

# UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**Profesor Patrocinante:** Mg.Ing. Alexander Opazo Vega

**Profesores Comisión :** Mg.Ing. Ángela Salinas Barrera

Mg.Ing. Franco Benedetti Leonelli

## “EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES SÍSMICAS EN EDIFICIO CLT DE 5 PISOS”

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**CRISTIAN MURIEL SEPÚLVEDA VENEGAS**

Concepción, Abril 2017

*Dedicatoria:*

Difícilmente las palabras lograrán expresar todo la alegría y satisfacción que siento en este momento, pero deseo expresar mi infinita gratitud, a través de la culminación de este proceso, a todas aquellas personas que me ayudaron a ser lo que soy hoy en día.

Inicialmente a la Universidad por abrirme con afecto sus puertas, a todos los docentes que formaron mi carácter, a los que con su amistad me guiaron con aprecio en el camino del aprendizaje, a los que me retroalimentaron o los que con paciencia me enseñaron.

Agradezco a los compañeros que se hicieron amigos, los que confiaron en mí, a los que dedicaron largas horas de su tiempo en ayudarme, aquellos con los que avancé por este camino. Todo ese compañerismo, amistad, lealtad y alegría quedarán por siempre en mí.

A quien fue mi compañera durante todo este proceso, que nunca dudó en brindarme su ayuda, sus energías y ánimos en los momentos en que todo se veía complicado, agradecer cada momento en que su cariño me motivó.

Reconozco el esfuerzo de mi familia, el apoyo constante de mis padres y el aliento que siempre me brindaron. Por su optimismo y perseverancia, muchas gracias.

A todos ellos, y a los mucho que se quedan en el tintero, les dedico mi seminario de tesis, gracias a ustedes logré hacerlo.

Con el cierre de esta etapa, otra comienza... me alegro y enorgullezco de cada paso que di, las huellas que dejé, cada decisión que tomé y de todo lo que adquirí.

Gracias, de todo corazón.

## **EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES SÍSMICAS EN EDIFICIO CLT DE 5 PISOS**

**Autor: Cristian Sepúlveda Venegas**

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

Correo Electrónico: [csepulvedavenegas@gmail.com](mailto:csepulvedavenegas@gmail.com)

**Profesor Patrocinante: Mg.Ing Alexander Opazo Vega**

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

Correo Electrónico: [aopazove@gmail.com](mailto:aopazove@gmail.com)

### **RESUMEN**

En la actualidad, todo apunta al desarrollo tecnológico sustentable que minorice el impacto al medio ambiente y Chile como importante exponente maderero debe hacer uso de ese noble recurso que es la madera.

La edificación en madera es poco considerada en Chile, por lo que se debe demostrar que es posible desarrollar construcciones de eficiente con este material, en particular el CLT (Paneles de madera contralaminda).

El desarrollo de esta tesis busca ser un aporte al respecto, analizando si posible construir edificios de mediana altura de CLT, abriendo las puertas a posibles que investigaciones.

En esta investigación se evaluó las deformaciones sísmicas de un edificio de 5 pisos en base a CLT, bajo la normativa vigente en Chile. Se analizaron los resultados de variadas tipologías de construcción para cada zona sísmica y tipo de suelo en base a un algoritmo denominado Rossi programado en MATLAB.

Del análisis de los desplazamientos relativos entre piso, se concluyó que es posible construir edificios en base a CLT en Chile cumpliendo las normativas actuales, también queda en evidencia la necesidad de trabajar la normativa que regula la construcción en madera.

### **Palabras**

6246 Palabras Texto + 25 Figuras/Tablas\*250 + 6 Figuras/Tablas\*500 =15496 Palabras aprox.

## **EVALUATION OF SEISMIC DEFORMATIONS IN CLT BUILDING OF 5 FLOORS**

**Author: Cristian Sepúlveda Venegas**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of the Bío Bío

Email: [csepulvedavenegas@gmail.com](mailto:csepulvedavenegas@gmail.com)

**Professor Sponsor: Alexander Opazo Vega**

Department of Civil and Environmental Engineering, University of the Bío Bío

Email: [aopazove@gmail.com](mailto:aopazove@gmail.com)

### **ABSTRACT**

At present, everything aims at sustainable technological development that minimizes the impact on the environment and Chile as an important woodworker should make use of that noble resource that is wood.

The building in wood is little considered in Chile, so it must demonstrate that it is possible to develop constructions of efficiency with this material, in particular the CLT (Cross Laminated Timber).

The development of this thesis seeks to be a contribution in this regard, analyzing if possible to construct buildings of medium height of CLT, opening the doors to possible investigations.

This research evaluated the seismic deformations of a building of 5 floors based on CLT, under the regulations in force in Chile. The results of different construction typologies for each seismic zone and soil type were analyzed based on an algorithm called Rossi programmed in MATLAB.

From the analysis of the displacements between the floors, it was concluded that it is possible to construct the buildings in a CLT base in Chile complying with the current regulations, as well as the fall in evidence the need to work the regulation that regulates the construction in wood.

Keywords: CLT, Drift, Connectors

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Metodología de trabajo.....	3
2. ASPECTOS CLAVES PARA ESTUDIO DE DEFORMACIONES SÍSMICAS EN EDIFICIOS CLT. ....	4
2.1. Cross Laminated Timber.....	4
2.2. Conectores metálicos a utilizar en la modelación sísmica.....	6
2.3. Propuesta de modelación de deformaciones sísmicas.....	8
2.4. Drift de piso.....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN. ....	12
3.1. Caracterización de muros CLT. ....	13
3.1.1. Largo, altura y espesor de paneles estructurales CLT. ....	13
3.1.2. Cargas sobre muros estructurales CLT. ....	13
3.1.3. Módulo de corte.....	15
3.1.4. Características de Hold-Downs y Angle Brackets.....	15
3.2. Análisis estático.....	17
3.2.1. Coeficiente sísmico (C) .....	17
3.2.2. Corte basal .....	17
3.2. Herramienta computacional para modelación de deformaciones sísmicas.....	18
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	19
4.1 Drift en Zona 1 Suelo A.....	20
4.2 Drift en Zona 1 Suelo B.....	21
4.3 Drift en Zona 1 Suelo C.....	21
4.4 Drift en Zona 1 Suelo D.....	22
4.5 Drift en Zona 1 Suelo E.....	22
4.6 Drift en Zona 2 Suelo A.....	23
4.7 Drift en Zona 2 Suelo B.....	24
4.8 Drift en Zona 2 Suelo C.....	24
4.8 Drift en Zona 2 Suelo D.....	25
4.9 Drift en Zona 2 Suelo E.....	25
4.10 Drift en Zona 3 Suelo A.....	26

4.11 Drift en Zona 3 Suelo B. ....	26
4.11 Drift en Zona 3 Suelo C. ....	27
4.12 Variación drift por tipo de suelo. ....	27
4.12 Variación de drift por zona sísmica.....	28
4.13 Variación de drift por conector a tracción.....	29
4.13 Variación de drift por espaciamiento de los Angles Brackets. ....	29
4.13 Variación de drift por número de capas en muro CLT. ....	30
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN. ....	31
5.1 Conclusiones.....	31
5.2 Recomendaciones de líneas de investigación. ....	33
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	34
7. ANEXOS .....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Metodología de trabajo.....	3
Tabla 2. Parámetros $p$ y $q$ para $\alpha_T$ de Dröscher (2014).....	6
Tabla 3. Resultados de ensayos mecánicos para distintos conectores Rothoblass.....	7
Tabla 4. Chequeo de capacidad de conectores con losa en sentido longitudinal.....	19
Tabla 5. Chequeo de capacidad de conectores con losa en sentido transversal.....	20
Tabla 6. Chequeo de drift normativo nacional.....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes configuraciones de paneles CLT.....	3
Figura 2. Dibujo esquemático de sección transversal de CLT de 5 capas.....	5
Figura 3. Esquema de conectores metálicos. Angle Bracket y Hold-Down respectivamente.....	7
Figura 4. Esquema de sistema de n muros alineados horizontalmente.....	9
Figura 5. Esquema de sistema de m x n muros de un edificio.....	11
Figura 6. Esquema de arquitectura en planta para edificio de 5 pisos con muros reforzados.....	12
Figura 7. Muros CLT comprimidos según disposición de losa.....	14
Figura 8. Ejemplo de abreviatura de tipologías de diseño.....	19
Figura 9. Drift en Zona 1 Suelo A.....	21
Figura 10. Drift en Zona 1 Suelo B.....	21
Figura 11. Drift en Zona 1 Suelo C.....	22
Figura 12. Drift en Zona 1 Suelo D.....	22
Figura 13. Drift en Zona 1 Suelo E.....	23
Figura 14. Drift en Zona 2 Suelo A.....	23
Figura 15. Drift en Zona 2 Suelo B.....	24
Figura 16 Drift en Zona 2 Suelo C.....	24
Figura 17. Drift en Zona 2 Suelo D.....	25
Figura 18. Drift en Zona 2 Suelo E.....	25
Figura 19. Drift en Zona 3 Suelo A.....	26
Figura 20. Drift en Zona 3 Suelo B.....	26
Figura 21. Drift en Zona 3 Suelo C.....	27
Figura 22. Variación de drift por tipo de suelo.....	28
Figura 23. Variación de drift por zona sísmica.....	28
Figura 24. Variación de drift por conector a tracción.....	29
Figura 25. Variación de drift por espaciamiento de Angles Brackets.....	29
Figura 26. Variación de drift por capas de muros CLT.....	30



## **1. INTRODUCCIÓN.**

### **1.1. Antecedentes.**

Actualmente la humanidad ha ido tomando conciencia de la condición ambiental del planeta, dándose así la necesidad de disminuir la huella de carbono generada de los procesos constructivos. Es debido a esto, que la tendencia se ha ido inclinando progresivamente en la búsqueda de recursos amigables con el entorno, siendo la utilización de la madera un gran exponente.

Países pioneros en la utilización de madera ya han mostrado experiencias positivas en su uso, siendo un buen ejemplo la construcción en base a madera contralaminada o Cross Laminated Timber (CLT por sus siglas en inglés), permitiendo satisfactoriamente edificaciones a mediana y gran escala (Gagnon y Pirvu, 2011).

Chile es uno de los principales productores de madera a nivel mundial, utilizando el onceavo lugar en el ranking (Corporación Chilena De la Madera, 2015), esto demuestra el potencial nacional que se tiene para hacer un buen uso ingenieril de este recurso. Sin embargo en nuestro país no se explota completamente este elemento de construcción, ya que su utilización se limitada principalmente a un uso provisorio de viviendas sociales.

Es por esto que se requiere sumar más conocimiento sobre edificaciones de mediana altura en base a madera en Chile. Hoy en día se realizan diversos estudios que pretenden adecuar el comportamiento de estas estructuras a la realidad chilena, siendo la Universidad de Bío-Bío una fuente importante de estas investigaciones.

### **1.2. Justificación.**

El CLT es un elemento constructivo probado en países más desarrollados pero considerado nuevo en Chile, por tanto, es imperativo generar conocimientos en nuevas técnicas de modelación, que permitan simular diversos comportamientos de estructuras, en base a este método constructivo.

Un aspecto relevante en la investigación será el comportamiento sísmico que debe ser evaluado bajo el alero de la normativa chilena vigente, normativa ideada para elementos estructurales convencionales como el hormigón armado. Esta norma no considera las propiedades mecánicas del CLT, siendo un parámetro crítico el desplazamiento relativo entre pisos o drift, el que es en extremo exigente para un elemento que tolera altas deformaciones como la madera.

Este estudio utilizará un método de modelación de deformaciones sísmicas adecuado para CLT, en la arquitectura de un edificio de uso habitacional de mediana altura de interés social (cinco pisos). Se buscará evaluar estas deformaciones bajo las exigencias de la normativa actual chilena y así obtener nociones del comportamiento sísmico de este método constructivo en el país.

### **1.3. Objetivos.**

#### *1.3.1. Objetivo general.*

Evaluar las deformaciones sísmicas para distintas tipologías constructivas de un edificio de mediana altura estructuradas con paneles de madera contralaminada (CLT).

#### *1.3.2. Objetivos específicos.*

- Revisar el estado del arte e investigación en técnicas de modelación de deformaciones sísmicas en edificios de mediana altura de CLT.
- Implementar una rutina matemática que permita determinar deformaciones sísmicas en un edificio de mediana altura de CLT.
- Aplicar el programa computacional para el cálculo de deformaciones sísmicas a variadas tipologías constructivas para una arquitectura CLT.
- Analizar y dimensionar niveles de drift en las alternativas estructurales respecto a la normativa chilena e internacional.

#### 1.4. Metodología de trabajo.

El procedimiento empleado para el desarrollo de esta investigación se dividirá en tres etapas principales, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Metodología de trabajo.**

ETAPA	SUB-ETAPAS			HITO
Estudio de Antecedentes.	Revisión del estado del arte respecto a CLT.	Revisión bibliográfica específica.	Estudio de normativa vigente.	Dimensionamiento de alternativas adecuadas a la realidad chilena.
Desarrollo de algoritmo.	Análisis de rutina matemática.	Determinación de variables.	Testeo de algoritmo.	Herramienta computacional para CLT.
Aplicación de herramienta computacional.	Definición de arquitectura.	Análisis de variables.	Ejecución de algoritmo.	Resultados de modelación de deformaciones sísmicas.

En la figura anterior se muestra como cada etapa se divide en sub-etapas, necesarias para la realización de un hito, para luego iniciar así la etapa siguiente concluyendo al hito final.

En la primera etapa se realiza el estudio de material bibliográfico específico de CLT, lo que es necesario para el dimensionamiento de alternativas adecuadas a la realidad chilena.

Para la segunda etapa se estudia un algoritmo matemático, el cual permitirá el desarrollo de una herramienta computacional para calcular deformaciones sísmicas en edificio CLT de mediana altura.

En la última etapa se aplica la herramienta computacional, determinando deformaciones sísmicas en una arquitectura CLT considerando distintas tipologías de constructivas.

## 2. ASPECTOS CLAVES PARA ESTUDIO DE DEFORMACIONES SÍSMICAS EN EDIFICIOS CLT.

En este capítulo se profundizará sobre propiedades de elementos CLT, herrajes a utilizar, método de modelación de la estructura y se explicará el concepto de drift. Estos corresponden a aspectos fundamentales para el estudio de deformaciones sísmicas en un edificio CLT de mediana altura.

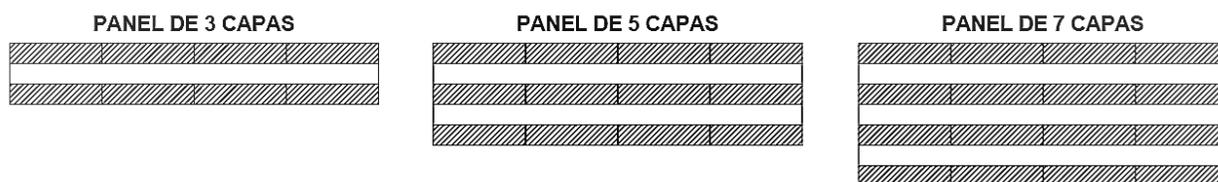
### 2.1. Cross Laminated Timber.

La madera contralaminada fue desarrollada por primera vez en Alemania y Austria. La elaboración de este material fue lento, debido a que era considerado como un material liviano, no comparable a sistemas constructivos más tradicionales como el hormigón armado, pero su crecimiento fue impulsado por nuevos proyectos en base a “construcción verde”.

La experiencia europea indica que el CLT es un tipo de construcción competitiva sobre todo en estructuras de mediana y gran envergadura (Gagnon y Pirvu, 2011), donde es utilizado en losas estructurales y muros. Este método constructivo ha sido utilizado hasta en edificios de nueve pisos como el Stadthaus en Londres.

Estos paneles son hechos en base a lamelas de madera aserrada en cantidades impares, unidas en noventa grados entre sí con un potente adhesivo, para luego ser prensadas, formando un bloque macizo. Los más utilizados son paneles de tres, cinco y hasta siete capas.

En la Figura 1. Se observan distintos tipos de paneles CLT.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 1. Diferentes configuraciones de paneles CLT.**

Las distintas configuraciones de capas en los paneles CLT, observados en la figura anterior, pueden ir variando en espesor respecto a las dimensiones de los elementos de madera utilizados. Las variaciones de capas y espesores provocan cambios en propiedades estructurales de estos.

Las propiedades mecánicas de los paneles cambian según las calidades de las tablas utilizadas para producir los elementos de CLT, donde el módulo de elasticidad  $E_{0,madera}$  y el módulo de corte  $G_{0,madera}$  están dirigidos a las fibras paralelas al eje fuerte del panel.

La norma NCh1198 of2014 establece las siguientes relaciones (Anexo A):

$$G_{0,madera} = 0.065 * E_{0,madera}$$

Es fundamental estimar el módulo de corte en el eje débil del CLT ( $G_{90,CLT}$ ) para obtener su rigidez horizontal, según Bogensperger et al. (2008) es posible calcular teóricamente  $G_{90,CLT}$  con la expresión:

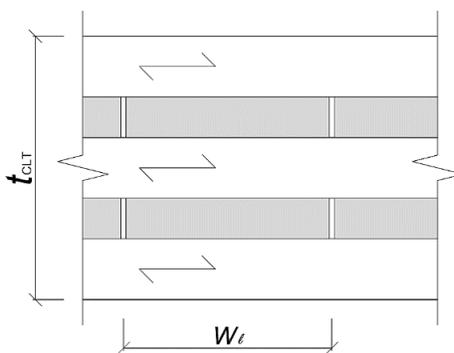
$$G_{90,CLT} = \frac{G_{0,madera}}{1 + 6 * \alpha_T * \left(\frac{t_{l,mean}}{w_l}\right)^2}$$

Con  $\alpha_T$  y  $t_{l,mean}$  como:

$$\alpha_T = p * \left(\frac{t_l}{w_l}\right)^q$$

$$t_{l,mean} = \frac{t_{CLT}}{N}$$

Siendo  $N$  el número de capas del elemento CLT,  $w_l$  y  $t_{CLT}$  el ancho individual de cada pieza de madera y el espesor total del panel respectivamente. Estas dimensiones se representan en la Figura 2.



Fuente: elaboración propia.

**Figura 2. Dibujo esquemático de sección transversal de CLT de 5 capas.**

Los términos  $p$  y  $q$  son variables de ajuste estadístico según Dröscher (2014), estos valores son resultado de una serie de ensayos cuya validez estadística es representativa. Estos términos varían según el número de capas del CLT como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Parámetros  $p$  y  $q$  para  $\alpha_T$  de Dröscher (2014).**

Número de capas	$p$	$q$
3	0.53	-0.79
5	0.43	-0.79
7	0.39	-0.79

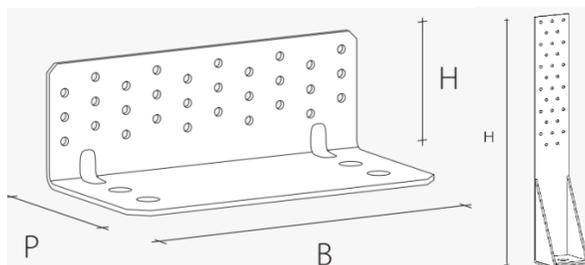
## 2.2. Conectores metálicos a utilizar en la modelación sísmica.

Con el sentido de realizar una efectiva modelación de deformaciones sísmicas de una estructura, es necesario caracterizar correctamente los dos conectores metálicos a utilizar. Propiedades de estos serán parámetros claves al momento de realizar el cálculo de desplazamientos horizontales y la posibilidad de un análisis factible de datos dependerá de si estos elementos serán capaces o no de resistir las cargas solicitantes.

El primero de estos conectores es el Angle Bracket (AB). Esta pieza metálica en forma de ángulo que va paulatinamente a lo largo del muro, está diseñado para resistir en conjunto los esfuerzos cortantes a los que se verá sometido este debido a las fuerzas de corte en las bases de cada piso.

El segundo conector es el Hold-Down (HD), este elemento está diseñado para trabajar a tracción, es el encargado de resistir los esfuerzos volcantes a los que se ven sometido los muros, ubicándose uno a cada extremo.

Ambos elementos a considerar serán los diseñados por la empresa de origen italiana Rothoblass, los que se muestran a continuación en la Figura 3.



Fuente: Manual Rothoblass (2015)

**Figura 3. Esquema de conectores metálicos. Angle Bracket y Hold-Down respectivamente.**

Es necesario definir las propiedades mecánicas que se considerarán para estos elementos conectores. Los parámetros son los resultados a raíz de una serie de ensayos mecánicos realizados por Casagrande et al (2016). La Tabla 3. Muestra los resultados para variados tipos de AB y HD.

**Tabla 3. Resultados de ensayos mecánicos para distintos conectores Rothoblass. Casagrande et al (2016).**

Ensayo	F <sub>máx</sub> (kN)	K (N/mm)
TCF_200	41.03	8479
TTF_200	70.04	8945
TCN_240 (Tracción)	93.80	28455
WHT340	60.19	5705
WHT440	78.14	6609
WHT620*	107.32	13247
WHT620 P	100.08	9967

En la tabla anterior se muestran los valores de resistencia máxima ( $F_{max}$ ) y rigidez elástica (K) para distintos tipos de conectores (Casagrande et al., 2016), donde TCF\_200, TTF\_200 y TCN\_240 corresponden a uniones tipo Angle Brackets y siendo WHT340, WHT440, WHT260 y WHT620 del tipo Hold-Down.

Para AB los resultados de  $F_{max}$  corresponden a resistencias de corte y para los HD corresponden a tracción. Cabe recalcar que un AB, el de denominación TCN\_240, fue ensayado a tracción obteniendo altos niveles de resistencia, siendo así una alternativa válida al tradicional Hold-Down.

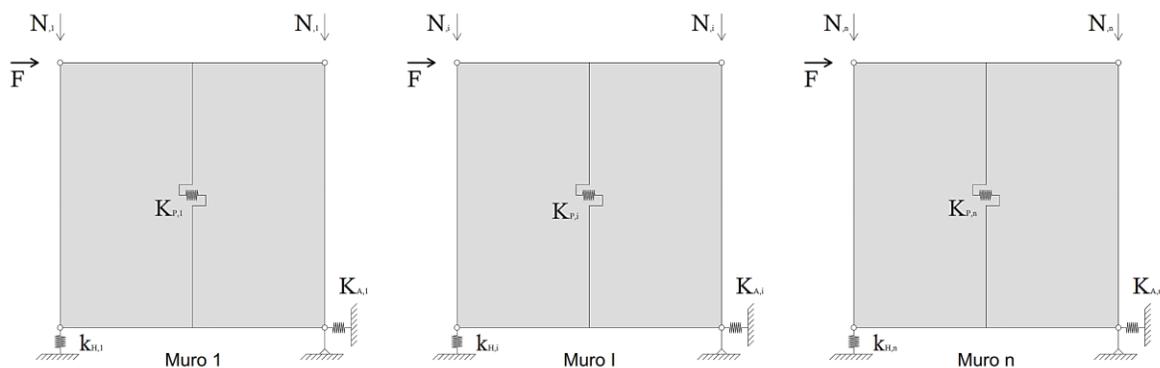
Es importante considerar que los valores de resistencia máxima se dividirán por un factor de seguridad de 2.5 para así considerarlo en el rango elástico, para luego multiplicarlo por un factor de duración de carga de 1.6 según la norma Nch1198 of2014 para sismo (Anexo B), no así a las rigideces cuyos valores se encuentran en el rango elástico.

Que la resistencia de estos elementos no sea superada, será considerada un factor crucial en la futura modelación, puesto que no se puede evaluar deformaciones sísmicas si ya antes se ve comprometida la resistencia de estas uniones metálicas.

### **2.3. Propuesta de modelación de deformaciones sísmicas.**

Una propuesta es la hecha por Casagrande et al (2015), en que idearon una herramienta simplificada para el análisis elástico de muros de corte para estructuras de un piso de madera bajo cargas horizontales y verticales. Este método es adecuado tanto para construcciones en madera del tipo tradicional como también para el sistema CLT.

Este tipo de modelación trata de expresiones analíticas que permiten determinar desplazamientos horizontales y la rigideces elásticas de muros de composición simple, extendida también para sistemas de muros en serie, como se aprecia en la Figura 4.



Fuente: Casagrande et al (2015)

**Figura 4. Esquema de sistema de n muros alineados horizontalmente.**

En la figura anterior se representa un sistema de muros en serie trabajando en conjunto, recibiendo una carga horizontal (F) y cargas verticales (N). El método determina rigideces equivalentes ( $K_{TOT}$ ), considerando las rigideces proporcionadas por el panel CLT ( $K_P$ ), conectores de corte ( $K_A$ ) y conectores a tracción ( $K_H$ ).

La rigidez horizontal del muro ( $K_{TOT}$ ) está dada por la ecuación (Rossi et al, 2015):

$$K_{TOT} = \left( \frac{1}{K_P} + \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_H} \right)^{-1}$$

$$\frac{1}{K_P} = \frac{h}{G_{90,CLT} * t_p * l}$$

$$\frac{1}{K_A} = \frac{i_a}{K_a * l}$$

$$\frac{1}{K_H} = \frac{h^2}{K_h * (\tau * l)^2}$$

En donde:

$h$  = altura de muro CLT.

$t_p$  = espesor de muro CLT.

$l$  = longitud de muro CLT.

$i_a$  = espaciamiento de conectores de corte.

$K_a$  = rigidez elástica de conector de corte.

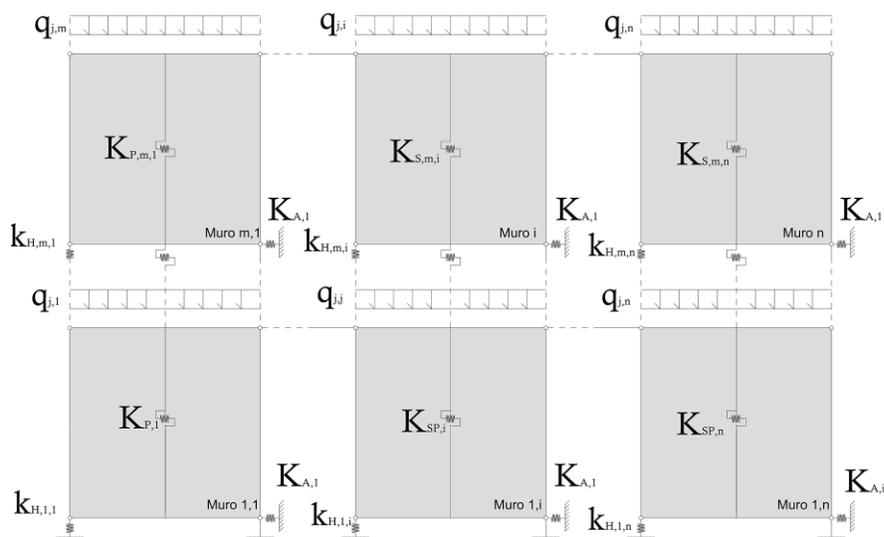
$K_h$  = rigidez elástica de conector a tracción.

$\tau$  = número que representa la distancia entre los conectores a tracción, para esta investigación se utiliza 0.9.

El paso siguiente en vías de una modelación de deformaciones horizontales en edificaciones de más pisos, es el realizado por Rossi et al (2015). Este algoritmo usa el trabajo mencionado anteriormente y lo extiende a edificios de mayor escala.

Este método permite determinar deformaciones sísmicas para sistemas de muros en construcciones de dos o más pisos a través de un proceso matricial iterativo. Considera cargas horizontales y verticales, además de los distintos estados del conector HD, enfatizando si este se encuentra o no en tracción debido a las distintas combinaciones de carga.

La Figura 6 esquematiza una distribución de muros  $m \times n$ , representando el comportamiento elástico de una estructura de más de un piso de altura.



Fuente: Rossi et al (2015)

**Figura 6. Esquema de sistema de m x n muros de un edificio.**

#### 2.4. Drift de piso.

El drift de piso corresponde a una relación entre el desplazamiento horizontal de un piso, relativo a la posición del anterior, y la altura de este. El parámetro posee un rango máximo, el que debe ser cumplido por todas las estructuras en Chile.

El drift entre dos pisos consecutivos, medido en el centro de masa de cada una de las direcciones de análisis, no debe ser mayor que la altura entre piso multiplicada por 0.002 (NCh433 of2011).

El nivel de drift permitido, es coherente con métodos de construcción tradicionales como hormigón armado, elementos que no presentan una considerable tolerancia a la deformación. No así la madera, el cual es un material altamente flexible, por lo que esta normativa le es en extremo exigente.

En países como E.E.U.U., donde la edificación en madera está más consolidada, los edificios de marco ligero son permitidos a una deriva elástica de un 0.5% (Dolan et al, 2008). Esto permite más holgura para elementos altamente deformables, no así en Chile que se rige por un 0.2%.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN.

Para el desarrollo de la investigación se utilizará la arquitectura de un edificio de 5 pisos de 12.2 metros de altura y un área aproximada por piso de 288 m<sup>2</sup>. En la Figura 8 se puede observar un esquema de la planta de esta estructura.



**Figura 6. Esquema de arquitectura en planta para edificio de 5 pisos con muros reforzados.**

En la figura anterior se observa la distribución de muros estructurales CLT de la edificación, en el que análisis preliminares indicaron la necesidad de reforzar los muros coloreados de amarillo. Estos muros son considerados críticos, debido a los esfuerzos de tracción a los que se verán sometidos. Es por esto que para garantizar un mejor comportamiento de la estructura se utilizará doble hold-down por cada extremo de estos muros, aumentando su capacidad admisible a la tracción.

La losa tendrá un espesor equivalente a 5 lamelas y será considerada como diafragma rígido, no se considerarán deflexiones en su plano; se trasladará y rotará de forma rígida en su totalidad.

### **3.1. Caracterización de muros CLT.**

El método de modelación ya antes descrito (punto 2.3), requiere de una caracterización detallada de cada muro perteneciente al edificio. Se deberá determinar parámetros, de cuya veracidad dependerá la confiabilidad de los resultados.

Se debe mencionar que el método considera muros estructurales llenos (segmentos verticales sin aberturas, Anexo C), los muros cuya extensión posean aberturas, serán dividido en segmentos menores. Para la arquitectura ya especificada, los muros considerados variarán entre 66 y 68, dependiendo de la disposición de la losa.

Diversos parámetros dependerán exclusivamente de la calidad del material. Para este estudio se utilizará madera pino radiata de clasificación mecánica C16, la cual corresponde a la calidad más disponible en el mercado. Las propiedades del pino radiata C16 se presentan en la parte b) de la Tabla 4 de la norma NCh1198 of2014 (Anexo D).

#### *3.1.1. Largo, altura y espesor de paneles estructurales CLT.*

El largo de cada muro corresponderá según lo que indique la arquitectura. La altura de cada panel CLT será la misma en cada piso del edificio (244 centímetros).

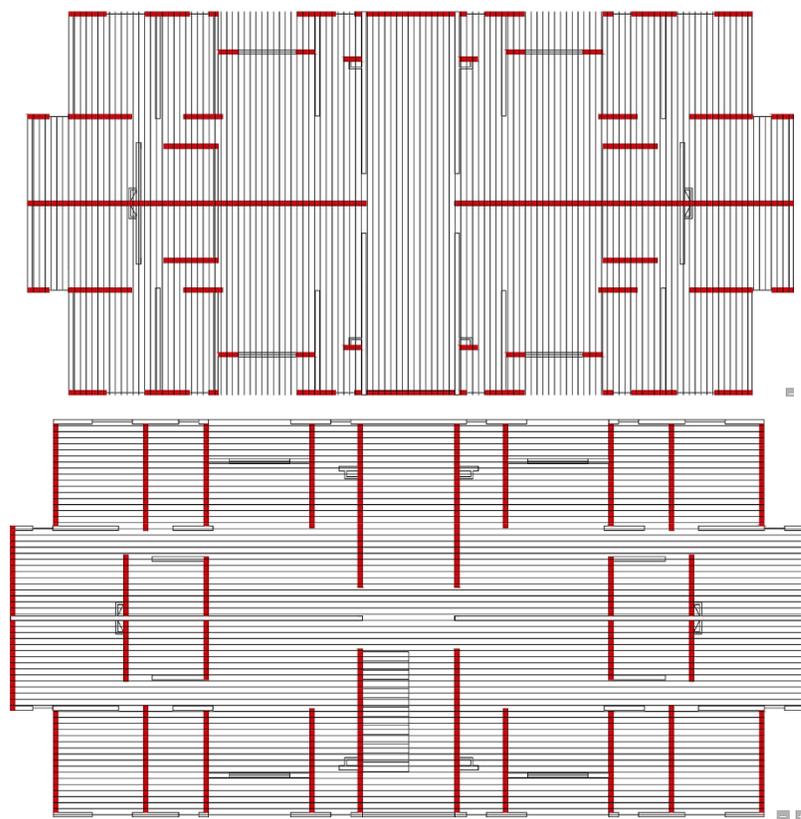
Respecto al espesor de los muros estructurales, se modelarán tanto para tres capas con un espesor de 99 milímetros y de cinco capas con espesor total de 165 milímetros. Esto para poder determinar diferencias en el comportamiento sísmico entre uno y otro, además de realizar sugerencias entre las dos opciones.

#### *3.1.2 Cargas sobre muros estructurales CLT.*

Es necesario determinar las cargas a las que se verán sometidos estos muros: (Anexo E), carga vertical permanente o de peso propio (D) incluyendo peso de la losa, sobrecarga (L) de 2 kPa. y sobrecarga de techo (Lr) de 1kPa. Se debe considerar también la masa sísmica estipulada por la norma NCh433 of96 para modelos estructurales, donde se considera la carga permanente más un porcentaje de sobrecarga no inferior al 25%, en este modelo se utilizará  $D + 0.25L$ .

El detalle de estas cargas será posteriormente analizado por el método de modelación, teniendo en cuenta las combinaciones de cargas mencionadas en la norma NCh3171 of2010 considerando la torsión accidental (MT) y carga horizontal sísmica (S) explicadas en NCh433 of2011. En el Anexo F se muestran las combinaciones de carga utilizadas.

La distribución de cargas en los muros estructurales varía respecto a la dirección en que se instalará la losa, longitudinal respecto al esquema de la Figura 9 comprimiendo los muros paralelos al eje Y, como también transversal comprimiendo los muros paralelos al eje X. La figura 7 representa los muros que se comprimen para cada disposición de losa.



**Figura 7. Muros CLT comprimidos según disposición de losa.**

A raíz de estas variaciones es que podemos por ahora definir cuatro casos de estudio:

- (a) Muros CLT de 3 capas con losa instalada paralelamente al eje X.
- (b) Muros CLT de 3 capas con losa instalada paralelamente al eje Y.
- (c) Muros CLT de 5 capas con losa instalada paralelamente al eje X.
- (d) Muros CLT de 5 capas con losa instalada paralelamente al eje Y.

Hay que mencionar que cada caso será analizado para sismos en las direcciones X e Y.

### *3.1.3. Módulo de corte.*

Para el cálculo del módulo de corte se requerirá de las ecuaciones indicadas en el Capítulo 2.1. Se utilizará un módulo de elasticidad señalado en la Tabla 4 de la norma NCh1198 of2014, correspondiente a elementos de madera de clasificación mecánica C16 igual a 7900 MPa.

El módulo de corte ( $G_{90,CLT}$ ) depende del módulo de elasticidad, espesor y número de capas de CLT, siendo 328 N/mm<sup>2</sup> y 350 N/mm<sup>2</sup> para muros de 3 y 5 capas respectivamente, utilizando las ecuaciones señaladas en el punto 2.1.

### *3.1.4. Características de Hold-Downs y Angle Brackets*

Como se mencionó antes en el Capítulo 2.2., la efectividad de los conectores metálicos es crucial a la hora de una buena modelación y obtención de fidedignos resultados de deformaciones sísmicas. Los drift no se pueden evaluar si antes no se corrobora el correcto funcionamiento de estos elementos.

Los Hold-Downs se ubican uno a cada extremo de muro y debido a las altas tensiones que se esperan tener en estos elementos, es que el HD a utilizar en una primera iteración de diseño será el de mayor resistencia mencionada en la Tabla 2. El WHT620\* posee una rigidez de aproximadamente 13000 N/mm y resistencia máxima de 107.32 kN.

Como segunda alternativa, se verificará el Angle Bracket ensayado a tracción mostrado en la Tabla 2. El TCN\_240 tiene rigidez de 28000 N/mm y  $F_{max}$  de 93.8 kN.

El conector de corte a utilizar será el de menor resistencia según la Tabla 2 dado a la utilización de una serie de estos por muro. El TCF\_200 con una rigidez de 8000 N/mm y capacidad de corte por conector de 41.63 kN. Se verificarán dos opciones de distribución de estos elementos, en un primer caso a lo largo de los muro cada 500 milímetros y en un siguiente caso cada 1000 milímetros. Esta variación en distanciamiento entre uno y otro determinara la cantidad de AB que utilizamos en cada muro, y esto a la vez el esfuerzo de corte que deberá resistir cada uno.

La carga admisible para cada herraje, según lo indicado en el punto 2.2, corresponde a las expresiones:

$$F_{WHT620*(tracción)} = \frac{F_{max}}{2.5} * 1.6 = \frac{107.32 \text{ kN}}{2.5} * 1.6 = 68.69 \text{ kN}$$

$$F_{TCN_240(tracción)} = \frac{F_{max}}{2.5} * 1.6 = \frac{93.8 \text{ kN}}{2.5} * 1.6 = 60.03 \text{ kN}$$

$$F_{TCF_200(corte)} = \frac{F_{max}}{2.5} * 1.6 = \frac{41.63 \text{ kN}}{2.5} * 1.6 = 26.64 \text{ kN}$$

De esta forma, considerando los casos mencionados en el Capítulo 3.1.2 es que aparecen 16 casos de estudio, correspondientes a distintas tipologías de diseño de la estructura:

- (a) Muros CLT de 3 capas, losa paralela a eje X, con WHT620\* y TCF\_200 cada 500 mm.
- (b) Muros CLT de 3 capas, losa paralela a eje X, con WHT620\* y TCF\_200 cada 1000 mm.
- (c) Muros CLT de 3 capas, losa paralela a eje X, con TCN\_240 y TCF\_200 cada 500 mm.
- (d) Muros CLT de 3 capas, losa paralela a eje X, con TCN\_240 y TCF\_200 cada 1000 mm.
- (e) Muros CLT de 3 capas, losa paralela a eje Y, con WHT620\* y TCF\_200 cada 500 mm.
- (f) Muros CLT de 3 capas, losa paralela a eje Y, con WHT620\* y TCF\_200 cada 1000 mm.
- (g) Muros CLT de 3 capas, losa paralela a eje Y, con TCN\_240 y TCF\_200 cada 500 mm.
- (h) Muros CLT de 3 capas, losa paralela a eje Y, con TCN\_240 y TCF\_200 cada 1000 mm.
- (i) Muros CLT de 5 capas, losa paralela a eje X, con WHT620\* y TCF\_200 cada 500 mm.

- (j) Muros CLT de 5 capas, losa paralela a eje X, con WHT620\* y TCF\_200 cada 1000 mm.
- (k) Muros CLT de 5 capas, losa paralela a eje X, con TCN\_240 y TCF\_200 cada 500 mm.
- (l) Muros CLT de 5 capas, losa paralela a eje X, con TCN\_240 y TCF\_200 cada 1000 mm.
- (m) Muros CLT de 5 capas, losa paralela a eje Y, con WHT620\* y TCF\_200 cada 500 mm.
- (n) Muros CLT de 5 capas, losa paralela a eje Y, con WHT620\* y TCF\_200 cada 1000 mm.
- (o) Muros CLT de 5 capas, losa paralela a eje Y, con TCN\_240 y TCF\_200 cada 500 mm.
- (p) Muros CLT de 5 capas, losa paralela a eje Y, con TCN\_240 y TCF\_200 cada 1000 mm.

### 3.2. Análisis estático

La norma NCh433 of2011 en su Capítulo 6.2 define el análisis estático para estructuras de no más de cinco pisos y 20 metros de altura, en que la acción sísmica se asimila a un sistema de fuerzas cuyos efectos sobre la estructura se calculan siguiendo los procedimientos de la estática.

#### 3.2.1. Coeficiente sísmico ( $C$ )

Este término corresponde al factor de amplificación de cargas sísmicas que depende de parámetros explicados en la norma NCh433 of2011 y se determina con la siguiente expresión (D.S. N°61 of2011) (Anexo G):

$$C = \frac{2.75 * S * A_0}{g * R} * \left(\frac{T'}{T^*}\right)^n$$

Donde:

$S$ ,  $T'$  y  $n$  = parámetros dependientes del tipo de suelo (Anexo G)

$A_0$  = aceleración efectiva máxima, depende de la zonificación sísmica del país. (Anexo G)

$g$  = valor de aceleración de gravedad.

$R$  = Factor de reducción que refleja la capacidad de absorción y disipación de energía de la estructura resistente, para CLT corresponde a 2.

#### 3.2.2. Corte basal

El esfuerzo de corte basal de un edificio, según la normativa chilena NCh433 of 96, está dada por la expresión:

$$Q_0 = CIP$$

Donde:

C = coeficiente sísmico explicado en 3.2.1.

I = factor de importancia respecto a la categoría de estructura. Para esta investigación corresponde a categoría II, estructura de uso habitacional público o privado, con un valor de 1.0.

P = peso total del edificio sobre el nivel basal, considerando lo estipulado sobre el peso sísmico en el Capítulo 3.1.2.

### **3.2. Herramienta computacional para modelación de deformaciones sísmicas.**

La modelación sísmica se desarrollará con el software MATLAB, mediante la programación de una rutina matemática que aplique el algoritmo Rossi para CLT, mencionado en el Capítulo 2.3.

Este algoritmo aplicará el análisis estático explicado en el punto anterior, considerando las cargas y las rigideces correspondientes a cada muro. Con todos estos factores determinará los desplazamientos horizontales de la estructura y de esta manera los drift.

El código debe ser alimentado con los parámetros explicados en el Capítulo 3.1 lo que se hará a través de una planilla Excel, como en el ejemplo de un muro que se muestra en el Anexo H.

En este mismo anexo se representa un ejemplo de como la herramienta hace entrega de los resultados.

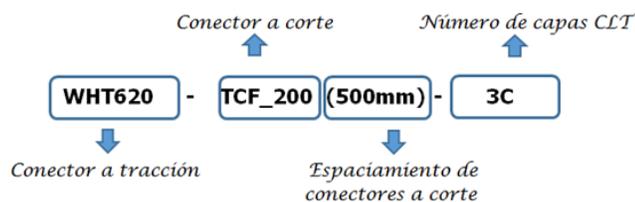
El código automatizará el cálculo para desarrollar cada uno de los 16 casos mencionados en 3.1.4 para todas las combinaciones posibles, considerando las tres zonas sísmicas y los cinco tipos de suelos. De esta forma se obtiene así una base de datos total de 240 resultados, los que estarán bajo todas las combinaciones de cargas para las direcciones de estudio X e Y.

Posteriormente se analizarán los resultados y se verificará que los conectores metálicos no estén sometidos a esfuerzos superiores a sus capacidades admisibles, de esta manera se encontrará la distribución de losa más favorable, siendo esta la que permita el emplazamiento de la estructura en una mayor variedad de zonas sísmicas y tipos de suelo.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se expondrán los resultados de esta investigación, se mostrarán tablas representativas de capacidades de los herrajes metálicos según el posicionamiento de la losa (longitudinal y transversal) para todas las tipologías constructivas y los niveles de drift para cada zona sísmica (Z) y tipo de suelo (S).

Para agilizar la entrega de información, se utilizará la nomenclatura presentada en la Figura 8.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 8. Ejemplo de abreviatura de tipología constructiva.**

En las Tablas 4 y 5 se muestra el chequeo de los herrajes metálicos para los criterios de losa longitudinal y transversal, respectivamente.

**Tabla 4. Chequeo de capacidad de conectores con losa en sentido longitudinal.**

Tipología Constructiva	Z1	Z1	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2	Z3	Z3	Z3	Z3	Z3
	SA	SB	SC	SD	SE	SA	SB	SC	SD	SE	SA	SB	SC	SD	SE
TCN_240-TCF(500mm)3C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
TCN_240-TCF(500mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
TCN_240-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
TCN_240-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(500mm)-3C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(500mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(1000mm)-3C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗

**Tabla 5. Chequeo de capacidad de conectores con losa en sentido transversal.**

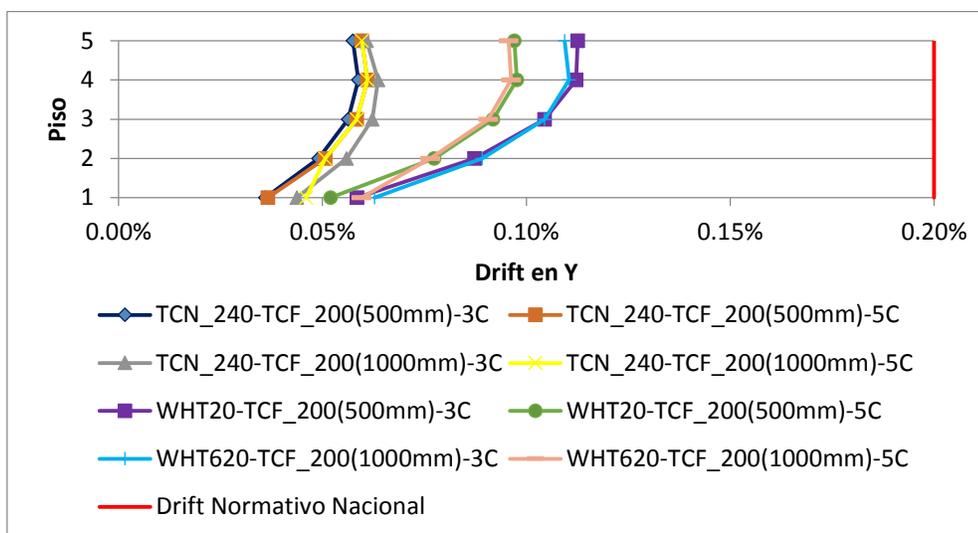
Tipología Constructiva	Z1	Z1	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2	Z3	Z3	Z3	Z3	Z3	
	SA	SB	SC	SD	SE	SA	SB	SC	SD	SE	SA	SB	SC	SD	SE	
TCN_240-TCF(500mm)-3C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
TCN_240-TCF(500mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
TCN_240-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
TCN_240-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(500mm)-3C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
WHT620-TCF(500mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(1000mm)-3C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
WHT620-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗

En las tablas anteriores se observa como un diseño que considera una losa transversal (paralelo a eje Y de la Figura 6) permite el desarrollo de una estructura con un mayor rango de zonas sísmicas y tipos de suelos. La losa transversal presenta una distribución más óptima de cargas, en comparación a la losa longitudinal, disminuyendo los esfuerzos de tracción en muros críticos.

A continuación se presentarán las curvas de drift para todas las tipologías constructivas considerando la distribución de losa más favorable (losa longitudinal) por cada zona sísmica y tipo de suelo (Para ver curvas considerando la losa longitudinal, ver Anexo I). Los drift para la dirección de estudio X son inferiores a los en Y por lo que se informarán estos últimos (Para ver Drift en la dirección X considerando losa transversal, ver Anexo J). Posteriormente se hará un análisis según cada variable constructiva.

**4.1 Drift en Zona 1 Suelo A.**

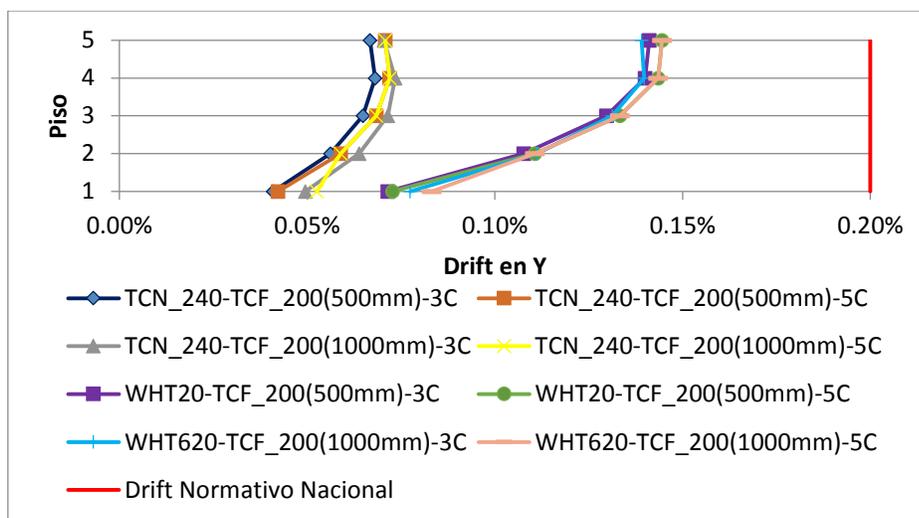
En la Figura 9 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 1 suelo A. Todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional como internacional, no superando el 0.11% de drift las que consideran WHT620 y 0.06% las con TCN\_240.



**Figura 9. Drift en Y, Zona 1 Suelo A con losa longitudinal.**

#### 4.2 Drift en Zona 1 Suelo B.

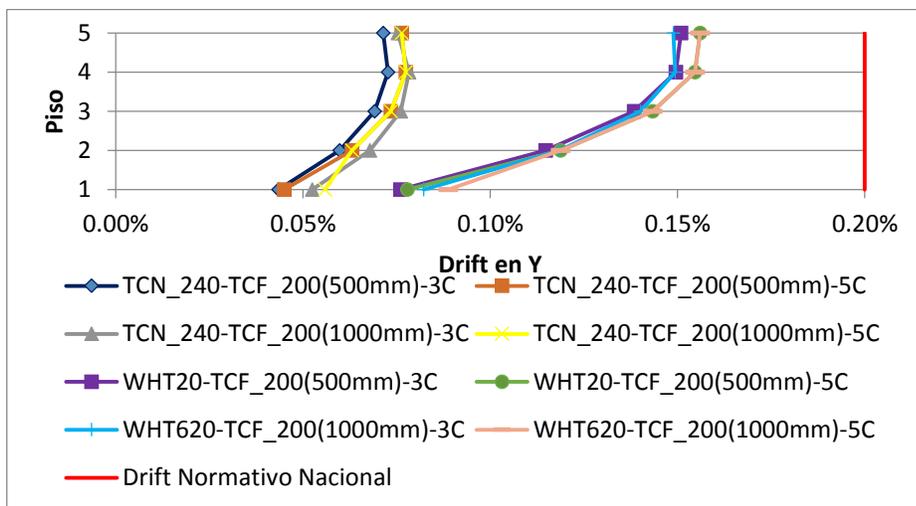
En la Figura 10 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 1 suelo B. Todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional como internacional, no superando el 0.14% de drift las que consideran WHT620 y 0.07% las con TCN\_240.



**Figura 10. Drift en Y, Zona 1 Suelo B con losa longitudinal.**

#### 4.3 Drift en Zona 1 Suelo C.

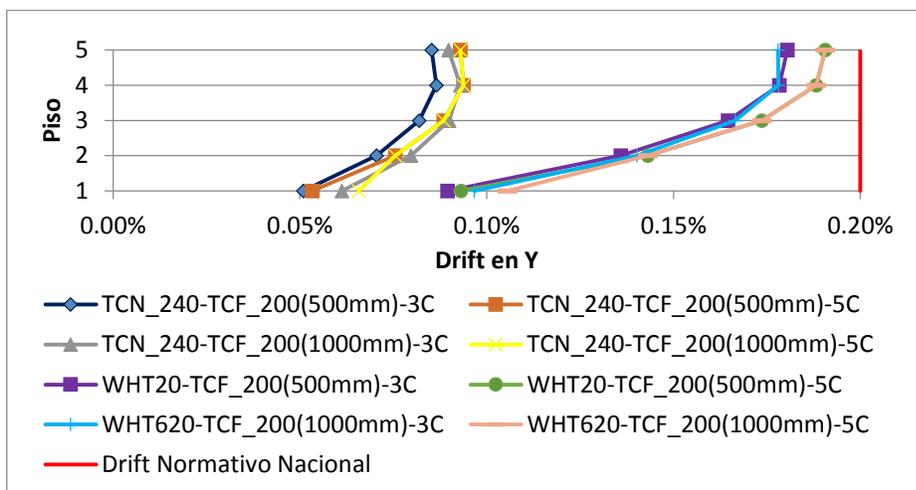
En la Figura 11 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 1 suelo C. Todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional como internacional, no superando el 0.16% de drift las que consideran WHT620 y 0.08% las con TCN\_240.



**Figura 11. Drift en Y, Zona 1 Suelo C con losa longitudinal.**

#### 4.4 Drift en Zona 1 Suelo D.

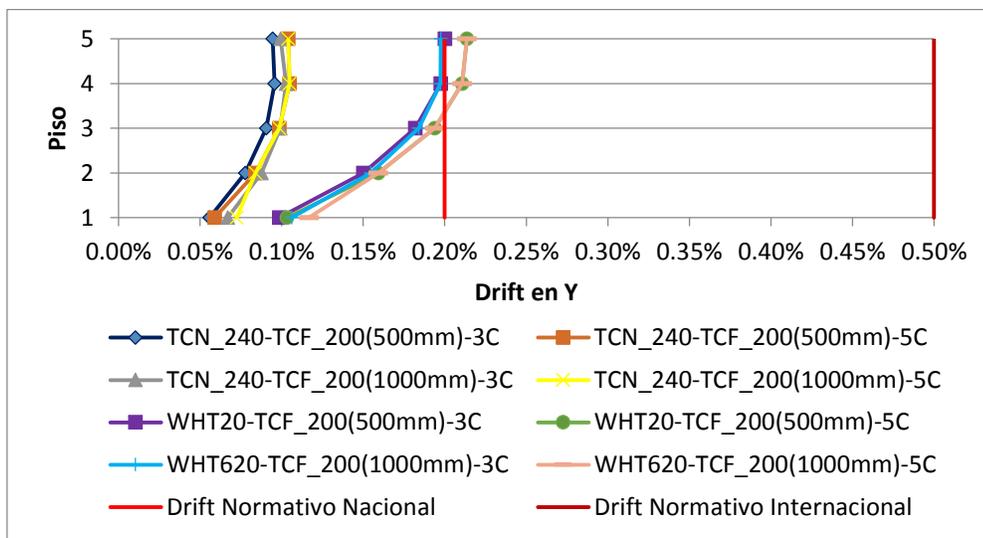
En la Figura 12 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 1 suelo D. Todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional como internacional, no superando el 0.19% de drift las que consideran WHT620 y 0.09% las con TCN\_240.



**Figura 12. Drift en Y, Zona 1 Suelo D con losa longitudinal.**

#### 4.5 Drift en Zona 1 Suelo E.

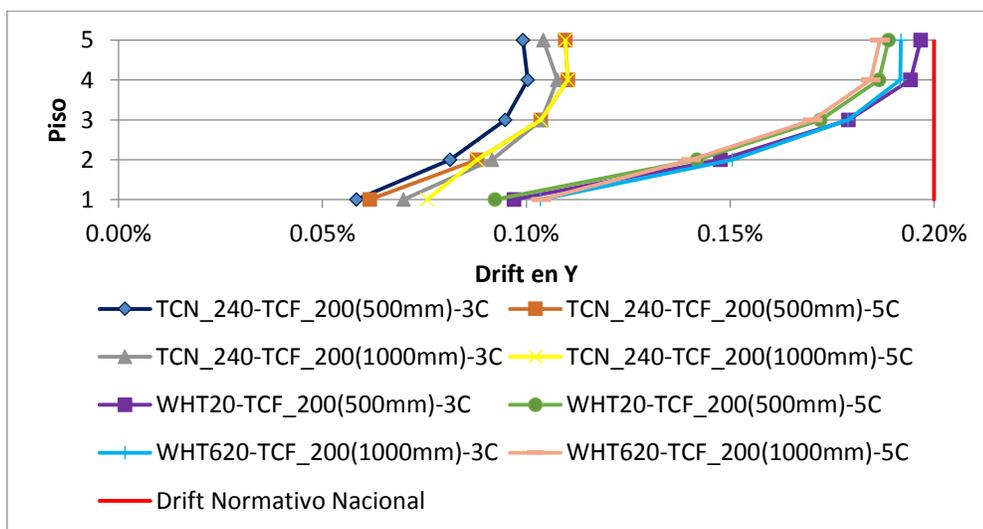
En la Figura 13 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 1 suelo E. No todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional pero sí internacional, no superando el 0.21% de drift las que consideran WHT620 y 0.10% las con TCN\_240.



**Figura 13. Drift en Y, Zona 1 Suelo E con losa longitudinal.**

#### 4.6 Drift en Zona 2 Suelo A.

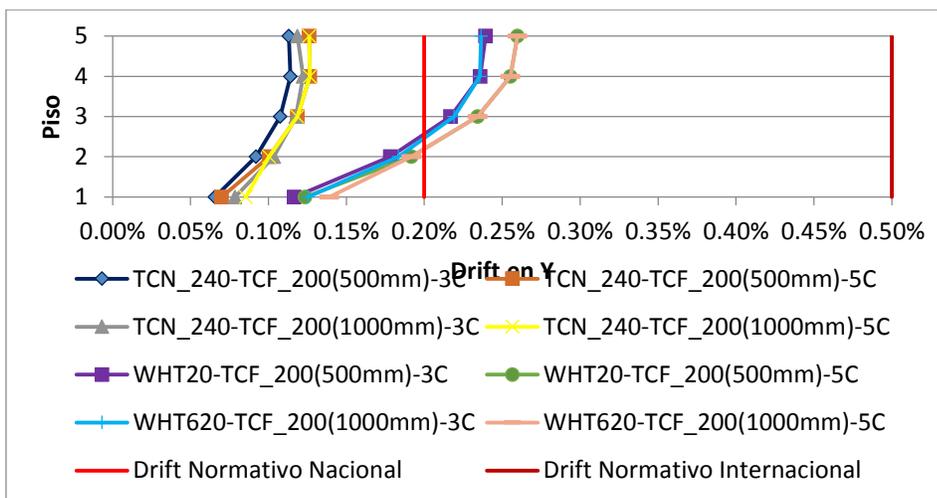
En la Figura 14 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 2 suelo A. Todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional como internacional, no superando el 0.19% de drift las que consideran WHT620 y 0.11% las con TCN\_240.



**Figura 14. Drift en Y, Zona 2 Suelo A con losa longitudinal.**

#### 4.7 Drift en Zona 2 Suelo B.

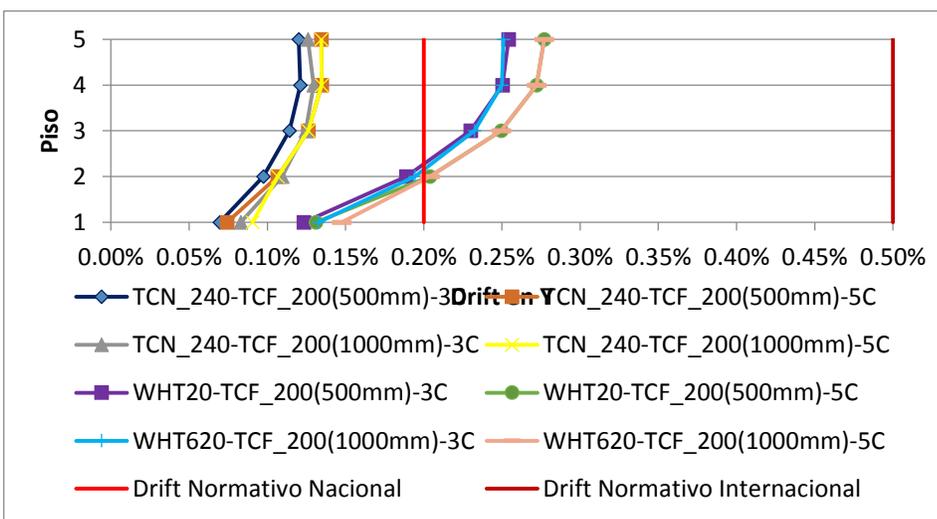
En la Figura 15 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 2 suelo B. No todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional pero sí internacional, no superando el 0.26% de drift las que consideran WHT620 y 0.13% de drift las con TCN\_240.



**Figura 15. Drift en Y, Zona 2 Suelo B con losa longitudinal.**

#### 4.8 Drift en Zona 2 Suelo C.

En la Figura 16 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 2 suelo C. No todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional pero sí internacional, no superando el 0.28% de drift las que consideran WHT620 y 0.13% de drift las con TCN\_240.



**Figura 16. Drift en Y, Zona 2 Suelo C con losa longitudinal.**

#### 4.8 Drift en Zona 2 Suelo D.

En la Figura 17 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 2 suelo D. No todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional pero sí internacional, no superando el 0.33% de drift las que consideran WHT620 y 0.16% de drift las con TCN\_240.

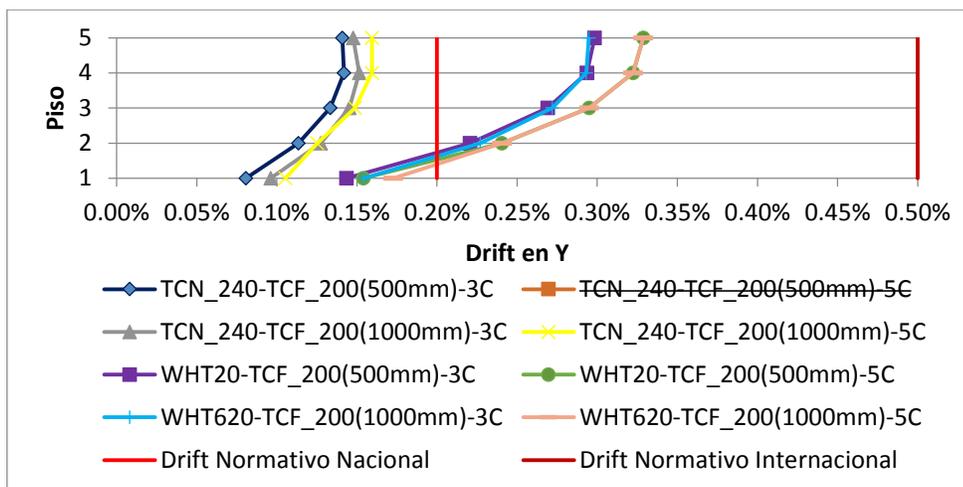


Figura 17. Drift en Y, Zona 2 Suelo D con losa longitudinal.

#### 4.9 Drift en Zona 2 Suelo E.

En la Figura 18 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 2 suelo E. No todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional pero sí internacional, no superando el 0.36% de drift las que consideran WHT620 y 0.17% de drift las con TCN\_240.

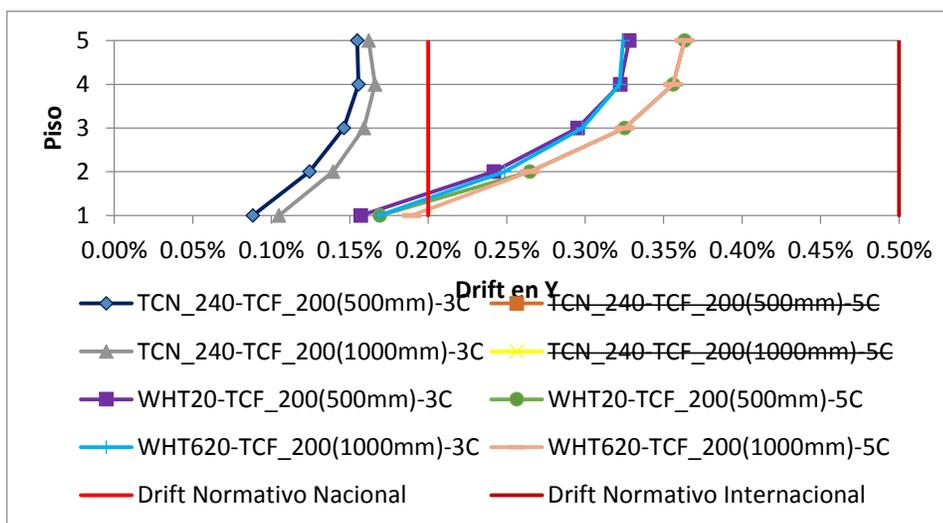


Figura 18. Drift en Y, Zona 2 Suelo E con losa longitudinal.

#### 4.10 Drift en Zona 3 Suelo A.

En la Figura 19 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 3 suelo A. No todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional pero sí internacional, no superando el 0.28% de drift las que consideran WHT620 y 0.16% de drift las con TCN\_240.

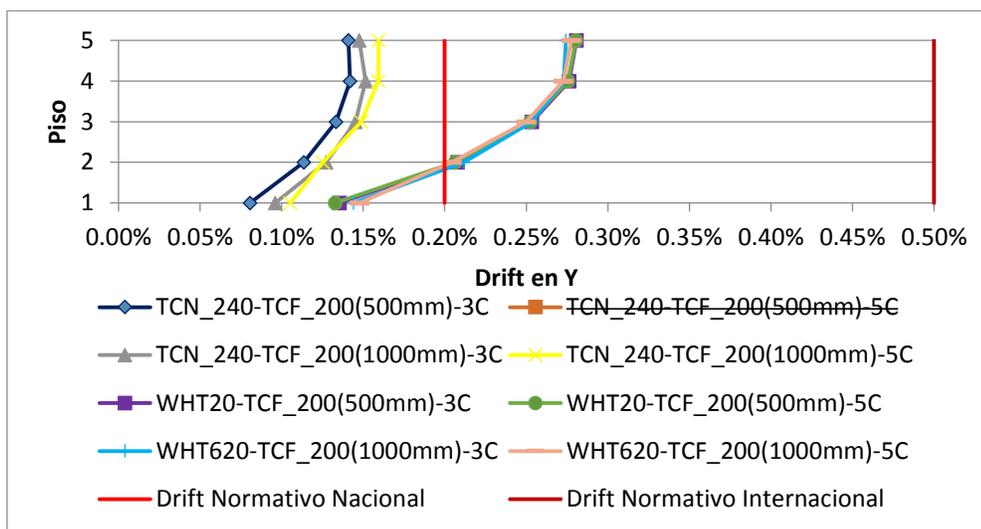


Figura 19. Drift en Y, Zona 3 Suelo A con losa longitudinal.

#### 4.11 Drift en Zona 3 Suelo B.

En la Figura 20 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 3 suelo B. No todas las tipologías constructivas cumplen la normativa nacional pero sí internacional, no superando el 0.37% de drift las que consideran WHT620 y 0.17% de drift las con TCN\_240.

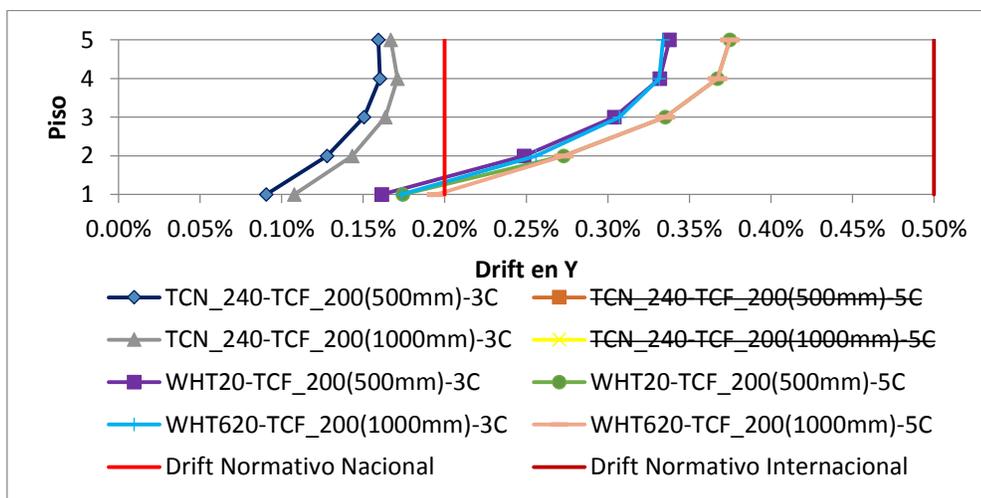
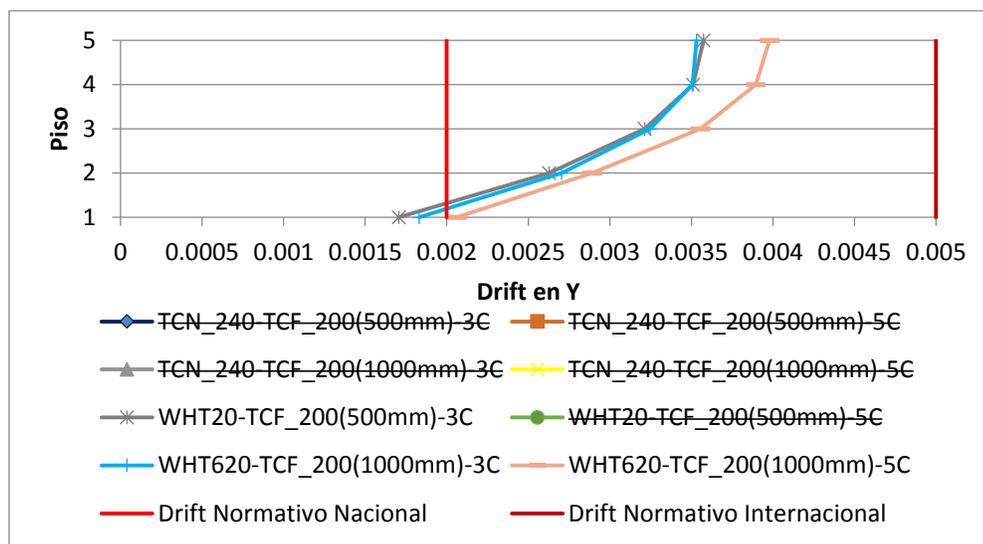


Figura 20. Drift en Y, Zona 3 Suelo B con losa longitudinal.

### 4.11 Drift en Zona 3 Suelo C.

En la Figura 21 se muestran los niveles de drift del edificio CLT en estudio para zona 3 suelo C. Ninguna tipología constructiva cumplen la normativa nacional pero sí internacional, no superando el 0.40% de drift las que consideran WHT620.



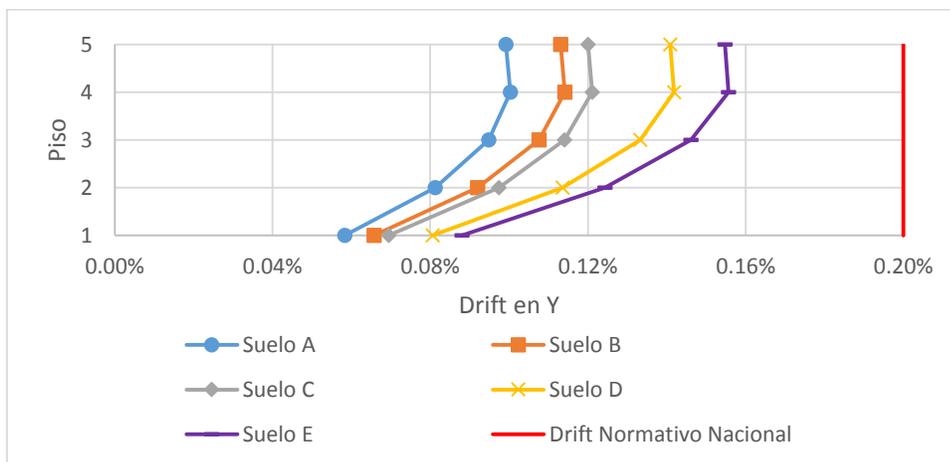
**Figura 21. Drift en Y, Zona 3 Suelo B con losa longitudinal.**

A continuación se realizarán análisis de las distintas variables involucradas que afectan el nivel de drift. Se presentarán comparaciones según tipo de suelo, zona sísmica, conector a tracción, espaciamiento de conectores de corte y número de capas de los muros CLT.

### 4.12 Variación drift por tipo de suelo.

En la Figura 22 se aprecia la variación en las curvas de drift debido solo al cambio del tipo de suelo, considerando una zona sísmica 2 y la tipología constructiva TCN\_240-TCF\_200(500mm).

El comportamiento es el esperado, un aumento en el drift a medida que empeora el suelo. Se aprecian variaciones de hasta un 24% de un tipo de suelo a otro consecutivo (de suelo C a suelo D).



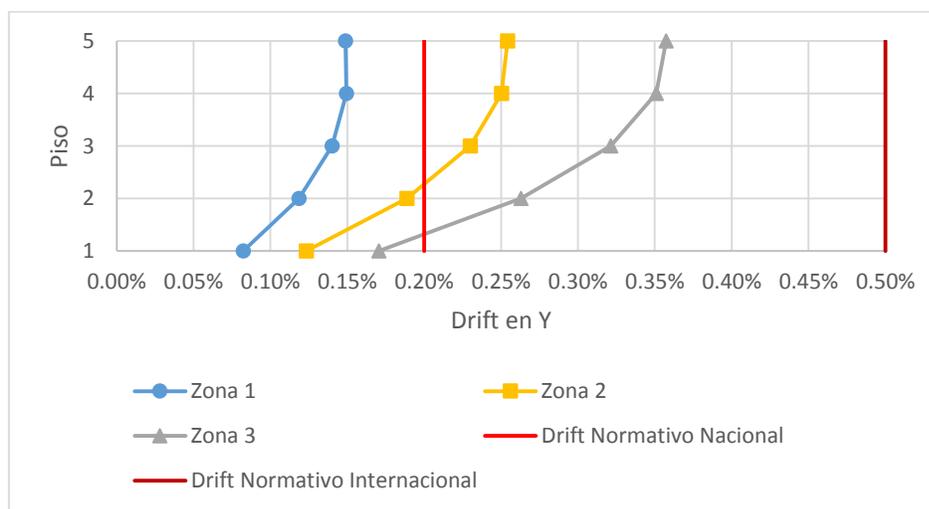
**Figura 22. Variación en el drift por tipo de suelo.**

#### 4.12 Variación de drift por zona sísmica.

En la Figura 23 se aprecia la variación el drift causado solo por el cambio en la zona sísmica. Se analiza en condición de suelo C por ser uno de los más comunes.

La tipología constructiva en cuestión corresponde a la WHR620-TCF\_200(500mm)-3C debido la posibilidad de ser utilizada en una zona considerada más hostil como la Zona 3.

Se observan variaciones en el drift de hasta un 30% permitiendo a la tipología de diseño ser considerada aun dentro de norma en criterios internacionales.



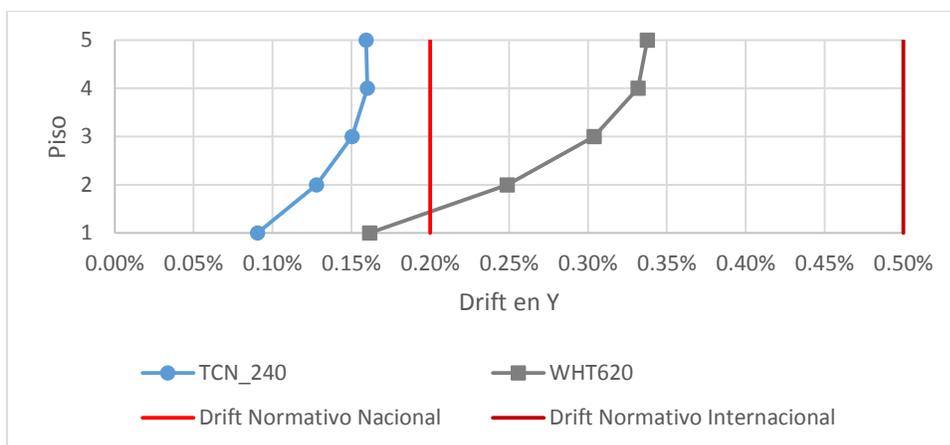
**Figura 23. Variación en el drift por zona sísmica.**

### 4.13 Variación de drift por conector a tracción.

En la figura 24 se presenta la variación en el nivel de drift provocado por el cambio de herraje a tracción, considerando un muro CLT de 3 capas con espaciamiento en los Angles Brackets de 500mm en las condiciones Zona 3 Suelo B.

Se realiza el análisis en Zona 3 puesto que en esta se encuentran emplazadas la mayoría de las ciudades en Chile.

Se puede observar variaciones en el drift de hasta un 47%, siendo el conector TCN\_240 el que muestra un mayor control de los drift dado a su ata rigidez, pudiendo marcar la diferencia entre estar o no dentro de la normativa nacional.



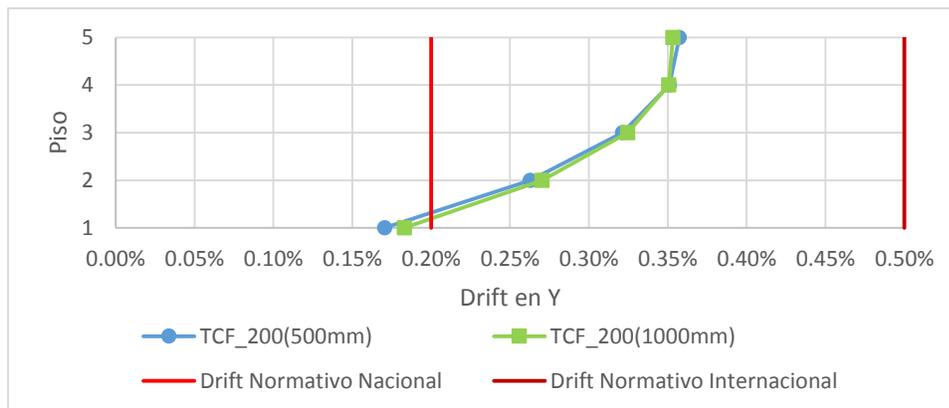
**Figura 24. Variación en el drift por conector a tracción.**

### 4.13 Variación de drift por espaciamiento de los Angles Brackets.

En la Figura 25 se expone la variación en el nivel de drift causado por el cambio en el distanciamiento de lo Angles Brackets de 500mm a 1000mm. La tipología constructiva es la que considera WHT620 y muro CLT de 3 capas.

En este análisis se considera Zona 3 puesto que es donde se ubica gran parte de las ciudades en Chile. También se selecciona Suelo C por ser uno de los tipos de suelo más frecuentes.

A pesar de que un muro posee el doble de conectores de corte que el otro, la variación en el drift es prácticamente nula



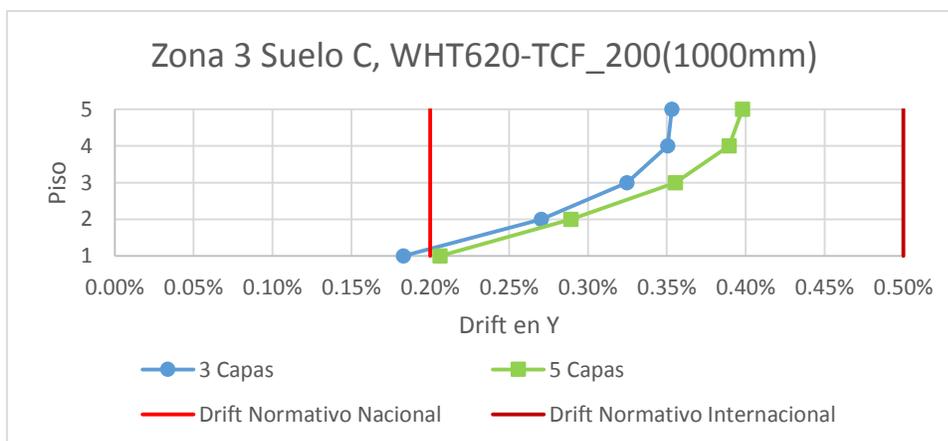
**Figura 25. Variación en el drift por espaciamento de Angles Brackets.**

#### 4.13 Variación de drift por número de capas en muro CLT.

En la Figura 26 se aprecian los cambios en el drift debido solo a la variación en el número de capas en el muro CLT (de 3 a 5). Para este análisis se considerará la tipología con Hold-Down WHT620 y espaciamento de los conectores de corte TCF\_200 de 1000mm.

En este análisis se considera Zona 3 puesto que es donde se ubica gran parte de las ciudades en Chile. También se selecciona Suelo C por ser uno de los tipos de suelo más frecuentes.

La variación alcanza un 12% siendo mayor en los elementos de más capas.



**Figura 26. Variación en el drift por capas de muros CLT.**

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

### 5.1 Conclusiones.

En este informe se realizó la evaluación de deformaciones sísmicas en diversas tipologías constructivas para un edificio de cinco pisos de madera contralaminada. Dichas tipologías corresponden a variaciones en los conectores metálicos a utilizar, distintas disposición de la losa de cinco capas de CLT y cambios en las cantidades de capas (tres y cuatro) en los muros estructurales del sistema constructivo ya señalado.

El cálculo se realizó mediante la herramienta computacional MATLAB, utilizando el algoritmo denominado Rossi en su configuración para elementos estructurales CLT. Este código establece rigideces equivalentes de los muros y conectores metálicos determinando desplazamientos horizontales.

En la ejecución de esta modelación, se consideraron todas las combinaciones de cargas nombradas en la norma NCh3171 of2010 bajo todas las variantes de zonas y suelos mencionadas en la normativa de diseño sísmico NCh433 of96.

Como resultado se obtuvo curvas que representan los niveles de drift para las direcciones de estudio X e Y en las combinaciones de carga más desfavorables para cada zona y suelo. Los desplazamientos sísmicos evaluados corresponden a las configuraciones de diseño en que los conectores metálicos traccionados no son superados por capacidad. La resistencia de elementos que trabajan a corte no se ve superada en ningún momento independiente de la distancia a la que estén dispuestos.

La zona sísmica y el tipo de suelo en que se ve emplazada la estructura es fundamental, puesto que en esto radica el nivel de tensiones en que la edificación se verá sometida. Fue posible realizar la evaluación de drift para zona sísmica 1 y 2 en suelos de A, B, C, D y E mientras que para la zona sísmica 3 en suelos A, B y C.

La Tabla 6 resume si las tipologías constructivas consideradas cumplen o no la normativa chilena.

#### **Tabla 6. Chequeo de drift normativo nacional.**

Tipología Constructiva	Z1	Z1	Z1	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z2	Z2	Z3	Z3	Z3
	SA	SB	SC	SD	SE	SA	SB	SC	SD	SE	SA	SB	SC
TCN_240-TCF(500mm)3C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
TCN_240-TCF(500mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
TCN_240-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
TCN_240-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗
WHT620-TCF(500mm)-3C	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(500mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(1000mm)-3C	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
WHT620-TCF(1000mm)-5C	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

En la tabla anterior, se visualiza que es posible construir un edificio CLT de 5 pisos con la arquitectura descrita en una gran variedad de zonas sísmicas y suelos cumpliendo la normativa nacional vigente. Esto es posible teniendo en consideración las condiciones de donde será edificado y a raíz de eso utilizar criterios constructivos adecuados.

Para las condiciones en que la normativa nacional no se cumple, sí se cumple la norma internacional, lo que habla de lo favorable que podría ser una reconsideración de nuestros parámetros normativos.

Con los resultados de esta investigación queda en evidencia la relevancia de los elementos de conexión a utilizar, siendo el conector que trabaja a tracción un elemento crítico. Estos elementos fueron: WHT620\* y TCN\_240. Este último mostró un mejor control de los niveles de drift, debido a su gran rigidez, permitiendo mantener los niveles normativos nacionales de mejor manera que su competencia, el que posee una rigidez menor. En condiciones desfavorables es donde el WHT620\* saca ventaja, dado que posee una mayor capacidad a tracción, lo que podría verse beneficiado con un cambio en el límite normativo.

Se observó que el número de capas del elemento CLT tiene una influencia en el nivel de drift que varía de un 5% a 12%, dependiendo de las condiciones de zonas sísmicas y tipos de suelo. En base a los datos obtenidos, no se puede concluir que el número de capas aumente o disminuya los desplazamientos horizontales, pero se recomienda el uso de CLT de 3 capas motivos económicos y a la no mayor influencia en los drift.

En los análisis de esta investigación, se determinaron modificaciones en el drift provocadas por distinta distancia de distribución de los elementos conectores de corte TCF\_200. El cambio en los desplazamientos horizontales debido a esto fue de entre un 3% a un 6% dependiendo de las condiciones de estudio. La cantidad de herrajes no afecta en mayor medida a los drift pero su exceso puede condicionar a un factor económico importante, lo que es necesario considerar.

En definitiva, este estudio da evidencia de la posibilidad real de construir estructuras de mediana altura de madera en Chile, en particular del CLT. El comportamiento de las deformaciones sísmicas fue satisfactorio cumpliendo en gran medida con la normativa chilena en su totalidad con la normativa internacional, lo que llama a un replanteamiento de los parámetros normativos nacionales actuales que potencian al uso de este noble recurso como la madera.

## **5.2 Recomendaciones de líneas de investigación.**

La madera es un material flexible, a modo de fomentar este tipo de sistemas constructivos amigables con el medio ambiente, se hace hincapié en realizar estudios de deformaciones alcanzables por el CLT, dado que límite normativo vigente castiga en demasía este tipo de estructuras, limitando su implementación.

De la mano a lo anterior, se llama a realizar estudios que fomenten el correcto uso de la madera como elemento constructivo, de esta manera quitar el prejuicio existente en este país que clasifica a este noble material a ser usado solo de manera provisoria.

A modo de implementar esta tecnología en condiciones más críticas, se recomienda la realización de más ensayos de elementos conectores, para de esta forma llegar a configuraciones más óptimas que permitan el desarrollo de estas estructuras en una mayor variedad de zonas.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- (1) Bogensperger, T (2008) A contribution to the characteristic shear strength of a CLT Wall under shear. 3rd Workshop, COST E55, Espoo, Finland.
- (2) Brandner et al., (2015). Shear properties of Cross Laminated Timber (CLT) under in-plane load: Test configuration and Experimental Study. Inter, Vancouver, Canada.
- (3) Casagrande et al., (2016a). Experimental campaign for the mechanical characterization of connection systems in the seismic design Of timber buildings. World conference on timber engineering, Vienna, Austria, August 22-25.
- (4) Casagrande et al., (2016b). Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear-walls. Construction and Building Materials, Department of Civil, Environmental and Mechanical Engineering, University of Trento, Italy.
- (5) Corporación Chilena De La Madera, Chile en el mercado mundial, 2015. [www.corma.cl/perfil-del-sector/aportes-a-la-economia/chile-en-el-mercado-mundial](http://www.corma.cl/perfil-del-sector/aportes-a-la-economia/chile-en-el-mercado-mundial). Acceso el 10 de Agosto de 2016.
- (6) Dolan et al., (2008). Comparison of Chilean and U.S seismic design provisions for timber structures. SWST Annual Meeting, Concepción, Chile, Noviembre.
- (7) Guendelman, T. (2015). Análisis estático y dinámico de estructuras. ULS, Chile.
- (8) Instituto Nacional De Normalización (INN). NCh 1198-2014: Madera – Construcción en madera – Cálculo. Santiago, INN Chile.
- (9) Instituto Nacional De Normalización (INN). NCh 3171-2010: Diseño estructural cálculo. Combinaciones de carga. Santiago, INN Chile.
- (10) Instituto Nacional De Normalización (INN). NCh 433-2011: Diseño sísmico de edificios. Santiago, INN Chile

- (11) Rossi et al., (2016). Seismic elastic analysis of light timber-frame multi-storey buildings: Proposal of an iterative approach. *Construction and Building Materials*. Department of Civil, Environmental and Mechanical Engineering, University of Trento, Italy
- (12) Rothoblaas (2016). Placas y conectores para madera. Casa principal, Cortaccia, Italia.
- (13) Sylvain Gagnon, Ciprian Pirvu (2011), CLT Handbook. FP Innovations, Canada.

## **7. ANEXOS**

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A.....	40
ANEXO B.....	40
ANEXO C.....	41
ANEXO D.....	42
ANEXO E.....	43
ANEXO F.....	44
ANEXO G.....	45
ANEXO H.....	46
ANEXO I.....	47
ANEXO J.....	56

## ÍNDICE DE TABLAS DE ANEXOS

Tabla A1. Parámetros y propiedades mecánicas de muros CLT.....	40
Tabla B1. Factores de modificación o de ajuste.....	40
Tabla D1. Tensiones admisibles y módulo de elasticidad a flexión, NCh1198 of 2015.....	42
Tabla E1. Cargas de peso propio.....	43
Tabla E2. Sobrecarga de uso.....	43
Tabla F1a. Combinaciones de carga incorporando torsión accidental.....	44
Tabla G1. Valores de parámetros dependientes del tipo de suelo.....	45
Tabla G2. Valores de aceleración efectiva máxima según clasificación sísmica.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS DE ANEXOS

Figura B1. Factores de modificación o de ajuste.....	40
Figura C1. Modelo de distribución de muros en edificio de cinco pisos.....	41
Figura H1. Ejemplo de datos de entrada de un muro en Excel para herramienta computacional..	46
Figura H2. Ejemplo de planilla Excel de resultados entregados por algoritmo Rossi.....	46
Figura I1. Drift Zona 1 Suelo A para losa longitudinal.....	47
Figura I2. Drift Zona 1 Suelo B para losa longitudinal.....	48
Figura I3. Drift Zona 1 Suelo C para losa longitudinal.....	49
Figura I4. Drift Zona 1 Suelo D para losa longitudinal.....	50
Figura I5. Drift Zona 1 Suelo E para losa longitudinal.....	51
Figura I6. Drift Zona 2 Suelo A para losa longitudinal.....	52
Figura I7. Drift Zona 2 Suelo B para losa longitudinal.....	53
Figura I8. Drift Zona 2 Suelo C para losa longitudinal.....	54
Figura I9. Drift Zona 3 Suelo A para losa longitudinal.....	55
Figura J1. Drift Zona 1 Suelo A para losa transversal.....	56
Figura J2. Drift Zona 1 Suelo B para losa transversal.....	56
Figura J3. Drift Zona 1 Suelo C para losa transversal.....	57
Figura J4. Drift Zona 1 Suelo D para losa transversal.....	57
Figura J5. Drift Zona 1 Suelo E para losa transversal.....	58
Figura J6. Drift Zona 2 Suelo A para losa transversal.....	58
Figura J7. Drift Zona 2 Suelo B para losa transversal.....	59
Figura J8. Drift Zona 2 Suelo C para losa transversal.....	59
Figura J9. Drift Zona 2 Suelo D para losa transversal.....	60
Figura J10. Drift Zona 2 Suelo E para losa transversal.....	60
Figura J11. Drift Zona 3 Suelo A para losa transversal.....	61
Figura J12. Drift Zona 3 Suelo B para losa transversal.....	61
Figura J13. Drift Zona 3 Suelo C para losa transversal.....	62

**ANEXO A**

**Tabla A1. Parámetros y propiedades mecánicas de muros CLT**

	$E_0$ (MPa)	$G_0$ (MPa)	$t_{CLT}$ (mm)	$w_l$ (mm)	$t_{l,mean}$ (mm)	p	q	$\alpha_t$	$G_{90}$ (MPa)
Muro CLT 3 capas	<b>7900</b>	<b>513.5</b>	<b>99</b>	<b>138</b>	<b>33</b>	<b>0.53</b>	<b>-0.79</b>	<b>1.641</b>	<b>328.17</b>
Muro CLT 5 capas	<b>7900</b>	<b>513.5</b>	<b>165</b>	<b>138</b>	<b>33</b>	<b>0.43</b>	<b>-0.79</b>	<b>1.332</b>	<b>352.474</b>

**ANEXO B**

Los factores de modificación o de ajuste son para:

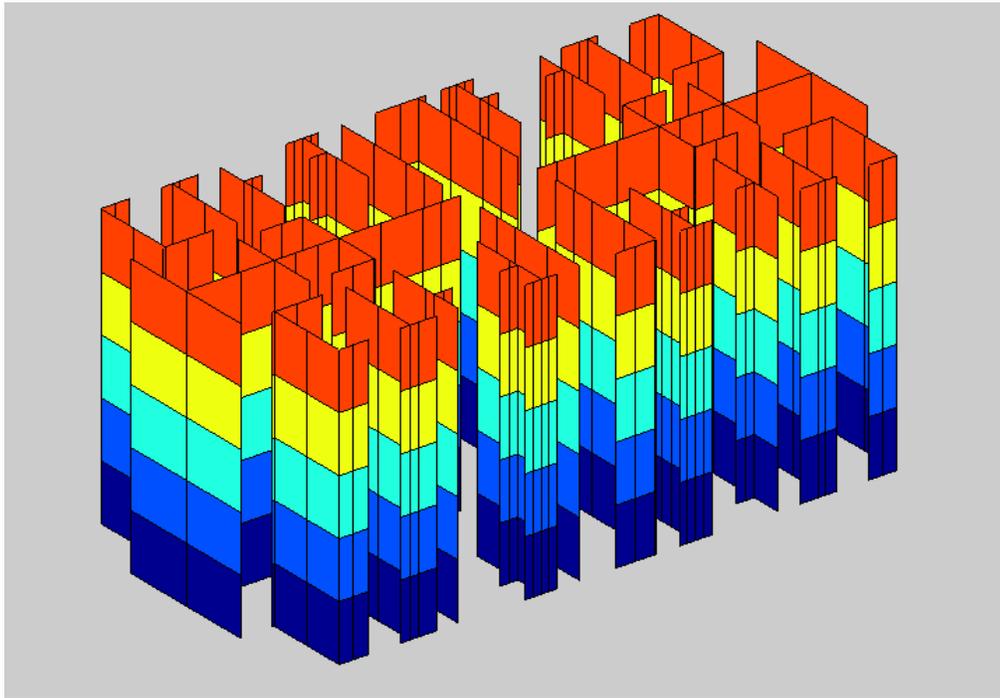
- carga permanente      0,90
- carga normal            1,00
- dos meses                1,15
- siete días                1,25
- viento o sismo          1,60
- impacto                  2,00

Fuente: NCh1198 of2014

**Figura B1. Factores de modificación o de ajuste.**

## ANEXO C

La Figura C1 corresponde a la distribución definitiva de muros de corte entregada por el software MATLAB, de esta manera es posible realizar una verificación visual preliminar.



Fuente: Adaptación propia

**Figura C1. Modelo de distribución de muros en edificio de cinco pisos**

Los muros de corte representados en la figura anterior corresponden a aquellos muros considerados llenos, es decir los que no presentan aberturas ni alteraciones que puedan afectar el comportamiento de estos elementos.

## ANEXO D

**Tabla D1. Tensiones admisibles y módulo de elasticidad a flexión, NCh1198 of 2015**

b) Pino radiata seco:  $H = 12\%$

Grado estructural	Tensiones admisibles de:					Módulo de elasticidad en flexión	Índice de aplastamiento en compresión normal
	Flexión <sup>1)</sup>	Compresión paralela	Tracción paralela <sup>1)</sup>	Compresión normal	Cizalle		
	$F_f$ MPa	$F_{cp}$ MPa	$F_{tp}$ MPa	$F_{cn}$ MPa	$F_{cz}$ MPa		
a) Visuales							
GS	11,0	8,5	6,0	2,5	1,1	10 500	5,65
G1	7,5	7,5	5,0	2,5	1,1	10 000	
G1 y mejor	9,5	7,8	5,5	2,5	1,1	10 100	
G2	5,4	6,5	4,0	2,5	1,1	8 900	
b) Mecánicos							
C24	9,3	8,0	4,7	2,5	1,1	10 200	5,65
C16	5,2	7,5	3,5	2,5	1,1	7 900	
MGP 10	8,4	10	4,0	2,5	1,3	10 000	
MGP 12	13,5	15,5	6,0	2,5	1,3	12 700	
<p>1) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal <math>\leq 90</math> mm, excepto en los Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12, para los que el límite se incrementa hasta 160 mm.</p> <p>2) Valores aplicables sobre piezas de altura de sección transversal <math>\geq 180</math> mm, excepto en los Grados Mecánicos MGP 10 y MGP 12, cuyos valores son aplicables sobre cualquier altura de sección transversal. El módulo de elasticidad característico inherente al percentil del 5%, <math>E_{fk}</math>, se puede estimar como <math>0,60 E_f</math>.</p>							

**ANEXO E****Tabla E1. Cargas de peso propio**

Elemento	Kgf/m <sup>2</sup>
Muro CLT 3 capas	<b>49.5</b>
Muro CLT 5 capas	<b>82.5</b>
Losa CLT 5 capas	<b>60</b>
Sobre losa	<b>120</b>

En la tabla E1, las cargas de los tres elementos CLT especificados corresponden al producto entre el peso específico del elemento y el espesor del muro o losa. Es decir, para determinar la carga lineal ejercida solo por el muro bastaría con multiplicar por la altura de este.

**Tabla E2. Sobrecarga de uso**

Tipo de sobrecarga	Kgf/m <sup>2</sup>
Sobrecarga de piso	<b>200</b>
Sobrecarga de techo	<b>101.972</b>

En la tabla E2, la sobrecarga de techo corresponde a la de un 1kPa.

## ANEXO F

Tabla F1. Combinaciones de carga incorporando torsión accidental.

Combinación de carga
1) D
2) D + L
3) D + Lr
4) D + 0.75L + 0.75Lr
5a) D + S + MT
5b) D + S - MT
5c) D - S - MT
5d) D - S + MT
6a) D + 0.75S + 0.75MT + 0.75L
6b) D + 0.75S - 0.75MT + 0.75L
6c) D - 0.75S - 0.75MT + 0.75L
6d) D - 0.75S + 0.75MT + 0.75L
7a) 0.6D + S + MT
7b) 0.6D + S - MT
7c) 0.6D - S - MT
7d) 0.6D - S + MT

**ANEXO G**

**Tabla G1. Valores de parámetros dependientes del tipo de suelo (NCh433 of96)**

Tipo de Suelo	S	$T_0$ seg	$T'$ seg	n	p
A	0.90	0.15	0.20	1.00	2.0
B	1.00	0.30	0.35	1.33	1.5
C	1.05	0.40	0.45	1.40	1.6
D	1.20	0.75	0.85	1.80	1.0
E	1.30	1.20	1.35	1.80	1.0
F	*	*	*	*	*

**Tabla G2. Valores de aceleración efectiva máxima según zonificación sísmica (NCh433 of96)**

Zona sísmica	$A_e$
1	0,20 g
2	0,30 g
3	0,40 g

### ANEXO H

piso	largo (mm)	altura (mm)	carga vert (pp+25%sc) (kN/m)	qpp(kN/m)	qsc(kN/m)	qsct(kN/m)	modulo de corte (N/mm <sup>2</sup> )	espesor paneles (mm)	rigidez vert hold down (N/mm)
1	1648	2440	6,047	3,832	8,86	0	328	99	13000
2	1648	2440	6,047	3,832	8,86	0	328	99	13000
3	1648	2440	6,047	3,832	8,86	0	328	99	13000
4	1648	2440	6,047	3,832	8,86	0	328	99	13000
5	1648	2440	4,962	3,832	0	4,517	328	99	13000
piso	rigidez hor bracket (N/mm)	nro brackets	altura desde base	R	theta	Masa (Ton)	x	y	
1	8000	3	2440	7136	270	1,0158467	19824,5	7775	
2	8000	3	4880	7136	270	1,0158467	19824	7775	
3	8000	3	7320	7136	270	1,0158467	19823,5	7775	
4	8000	3	9760	7136	270	1,0158467	19823	7775	
5	8000	3	12200	7136	270	0,8335755	19822,5	7775	

Fuente: Adaptación propia.

**Figura H1. Ejemplo de datos de entrada de un muro en Excel para herramienta computacional.**

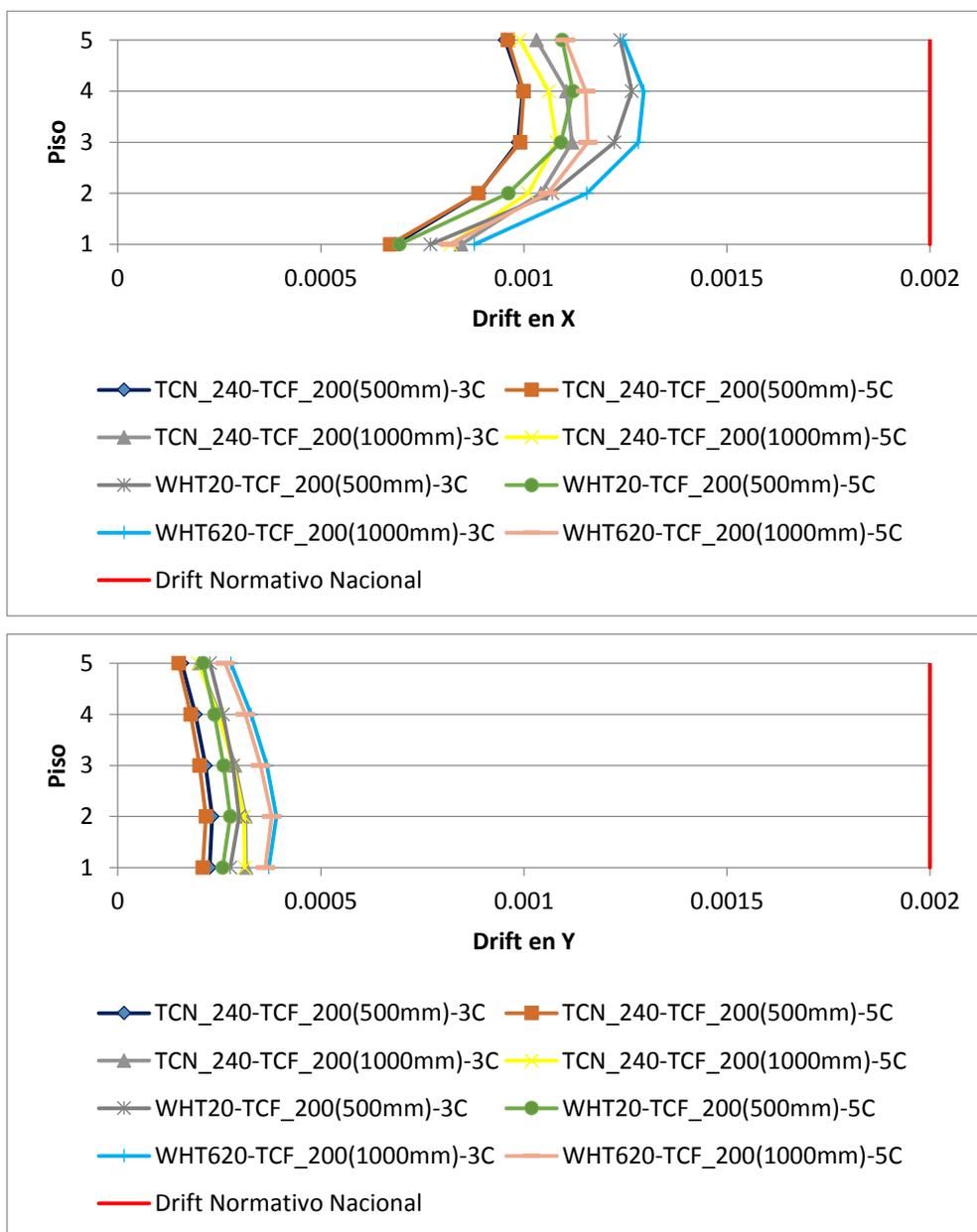
Dirección	THd max (kN)	Periodo (s)	C calc	Max AB (kN)		piso	Drift X	Drift Y
x	97,8263916	1,29162721	0,104	6,57852307		1	0,00268929	0,00105662
y	58,7202705	0,7766217	0,104	3,83426256		2	0,00416756	0,00159065
						3	0,00506049	0,00191537
						4	0,00548208	0,00206657
						5	0,00555221	0,00208276

Fuente: Adaptación propia.

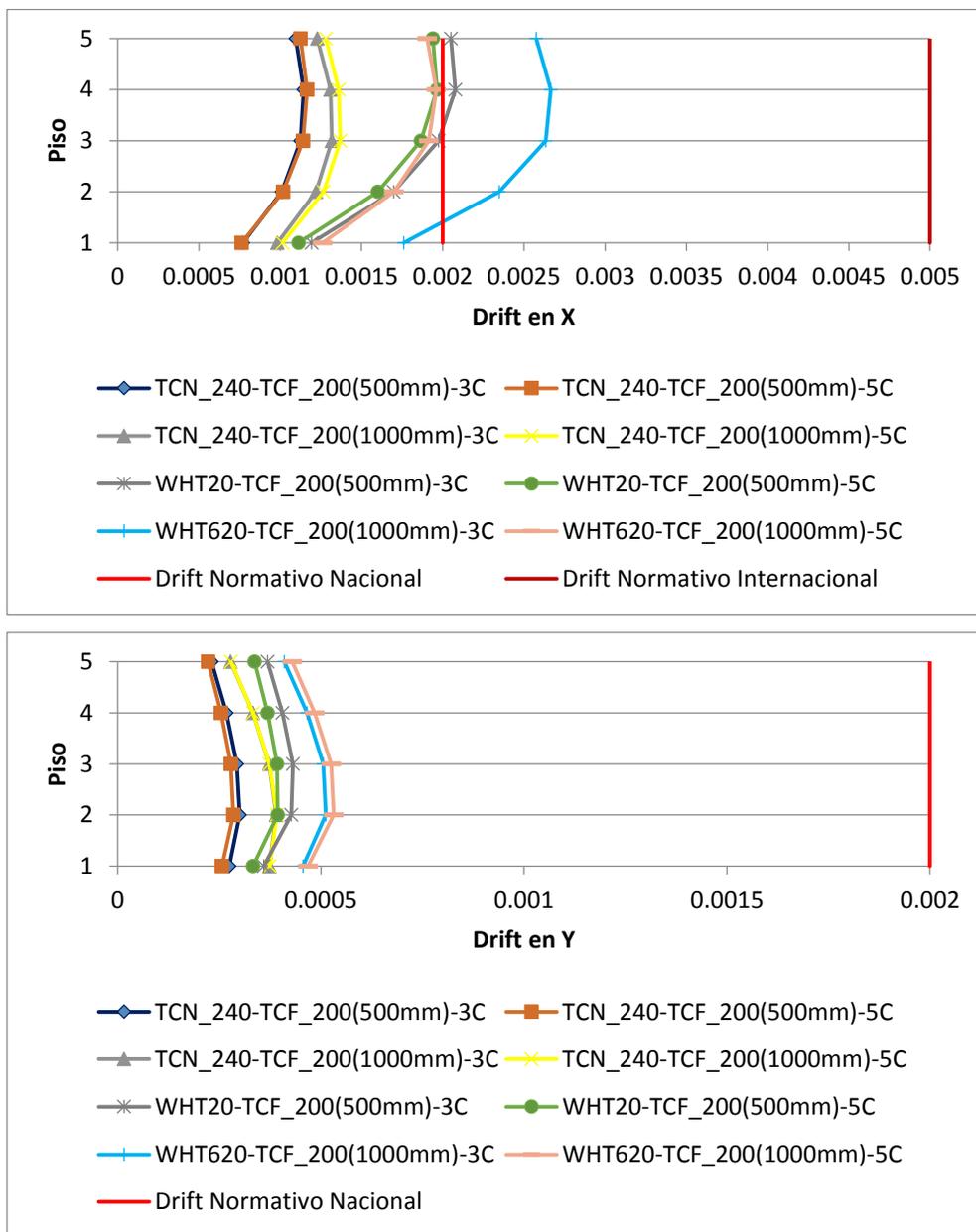
**Figura H2. Ejemplo de planilla de Excel de resultados entregados por algoritmo Rossi CLT.**

### ANEXO I

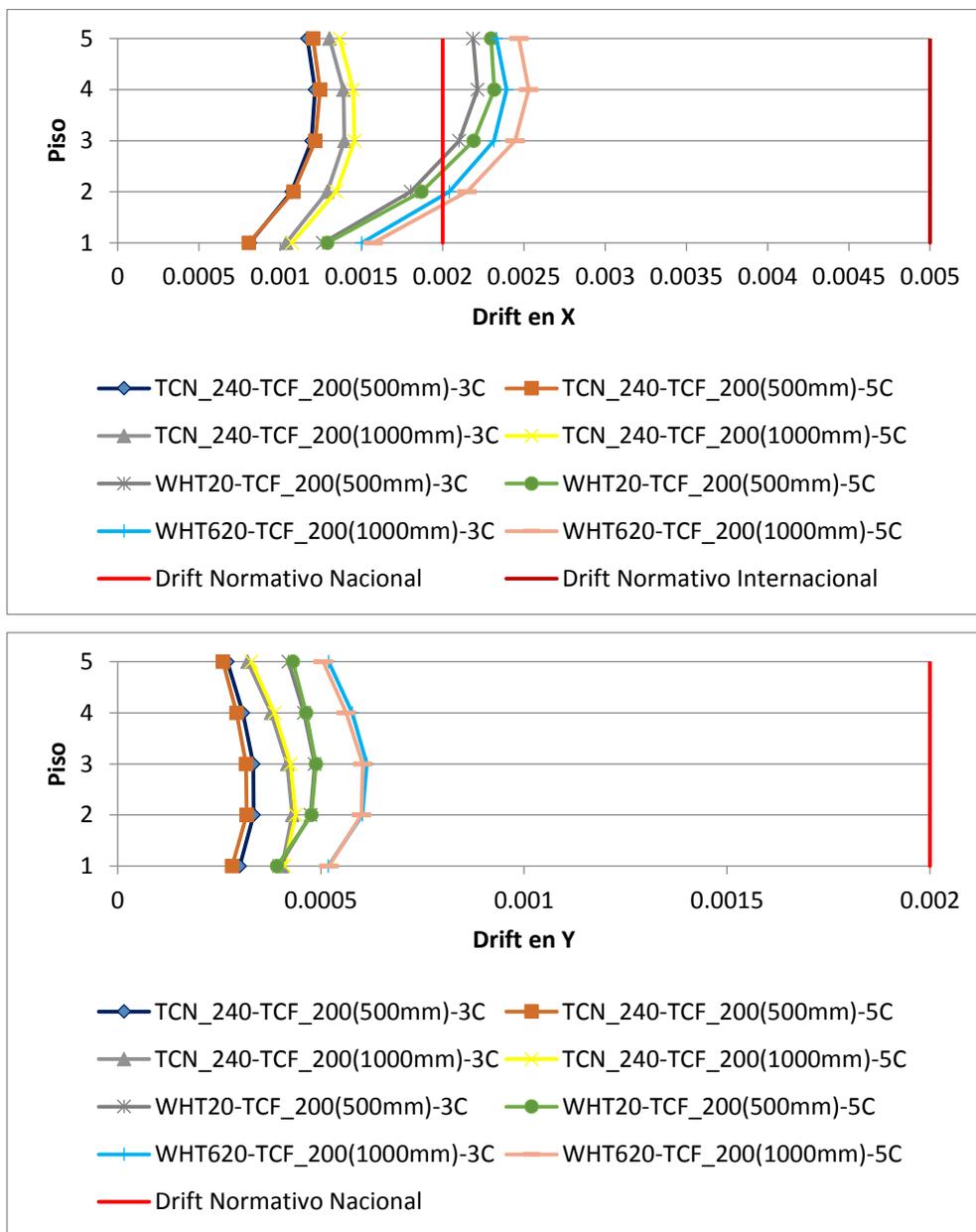
En este anexo se encuentran los drift de piso para distribución de losa longitudinal.



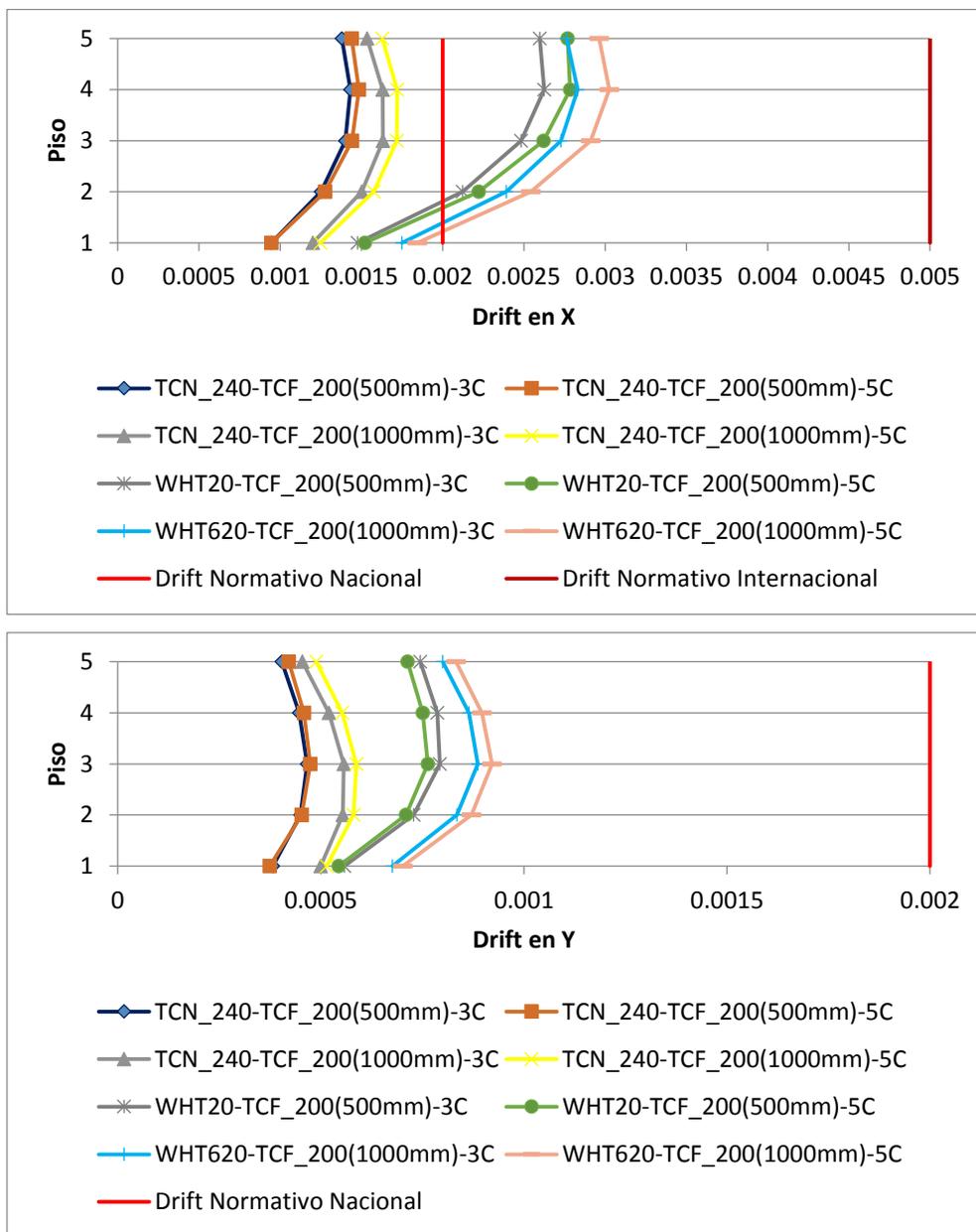
**Figura I1. Drift Zona 1 Suelo A para losa longitudinal.**



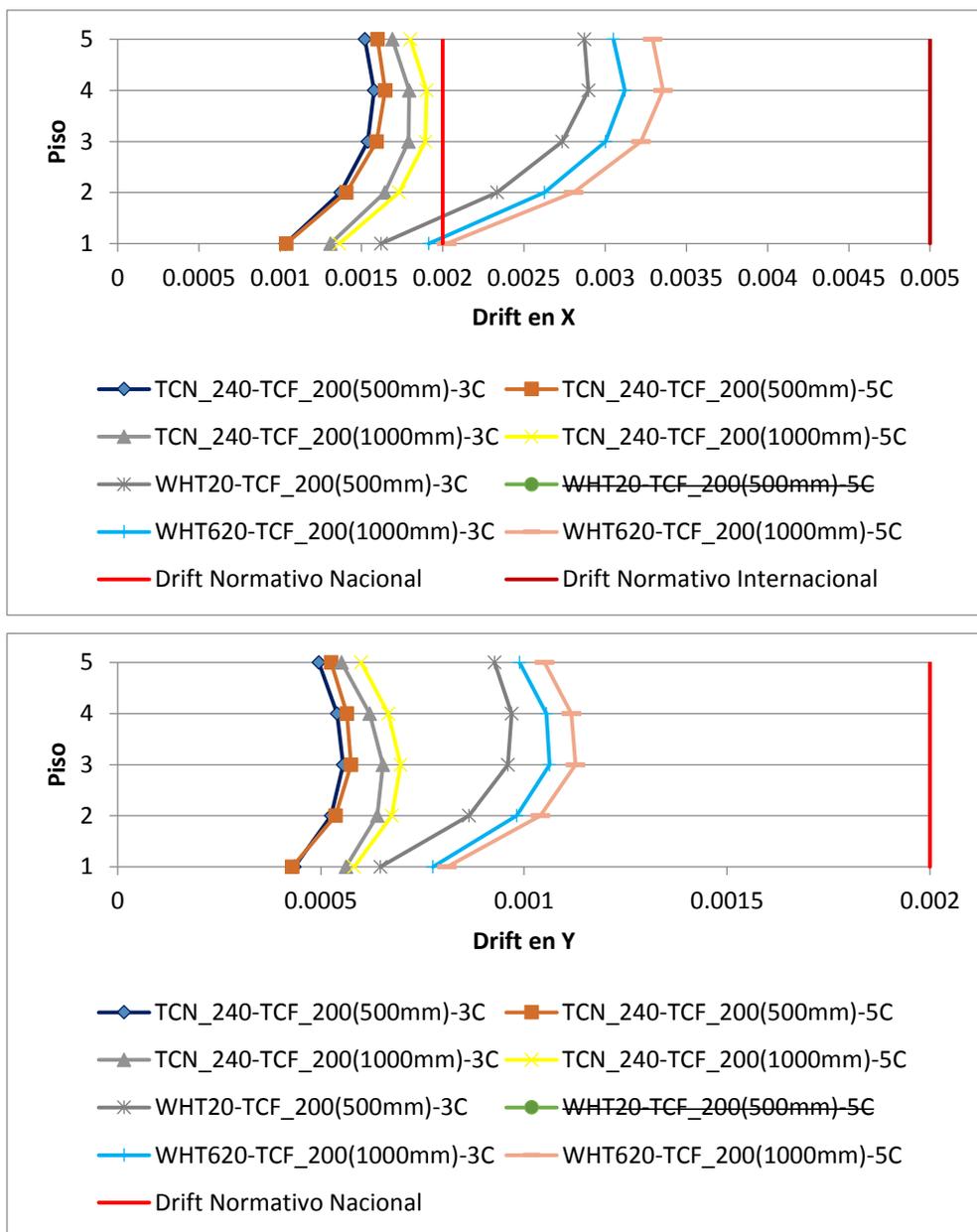
**Figura I2. Drift Zona 1 Suelo B para losa longitudinal**



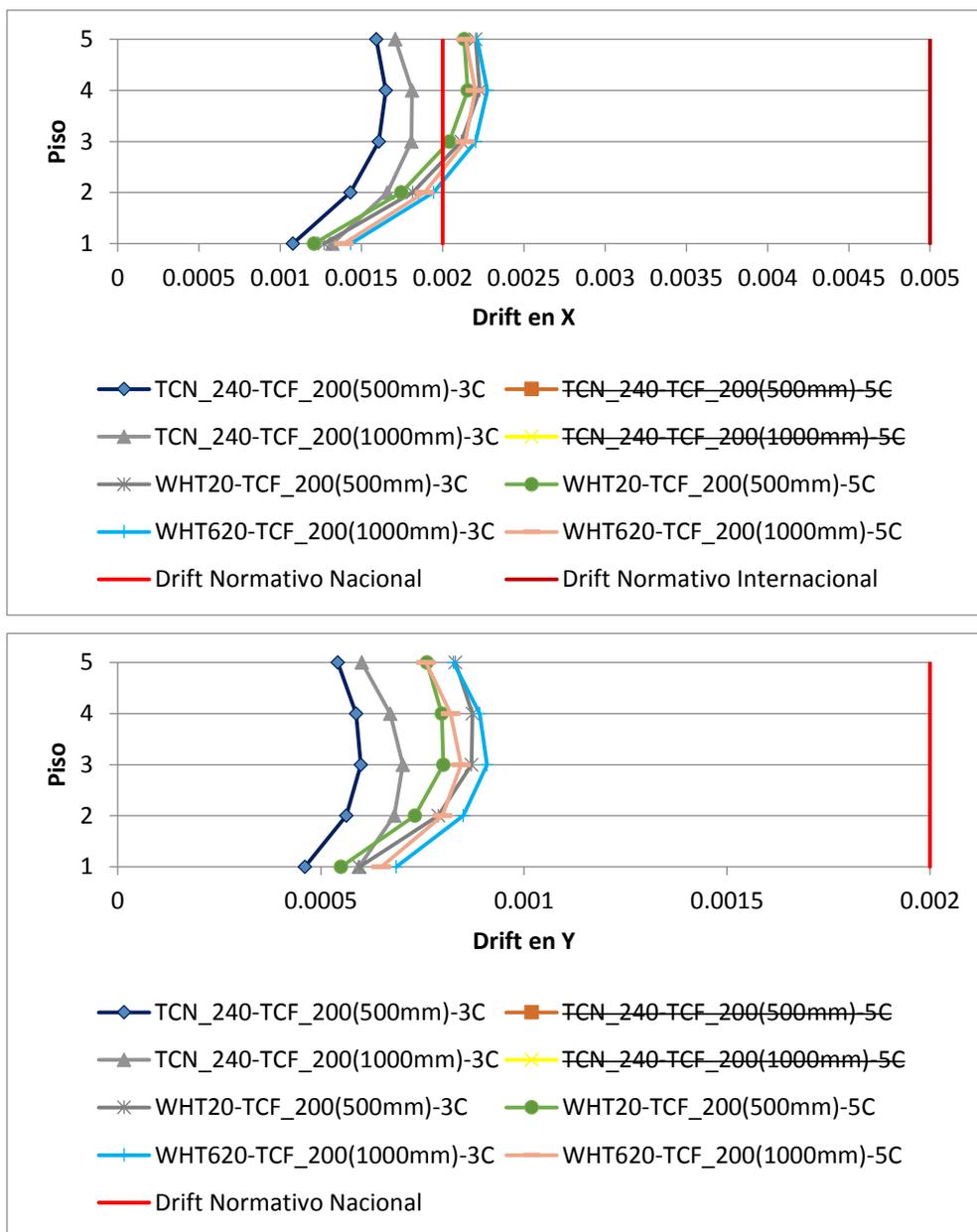
**Figura I3. Drift Zona 1 Suelo C para losa longitudinal.**



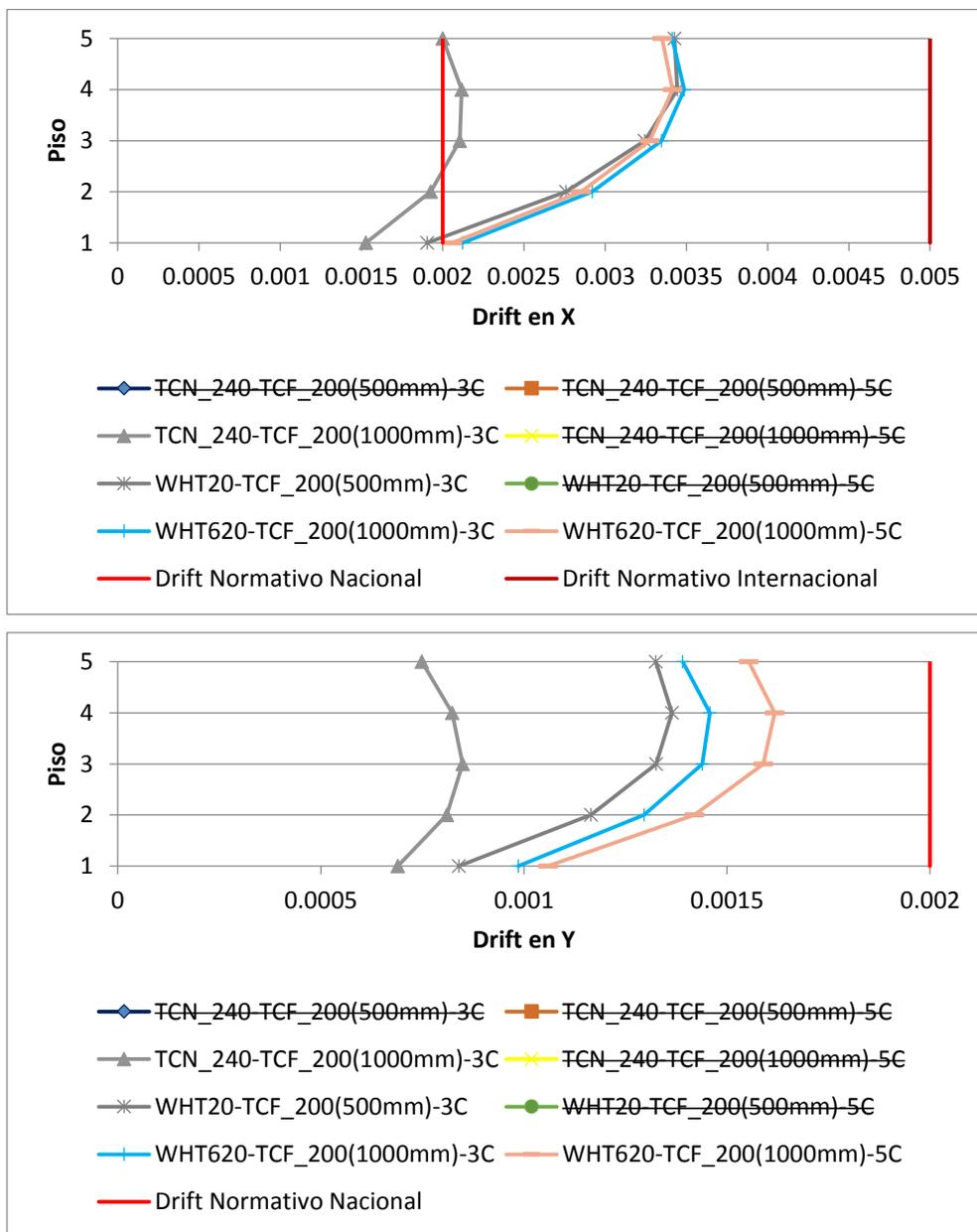
**Figura I4. Drift Zona 1 Suelo D para losa longitudinal.**



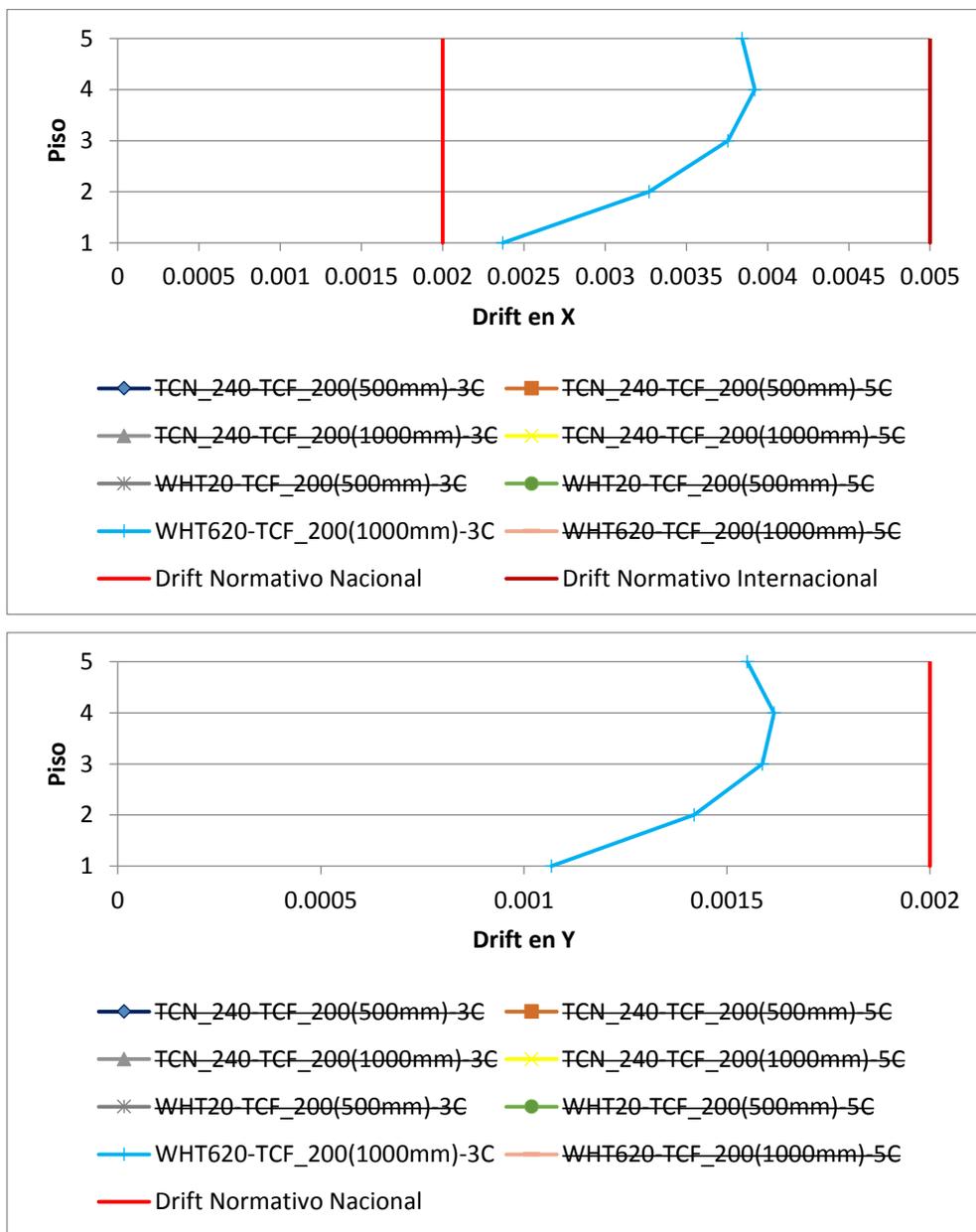
**Figura I5. Drift Zona 1 Suelo E para losa longitudinal.**



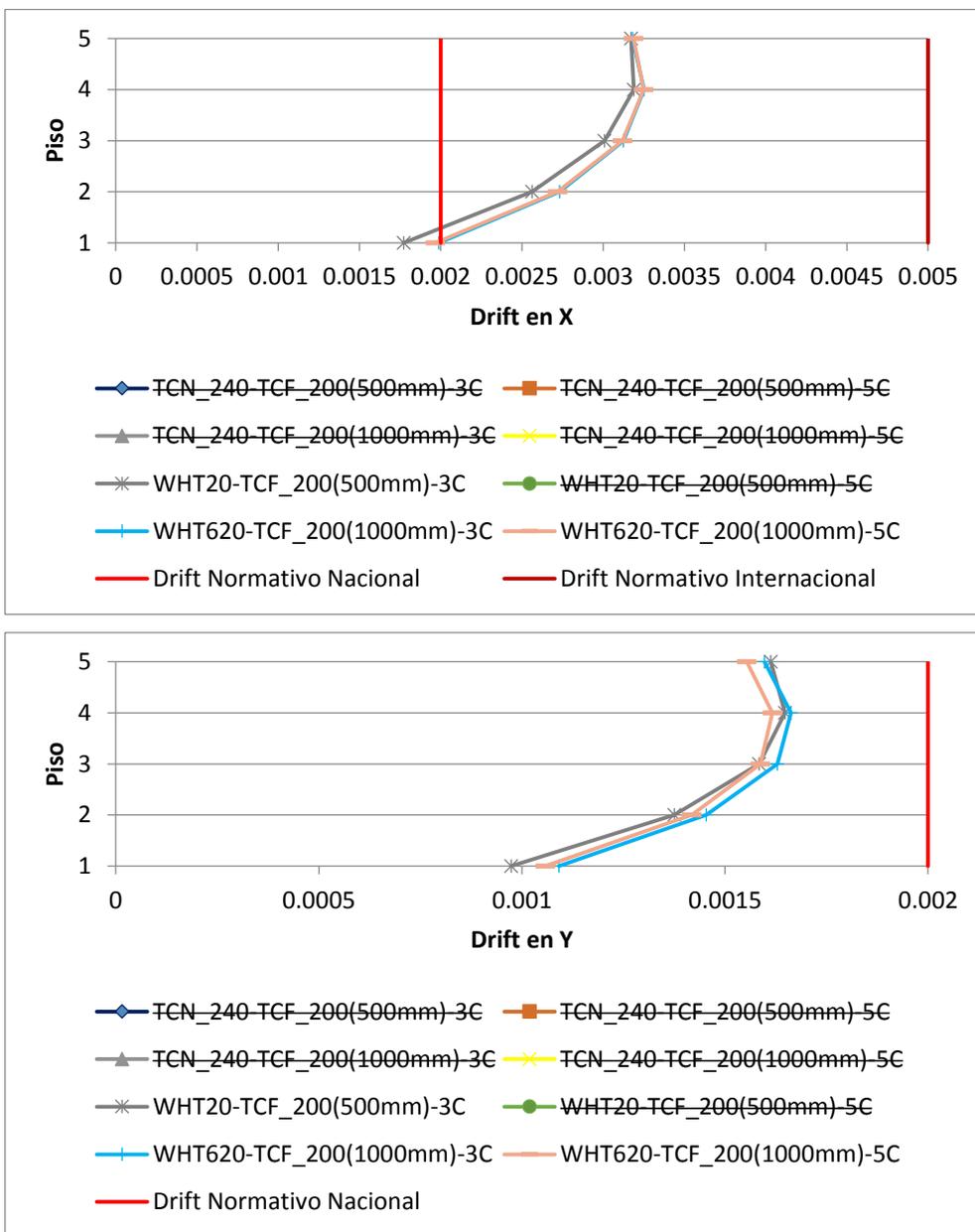
**Figura I6. Drift Zona 2 Suelo A para losa longitudinal.**



**Figura I7. Drift Zona 2 Suelo B para losa longitudinal.**



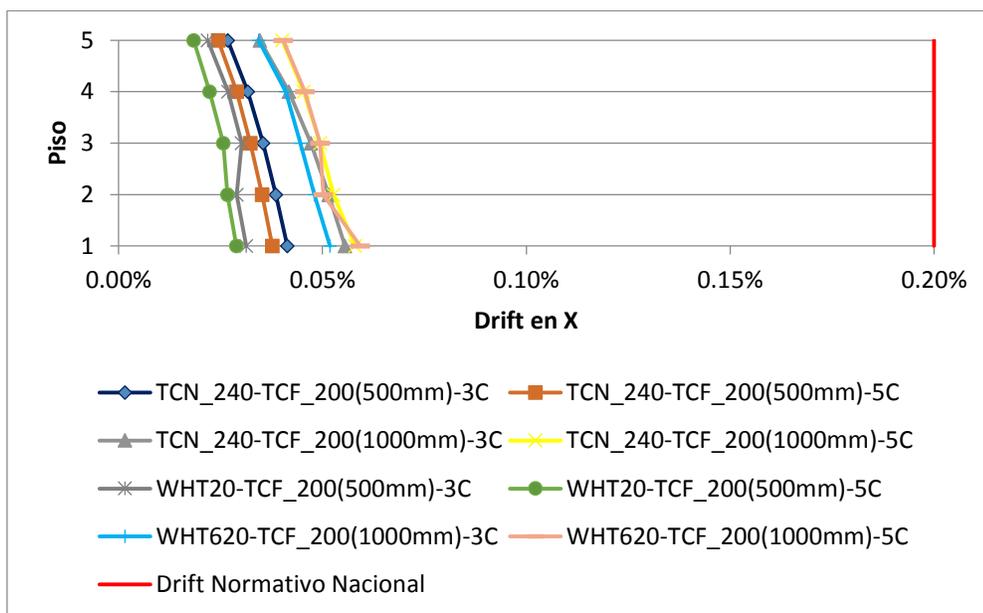
**Figura I8. Drift Zona 2 Suelo C para losa longitudinal.**



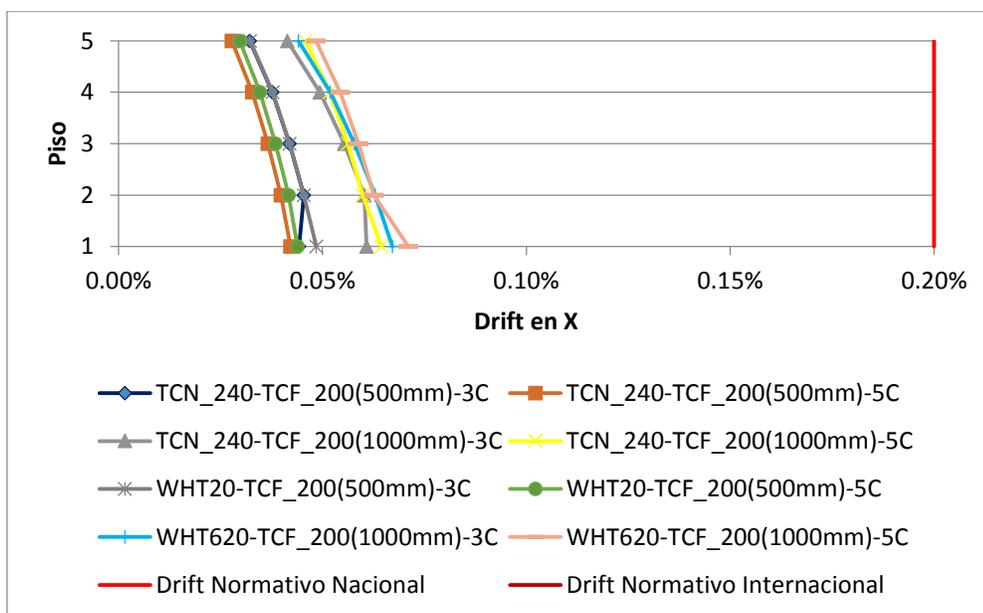
**Figura I9. Drift Zona 3 Suelo A para losa longitudinal.**

### ANEXO J

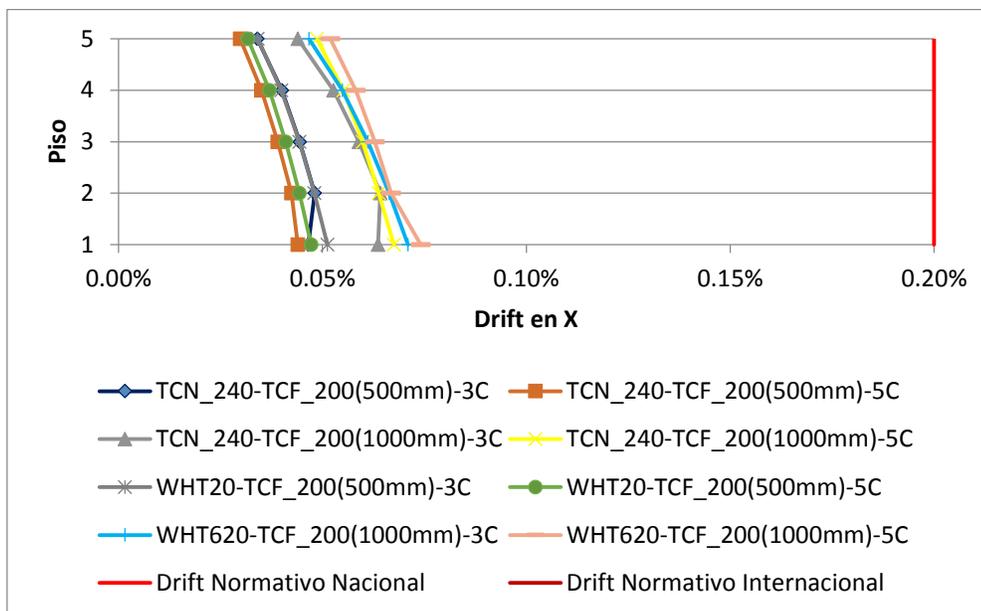
En el siguiente anexo se encuentran los drift en la dirección X considerando la losa distribuida longitudinalmente.



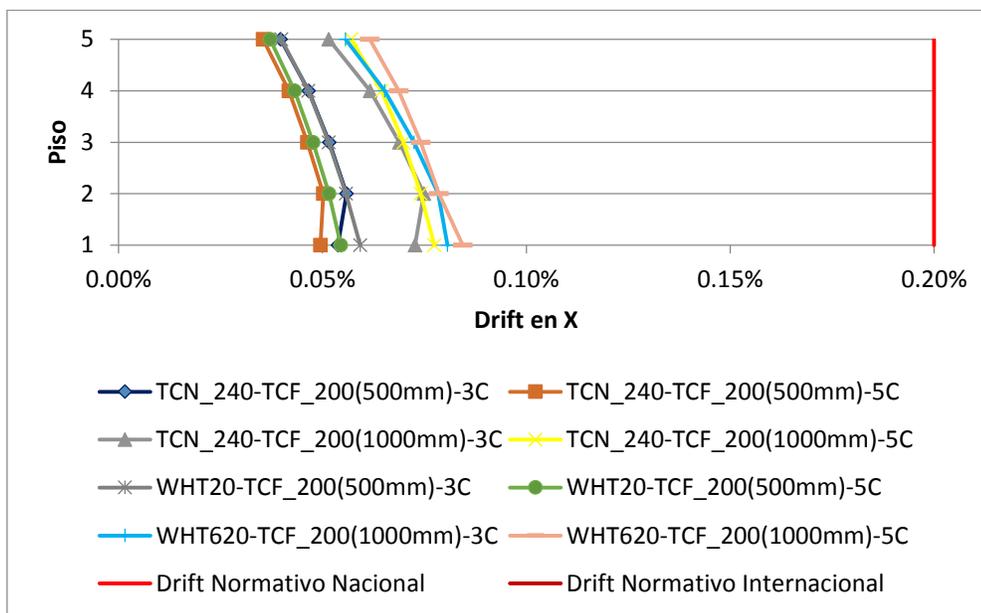
**Figura J1. Drift Zona 1 Suelo A para losa transversal**



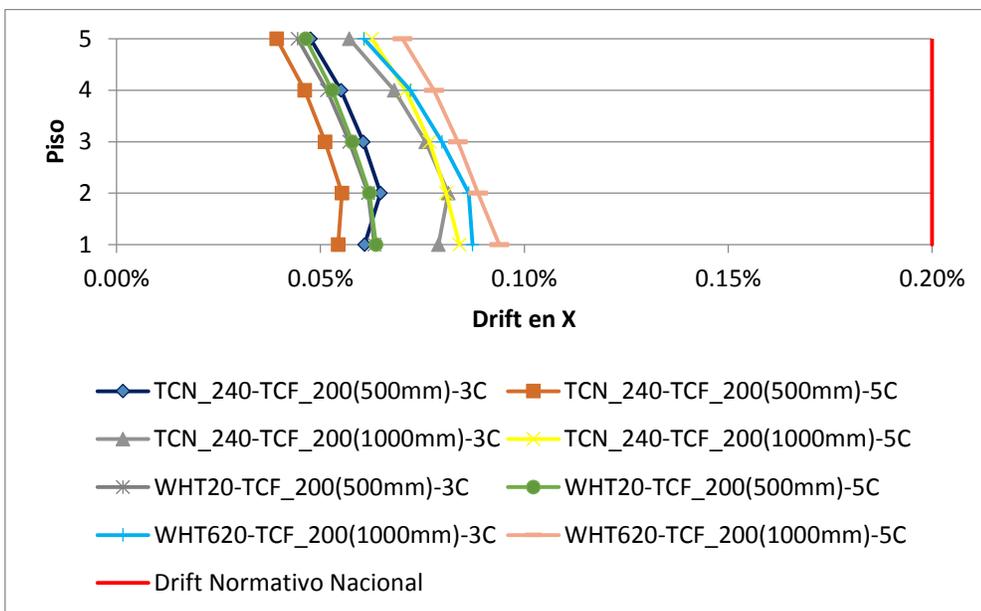
**Figura J2. Drift Zona 1 Suelo B para losa transversal**



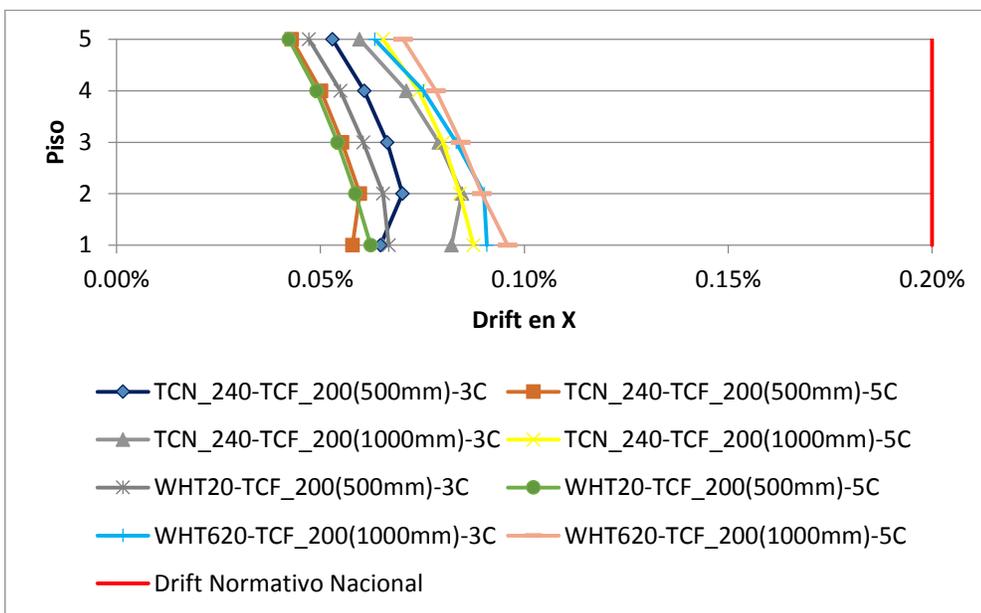
**Figura I3. Drift Zona 1 Suelo C para losa transversal**



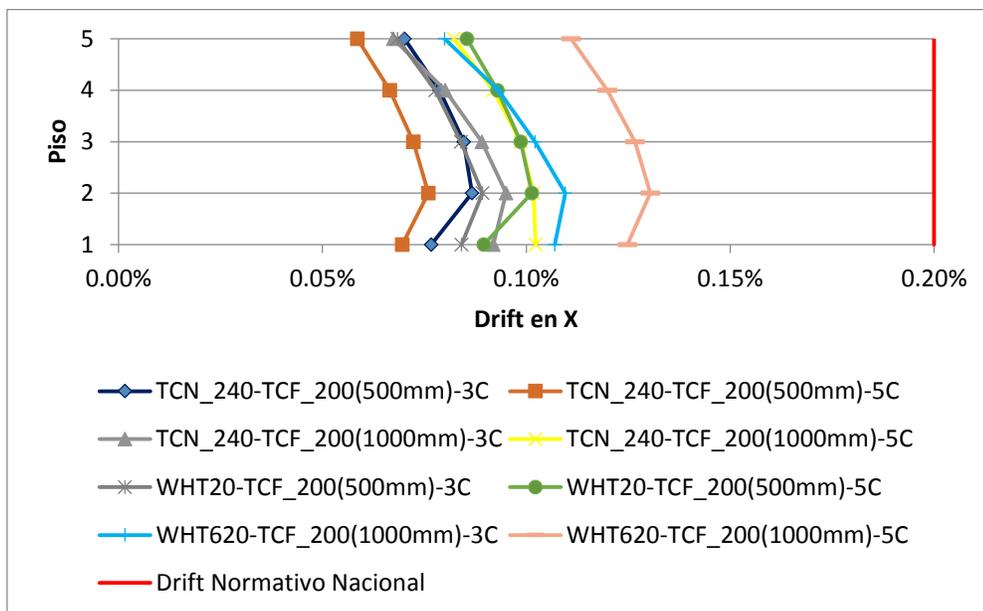
**Figura I4. Drift Zona 1 Suelo D para losa transversal**



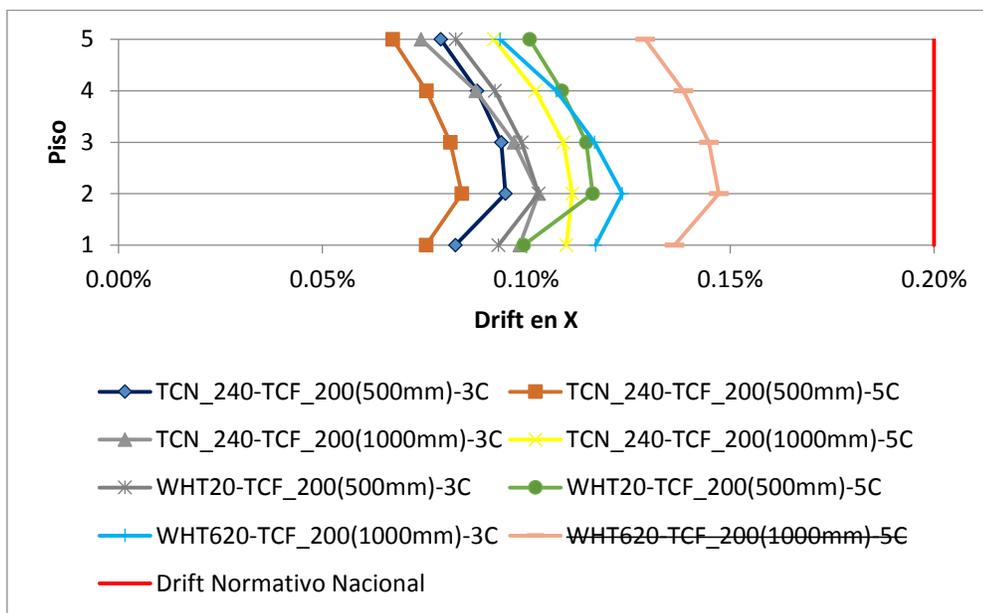
**Figura I5. Drift Zona 1 Suelo D para losa transversal**



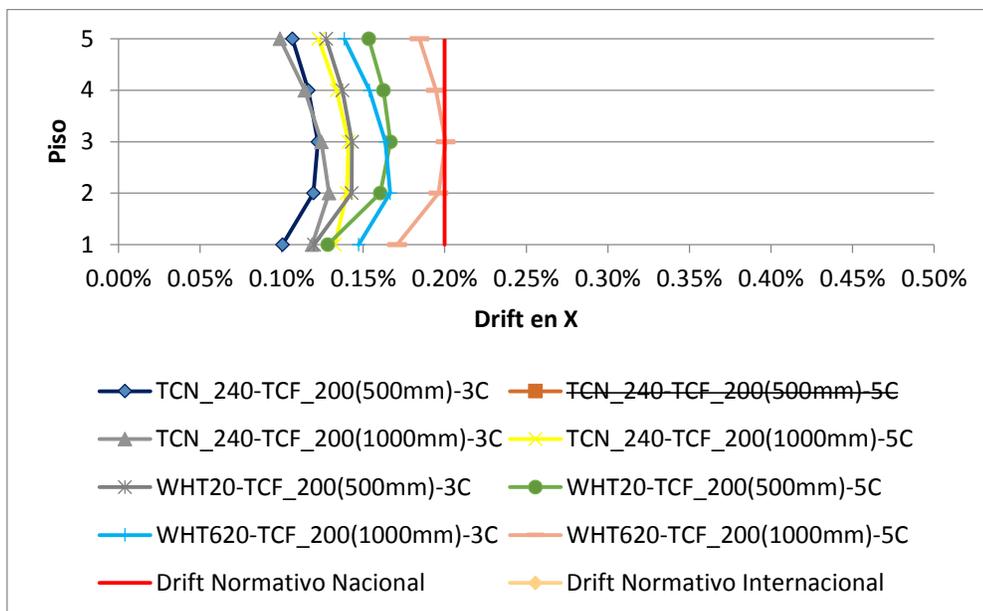
**Figura I6. Drift Zona 2 Suelo A para losa transversal**



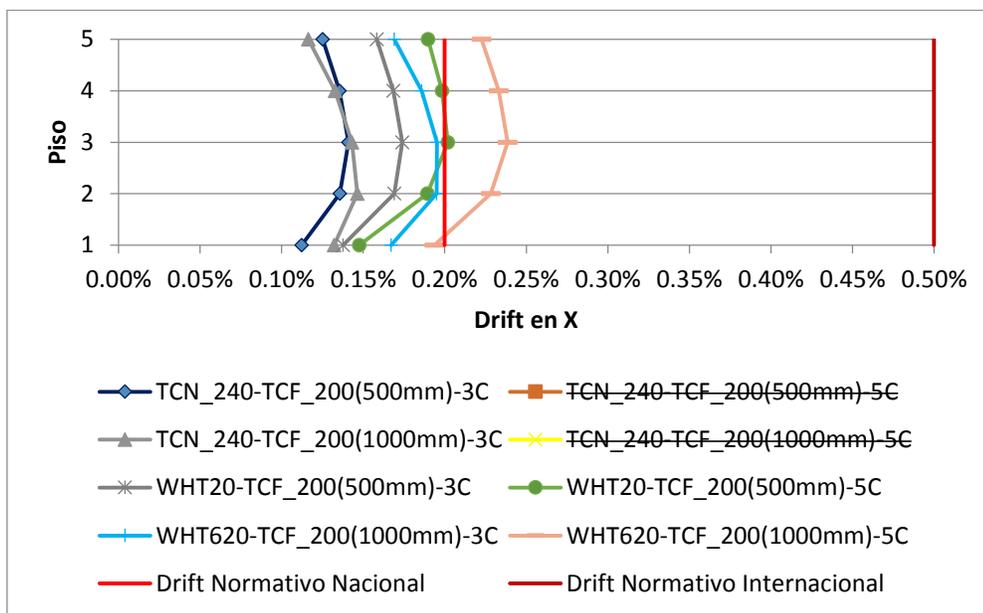
**Figura I7. Drift Zona 2 Suelo B para losa transversal**



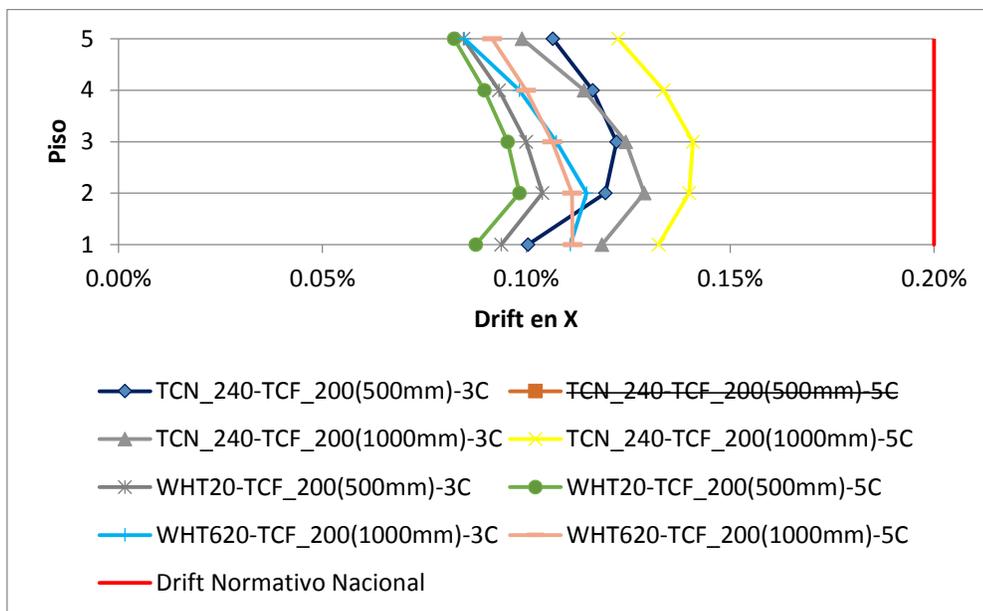
**Figura I8. Drift Zona 2 Suelo C para losa transversal**



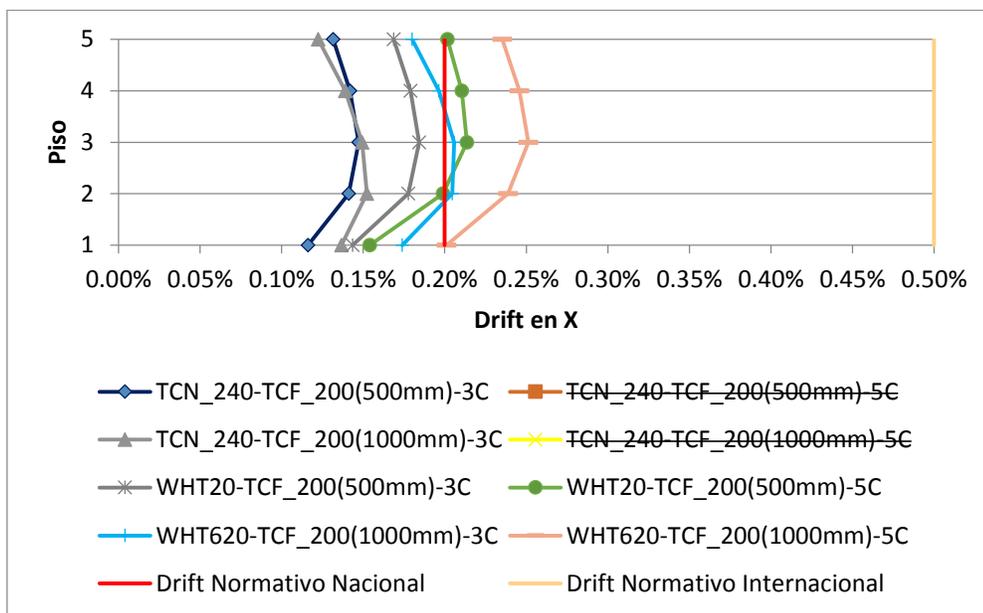
**Figura I9. Drift Zona 2 Suelo D para losa transversal**



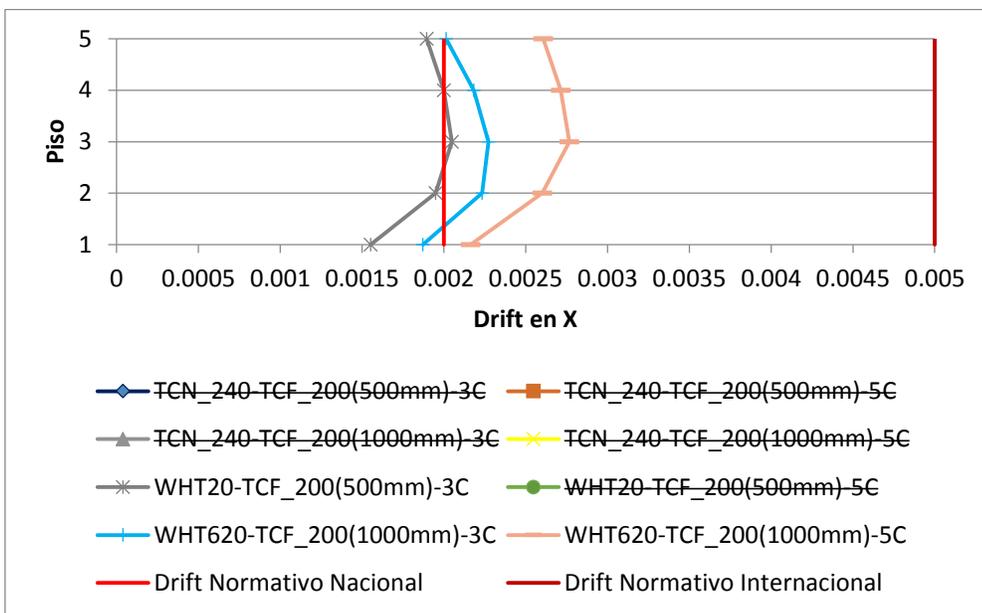
**Figura I10. Drift Zona 2 Suelo E para losa transversal**



**Figura I11. Drift Zona 3 Suelo A para losa transversal**



**Figura I12. Drift Zona 3 Suelo B para losa transversal**



**Figura I3. Drift Zona 13 Suelo C para losa transversal**