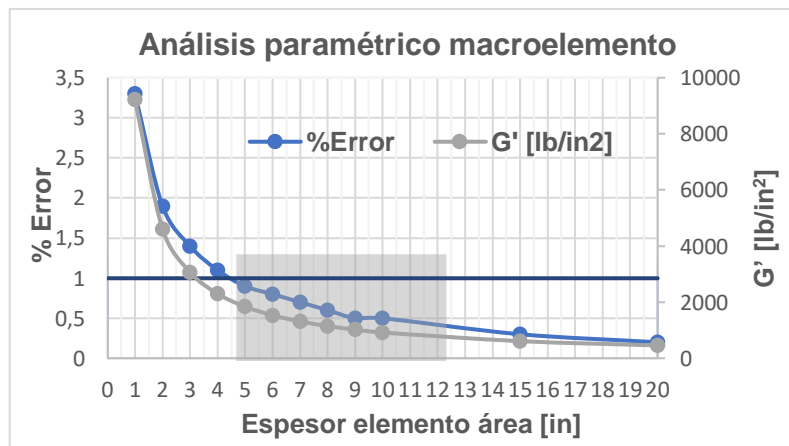


Figura 7: Variación de % de error vs espesor macroelemento

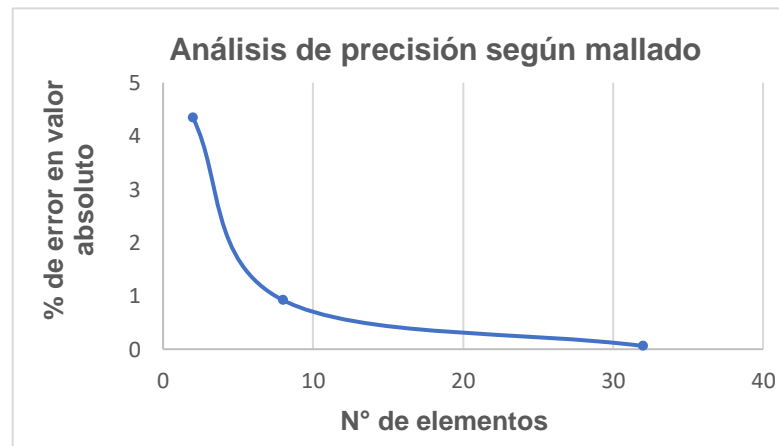


Figura 8: Porcentaje de error vs n° de divisiones del elemento área

$$\delta_{diap} = 0,078 \text{ in} + 0,306 \text{ in} + 0,072 \text{ in} = 0,465 \text{ [in]}$$

$\Delta_{SAP}$ [in]	$\Delta_{SDPWS}$ [in]	% Error	Mallado [in <sup>2</sup> ]	N° de divisiones
0,4448	0,465	-4,34	288x288	2 x 1 = 2
0,4607	0,465	-0,92	144x144	4 x 2 = 8
0,4647	0,465	-0,06	72x72	8 x 4 = 32

Tabla 1: Comparación de resultados obtenidos

# Análisis de comportamiento fuera del plano

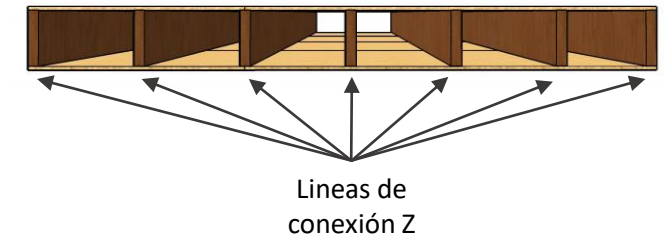
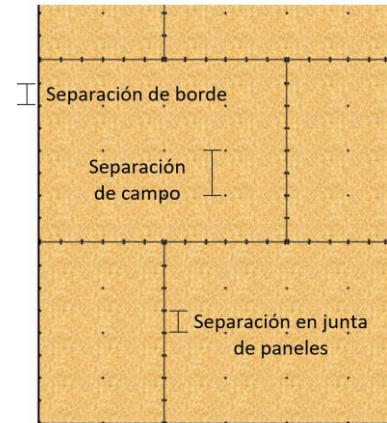
## Formulaciones

En flexión longitudinal, la unión mecánica entre paneles y entramados, se considera utilizando la extrapolación del método gamma para una viga cajón, incorporando las variables  $s'$  y  $z$ . Con esto se calcula la rigidez  $EI$  efectiva a implementar en el macroelemento, considerando un módulo de elasticidad de referencia.

$$\gamma_{sup\ o\ inf} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A \cdot s'}{L^2 \cdot K_{ser} \cdot z}}$$

$$I_{ef} = \sum_{i=1}^3 (n_i \cdot I_i + \gamma_i \cdot n_i \cdot A_i \cdot a_i^2)$$

$$E_{ref} = E_{entramado} \quad EI_{ef} = E_{ref} \cdot I_{ef}$$



$s'$ : Separación promedio ;  $z$ : Líneas de conexión

Figura 9: Líneas de conexión Z y separaciones de conexiones

Respecto a la flexión transversal, un análisis paramétrico que involucra una serie de variables permite obtener expresiones para el cálculo de inercia y módulo de elasticidad efectivo:

- Ancho del diafragma ( $W$ )
- Altura del entramado ( $h_E$ )
- Espesor del panel ( $t$ )
- Longitud del diafragma ( $L$ )
- Separación de entramados ( $C$ )
- Módulo de elasticidad del panel ( $E_{panel}$ )
- Módulo de elasticidad del entramado ( $E_{Entramado_z}$ )

$$I_{ef,trans} = W \cdot \left[ (\{\alpha_1 \cdot h_E + \alpha_2\} \cdot t^2 + \{\alpha_3 \cdot h_E + \alpha_4\}) \cdot \left(\frac{L}{C}\right)^2 + (\{\alpha_5 \cdot h_E + \alpha_6\} \cdot t^2 + \{\alpha_7 \cdot h_E + \alpha_8\}) \right]$$

$$E_{ef} = (\beta_1 \cdot E_{panel} + \beta_2) \cdot \left( \frac{\beta_3}{100000} \cdot E_{Entramado_z} + \beta_4 \right)$$

$\alpha_i$  y  $\beta_i$ : Factores de aplicación obtenidos por ajustes de curvas



# Análisis de comportamiento fuera del plano

## Modelo de validación

Se considera el siguiente ejemplo para la validación de las formulaciones anteriores:

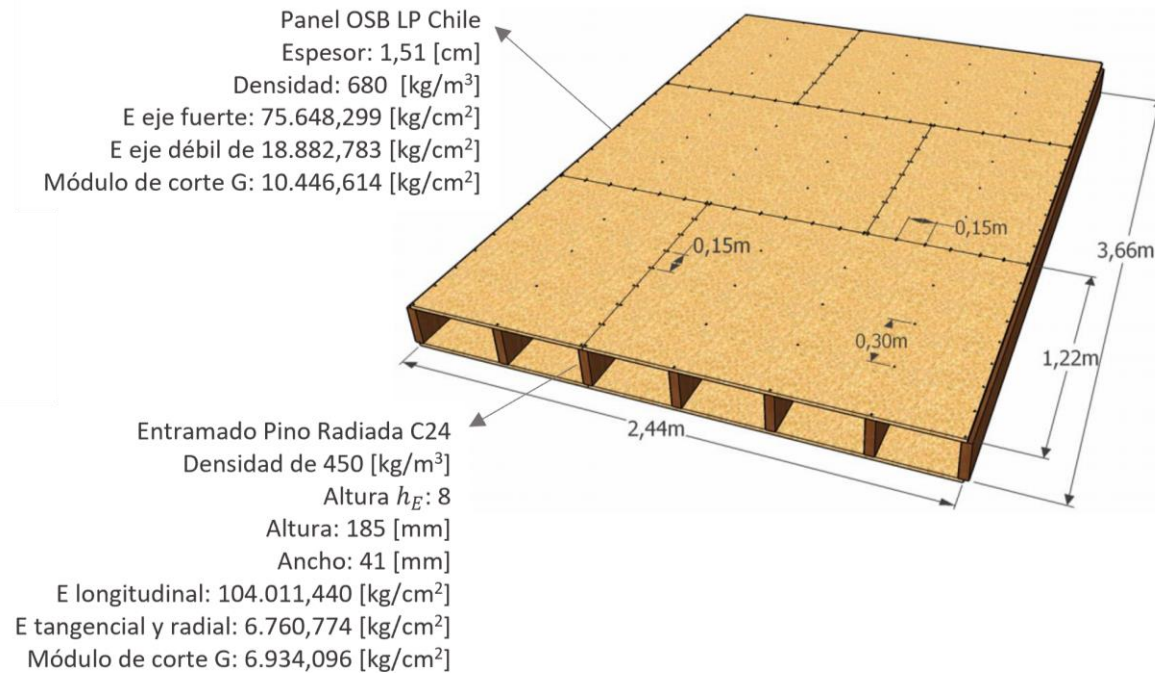


Figura 10: Diafragma para modelo de validación fuera del plano

Se aplica el método gamma considerando el módulo de corrimiento  $K_{ser}$  según lo dispuesto en el Eurocódigo 5.

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d^{0,8}}{30}$$

Posteriormente se calcula la inercia efectiva de la sección transversal equivalente aplicando el factor gamma. A partir de lo anterior, se obtiene la rigidez EI efectiva.

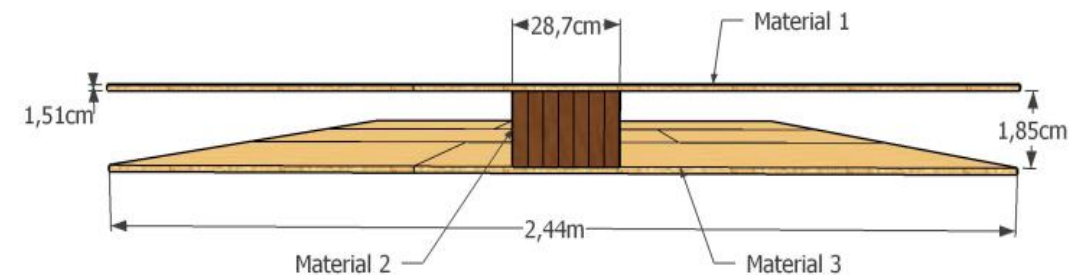
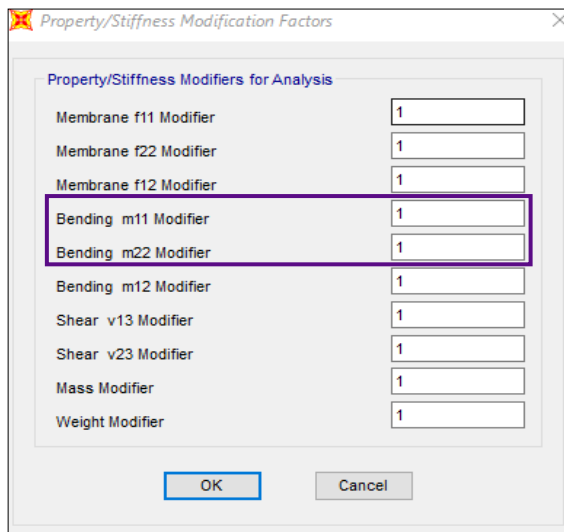


Figura 11: Sección transversal equivalente

# Compatibilización de efectos en macroelemento

Para compatibilizar los efectos dentro y fuera del plano, se toman las siguientes consideraciones en el modelo de validación:

- El módulo de elasticidad del macroelemento corresponde al de las cuerdas del diafragma
- El macroelemento se modela con el espesor real del diafragma
- $G'$  se calcula a partir de la expresión obtenida en el análisis en el plano del diafragma utilizando la rigidez equivalente de la SDPWS
- Para incluir el comportamiento lateral y gravitacional, se aplican factores de modificación de rigidez del elemento área



Cálculo de factores de modificación de rigidez:

$$m_{11} = \frac{EI_{efectivo}}{E_{cuerdas} \cdot I_{SAP2000-longitudinal}}$$

$$m_{22} = \frac{E_{ef} \cdot I_{ef,trans}}{E_{cuerdas} \cdot I_{SAP2000-transversal}}$$

Figura 12: Factores de modificación de rigidez  
Fuente: Software SAP2000, 2021

# Compatibilización de efectos en macroelemento

## Modelo de validación

Se calculan los valores teóricos de deformación gravitacional y lateral a partir de una modelación explícita del diafragma y aplicando la ecuación de deflexión de la SDPWS respectivamente.

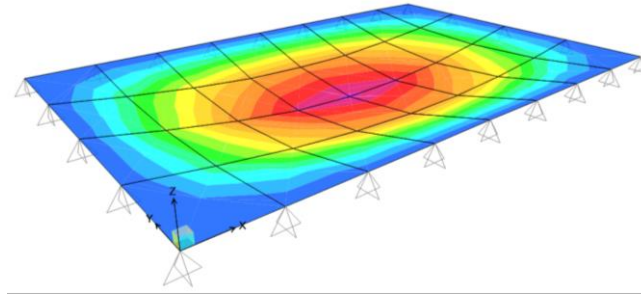


Figura 13: Representación de macroelemento

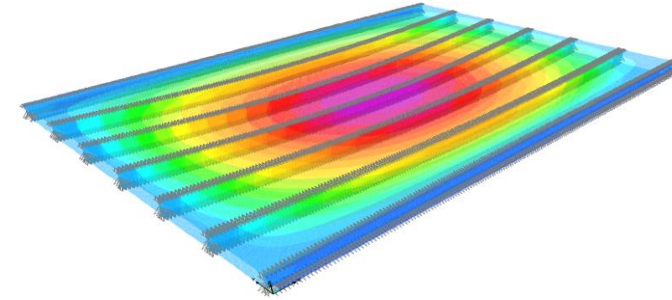


Figura 14: Modelo explícito diafragma en estudio

Luego de aplicar las compatibilizaciones de la flexión longitudinal y transversal fuera del plano, el macroelemento es capaz de representar la respuesta estructural del diafragma ante cargas laterales y gravitacionales. En la siguiente tabla e imagen se pueden apreciar los datos arrojados en la modelación del macroelemento

Análisis	Condición	Δ SAP [mm]		Δ ref. [mm]	Error%	
		8x4	12x8		8x4	12x8
Mallado		8x4	12x8	-	8x4	12x8
Fuera del plano	Apoyo transversal	6,674	6,721	6,76	-1,27	-0,58
	Apoyo longitudinal	7,773	8,080	8,02	-3,08	0,75
	Apoyo en 4 lados	4,404	4,393	4,49	-1,92	-2,16
En el plano (SDPWS)	Sismo en Y	1,708	1,712	1,71	-0,12	0,11
	Sismo en X	0,706	0,712	0,71	-1,03	-0,19
En el plano (APA)	Sismo en Y	1,639	1,640	1,641	-0,13	0,07
	Sismo en X	0,661	0,666	0,667	-0,95	-0,13

Tabla 2: Resultados entregados por SAP2000 para compatibilización de efectos bajo diferentes condiciones de apoyo

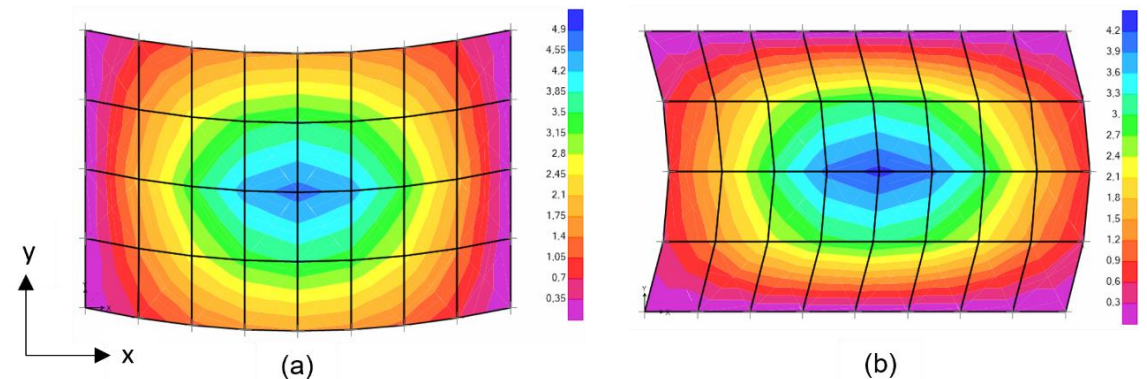


Figura 15: Deformación en [mm] de macroelemento compatibilizando efectos fuera del plano con deformación lateral: a) Dirección Y b) Dirección X

# Modelación de edificio con aplicación de macroelemento

La aplicación del macroelemento para diafragma de piso se aplica en la modelación de un edificio de cuatro pisos de altura con las siguientes consideraciones:

- Los muros son modelados según la metodología descrita en la tesis de pregrado de Sebastián Cárcamo.
- El cálculo de cargas laterales se realiza mediante el método de análisis estático descrito en la norma NCh 433.
- El peso propio de la edificación se calcula a partir de la cubicación de los elementos que componen los diafragmas de piso y muros.
- Dado que las formulaciones de muros dependen de la longitud, cada uno de estos tiene valores propios de módulos de elasticidad y de corte equivalente.
- En el caso de los diafragmas de piso, cada nivel tiene su propio valor de módulo de corte equivalente, debido a que la formulación de rigidez equivalente depende de la rigidez del empalme, quien a su vez, en este caso, es dependiente de la carga lateral que recibe el piso, ya que se fija la deformación del empalme.

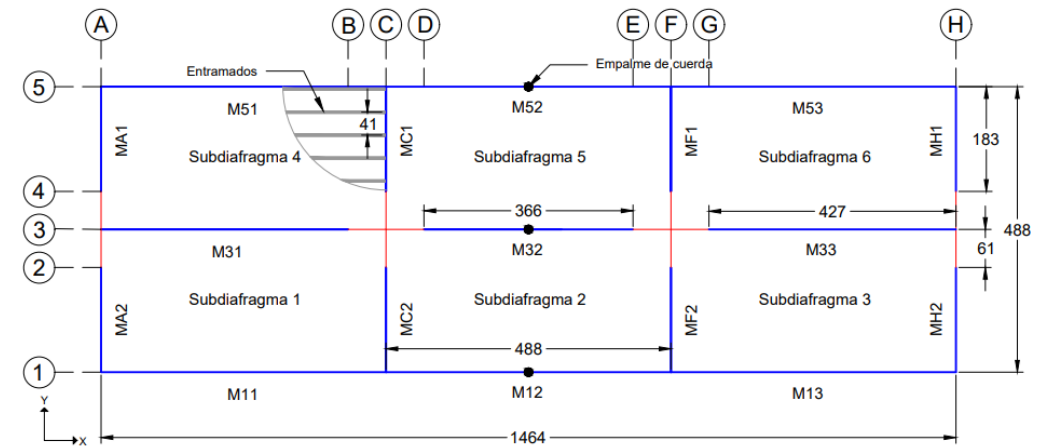


Figura 16: Planta del edificio de análisis, medidas en [cm]

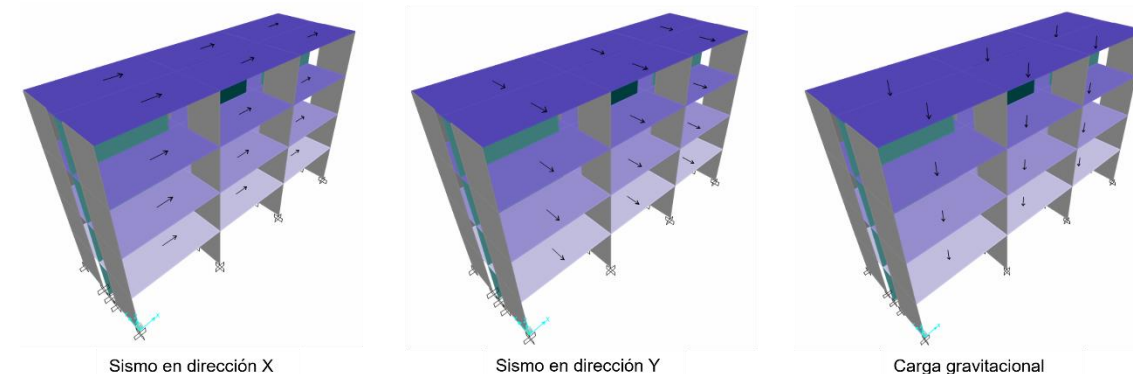


Figura 17: Edificio modelado con aplicación de cargas de superficie

# Resultados modelación de edificio

## Deformaciones laterales

Los resultados obtenidos en cada piso del edificio para los subdiafragmas 1 y 2 (figura 16) se comparan con las deformaciones calculadas a partir de la ecuación de deflexión de la SDPWS.

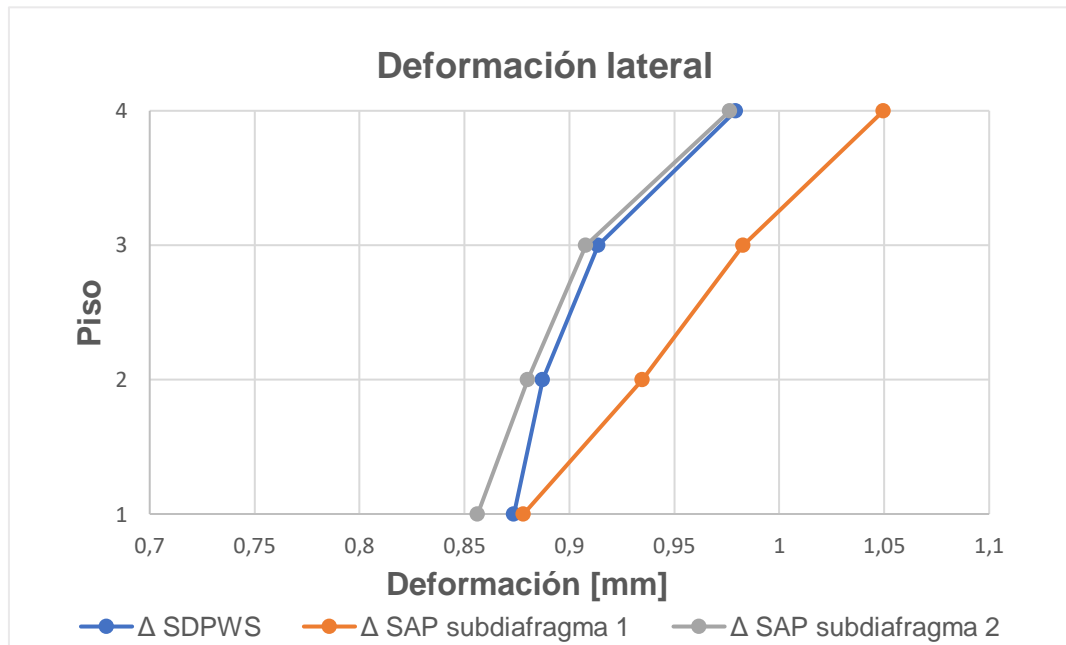


Figura 18: Deformación lateral subdiafragmas de edificación

## Distribución de fuerza de corte

Para el muro MC1 (figura 16) se calcula la distribución de fuerza de corte teórica para una idealización de diafragma rígido y flexible, que produce una distribución de corte según la rigidez de los muros y por área tributaria respectivamente. Para compararlo con los datos arrojados por la modelación, se utilizan diferentes condiciones de rigidez de los elementos verticales.

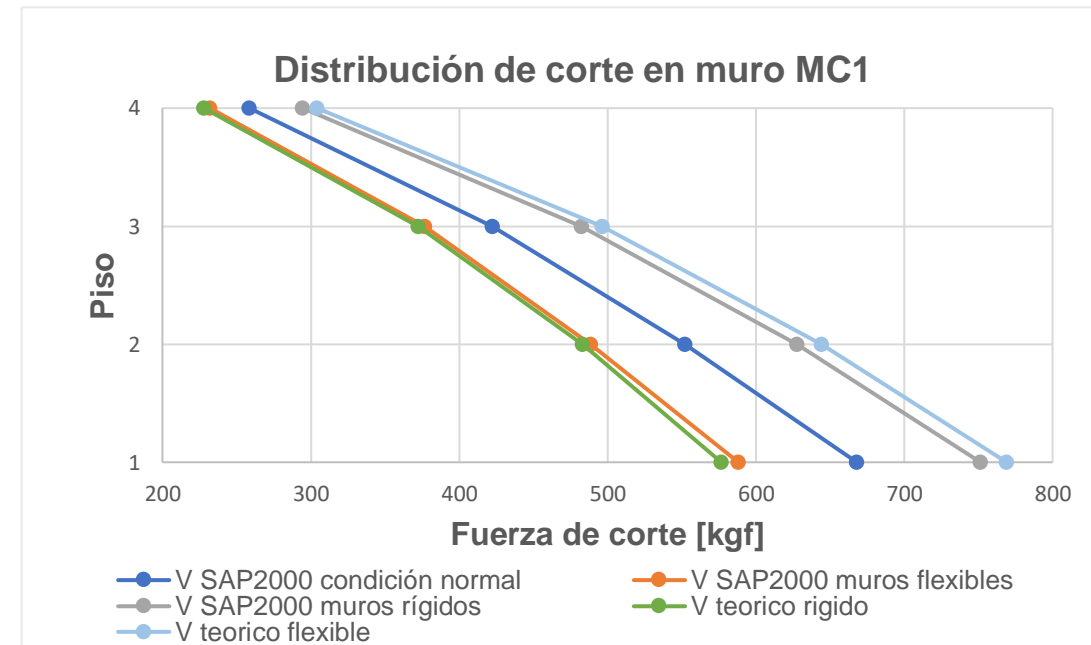


Figura 19: Distribución de corte desde macroelemento a muro MC1

# Resultados modelación de edificio

## Deformaciones gravitacionales

Los resultados obtenidos para el subdiafragma 2 de cada uno de los niveles del edificio, se comparan con la deformación gravitacional entregada por la modelación explícita de dicho subdiafragma.

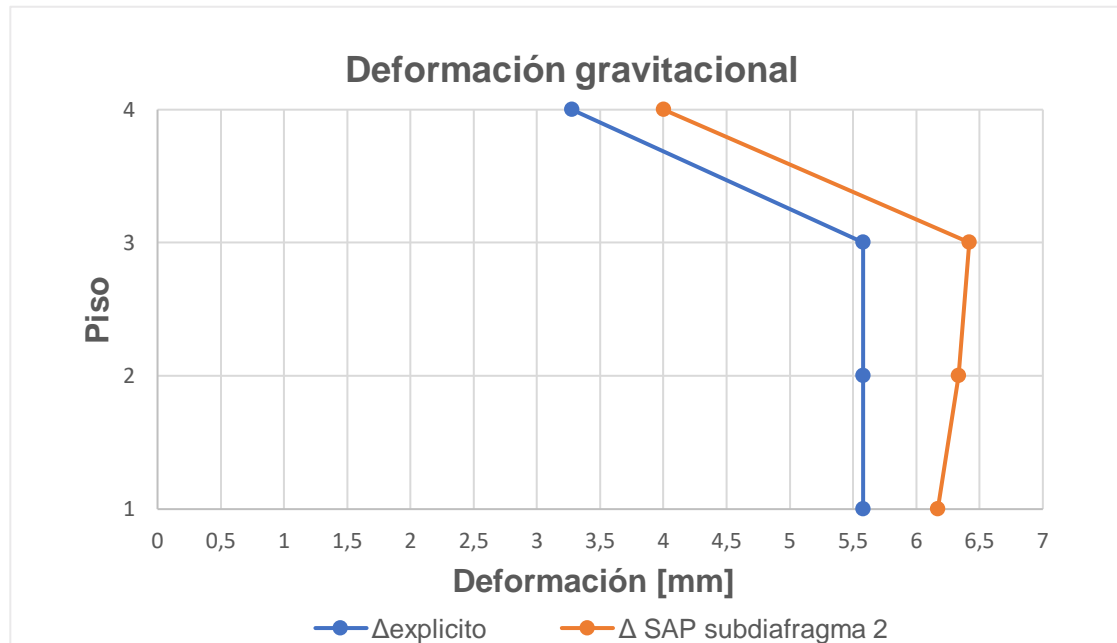


Figura 20: Deformación gravitacional en subdiafragmas en cada piso

## Distribución de carga a muros

Para los muros del piso 4 se obtiene la carga que cada uno de ellos recibe, formando agrupaciones para aquellos con una misma condición. De forma más ilustrada, la distribución se muestra en la figura 21.

Tipo de muro	Muros	Largo [m]	Carga [kg]	Carga distribuida [kg/m]
1	M11-M13-M51-M53	4,88	450,28	92,27
2	M12-M52	4,88	462,33	94,74
3	MA1-MA2-MH1-MH2	1,83	403,21	220,33
4	M31-M33	4,27	953,01	223,19
5	M32	3,66	992,33	271,13
6	MC1-MC2-MF1-MF2	1,83	783,14	427,95

Tabla 3: Carga distribuida recibida por cada muro distribuida por el macroelemento..

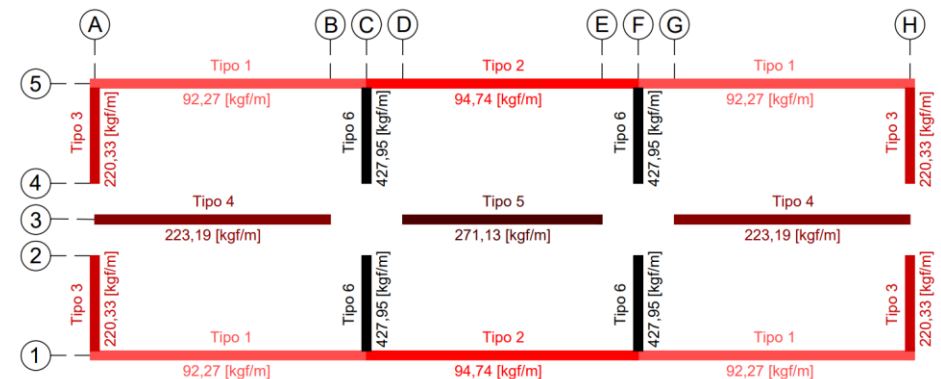


Figura 21: Distribución de carga gravitacional

# Resultados modelación de edificio

## Distribución de momentos

Para el análisis del comportamiento gravitacional, se extrae el diagrama de distribución de momentos principales de los subdiafragmas 1 y 2, con el fin de analizar si la distribución principal se realiza a lo largo de los entramados.

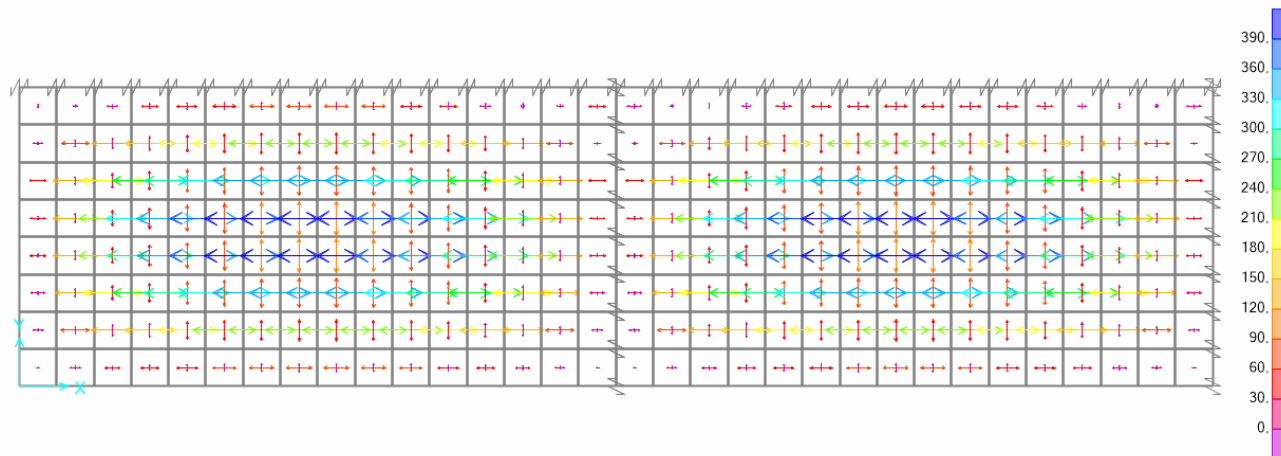


Figura 22: Diagrama de momentos principales

## Periodos fundamentales – sismo en dirección Y

Para el sismo en dirección Y perpendicular a los entramados según la figura 16, se obtienen los periodos fundamentales para las tres condiciones de rigidez de muros.

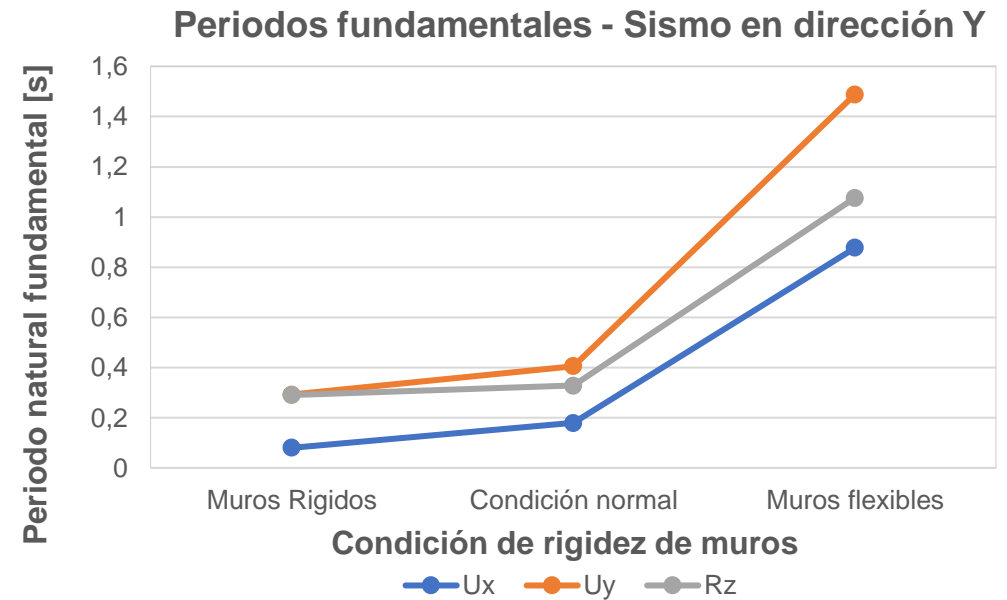


Figura 23: Periodos fundamentales

# Conclusiones

Del estudio realizado y los resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones:

- En la figura 18 se observa que las deformaciones arrojadas por la modelación son cercanas al valor teórico, obteniendo errores menores al 2%. También se aprecia que el subdiafragma 1 se aleja de la deformación indicada por la SDPWS, mientras que el subdiafragma 2, el cual se encuentra en el centro de la planta, posee deformaciones cercanas a este valor. Lo anterior se debe a que la deformación entregada por la teoría es calculada en el centro del subdiafragma, la cual solo coincide con el subdiafragma 2.
- La distribución de corte de la figura 19 muestra que en una condición normal de rigidez de muros, el subdiafragma distribuye de una forma intermedia entre rígido y flexible a los elementos verticales, según la disposición de la SDPWS. También se puede apreciar que para una condición de muros más rígidos y más flexibles, la distribución de corte a los elementos verticales se acerca de buena manera a la distribución teórica, lo que indica que bajo estas condiciones, el criterio para categorizar la rigidez del diafragma comparándola con la del sistema resistente a la carga lateral es correcto, pero para una situación normal donde, en este caso, a pesar de que la categorización indica que el diafragma es rígido, no se alcanza una distribución por rigidez, sino más bien semirrígida, lo que lleva al cuestionamiento sobre la posible falta de criterios adicionales para su clasificación.
- Con la figura 22 se concluye que el macroelemento distribuye principalmente a lo largo de la dirección de los entramados (indicados en la figura 16). Esto último genera que los muros dispuestos de manera perpendicular a los entramados reciban mayor concentración de carga gravitacional.
- En la figura 20, es posible apreciar que el macroelemento es capaz de representar de manera correcta la deformación del diafragma causada por el efecto gravitacional. Se observa un aumento en el error en los pisos superiores y esto se debe a la acumulación de la deformación axial de muros.