



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

Desempeño sísmico del sistema constructivo tipo *balloon* en edificios de madera contralaminada

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

JOSÉ NICOLÁS DURÁN WEISSE
CONCEPCIÓN-CHILE
2018

Profesor Guía: Dr. Peter Dechent Anglada
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

En Chile existe abundante materia prima para construir en madera, material que debe aprovecharse para obtener los beneficios económicos, ambientales o constructivos que presenta. Una de las soluciones desarrolladas para construir edificaciones más altas es la madera contralaminada o CLT (*Cross Laminated Timber*), sistema que consiste en tablas de madera apiladas y encoladas en forma cruzada, formando muros compactos. El CLT se ha utilizado en edificios de hasta 10 pisos, con resultados excelentes ante cargas estáticas, aunque en Chile su uso se ve un poco más lejano debido a la alta sismicidad que existe. Dado que las estructuras convencionales de CLT de mediana altura son bastante rígidas, se generan aceleraciones y cortes muy altos, esta investigación busca mejorar la respuesta dinámica de éstas, utilizando el sistema constructivo *balloon* con disipadores de energía.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el desempeño sísmico de estructuras CLT mediante modelos no lineales de edificios de mediana altura, utilizando el sistema *balloon* con disipadores de energía, donde se evalúan parámetros como rigidez, cortes, disipación de energía, aceleraciones y desplazamientos.

Para lograr tal objetivo, la investigación abarcó dos etapas principales, la primera reprodujo el comportamiento de estructuras CLT con conectores convencionales, que utilizan el sistema constructivo tipo plataforma, la cual sirvió para calibrar los modelos con resultados experimentales, y la segunda reprodujo estructuras que utilizan el sistema constructivo tipo *balloon* con disipadores de energía. A ambos modelos se les aplicaron distintas cargas dinámicas a efecto de analizar las ventajas y desventajas del sistema propuesto, comparando los resultados obtenidos. Al utilizar el sistema constructivo tipo *balloon* se permitió generar un movimiento de pivoteo en los paneles ante cargas laterales, logrando disipar energía en las estructuras.

Se concluyó que el comportamiento ante cargas sísmicas de estructuras CLT de mediana altura que utilizan el sistema constructivo tipo *balloon* con disipadores de energía presenta grandes beneficios, porque logra reducir los cortes y aceleraciones, en comparación con estructuras CLT con conectores convencionales. Los dispositivos evitarían daños en contenidos al disminuir la rigidez del sistema, concentrando la disipación de energía en los disipadores y evitando tener que reponer los conectores.

AGRADECIMIENTOS

Este largo camino culmina con la realización de esta Tesis, no hubiese sido posible transitarlo sin el apoyo trascendental de muchas personas, quienes se convirtieron en parte fundamental de este logro, que es tanto mío como de ellos.

En primer lugar deseo agradecer a mi profesor patrocinante, Dr. Peter Dechent A., quien siempre me apoyó y entregó las herramientas para poder avanzar y concluir este trabajo. También a los profesores y colegas que me aportaron conocimientos e ideas útiles para el desarrollo de la investigación.

A mis compañeros de carrera y amigos, quienes siempre me brindaron su ayuda, sobretodo en momentos complicados a lo largo de este camino.

A mis padres Pedro Durán Faúndez y Flor Weisse Novoa, por su constante guía durante toda mi vida, por los valores que me entregaron, los cuales ayudaron a cumplir mis metas y concretar mis sueños.

A mis hermanos, familiares y amigos quienes siempre me entregaron su apoyo y buenas vibras. Y en general a todos los que de alguna u otra forma ayudaron a formarme como persona y lograr finalizar esta etapa tan importante.

A la Universidad de Concepción, la cual me entregó conocimientos y una formación integral para enfrentar la vida.

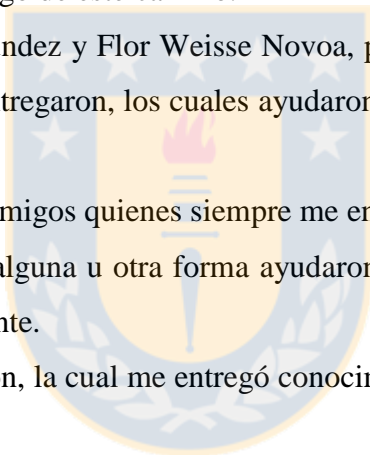


TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Metodología y alcances del trabajo.....	5
1.5 Principales resultados.....	6
1.6 Organización de la tesis	8
CAPÍTULO 2 PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS LATERALES DEL CLT.....	9
2.1 Introducción	9
2.2 El CLT como material de construcción	9
2.3 Diseño estructural de CLT	15
2.4 Conexiones en CLT.....	18
2.5 CLT ante cargas laterales	21
2.6 Conclusiones	28
CAPÍTULO 3 MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS CLT CON CONECTORES CONVENCIONALES	29
3.1 Introducción	29
3.2 Modelación y calibración de conectores convencionales	30
3.3 Modelación de muros CLT	32

3.4 Modelación de muros CLT ante cargas laterales	33
3.5 Modelación de estructuras CLT de uno, dos y tres pisos con conectores convencionales ...	35
3.6 Conclusiones	39
CAPÍTULO 4 MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS CLT UTILIZANDO EL SISTEMA BALLOON CON CONECTORES DISIPADORES DE ENERGIA	40
4.1 Introducción	40
4.2 Modelación de disipadores de fricción y de fluencia.....	41
4.3 Modelación de muros CLT con conectores disipadores de energía.....	44
4.4 Modelación de estructuras CLT utilizando el sistema <i>balloon</i> con disipadores de energía .	51
4.5 Conclusiones	58
CAPÍTULO 5 RESULTADOS DE MODELOS DE ESTRUCTURAS CLT CON CONECTORES CONVENCIONALES	59
5.1 Introducción	59
5.2 Modelos de conectores convencionales	59
5.3 Modelos de muros CLT con conectores convencionales	61
5.4 Modelos de estructuras CLT con conectores convencionales.....	63
5.5 Conclusiones	68
CAPÍTULO 6 RESULTADOS DE MODELOS DE ESTRUCTURAS CLT CON DISIPADORES DE ENERGÍA QUE UTILIZAN EL SISTEMA <i>BALLOON</i>.....	69
6.1 Introducción	69
6.2 Modelos de muros CLT con conectores disipadores de energía.....	69
6.3 Modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema <i>balloon</i> con conectores disipadores de energía	77
6.4 Conclusiones	88
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	89
REFERENCIAS	94

ANEXOS	102
ANEXO 2.1 Métodos analíticos para el diseño de paneles CLT	102
ANEXO 3.1 Modelos de estructuras CLT con conectores convencionales.....	104
ANEXO 4.1 Modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema <i>balloon</i> con disipadores de energía	106
ANEXO 4.2 Propuesta de apoyo de losa a muros CLT en sistema constructivo tipo <i>balloon</i> .	110
ANEXO 5.1 Resultados de modelación de ángulos de corte y <i>hold-downs</i> para uniones de muro CLT a fundación y a losas.....	112
ANEXO 5.2 Resultados de modelación del muro 1.1 con conectores convencionales	115
ANEXO 5.3 Resultados de la modelación de estructuras CLT con conectores convencionales	116
ANEXO 6.1 Muro con disipador friccional con fuerza de deslizamiento igual a cero.....	120
ANEXO 6.2 Resultados de muros CLT con disipadores de energía	120
ANEXO 6.3 Resultados de modelos en estructuras CLT de uno a tres pisos con disipadores de energía que utilizan el sistema <i>balloon</i> ante el registro de Kobe	127
ANEXO 6.4 Resultados de modelos en estructuras CLT de uno a tres pisos con disipadores de energía que utilizan el sistema <i>balloon</i> ante registros locales.....	130
ANEXO 6.5 Resultados de modelos en estructuras CLT de cuatro a siete pisos con disipadores de energía que utilizan el sistema <i>balloon</i>	135
ANEXO 6.6 Distintos análisis en estructuras CLT con conectores disipadores de energía que utilizan el sistema <i>balloon</i>	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Modelos realizados para conectores convencionales	31
Tabla 3.2 Modelos realizados para muros con conectores convencionales	33
Tabla 3.3 Registros sísmicos utilizados en los modelos.....	35
Tabla 3.4 Análisis de modelos realizados para estructuras con conectores convencionales.....	38
Tabla 4.1 Modelos realizados para muros con disipadores de energía	50
Tabla 5.1 Masas y periodos fundamentales en modelos con conectores convencionales	59
Tabla 6.1 Masas y periodos fundamentales en modelos con disipadores de energía.....	69
Tabla 6.2 Valores máximos de distintos parámetros para modelos de estructuras con conectores convencionales y con disipadores de energía, para registro de Kobe 0,82g	81
Tabla A.4.1 Modelos realizados para estructuras con disipadores de energía	108
Tabla A.6.1 Valores máximos de distintos parámetros para modelos de estructuras con disipadores de energía, para registro de Concepción	132
Tabla A.6.2 Valores máximos de distintos parámetros para modelos de estructuras con disipadores de energía, para registro de Maule 2	133
Tabla A.6.3 Valores máximos de distintos parámetros para modelos de estructuras con disipadores de energía, para registros de Kobe 0,82g, Concepción y Maule 2	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Composición panel CLT	2
Figura 2.1 Edificio Stadthaus Murray Grove	10
Figura 2.2 Edificio Forté Apartments	11
Figura 2.3 Proyecto Milano Vina Cenni	11
Figura 2.4 Manufactura de paneles CLT	12
Figura 2.5 Comparación del costo de construcciones en distintas alturas en CLT y otros materiales	14
Figura 2.6 Falla por rodamiento de capas transversales	15
Figura 2.7 Modelo de viga para método de Kreuzinger	16
Figura 2.8 Porcentaje de deformación por flexión y por corte dependiendo de la razón L/d en panel CLT	17
Figura 2.9 Conectores con placas metálicas en CLT	19
Figura 2.10 Anclaje y conector de corte instalado en muro CLT	19
Figura 2.11 Uniones en CLT con tornillos autoperforantes	20
Figura 2.12 Distintos tipos de uniones tipo <i>spline</i>	20
Figura 2.13 Algunos de las conexiones ensayadas por Ubiel y Blass	21
Figura 2.14 Algunos de los ensayos realizados por Gavric	23
Figura 2.15 Trabajo realizado por Gavric para conectores metálicos	23
Figura 2.16 Configuraciones de muros CLT ensayadas	24
Figura 2.17 Ensayo en estructura de un piso	25
Figura 2.18 Ensayo en estructura de tres pisos	26
Figura 2.19 Ensayo en estructura de siete pisos y carga viva aplicada	27
Figura 2.20 Trabajo realizado por Pei con muros dúctiles y rígidos	28
Figura 3.1 Ensayo con cargas cíclicas en <i>hold-down</i>	32
Figura 3.2 Esquema de ensayo y modelo en muros CLT ante cargas laterales	34
Figura 3.3 Planta de estructura modelada de un piso	36
Figura 3.4 Elevaciones de estructura modelada de un piso	37
Figura 4.1 Disipador friccional en muro CLT	42
Figura 4.2 Disipador de fluencia en muros CLT	43

Figura 4.3 Curva corte-desplazamiento de muro	45
Figura 4.4 Fases de movimiento de balanceo en muro con disipadores.....	45
Figura 4.5 Muro 1.2 con disipadores friccionales	49
Figura 4.6 Muro 2.1 con disipadores friccionales y disipadores de fluencia	49
Figura 4.7 Planta y elevaciones de estructura de dos pisos con disipadores	53
Figura 4.8 Equilibrio de fuerzas en muro de tres pisos con disipador de energía	54
Figura 5.1 Curvas fuerza-deformación en <i>hold-down</i> y ángulo metálico de corte.....	60
Figura 5.2 Curva corte-desplazamiento en muros con conectores convencionales	62
Figura 5.3 Curva Energía-desplazamiento lateral total en muros con conectores convencionales	62
Figura 5.4 Curvas corte-desplazamiento para análisis cíclico de estructura de tres pisos	64
Figura 5.5 Resultados de análisis <i>time-history</i> para sismo Kobe 0,82g, estructura un piso.....	66
Figura 5.6 Curvas corte-desplazamiento para análisis <i>time-history</i> con sismo Kobe 0,82g, estructura de tres pisos.....	67
Figura 6.1 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en muro 2.1	72
Figura 6.2 Comportamiento de disipadores friccionales y de fluencia en muro 2.1	73
Figura 6.3 Curva energía deformación-número de etapas de tiempo, análisis cíclico en muro 2.1	73
Figura 6.4 Curvas corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g en muro doble.....	76
Figura 6.5 Curvas en disipadores de muro doble para registro de Kobe 0,82g.....	76
Figura 6.6 Curva energía deformación- tiempo en muro doble para registro de Kobe 0,82g.....	77
Figura 6.7 Curva corte-desplazamiento en análisis cíclico, estructura tres pisos con disipadores	80
Figura 6.8 Curva corte-desplazamiento registro Kobe 0,82g, estructura tres piso con disipadores	80
Figura 6.9 Curva energía deformación-tiempo registro Kobe 0,82g en estructura tres pisos	80
Figura 6.10 Curvas corte-desplazamiento registro Maule 2, estructura tres pisos con disipadores	84
Figura 6.11 Curvas energía deformación-tiempo registro Maule 2 en estructura tres pisos	84
Figura 6.12 Curvas corte-desplazamiento estructura siete pisos con disipadores, corte objetivo 15% del peso total	87
Figura A.2.1 Factores de unión de método gamma.....	102
Figura A.2.2 Ejemplos de factores k para distintas configuraciones de carga	103

Figura A.3.1 Modelo tipo “pivote”	104
Figura A.3.2 Modelo de estructura de un piso	104
Figura A.3.3 Modelo de estructura de dos pisos	105
Figura A.3.4 Modelo de estructura de tres pisos deformada lateralmente	105
Figura A.4.1 Modelo de disipador friccional	106
Figura A.4.2 Modelo de estructura de dos pisos con disipadores de energía.....	107
Figura A.4.3 Modelo de estructura de cinco pisos con disipadores de energía.....	107
Figura A.4.4 Modelo de estructura de siete pisos con disipadores y muros de 2,3 m de largo..	108
Figura A.4.5 Unión propuesta para apoyo de losa sobre muros.....	111
Figura A.4.6 Unión propuesta para apoyo de losa sobre vigas	112
Figura A.5.1 Curvas fuerza-deformación en <i>hold-down</i> y ángulo metálico de corte.....	113
Figura A.5.2 Curvas fuerza-deformación <i>half-lap</i> para uniones de losas y muros	113
Figura A.5.3 Curvas fuerza-deformación ángulo metálico de corte, unión muro-losa	114
Figura A.5.4 Curvas fuerza-deformación anclaje metálico o <i>hold-down</i> , unión muro-losa	114
Figura A.5.5 Curva corte-desplazamiento en muros 1.1 con conectores convencionales.....	115
Figura A.5.6 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en estructura un piso	116
Figura A.5.7 Curvas corte-desplazamiento para análisis cíclico en estructura de dos pisos.....	117
Figura A.5.8 Resultados de análisis <i>time-history</i> para sismo Kobe 0,5g, estructura un piso.....	118
Figura A.5.9 Curvas corte-desplazamiento para análisis <i>time-history</i> con sismo Kobe 0,82g, estructura de dos pisos	119
Figura A.5.10 Curva energía deformación-tiempo, registro de Kobe 0,82g en estructura dos pisos	119
Figura A.5.11 Curva energía deformación-tiempo, registro de Kobe 0,82g en estructura tres pisos	119
Figura A.6.1 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en muro 1.1 con disipador friccional con fuerza de deslizamiento igual a cero	120
Figura A.6.2 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en muro 1.1	121
Figura A.6.3 Curva fuerza-deslizamiento para disipadores friccionales en muro 1.1.....	122
Figura A.6.4 Curva energía deformación-desplazamiento lateral total, análisis cíclico en muro 1.1	122
Figura A.6.5 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en muro 1.2	124

Figura A.6.6 Curva fuerza-deslizamiento para disipadores friccionales en muro 1.2.....	124
Figura A.6.7 Curva energía deformación-desplazamiento lateral total, análisis cíclico en muro 1.2	124
Figura A.6.8 Curva corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g en muro simple	126
Figura A.6.9 Curva fuerza-deslizamiento en disipador sin límite, sismo Kobe 0,82g muro simple	126
Figura A.6.10 Curva energía deformación- tiempo en muro simple para registro de Kobe 0,82g	126
Figura A.6.11 Curva corte-desplazamiento en análisis cíclico, estructura un piso con disipadores	128
Figura A.6.12 Curva corte-desplazamiento sismo Kobe 0,82g, estructura un piso con disipadores	128
Figura A.6.13 Curva energía deformación-tiempo registro Kobe 0,82g en estructura un piso ..	128
Figura A.6.14 Curva corte-desplazamiento análisis cíclico, estructura dos pisos con disipadores	129
Figura A.6.15 Curva corte-desplazamiento sismo Kobe 0,82g, estructura dos pisos con disipadores	130
Figura A.6.16 Curva energía deformación-tiempo registro Kobe 0,82g en estructura dos pisos	130
Figura A.6.17 Curvas corte-desplazamiento para registro Concepción en estructuras con disipadores	132
Figura A.6.18 Curva energía deformación-tiempo registro Concepción en estructura tres pisos	132
Figura A.6.19 Curva corte-desplazamiento registro Maule 1, estructura tres pisos con disipadores	134
Figura A.6.20 Curva corte-desplazamiento registro Maule 3, estructura tres pisos con disipadores	135
Figura A.6.21 Curvas corte-desplazamiento estructura cuatro pisos con disipadores, corte objetivo 20% del peso total	136
Figura A.6.22 Curvas energía deformación-tiempo para estructura cuatro pisos, corte objetivo 20% del peso total	137
Figura A.6.23 Curvas corte-desplazamiento estructura cinco pisos con disipadores, corte objetivo 20% del peso total	138

Figura A.6.24 Curvas energía deformación-tiempo para estructura cinco pisos, corte objetivo 20% del peso total	139
Figura A.6.25 Curvas energía deformación-tiempo para estructura siete pisos con muros de 2,3m, corte objetivo 15% del peso total	139
Figura A.6.26 Curva corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g, estructura tres pisos con disipadores y distinta carga vertical.....	141
Figura A.6.27 Curva corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g, estructura tres pisos con disipadores y distinta carga de deslizamiento en disipador friccional.....	142
Figura A.6.28 Curva corte-desplazamiento para registro Maule 2 amplificado 1,5 veces, estructura tres pisos con disipadores	143
Figura A.6.29 Curva corte-desplazamiento para registro Maule 2 amplificado 2 veces, estructura tres pisos con disipadores	143



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Actualmente, una de las materias primas más importantes en Chile, y en especial en la zona sur del país, es la madera. Chile presenta una gran extensión de plantaciones y bosques, los cuales en un gran porcentaje son utilizados para generar madera para la construcción. Generalmente, la construcción en madera en Chile es de viviendas de uno o dos niveles, con estructuras en base a tabiques con pies derechos y envigados para los entrepisos. Este tipo de construcción no permite generar espacios y luces muy grandes, ya que las dimensiones y resistencias de las piezas no son suficientes. Por otro lado, para estructuras mayores se utilizan sistemas de marcos de madera laminada contralaminada construidos con el sistema tipo plataforma y generalmente se complementa con otros materiales, generando sistemas híbridos, evitando así utilizar muchos arrostramientos, reduciendo de esta manera las deformaciones en las estructuras. La madera presenta algunas debilidades en comparación con otros materiales de construcción y una de ellas es que contiene fibras con direcciones marcadas. Esto la convierte en un material ortotrópico que presenta una menor estabilidad, por lo tanto, se debe tener cuidado en utilizar los elementos en las orientaciones adecuadas dependiendo del tipo de carga que esté actuando. Otra debilidad que presenta la madera, es que tiene una menor resistencia comparada con otros materiales como el hormigón y el acero, lo que limita su uso a cargas más pequeñas. Sin embargo, la madera junto con sus conexiones tiene el beneficio de ser un material dúctil que puede absorber energía y deformarse sin tener fallas frágiles o repentinas.

Con la gran cantidad de madera que existe en Chile, la idea es poder construir estructuras de mayor altura con este material. Debido a las restricciones que tiene el sistema tradicional de construcción en madera, nace en los años 90 un sistema que se utiliza cada vez más en el mundo, con resultados óptimos para edificios en altura, éste es el *Cross Laminated Timber* (Madera Contralaminada) o CLT. El CLT es un panel que tiene generalmente tres, cinco o siete capas, las cuales están compuestas por tablas de madera y cada una de éstas va encolada con la otra de manera cruzada, formando finalmente un muro macizo. Esta laminación ofrece mayor estabilidad a losas que pueden funcionar en dos direcciones, además, cuenta con una gran resistencia y baja

deformación al tratarse de paneles sólidos, permitiendo fabricar muros más altos y largos, ofreciendo mayor resistencia a la compresión debido a la cantidad de madera que se utiliza. En los paneles, se puede aprovechar de utilizar madera de menor calidad estructural para las capas interiores, debido a que éstas son las que menores esfuerzos presentan al momento de la flexión en el panel. Este material puede ser competitivo con el hormigón y el acero para edificaciones de mediana y gran altura. En actualidad, existen estructuras de hasta 10 pisos en CLT como el Forté Apartments ubicado en Melbourne construido el año 2012.

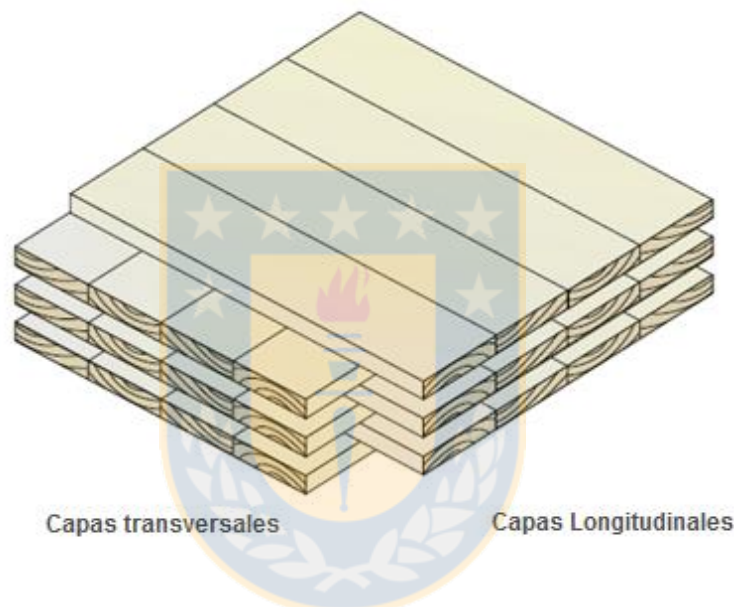


Figura 1.1 Composición panel CLT (FPInnovations, 2013)

El CLT no solo es un excelente material estructural como ya se ha mencionado, sino que también presenta buenos desempeños en otros ámbitos, por ejemplo, como cualquier construcción en madera tiene un balance de CO₂ positivo, porque almacena carbono y produce una menor huella de éste en su proceso de fabricación comparado con otros materiales. Esto permite construir de una forma más ecológica y sostenible. El CLT, también posee buenas propiedades de resistencia al fuego y de instalación entre otras.

En Chile, debido a la sismicidad que existe, no es tan fácil implementar este nuevo sistema de construcción. Por lo tanto, sería bastante arriesgado aventurarse con edificios CLT en Chile sin antes realizar varias investigaciones y ensayos sobre el tema. Actualmente existen algunos

trabajos que analizan la respuesta de los paneles ante cargas laterales y sísmicas, llegando incluso a ensayar un edificio CLT de siete pisos en una mesa vibradora aplicando varios registros distintos. Sin embargo, los resultados mostraron que el sistema aún no está cien por ciento preparado para un país altamente sísmico y deben implementarse algunas mejoras, debido a que las estructuras CLT al ser tan rígidas generan aceleraciones y cortes muy altos para una vivienda habitable. Por otro lado, en los ensayos realizados por distintos autores, se ha concluido que la disipación de energía en las estructuras de madera contralaminada se concentra a nivel de los conectores, los cuales generalmente fallan después de varios ciclos de carga. Por los motivos antes mencionados, nace la necesidad de generar un sistema que reduzca las aceleraciones y cortes en las estructuras CLT, y que también disipe de mejor manera la energía en las uniones.

Para obtener una mejor respuesta ante cargas sísmicas en estructuras CLT, en esta Tesis se estudió la posibilidad de utilizar distintos tipos de disipadores de energía, ya sea en las uniones de los paneles a la fundación, como también en las uniones entre los paneles. Se utilizaron disipadores friccionales y de fluencia en modelos de estructuras CLT de uno hasta siete pisos. Estos disipadores funcionan con el movimiento relativo de los paneles con respecto al suelo y el desplazamiento relativo entre paneles adyacentes. Para lograr un mejor aprovechamiento del uso de los disipadores, se utilizó el sistema constructivo tipo *balloon*. Este sistema mantiene la estructura vertical continua en toda la altura del inmueble, a diferencia del sistema tipo plataforma que en cada piso utiliza un elemento estructural vertical distinto, evitando así mantener la continuidad. Al utilizar paneles continuos en toda la altura del edificio, las cargas laterales generan pivoteos en éstos y concentran las deformaciones en los disipadores. El hecho de contar con muros continuos hace que la esbeltez de ellos aumente y que la estructura se flexibilice, mejorando así el desempeño global del edificio. Si se utilizara el sistema tipo plataforma, el movimiento de pivoteo en los muros sería bastante menor y las deformaciones en los disipadores también se verían reducidas. En la actualidad, el sistema constructivo *balloon* se utiliza muy poco, y menos aún cuando se trata de estructuras de más de dos pisos. El desarrollo de esta investigación permite posicionar el sistema *balloon* en la actualidad como una buena alternativa a las construcciones en madera de mediana altura específicamente en CLT. Las estructuras construidas actualmente con CLT, utilizan el sistema tipo plataforma, el cual presenta algunos fenómenos desfavorables que no se observan en el sistema *balloon*, como por ejemplo, el

creep perpendicular a la fibra y la contracción por cambio de humedad en las losas, o el aplastamiento en losas producto de la flexión en la dirección del eje de los muros. Con el uso del sistema *balloon*, se pueden evitar problemas de deformaciones diferenciales, las cuales se ven aumentadas al incrementar la cantidad de pisos.

1.2 Hipótesis

Las estructuras de CLT de mediana altura que utilizan el sistema constructivo tipo *balloon* con disipadores de energía logran un buen desempeño ante cargas sísmicas locales, logrando un control sobre el corte sísmico y reduciendo las aceleraciones en las edificaciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño sísmico de edificios CLT en mediana altura que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía, analizando parámetros como rigidez, resistencia, disipación de energía, aceleraciones y desplazamientos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar los antecedentes sobre el sistema constructivo actual en CLT y su comportamiento ante cargas laterales.
- Reproducir ensayos experimentales realizados por otros autores en muros y estructuras CLT, analizando el comportamiento de sus conectores.

- Desarrollar y posicionar como una alternativa factible la construcción de estructuras de madera de mediana altura con el sistema *balloon*, el cual se utiliza muy poco en construcciones con CLT.
- Predecir el comportamiento de modelos no lineales de edificios CLT que utilizan el sistema *balloon* ante registros sísmicos, incluyendo disipadores de energía y analizando el comportamiento de conectores y paneles.
- Mejorar la disipación de energía, disminuir las aceleraciones y controlar los cortes basales en modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía, en comparación con modelos de estructuras CLT que utilizan conectores convencionales.

1.4 Metodología y alcances del trabajo

Como primera etapa para el desarrollo de esta Tesis, se revisó la bibliografía existente del sistema CLT, sus propiedades, comportamiento y parámetros de diseño. Principalmente, se buscó información referente a ensayos en muros o estructuras ante cargas laterales, aplicando cargas cíclicas o sísmicas, recopilando de esta manera información que permitió analizar y determinar las falencias que presenta el sistema actual.

La segunda etapa fue el desarrollo de las herramientas de modelación, primero se definieron los muros CLT, para lo cual se utilizaron módulos de elasticidad obtenidos de trabajos previos. A continuación, se modelaron y se calibraron los conectores convencionales, tal como anclajes, conectores de corte o tornillos, todos con sus histéresis a fuerzas de tracción y cortante. Para esto también se utilizaron datos experimentales. Los conectores ya modelados se incorporaron a los muros y se aplicaron patrones de cargas laterales cíclicas en los paneles, se utilizaron distintas configuraciones de muros basadas en ensayos existentes que sirvieron para calibrar los modelos. Finalmente, se modelaron estructuras de uno hasta tres pisos con conectores convencionales, a las cuales se les aplicaron cargas laterales estáticas; también, registros sísmicos. Los modelos de las estructuras intentaron reproducir ensayos a escala real que utilizan el sistema constructivo tipo plataforma.

La siguiente etapa fue modelar los disipadores de energía, los cuales se diseñaron y se definieron utilizando distintos tipos de modelos que contiene el programa computacional usado y de esta manera se logró representar las histéresis de los disipadores friccionales y de fluencia. Los disipadores modelados fueron incorporados a distintos muros CLT, a los cuales se les aplicaron cargas laterales cíclicas y registros sísmicos con el objetivo de verificar sus desempeños. A continuación, se modelaron estructuras de CLT de distinta cantidad de pisos utilizando el sistema *balloon*. En los modelos, los conectores convencionales fueron reemplazados por disipadores de energía para luego aplicar cargas laterales estáticas y registros sísmicos a las estructuras modeladas.

Con los resultados obtenidos en las modelaciones de estructuras CLT con conectores convencionales y en las estructuras que utilizaron el sistema *balloon* con disipadores de energía, se pudieron comparar ambas respuestas y analizar las fortalezas y debilidades de incorporar disipación de energía a estructuras CLT construidas con el sistema *balloon*. Finalmente, también se analizó la factibilidad constructiva de incorporar los disipadores de energía a las estructuras CLT y se sugirieron algunas opciones para su instalación.

La investigación realizada trata sobre las estructuras de madera, específicamente, se centra en edificaciones de material CLT construidas con el sistema tipo *balloon*. Por otro lado, se debe tener en cuenta que se estudia solo el comportamiento estructural de los paneles CLT y no otros aspectos de diseño, como por ejemplo, la resistencia al fuego, aislación, etc. Se analiza el funcionamiento global del modelo estructural, pero no se pretende estudiar efectos locales en los paneles. En esta investigación, se analizarán modelos numéricos de estructuras CLT con conectores no lineales, evaluando distintos parámetros de respuesta y se examinando el desempeño particular de las conexiones.

1.5 Principales resultados

Se logró obtener un buen comportamiento sísmico en modelos de estructuras CLT de mediana altura que utilizan el sistema *balloon*, incorporando disipadores de energía. De esta manera, se

concluye que es posible implementar la madera contralaminada en edificios de mediana altura en Chile, aprovechando todas las ventajas estructurales que presenta el CLT.

En los modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía, se logró controlar los cortes basales y disminuir las aceleraciones máximas en comparación con las estructuras CLT con conectores convencionales. La disminución de la rigidez global del sistema permitió reducir las aceleraciones, evitando daños en los contenidos y personas. Al controlar los cortes basales se pueden reducir las fuerzas de diseño, por lo tanto, se requieren menos elementos resistentes en comparación con el sistema actual de construcción en CLT. Los desplazamientos se mantuvieron dentro de rangos aceptables al incluir disipadores de energía a las estructuras CLT construidas con el sistema *balloon*.

La energía de deformación que incluye la deformación elástica e inelástica, no siempre fue mayor en las estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores. Esto se debe a que la disminución del corte basal genera que se disipe menos energía. A pesar de lo mencionado anteriormente, la disipación de energía en las estructuras con el sistema *balloon* mejoró, puesto que esta se concentró en los disipadores de energía, lo que evita tener que cambiar los anclajes luego de un evento sísmico como es el caso de las estructuras CLT convencionales. Por otra parte, la disminución del corte en estructuras CLT evita daños en conectores convencionales, los que igualmente se deben ocupar en estructuras que utilizan el sistema *balloon* con disipadores.

Se logró reproducir de buena manera en los modelos computacionales el comportamiento ante cargas sísmicas de conectores convencionales, de muros y estructuras con este tipo de conectores. También se llegó a los resultados esperados para los modelos que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía sísmica.

Se logró incursionar en la utilización del sistema *balloon* para edificios de madera de mediana altura, obteniendo buenos resultados. En la búsqueda de poder materializar las conexiones, se encontraron maneras de poder incorporar los disipadores al sistema en la práctica.

1.6 Organización de la tesis

En el Capítulo 2, se tratan los antecedentes del estado del arte del sistema de construcción CLT con sus parámetros de diseño. Además, se mencionan trabajos de diferentes autores referentes a estructuras CLT bajo cargas laterales. Finalmente, se revisan investigaciones de sistemas que utilizan disipación de energía. A continuación, en el Capítulo 3, se muestra la modelación de los paneles CLT y de los conectores convencionales, para luego modelar ambos y aplicar distintos patrones de carga laterales. También en este capítulo, se analiza la respuesta de modelos de estructuras con conectores convencionales ante el registro sísmico de Kobe. En el Capítulo 4, se realiza el diseño de los distintos disipadores de energía y la inclusión de estos a muros CLT, se aplican cargas estáticas y dinámicas a los modelos de muros individuales. A continuación, se modelan estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía y se aplican distintos registros sísmicos en el tiempo. Luego de haber explicado los métodos de modelación y diseño de las estructuras, en el Capítulo 5, se analizan los resultados obtenidos de los distintos modelos con conectores convencionales, comparándolos con resultados de ensayos realizados por distintos autores, ensayos de donde fueron extraídos los parámetros de modelación. En el Capítulo 6, se analizan los resultados obtenidos de los distintos modelos que incluyen disipadores de energía. Adicionalmente, se comparan los resultados entre el sistema de construcción convencional con CLT y el sistema tipo *balloon* en CLT con disipadores de energía frente a la demanda sísmica. Finalmente, en el Capítulo 7, se muestran las conclusiones de la investigación, situándolas en el contexto del conocimiento actual.

CAPÍTULO 2 PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS LATERALES DEL CLT

2.1 Introducción

En este capítulo, se describe el CLT como material de construcción, indicando las ventajas que presenta frente a otros materiales más comunes. Se definen los métodos más utilizados para el diseño estructural de los paneles CLT y se analizan los tipos de conectores que se usan actualmente para su montaje. Finalmente, se analiza el comportamiento de estructuras CLT ante cargas sísmicas. Lo que se expone en este capítulo sirve para contextualizar y conocer lo que actualmente se ha investigado en madera contralaminada, particularmente en el ámbito sísmoresistente.

2.2 El CLT como material de construcción

Las construcciones en madera se caracterizan por presentar distintos sistemas estructurales, donde se distinguen dos a grandes rasgos, el primero y más utilizado en Chile es el sistema de entramado cuyos elementos principales son vigas, pilares, pies derechos, soleras, etc. El segundo, menos usado en Chile, es el sistema de estructuras macizas de madera, tal como elementos con bloques ensamblados, clavados o pegados que forman elementos sólidos. El CLT entra dentro de esta categoría, debido a que forma un panel sólido. El CLT es un sistema relativamente nuevo que nació en los años 90 en Europa y que actualmente se produce en mayor cantidad en países como Austria, Alemania, Italia, Suiza, República Checa y otros; pero se está empezando a utilizar en construcciones en Estados Unidos, Australia, Inglaterra, Nueva Zelanda, y en muchos otros países, aumentando notablemente su uso en los últimos años. El CLT básicamente consta de tablas aserradas de madera que se ordenan juntándolas de canto, a las cuales se les aplica un adhesivo por su cara más ancha (de la misma manera que para la madera laminada) y se coloca otra capa de tablas apiladas de la misma manera pero ahora en dirección perpendicular a la primera capa, luego se van aplicando más capas de forma ortogonal hasta llegar al espesor deseado (siempre con un número impar de capas). Cuando termina el armado de las capas, el siguiente paso es aplicar presión sobre el panel durante un tiempo determinado para lograr que el

adhesivo fragüe. Finalmente, las capas ya unidas funcionan como un panel macizo (proceso de fabricación se muestra en Figura 2.4). Los paneles pueden ser de las dimensiones que el fabricante desee y su límite dependerá de la maquinaria existente y de las capacidades para poder transportarlos a obra. En la actualidad, para el sistema plataforma lo más común es que sean de 3 m de alto por el largo necesario (hasta 18 m por motivos de transporte) y de hasta 500 mm de espesor. Para el sistema *balloon* considerado en este trabajo, las dimensiones son similares a las típicas producidas en paneles pero cambiando el largo por el alto, ya que el panel es continuo para la altura total del edificio. Comúnmente, se trabaja con paneles de 3 a 7 capas, con espesores de tablas que van desde los 15 mm a los 50 mm y anchos de 60 mm a 240 mm, éstas se van uniendo mediante *finger joints* para lograr los largos necesarios. El sistema CLT nació para poder hacer competitiva la madera frente a otros materiales más clásicos que se utilizan en estructuras en altura como el hormigón armado y el acero, debido a que la laminación cruzada del CLT ofrece mayor estabilidad para losas en dos direcciones y permite muros más altos y largos con mayor resistencia que los sistemas de entramado de madera. Actualmente, el Eurocódigo 5 no incluye aún el sistema CLT, pero existen países europeos que ya poseen o están desarrollando normas al respecto. En Estados Unidos existe la norma ANSI/APA PRG 320, la que indica los requisitos, calificación y aseguramiento de la calidad de la madera contralaminada.



Figura 2.1 Edificio Stadthaus Murray Grove (KLH UK, 2017)

En varios países europeos y EE.UU., se están construyendo cada vez más estructuras con CLT, ya sea en un cien por ciento con este material o combinándolo con otros materiales como hormigón armado o acero. Dentro de los edificios más destacados construidos solo con CLT se

pueden mencionar el Stadthaus Murray Grove de 8 pisos ubicado en la ciudad de Londres, el Forté Apartments que cuenta con 10 pisos o el Milano Via Cenni, el proyecto residencial más grande en Europa construido en madera (Figuras 2.1, 2.2 y 2.3 respectivamente). En Chile, la experiencia aún es reducida, pero se está avanzando, se construyó una casa de 120 m² y dos pisos de altura en San Pedro de la Paz y otra de 180 m² y tres pisos en San Bernardo. Durante el año 2018 debería comenzar la construcción de cuatro jardines infantiles a lo largo del país, los que serán en su totalidad de CLT.



Figura 2.2 Edificio Forté Apartments (Franco, 2013)



Figura 2.3 Proyecto Milano Vini Cenni (Castro, 2012)

El CLT tiene un mejor comportamiento del punto de vista estructural que los sistemas de marcos o entramados de madera, debido a que es más rígido y no necesita arrostramientos o elementos para reducir las deformaciones entre pisos. Por otro lado, al poseer losas y muros llenos existe mayor cantidad de material, lo que admite cargas más elevadas. La madera contralaminada puede

ser competitiva contra materiales como el hormigón o el acero en estructuras de mediana y gran altura, dado que puede soportar cargas similares, pero con un peso propio mucho menor, lo que se traduce en fundaciones más pequeñas y también en cargas sísmicas mucho menores. La estabilidad que ofrece la laminación cruzada permite fabricar losas más largas y anchas; también, muros más altos que pueden cubrir varios pisos. Por otro lado, la disposición de las capas cruzadas hace que los paneles posean rigideces relativamente altas en el plano y fuera del plano.

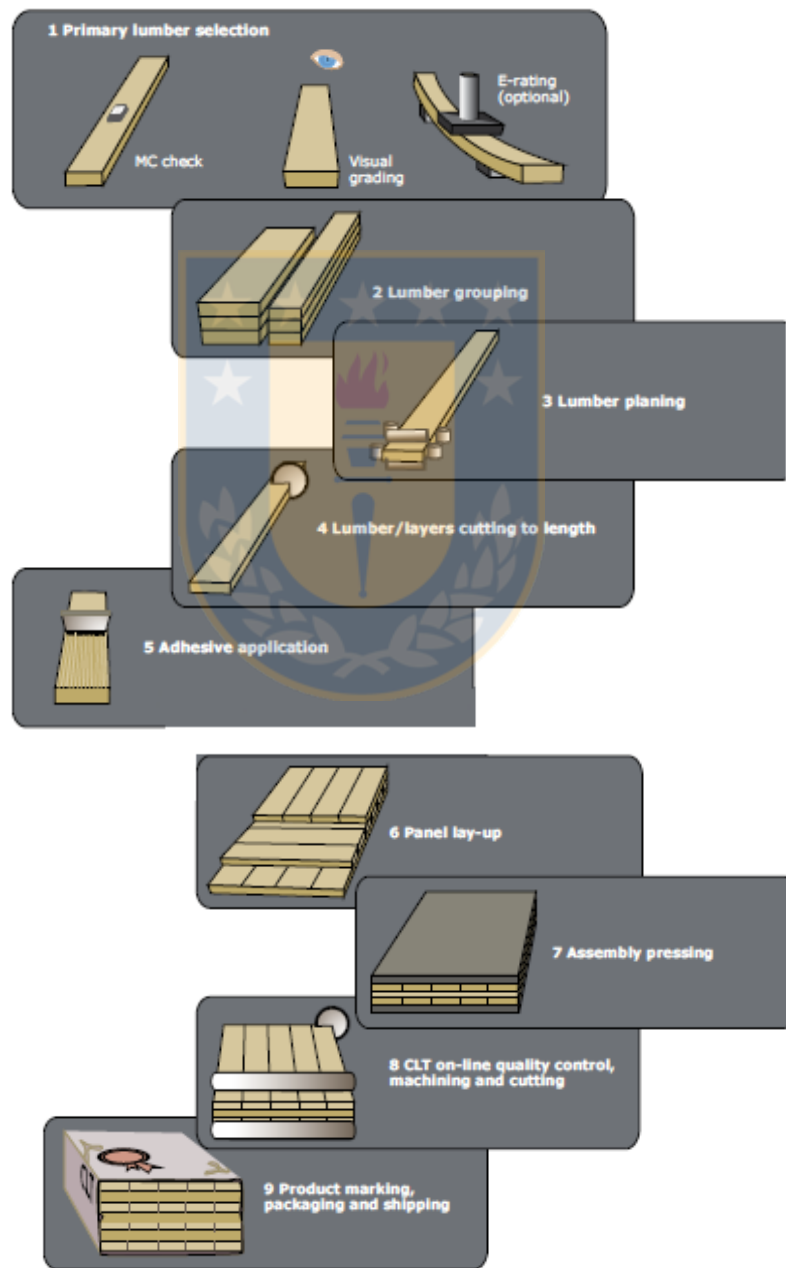


Figura 2.4 Manufactura de paneles CLT (FPInnovations, 2013)

Un factor importante, actualmente, para construir en madera son las ventajas del punto de vista ambiental que presenta este material frente a otros, porque los árboles almacenan carbono mediante la fotosíntesis y por otro lado, la extracción y manufactura de CLT o de la madera en general, requiere menos energía que otros materiales de construcción, por lo tanto, se produce menor cantidad de CO₂ (hasta cinco veces menos que para la fabricación de cemento y hasta 24 veces menos que para el acero). Estos dos aspectos contribuyen a una huella de carbono mucho más baja que la de otros materiales y ayuda a reducir el calentamiento global.

Otra cualidad importante del CLT es su buena resistencia al fuego, debido a la gran masa que tienen los paneles, los cuales forman una capa carbonizada que es difícil de traspasar y evita que se propague el fuego a otras habitaciones, al contrario de las estructuras de entramado ligero de madera que deben ser provistos de otros materiales para poder cumplir con las exigencias al fuego. Por otro lado, los paneles contralaminados presentan buenos niveles de aislamiento acústico si se sigue el diseño e instalación adecuados, también poseen un buen aislamiento térmico siempre que se realicen buenas prácticas constructivas controlando los flujos de aire y evitando que los paneles absorban demasiada humedad.

Otra de las grandes ventajas del CLT es que al ser un sistema prefabricado permite una gran precisión en su montaje y acorta en gran medida los tiempos de construcción comparado con otros materiales, se construye en seco y los paneles pueden venir desde fábrica con todos los cortes y diseños necesarios para solo ensamblar y unir las partes en obra. En el montaje del CLT se necesita una menor cantidad de mano de obra, existe una mayor seguridad y se generan menos pérdidas de material que en otros tipos de construcción. Por otra parte, al ser un sistema modular también es ideal para ampliaciones en edificios existentes e incluso se puede aprovechar su buen aspecto para dejarlo a la vista. Los paneles requieren de una construcción industrializada que permita precisión en los cortes y reduzca los tiempos de fabricación. En Chile, ese es uno de los mayores contratiempos para este sistema, porque se ha empezado por una fabricación más artesanal en comparación a lo utilizado en países más desarrollados, sin embargo, este avance debe darse con el tiempo. Los tiempos de construcción se pueden reducir a más de la mitad comparados con materiales tradicionales como el hormigón. Además, existen otros factores que hacen que el CLT se vuelva competitivo económicamente en comparación con otros sistemas

constructivos (siempre comparando con los mismos estándares de prestación), por ejemplo, para casas de no más de dos pisos puede que el CLT no sea rentable del punto de vista de los costos, pero se pueden lograr ahorros de energía a lo largo de la vida útil de la casa. La Figura 2.5 muestra una comparación de los costos de construir en CLT, en entramado liviano de madera y en hormigón, se puede ver que a medida que aumenta la altura de las construcciones, el CLT se vuelve mucho más competitivo.

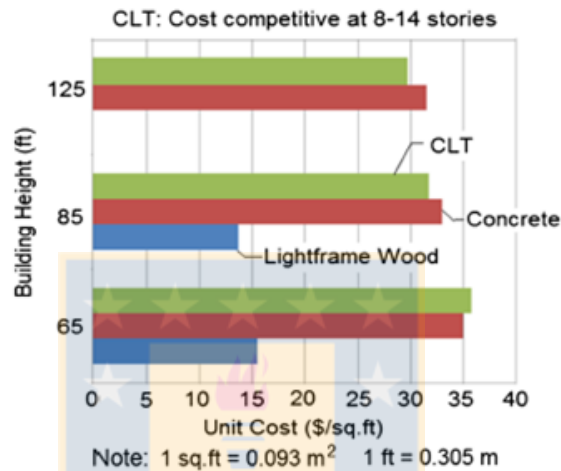


Figura 2.5 Comparación del costo de construcciones en distintas alturas en CLT y otros materiales (Pei *et al.*, 2014)

Los principales criterios de diseño del CLT son los siguientes:

- Resistencia a flexión y resistencia al corte; en el plano y fuera del plano.
- Capacidad de carga a compresión.
- Compresión perpendicular a las fibras (apoyos).
- Serviciabilidad frente a vibración de las losas.
- Resistencia al fuego.
- Aislación acústica.
- Aislación térmica.
- Deflexiones a corto y largo plazo.
 - Flecha instantánea y deflexión a largo plazo (creep).

2.3 Diseño estructural de CLT

Como ya se mencionó, el CLT se conforma por capas ordenadas en forma perpendicular, por lo tanto su comportamiento va a depender de los módulos de elasticidad paralelos y perpendiculares a la fibra de la madera, por esto, las capas superficiales en las losas siempre tendrán las tablas dispuestas en la dirección de la luz mayor para poder aprovechar la capacidad a flexión de las capas externas, incluso se pueden utilizar maderas de menor calidad en las intermedias. En los muros las capas exteriores siempre deben ir con las tablas dispuestas en forma vertical para aprovechar la capacidad de la madera en compresión paralela a la fibra.

La madera contralaminada es un material relativamente nuevo, donde se han utilizado distintos métodos de análisis estructural. En un principio, se usaron métodos experimentales que eran más precisos y se basaban en el comportamiento real de los paneles, pero estos métodos eran poco versátiles, porque necesitaban de nuevos ensayos cada vez que se cambiaban el número de capas, tipo de material o incluso el tipo de fabricación. Por este motivo, se crearon métodos analíticos que permiten predecir el comportamiento de distintas configuraciones de paneles CLT. En Europa, actualmente, existen tres métodos que son los más utilizados, los cuales se describirán más adelante. Al igual que en otros productos de madera, el CLT utiliza factores de ajuste por distintas condiciones, como factor por duración de carga, factor por contenido de humedad, etc.

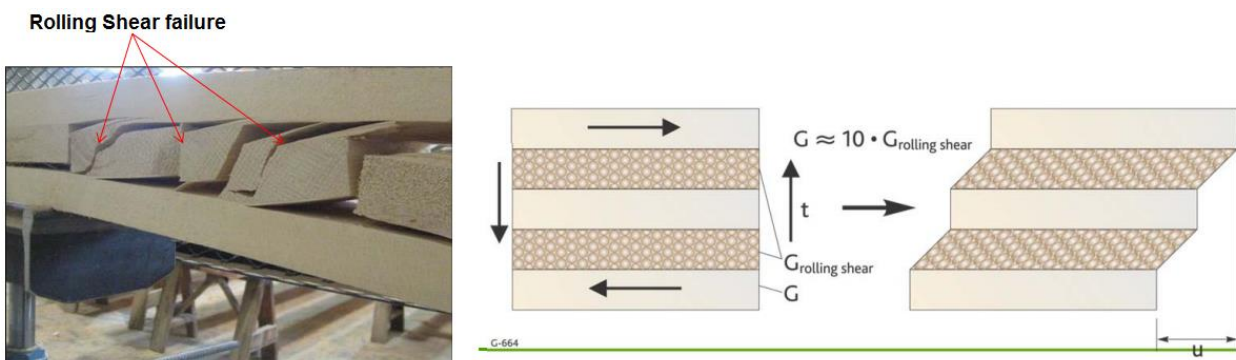


Figura 2.6 Falla por rodamiento de capas transversales (Gagnon y Mohammad, 2011)

Siempre se debe tener en cuenta la resistencia al corte de las capas transversales cuando los paneles trabajan a flexión fuera del plano, ya que la madera tiene un bajo módulo de corte

perpendicular a la fibra (módulo de rodamiento G_r) y se pueden producir fallas como la que se ve en la Figura 2.6. Es por esto que los fabricantes recomiendan utilizar tablas con anchos de por lo menos 3,5 veces el espesor. A continuación, se menciona uno de los modelos analíticos.

Método por analogía de corte o de Kreuzinger: Éste considera los diferentes módulos de corte de todas las capas en ambas direcciones. Es uno de los métodos más precisos, porque no descuida el efecto de la deformación por corte, la que en algunos casos puede ser hasta un 20% de la deformación total en losas (Figura 2.8). Este método no tiene limitación para el número de capas y para la relación luz por espesor de los paneles (L/d). El método considera dos vigas virtuales A y B, donde la viga A suma las rigideces de cada capa del panel con respecto a sus propios centros y la viga B suma los puntos de Stenier con respecto al eje neutro del panel (Figura 2.7). Estas dos vigas se acoplan con elementos infinitamente rígidos, de modo que la deformación sea igual entre ambas vigas. Este método ha sido el adoptado por la norma ANSI/APA PRG 320. Los módulos de elasticidad y corte efectivos se calculan de la siguiente manera:

$$(EI)_{\text{eff}} = (EI)_A + (EI)_B = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} + \sum_{i=1}^n E_i A_i z_i^2, \quad (2.1)$$

$$(GA)_{\text{eff}} = \frac{a^2}{\left[\left(\frac{h_1}{2G_1 b} \right) + \left(\sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{2G_i b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2G_n b} \right) \right]} \quad (\text{esta rigidez se incluye para calcular deflexiones}), \quad (2.2)$$

donde:

E_i : Módulo de elasticidad de cada capa.

G_i : Módulo de corte de cada capa.

b_i : Ancho de cada capa.

h_i : Espesor de cada capa.

A_i : Área de cada capa.

z_i : distancia desde el centro de cada capa el centro del panel.

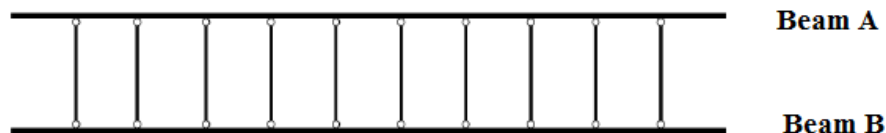


Figura 2.7 Modelo de viga para método de Kreuzinger (Gagnon y Mohammad, 2011)

Con este método, se pueden obtener las tensiones en cada capa y se puede determinar la deflexión total sumando la contribución por flexión y por corte. En el Anexo 2.1, se mencionan otros dos métodos que se utilizan para calcular las tensiones efectivas en los paneles CLT.

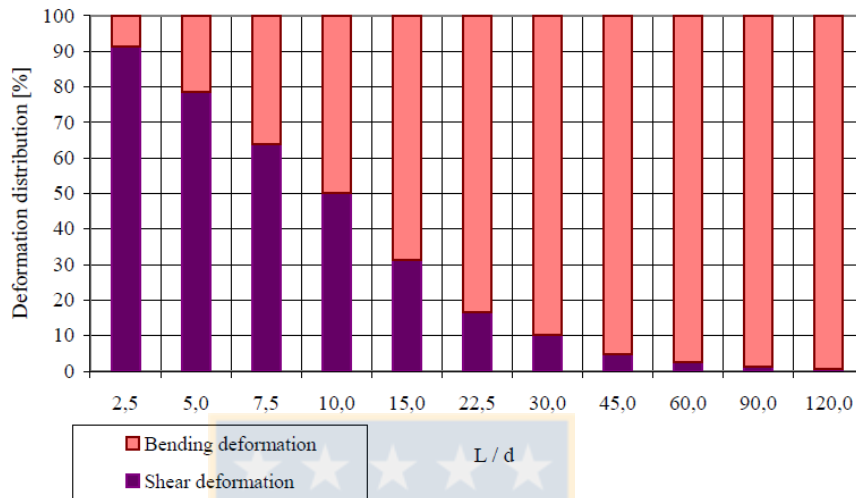


Figura 2.8 Porcentaje de deformación por flexión y por corte dependiendo de la razón L/d en panel CLT (Fellmoser y Blass, 2004)

Calculando los módulos efectivos por cualquiera de los métodos descritos, se pueden obtener las tensiones, principalmente, para cargas a flexión fuera del plano con métodos simplificados de diseño como los utilizados en madera aserrada. Las tensiones obtenidas con los módulos efectivos y las solicitaciones existentes en el material deben ser siempre menores a las tensiones admisibles del material.

La resistencia a la compresión para muros CLT con cargas verticales se calcula de forma similar que para columnas de madera aserrada, pero en el caso del CLT solo se considera el área de las capas longitudinales, que son las que toman las cargas de compresión paralelas a la fibra. Los factores de modificación por esbeltez pueden ser calculados por métodos utilizados en madera aserrada, pero considerando la rigidez efectiva calculada con alguno de los métodos antes mencionados. Se recomienda que la esbeltez C_c sea menor que 150.

$$C_c = \frac{H}{2\sqrt{3} r_{eff}} < 150, \tag{2.3}$$

$$r_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}}}, \quad (2.4)$$

$$A_{\text{eff}} = b \sum_i h_i, \quad (2.5)$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{b \sum_i h_i^3}{12} + b \sum_i h_i z_i^2, \quad (2.6)$$

donde:

H: altura del muro.

b_i : Ancho de cada capa.

h_i : Espesor de cada capa.

z_i : distancia desde el centro de cada capa al centro del panel.

Para otros tipos de carga, se pueden utilizar métodos simplificados que consideran las capas que actúan en el lado fuerte de las fibras y factores que reducen las tensiones admisibles, lo que implica mantenerse siempre en lado conservador. Para el diseño con tipos de cargas distintas a las mencionadas, se recomienda revisar el CLT Handbook (FPInnovations, 2013).

2.4 Conexiones en CLT

Uno de los puntos más importantes para el buen funcionamiento estructural del CLT son sus conexiones. Dada la alta rigidez de los paneles, las deformaciones se traducen principalmente a los conectores. Se debe tener un especial cuidado en las conexiones al momento del montaje en obra, porque los paneles generalmente vienen cortados y la partida donde se pueden generar más errores es en la cuadratura de las estructuras y en la instalación de los conectores. Los conectores utilizados en este sistema deben ser dúctiles para evitar fallas repentinas, especialmente ante cargas dinámicas que pudieran afectar la integridad de la construcción. En las estructuras con CLT, se pueden distinguir dos tipos de conexiones. El primero, basado en placas metálicas que funcionan ya sea a corte o a tracción y pueden unir los paneles a la fundación o los paneles a las losas de pisos superiores. Estas placas van unidas mediante clavos o tornillos a la madera y mediante pernos de anclaje al hormigón de las fundaciones. Dentro de las placas metálicas se encuentran las que trabajan a corte y son ubicadas en el centro de los muros, estas generalmente

tienen forma de “L”, y están las placas que trabajan a tracción y que son ubicadas en los extremos de los muros para absorber las fuerzas provocadas por el volcamiento del panel. Estas placas son llamadas anclajes o *hold-downs*. Ambos conectores se muestran en la Figura 2.9 y 2.10.



a) Conector a tracción

b) Conector de corte

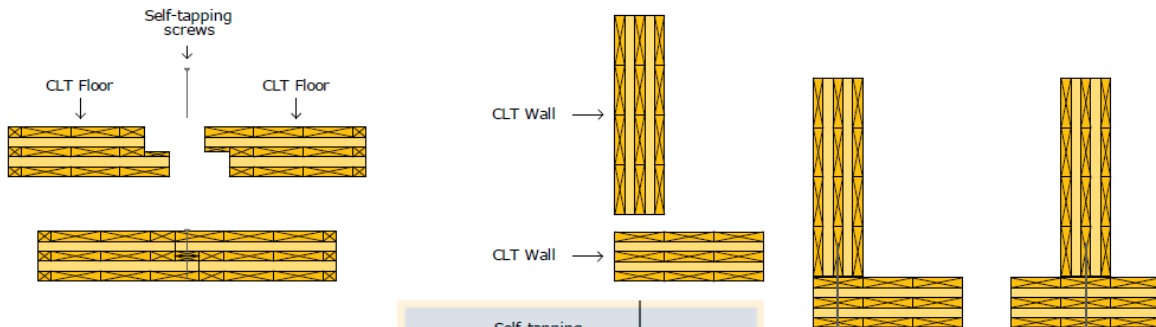
Figura 2.9 Conectores con placas metálicas en CLT (FPInnovations, 2013)



Figura 2.10 Anclaje y conector de corte instalado en muro CLT (Lauriola y Sandhaas, 2006)

En el segundo tipo de conexiones, se encuentran los tornillos autoperforantes, los que sirven para unir muros en forma perpendicular, muros de canto, losas a muros o paneles de losa entre sí. En la actualidad, existe una gran cantidad tornillos fabricados con materiales muy dúctiles y largos de hasta 600 mm, son muy fáciles de instalar y en la mayoría de los casos no necesitan perforación previa, lo que facilita en gran medida la construcción. En las conexiones con tronillos autoperforantes, se distinguen dos tipos de uniones para ensamblar paneles de canto, la primera

es la conexión *half-lap* o traslapada, la cual se muestra en la Figura 2.11 a); la segunda es la unión *spline* o ranurada, donde se realiza un rebaje en los paneles y se utiliza una placa de terciado para unirlos. Esta última puede ser por una cara, por ambas caras o interna como se muestra en la Figura 2.12. Las uniones perpendiculares entre muros y las uniones losa-muro van simplemente a tope con tornillos auto perforantes, como se muestra en la Figura 2.11 b).



a) Unión *half-lap* para losas y muros b) Unión para muros perpendiculares o losa-muro

Figura 2.11 Uniones en CLT con tornillos auto perforantes (FPInnovations, 2013)

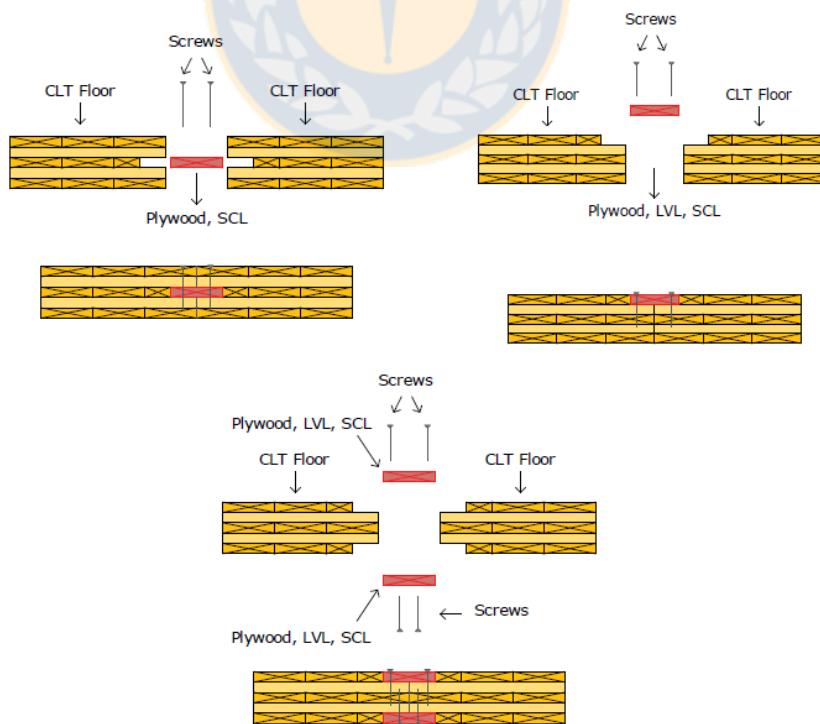


Figura 2.12 Distintos tipos de uniones tipo *spline* (FPInnovations, 2013)

Los métodos utilizados para calcular la resistencia de las conexiones no difieren en gran medida de los utilizados para madera aserrada o laminada, la diferencia en el CLT es que existen distintas direcciones de fibra de la madera dependiendo de las diferentes capas. Blass y Ubiel (2006, 2007 y 2014), ensayaron distintos tipos de conectores para distintas configuraciones de paneles y tipos de carga, obtuvieron fórmulas empíricas para determinar la capacidad de las conexiones dependiendo de factores como el diámetro y largo de los conectores, de la densidad de la madera y de la dirección de la carga. Los resultados de estos ensayos no difieren en gran medida de las ecuaciones utilizadas por el *National Design Specification for Wood Construction* (NDS), la que utiliza los modelos de falla comunes en conexiones con conectores cilíndricos en madera. Siempre se debe tener cuidado con los espaciamientos de los conectores y sus distancias hacia los bordes para asegurar así el buen comportamiento de las conexiones. En la Figura 2.13, se muestran algunos de los ensayos realizados por Ubiel y Blass.

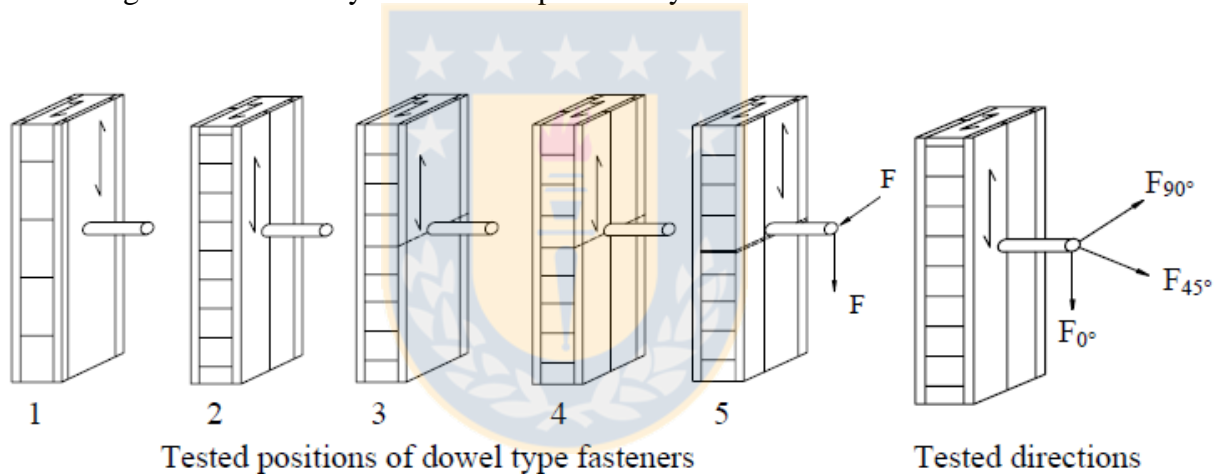


Figura 2.13 Algunos de las conexiones ensayadas por Ubiel y Blass (Blass y Ubiel, 2006)

2.5 CLT ante cargas laterales

Uno de los aspectos que tiene mayor incertidumbre en el CLT es su comportamiento ante cargas laterales, principalmente, aplicando movimientos sísmicos. El objetivo que se busca alcanzar en los últimos años es construir edificios de mediana o gran altura en madera, lo que se ha logrado en zonas que no presentan gran demanda sísmica. Muchos de estos edificios son completamente de CLT o en otros casos combinan el CLT con otros materiales de construcción más tradicionales, sin embargo, no existe ningún edificio en altura construido solo con CLT en alguna

zona con alta demanda sísmica como por ejemplo Chile. Varios autores han investigado el comportamiento del CLT ante cargas laterales dinámicas, ya sea con ensayos a nivel de conectores, muros o estructuras a escala real. Estos investigadores han logrado concluir que las estructuras de CLT son bastante resistentes a los sismos de gran magnitud, siempre y cuando se realice un buen diseño de sus conectores. En general, en estos ensayos no se han presentado daños mayores ni condiciones cercanas al colapso de las estructuras, pero sí se ha demostrado que las estructuras de CLT son demasiado rígidas por la condición de sus paneles, los que presentan una deformación casi imperceptible. Esto hace que los cortes basales generados sean muy altos y las aceleraciones dentro de los edificios también. Las aceleraciones, en algunos casos, pueden ser excesivas para la vida humana y pueden generar muchos daños en el contenido de los inmuebles. Como ya se mencionó, los paneles tienen muy baja deformación, por lo tanto los conectores son los que deforman y disipan la energía en la estructura. Los conectores son bastante dúctiles, pero con un nivel de carga sísmica alta no logran disipar la energía necesaria para lograr un buen nivel global de ductilidad. Los conectores después de varios ciclos de carga comienzan a degradar su rigidez y la disipación de energía se va perdiendo, además, el daño se concentra específicamente en ellos, lo que implica tener que reponerlos. Uno de los objetivos de esta investigación es poder aumentar la disipación global de energía en el edificio, disminuyendo las altas aceleraciones y cortes en la estructura, evitando daños y cambios de los conectores y así seguir manteniendo las condiciones de servicio.

Gavric *et al.* (2012b) realizaron una serie de ensayos con cargas cíclicas en conexiones entre paneles con tornillos autoperforantes, consideraron todas las uniones posibles para muros y losas y realizaron ensayos a extracción lateral y extracción axial de los tornillos (Figura 2.14). Ellos clasificaron las conexiones como de alta o media ductilidad según la clasificación que da el Eurocódigo 8. Por otro lado, evaluaron la sobrerresistencia de las conexiones, obteniendo entre un 20% hasta un 90% más de resistencia que la especificada por los fabricantes.

Otro de los ensayos realizados por Gavric *et al.* (2012a) fue someter a cargas cíclicas conectores metálicos de corte y tracción (Figura 2.15 a)), luego de obtener los resultados de éstos, calibraron modelos no lineales para representar la histéresis de los conectores y los implementaron a un modelo con muros CLT (Figura 2.15 b)). Los muros fueron modelados como elementos *shell*

lineales ortotrópicos y se sometieron a distintos tipos de cargas laterales, se comparó su comportamiento con resultados de muros ya ensayados con los mismos tipos de conectores, donde las respuestas de los modelos fueron similares a las experimentales.

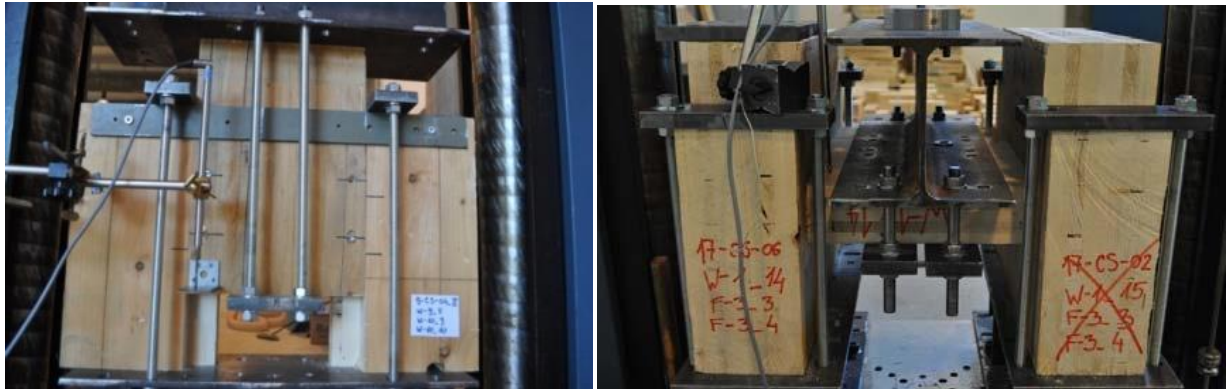
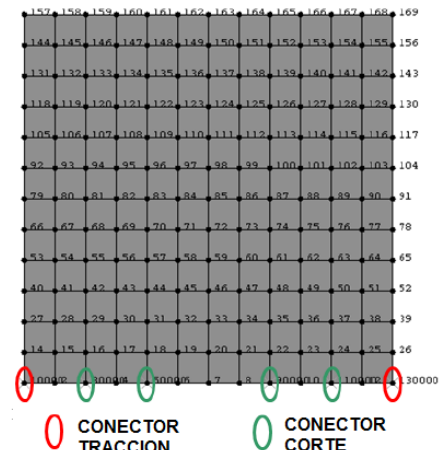


Figura 2.14 Algunos de los ensayos realizados por Gavric (Gavric *et al.*, 2012b)



a) Ensayo con cargas cíclicas en conector de corte



○ CONECTOR TRACCION ○ CONECTOR CORTE

b) Modelo de muro con conectores

Figura 2.15 Trabajo realizado por Gavric para conectores metálicos (Gavric *et al.*, 2012a)

Por otro lado, Popovski y Karacabeyli (2012) realizaron varios ensayos con cargas monotónicas y cíclicas en distintas configuraciones de muros CLT, donde variaron la cantidad y tipo de conectores, la carga vertical, las dimensiones de los paneles y la cantidad de pisos. Observaron que al aumentar la carga vertical los paneles tenían una mayor resistencia y una rigidez más alta. Por otro lado, concluyeron que los paneles con conectores a tracción mostraron mayor rigidez y ductilidad que los unidos solo con conectores de corte; también, que los muros formados por más de un panel presentan menor resistencia y rigidez, pero tienen una mayor ductilidad. Además, se

pudo confirmar que el comportamiento de los muros es gobernado por las conexiones, las que generan la ductilidad en el sistema, por lo tanto, en esas zonas es donde se debe buscar implementar sistemas que mejoren el comportamiento sísmico de los muros. En la Figura 2.16, se muestran algunos de los ensayos realizados por Popovski. En la primera columna, se muestra la configuración del muro ensayado. En la segunda, se indica el nombre asignado al ensayo, donde la segunda letra indica el tipo de conector de corte que se utilizó (A, B o C), después del guion se indica el tipo de tornillos utilizado y se incluye la letra H si tiene conectores a tracción (SN: *spiral nails*, TR: *timber rivets*, RN: *annular ring nails*, S1: SFS screws 4x70 mm, S2: SFS screws 5x90 mm). En la tercera columna, se mencionan los tipos de placas con su ubicación y los tipos y cantidad de tornillos (D: diámetro, L: largo). La cuarta columna indica la carga vertical. La quinta muestra el tipo de carga del ensayo (CUREE: cíclico, Ramp: monotónico, ISO16670).

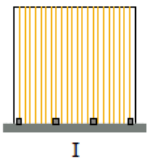
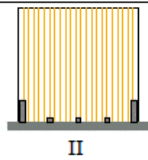
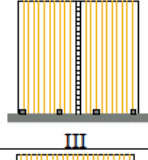
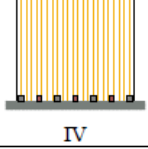
Wall Configuration	Test Designation	Brackets and Fasteners	Vertical Load [kN/m]	Lateral Load
 <p>I</p>	CA-SN-00	Bracket A placed at 710mm SN 16d, n = 18 D = 3.9 mm L = 89 mm	0	CUREE
	CA-SN-01		10	Ramp
	CA-SN-02		10	CUREE
	CA-SN-03		20	CUREE
	CA-RN-04	RN 10d (3.4 x 76mm), n=12	20	CUREE
	CA-S1-05	S1 (4 x 70mm) n=18	20	CUREE
	CA-S2-06	S2 (5 x 90mm) n=10	20	CUREE
	CC-TR-09	Bracket C, Rivets L=65mm, n=10	20	Ramp
	CC-TR-10A	Bracket C, Rivets L=65mm, n=10	20	CUREE
	 <p>II</p>	CA-SNH-07	SN 16d (3.9 x 89mm), n=18 Same on Hold-Down	20
CA-SNH-08		SN 16d (3.9 x 89mm), n=18 Same on Hold-Down	20	CUREE
CA-SNH-08A		SN 16d (3.9 x 89mm), n=18 12d (3.3 x 63mm), n=18 on HD	20	CUREE
 <p>III</p>	CA-SN-11	SN 16d (3.9 x 89mm), n=18 WT-T (3.8 x 89mm) n=12	20	CUREE
	CA-SN-12	SN 16d (3.9 x 89mm), n=18 SFS2 (5 x 90mm) n=12	20	CUREE
	CA-SN-12A	SN 16d (3.9 x 89mm), n=18 Between panels SFS2 (5 x 90mm) n=12	20	ISO
 <p>IV</p>	CA-SN-20	Bracket A SN 16d, n=18 D=3.9mm L=89mm 3 brackets on the back side Representative of inside bottom storey wall	20	CUREE

Figura 2.16 Configuraciones de muros CLT ensayadas (Popovski y Karacabeyli, 2012)

Otro de los grandes impulsores del CLT ha sido el investigador Ario Ceccotti, quien ha realizado una serie de ensayos en estructuras de este tipo. Primero, realizó un ensayo en una estructura de

un piso, donde aplicó los registros sísmicos de Kobe y El Centro con una prueba pseudo-dinámica, en la cual se generan desplazamientos a nivel del techo de la estructura a bajas velocidades. Este ensayo consideró distintas aberturas en los paneles para evaluar el efecto de la torsión (Figura 2.17). Ceccotti llegó a la conclusión que la estructura con aberturas asimétricas se comportó prácticamente igual que la simétrica, lo que indica que los paneles se comportan de manera elástica y que las conexiones son las que entran en el rango no lineal. Se observó un *drift* máximo de 2,3% en la configuración más desfavorable, donde no se vieron daños mayores.



a) Ensayo estructura de un piso



a) Daño en conector a tracción



b) Daño en conector de corte

Figura 2.17 Ensayo en estructura de un piso (Lauriola y Sandhaas, 2006)

El siguiente ensayo que realizó Ceccotti fue una estructura a escala real de tres pisos, donde se aplicaron una serie de registros sísmicos en una mesa vibradora (Figura 2.18), el edificio se

diseño con un factor $q=1$ (q es similar al factor R de la norma chilena) y con una aceleración de $0,35\text{ g}$ correspondiente a la mayor en el código italiano. En el ensayo, no se observó ningún daño severo hasta llegar a una aceleración *peak* de $0,5\text{g}$ para el sismo de Kobe, ni tampoco se distinguió una torsión apreciable. Se llevó el edificio hasta la falla llegando a $1,2\text{g}$ de aceleración *peak* para el sismo de Kobe amplificado, llegando a un *drift* de $1,3\%$ en donde se alcanzó la condición de colapso, así se pudo calcular un factor $q=3,4$.

Finalmente, Ceccotti realizó un ensayo en una estructura de siete pisos en una mesa vibradora, donde aplicó distintos registros de aceleraciones, entre ellos el de Kobe en las tres direcciones de movimiento (Figura 2.19). En el ensayo, se midieron aceleraciones, *drifts*, desplazamientos y levantamientos en los paneles CLT. Basado en el edificio de tres pisos, el edificio ensayado fue diseñado con un factor $q=3$ y un coeficiente de importancia igual a $1,5$, luego de varias pruebas se observaron algunos daños en los anclajes, pero ninguna condición cercana al colapso. Se observó un levantamiento de 13 mm en los anclajes, los cuales fallan a los 30 mm y deformaciones laterales de los conectores de corte de 67 mm , los cuales fallan a los 80 mm . Se alcanzó un *drift* máximo de $2,3\%$. Sin embargo, el tema más complejo y donde se debe trabajar es en las aceleraciones, éstas llegaron a valores de $3,6\text{ g}$ en el último piso, lo que es demasiado altas para una vivienda. Es por esto que el autor sugiere la adición de elementos dúctiles para mejorar el rendimiento en cuanto a las aceleraciones en la estructura, la que es demasiado rígida.



a) Ensayo estructura de tres pisos



b) Daño en conector a tracción

Figura 2.18 Ensayo en estructura de tres pisos (Ceccotti y Follesa, 2006)



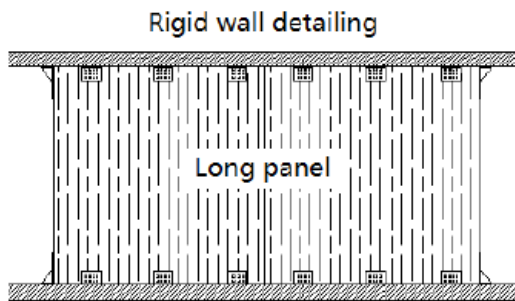
a) Ensayo estructura de siete pisos



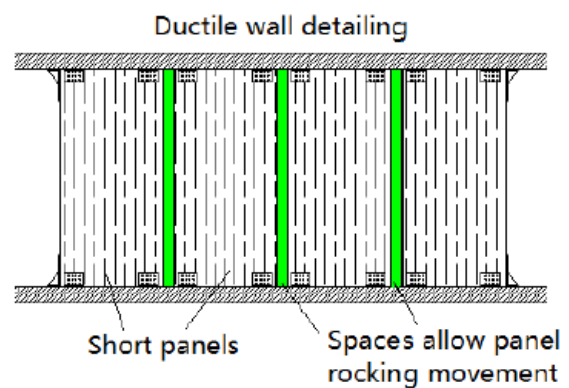
b) Carga vertical aplicada

Figura 2.19 Ensayo en estructura de siete pisos y carga viva aplicada (Ceccotti *et al.*, 2013)

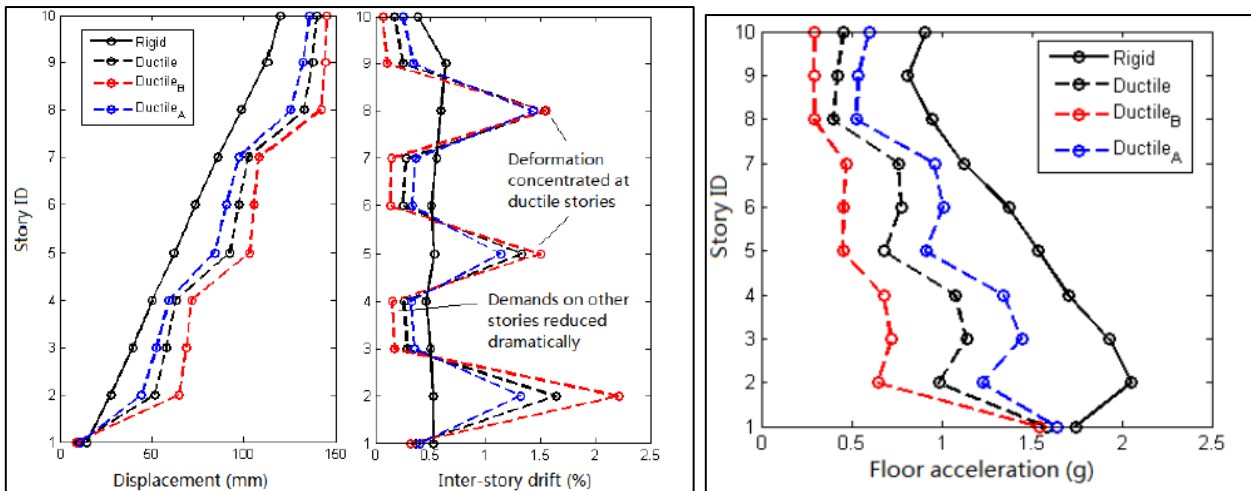
Uno de los trabajos interesantes realizados en CLT y que intenta introducir mayor ductilidad a los edificios en CLT es el realizado por Pei *et al.* (2012a), los que propusieron un concepto de muros rígidos CLT (utilizando paneles largos) y muros dúctiles CLT (utilizando segmentos de paneles cortos) en un edificio de 10 pisos. Definieron tres configuraciones, la primera la configuración dúctil que redujo a 1/3 la rigidez original de los pisos, la segunda la configuración dúctil A que aumentó en un 50% la rigidez de los pisos dúctiles y la tercera la configuración dúctil B que la disminuyó en un 50%.



a) Muro rígido compuesto de un panel



b) Muro dúctil compuesto por varios paneles

c) Desplazamientos y *drifts* por piso

d) Aceleraciones por piso

Figura 2.20 Trabajo realizado por Pei con muros dúctiles y rígidos (Pei *et al.*, 2012a)

El edificio modelado fue diseñado usando un factor R igual a 2. El modelo numérico se sometió a registros sísmicos, donde se observó que la deformación lateral se concentró en los pisos dúctiles y la aceleración en los pisos superiores se redujo significativamente, como se ve en la Figura 2.20 c) y d), así con las fuerzas reducidas los pisos rígidos pueden permanecer libres de daños durante un evento importante. La simulación numérica confirmó que el concepto global de ductilidad distribuida y amortiguación es factible y muy eficaz.

2.6 Conclusiones

En este capítulo, se pudieron revisar las propiedades generales del CLT y los criterios de diseño estructural de estos, tanto para el panel en sí, como para sus conexiones. Por lo tanto, se puede concluir, considerando los ensayos realizados por distintos autores para estructuras CLT ante cargas sísmicas, que éstas aún no dan garantías para ser utilizadas en zonas altamente sísmicas, utilizando el sistema actual de construcción. Los ensayos en estructuras a escala corroboraron la alta rigidez del sistema, llegando a desarrollar aceleraciones y cortes demasiado altos para un edificio de mediana altura.

CAPÍTULO 3 MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS CLT CON CONECTORES CONVENCIONALES

3.1 Introducción

Las estructuras de CLT construidas con el sistema plataforma, como se ha mencionado en capítulos anteriores, pueden llegar a tener una gran resistencia y soportar cargas sísmicas sin sufrir daños considerables a nivel global. Esto se ha demostrado en varios ensayos a escala real en que se han aplicado registros de aceleraciones de sismos importantes a nivel mundial, sin embargo, la ductilidad y la disipación de energía de los edificios es baja, y dada la rigidez del sistema, los cortes basales y las aceleraciones en los distintos pisos pueden llegar a ser muy altas. En el sistema plataforma en CLT existen algunos fenómenos que son desfavorables, como el *creep* perpendicular a la fibra y la contracción por cambio de humedad en las losas, o también el aplastamiento en losas producto de la flexión en la dirección del eje de los muros. Considerando tales desventajas, surge la idea de estudiar el sistema constructivo *balloon* incorporando disipadores sísmicos a las estructuras de CLT y evaluar su comportamiento, no obstante tal comportamiento debe ser comparado con el sistema constructivo tipo plataforma con conectores convencionales que se utiliza actualmente en madera contralaminada. Por esto, la primera parte de la investigación se centra en modelar y lograr reproducir el comportamiento de estructuras CLT con los conectores utilizados habitualmente en su construcción, a los cuales se les denominará conectores convencionales. Dentro de los conectores convencionales, se encuentran los tornillos autoperforantes que se utilizan para uniones muro-muro, losa-losa y muro-losa, éstas pueden ser tipo *half-lap* o tipo *spline*. Por otro lado, se tiene las uniones con placas metálicas de corte y de tracción para fijar los paneles a la fundación o para unir paneles de pisos superiores con losas, todas estas conexiones fueron discutidas en el subcapítulo 2.4.

En este capítulo para la modelación de CLT con conectores convencionales, se trabajó siguiendo una serie de pasos. Primero, se modelaron y calibraron los conectores en forma individual, para esto se utilizaron datos de ensayos realizados por distintos autores y se reprodujeron de forma numérica. Luego, los conectores modelados se implementaron a muros CLT, para el modelo muro-conector, se aplicaron una serie de patrones de cargas laterales correspondientes a patrones

aplicados en ensayos realizados por otros investigadores, los modelos fueron calibrados con los datos experimentales intentando reproducir de la mejor manera dichos ensayos. Finalmente, ya con los conectores y muros calibrados, se modelaron estructuras 3D de distinta cantidad de pisos y se aplicaron cargas laterales cíclicas y registros de aceleraciones sísmicas. Todos los modelos de estructuras con conectores convencionales intentan reproducir el sistema constructivo tipo plataforma, el cual se utiliza habitualmente en edificios CLT con este tipo de conectores. De todos los modelos realizados, se obtuvieron distintos resultados que sirvieron para evaluar y comparar con el desempeño de las estructuras con conectores disipadores de energía, los que se modelaron con posterioridad. Todos los resultados obtenidos en los modelos mencionados en este capítulo se muestran en el Capítulo 5, tanto el capítulo actual como el Capítulo 4 solo muestran los procedimientos utilizados para realizar los modelos computacionales realizados en el *software* comercial SAP2000 (CSI, 2015).

Para todos los modelos realizados, se utilizaron paneles CLT con madera de abeto europeo (*picea abies*), esto debido a que los ensayos que se quiere reproducir están hechos en paneles con este tipo de madera. El abeto europeo tiene una densidad y módulos de elasticidad similar a la del pino radiata. Sumando a lo anterior que los paneles no sufren grandes deformaciones ni llegan a tensiones cercanas a las admisibles para cargas laterales, se puede considerar que las modelaciones son una buena aproximación para el escenario chileno. Sin embargo, en un futuro se deben realizar ensayos de distinto tipo en paneles CLT con madera de pino radiata para tener datos más confiable y que representen mejor el caso chileno.

3.2 Modelación y calibración de conectores convencionales

Se modelaron las uniones con tornillos autoperforantes tipo *half-lap* y tipo *spline*, y las uniones con placas metálicas de corte y de tracción. Para esto, se utilizaron los datos de las rigideces obtenidos por Rinaldin *et al.* (2013), los cuales fueron incorporados a los modelos y sirvieron para calibrar las histéresis de los conectores. Los conectores convencionales fueron modelados en el *software* SAP2000 al igual que todos los modelos realizados en esta investigación. Cada conector se definió como un elemento tipo *link* no lineal (elementos de enlace), para el cual el

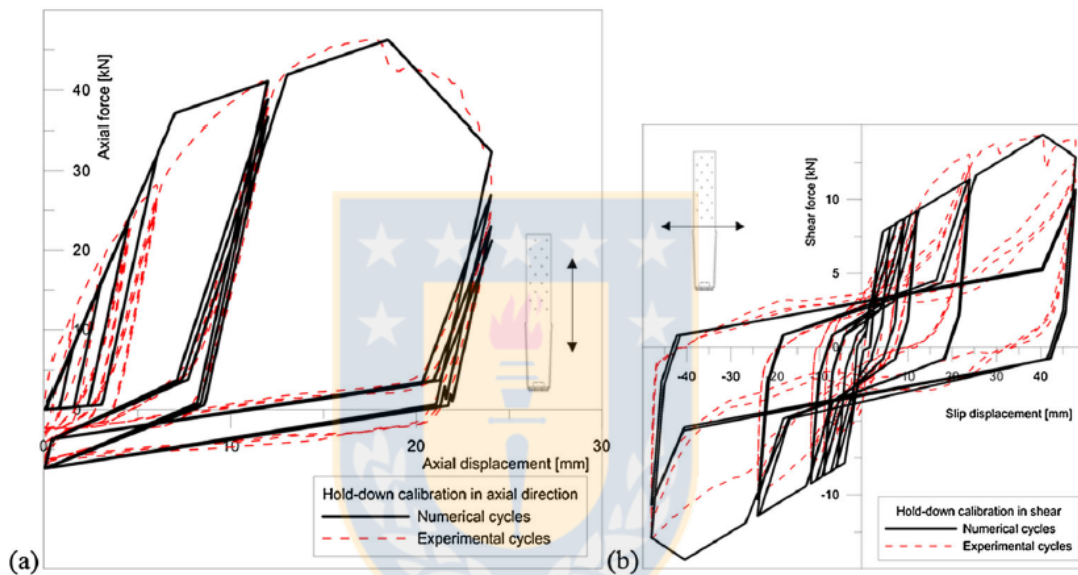
programa ofrece distintos modelos para poder definir las histéresis. En el caso de este trabajo, se utilizó una curva multi-linear plástica no lineal con el modelo más completo del *software*, el que recibe el nombre de “pivote”. Este modelo considera la degradación de rigidez en donde la carga y descarga tienden a dirigirse hacia puntos denominados pivotes (ver Anexo 3.1 Figura A.3.1).

Los ángulos (conectores de placas metálicas que trabajan a corte) y anclajes (conectores de placas metálicas que trabajan a tracción) se modelaron en dos direcciones, a cortante y a tracción, y las uniones tipo *half lap* y *spline* se modelaron tanto a extracción lateral como a extracción directa. La placa metálica a cortante es del tipo BMF 90x48x3,0x116 conectado al panel con 11 clavos 4x60 mm tipo “anker” y conectado a la fundación con un tornillo de 12 mm, la placa metálica a tracción es SIMPSON HTT22 conectada con 14 clavos de 4x60 mm tipo “anker” y a la fundación con un perno de 16 mm. Para las conexiones entre paneles, se utilizaron dos tornillos autopercutorantes HBS 8x80 mm cada 15 cm. En los ensayos mostrados por Rinaldin *et al.* (2013) los conectores fueron expuestos a un patrón de desplazamientos cíclicos definido en la norma europea EN 12512, donde se aumenta la magnitud del desplazamiento al aumentar el número de ciclos. Este mismo patrón se utilizó en los modelos de todos los conectores para lograr comparar la respuesta numérica con la experimental. Para el caso de los modelos sometidos a cargas de tracción se combinó el elemento *link* multi-linear con otro del tipo *gap* que solo toma cargas de compresión, al cual se le dio una rigidez alta para simular el comportamiento de los conectores ante este tipo de carga. En la Figura 3.1, se ven los resultados obtenidos del ensayo mostrado por Rinaldin *et al.* (2013) para el conector tipo *hold-down* del panel a la fundación en dos direcciones perpendiculares, se puede observar la curva real de los ensayos y la de los modelos realizados por Rinaldin. Los resultados de la modelación para los conectores realizada en este trabajo se muestran en el Capítulo 5. En la Tabla 3.1, se muestran los modelos implementados en este trabajo para los conectores convencionales, ya sea conectores angulares de corte, *hold-downs*, uniones tipo *half-lap* y *spline*.

Tabla 3.1 Modelos realizados para conectores convencionales

Conector	Dirección de la carga	Tipo de carga
<i>Hold-down</i> (panel-fundación y panel-panel)	Tracción	Patrón cíclico de desplazamientos
	Corte	

Conector de corte (panel-fundación y panel-panel)	Corte	Patrón cíclico de desplazamientos
	Tracción	
<i>Half-lap</i>	Extracción lateral	Patrón cíclico de desplazamientos
	Extracción directa	
<i>Spline</i>	Extracción lateral	Patrón cíclico de desplazamientos
	Extracción directa	



a) Histéresis cargas de tracción b) Histéresis cargas de corte

Figura 3.1 Ensayo con cargas cíclicas en *hold-down* (Rinaldin *et al.*, 2013)

3.3 Modelación de muros CLT

En los paneles CLT la deformación debido a cargas laterales se concentra específicamente en las conexiones, los muros presentan deformaciones muy bajas comparadas con las de los conectores, por lo tanto, se considera que los paneles se mantienen prácticamente en el rango elástico. Por tal motivo, la modelación de los muros CLT se hizo con elementos tipo *shell* elásticos, así se logró ahorrar tiempo de análisis debido a que la no linealidad del panel no influye en la respuesta global de los modelos. Para los elementos *shell*, se utilizó un módulo de elasticidad promedio de

5.685 MPa, el cual ponderó los módulos en la dirección paralela y perpendicular a la fibra ($E_0=11$ GPa y $E_{90}=0,37$ GPa) en especies de abeto utilizadas en Europa, mientras que el módulo de Poisson utilizado fue de 0,35. Los valores utilizados para la modelación de los muros se obtuvieron del trabajo realizado por Rinaldin *et al.* (2013) donde se consideró el CLT como material isotrópico, ponderando los módulos de elasticidad en las dos direcciones perpendiculares de la madera. No se espera una gran diferencia con respecto a paneles fabricados en Chile, principalmente, por tener el pino radiata una densidad específica similar a la del abeto europeo.

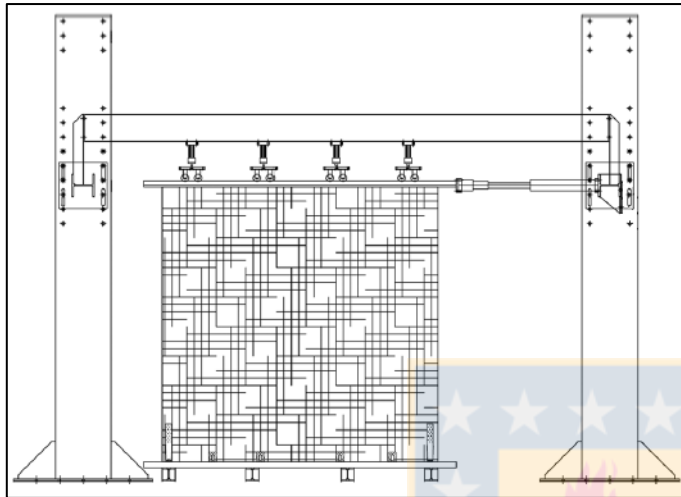
3.4 Modelación de muros CLT ante cargas laterales

A los paneles CLT modelados se les incluyeron los conectores convencionales y se intentaron reproducir tres ensayos en muros que se muestran en el trabajo realizado por Rinaldin *et al.* (2013), a los que se les llamó muro 1.1, 1.2 y 2.1. Los ensayos constan de la aplicación de un desplazamiento cíclico en el extremo superior del muro, el cual va unido a la fundación con los conectores convencionales que han sido mencionados (Figura 3.2 a)). El muro 1.1 tiene 85 mm de espesor, 2,95 m de largo y 2,95 m de alto con dos conectores de corte en el centro y dos conectores a tracción en los extremos del panel, se agregó una carga vertical de 18,5 kN/m correspondiente a la del ensayo real. El muro 1.2 tiene las mismas dimensiones que el muro 1.1, pero con cuatro conectores a corte en el centro y dos conectores a tracción en los extremos. El muro 2.1 (Figura 3.2 b)) cuenta con dos paneles de 85 mm de espesor, 1,45 m de largo y 2,95 m de alto, los cuales están unidos entre sí con uniones del tipo *half-lap* cada 15 cm; también, con cuatro conectores de corte y dos *hold-downs*. Tanto el modelo 1.2 como el 2.1 tienen una carga vertical de 18,5 kN/m. En la Tabla 3.2, se muestran los modelos realizados en muros con conectores convencionales.

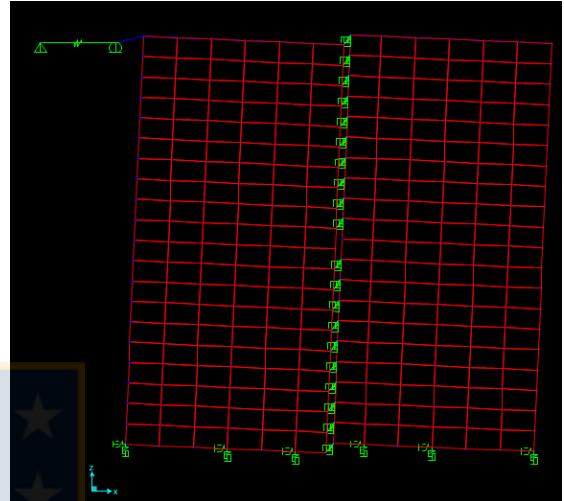
Tabla 3.2 Modelos realizados para muros con conectores convencionales

Muro	Lugar aplicación de la carga	Tipo de carga	Carga vertical	Conectores
1.1	Tope del muro	Patrón cíclico de desplazamientos	18 kN/m	Dos <i>hold-downs</i> y dos ángulos de corte

1.2	Tope del muro	Patrón cíclico de desplazamientos	18 kN/m	Dos <i>hold-downs</i> y cuatro ángulos de corte
2.1	Tope del muro	Patrón cíclico de desplazamientos	18 kN/m	Dos <i>hold-downs</i> , cuatro ángulos de corte y uniones <i>half-lap</i>



a) Ensayo en muros realizado por Gavric
(Rinaldin *et al.*, 2013)



b) Modelo de muro 2.1

Figura 3.2 Esquema de ensayo y modelo en muros CLT ante cargas laterales

A los tres modelos de muros, se les aplicaron los patrones de carga de los ensayos reales correspondiente a desplazamientos cíclicos en el extremo superior de los paneles, patrón definido en la norma europea EN 12512. De esta manera, fue posible comparar los resultados de los ensayos reales mostrados por Rinaldin *et al.* (2013) con la modelación realizada en este trabajo. Se debe mencionar que los conectores convencionales que habían sido modelados, fueron calibrados nuevamente para obtener un comportamiento lo más cercano al ensayo real. Así se permite establecer los parámetros finales de calibración de los conectores convencionales, que fueron los utilizados en los modelos realizados en estructuras en tres dimensiones. Los resultados de los modelos de muros con conectores convencionales se muestran en el Capítulo 5.

3.5 Modelación de estructuras CLT de uno, dos y tres pisos con conectores convencionales

Luego de reproducir el comportamiento de los muros, se procedió a modelar estructuras en tres dimensiones con paneles CLT unidos con conectores convencionales. Se modelaron estructuras de uno, dos y tres pisos, aplicando patrones de desplazamiento cíclicos por piso y también registros de aceleraciones sísmicas en la base de las estructuras. En la Tabla 3.3, se muestran los parámetros más importantes de los registros sísmicos que se utilizaron en la investigación.

Tabla 3.3 Registros sísmicos utilizados en los modelos

Nombre de registro	Terremoto	País	Estación	Componente
Kobe 0,5g	Terremoto de Kobe 1995	Japón	JMA	N-S
Kobe 0,82g	Terremoto de Kobe 1995	Japón	JMA	N-S
Concepción	Terremoto Chile 2010	Chile	Concepción	N-S
Maule 1	Terremoto Chile 2010	Chile	Curicó	N-S
Maule 2	Terremoto Chile 2010	Chile	Hualañe	E-W
Maule 3	Terremoto Chile 2010	Chile	Talca	N-S

Nombre de registro	PGA	Duración	Observaciones	Fecha	Mw
Kobe 0,5g	0,50 g	48 s	Sismo de Kobe escalado a 0,5 g como <i>peak</i> de aceleración.	16/01/1995	6.9
Kobe 0,82g	0,82 g	48 s	-	16/01/1995	6.9
Concepción	0,40 g	141 s	-	27/02/2010	8.8
Maule 1	0,50 g	192 s	-	27/02/2010	8.8
Maule 2	0,48 g	144 s	-	27/02/2010	8.8
Maule 3	0,44 g	148 s	-	27/02/2010	8.8

El primer modelo realizado fue el de una estructura de un piso ensayada y descrita por Lauriola y Sandhaas (2006). En la prueba original se aplicó el registro sísmico de Kobe 0,5g mediante un ensayo pseudo-dinámico, donde se generan desplazamientos a nivel del techo de la estructura a bajas velocidades. La estructura ensayada tiene dimensiones de 7x7 m (tres paneles de 2,33 m por

eje como se muestra en Figura 3.4) y 3,1 m de alto, los muros son de 85 mm de espesor y el panel del techo es de 142 mm. En las Figuras 3.3 y 3.4, se puede ver la planta y elevaciones del modelo. La carga vertical que consideró el ensayo real fue la correspondiente a una estructura de tres pisos (9 kN/m^2 aplicada en la losa), con lo cual se quiso reproducir el comportamiento de una estructura de esa cantidad de niveles. Se debe mencionar que la estructura completa es de paneles CLT y no cuenta con vigas ni pilares de madera. Para todos los modelos de muros individuales y estructuras CLT realizadas en esta investigación, se utilizó un amortiguamiento modal de un 5%. La estructura se modeló considerando cada una de las uniones con tornillos autoperforantes entre paneles CLT y todos los conectores de corte y de tracción. La malla de elementos finitos del modelo se definió siguiendo la ubicación de los conectores y se aplicó la misma carga vertical del ensayo real. Todas las uniones entre muros son del tipo *spline* al igual que la conexión entre la losa y los muros, mientras que la unión entre losas es del tipo *half-lap*. En un principio, se consideraron las uniones con tornillos autoperforantes entre paneles de losa, pero no se notó una diferencia cuando se utilizó la losa como diafragma rígido. Por lo tanto, en los siguientes modelos, se les asignó a las losas un diafragma rígido.

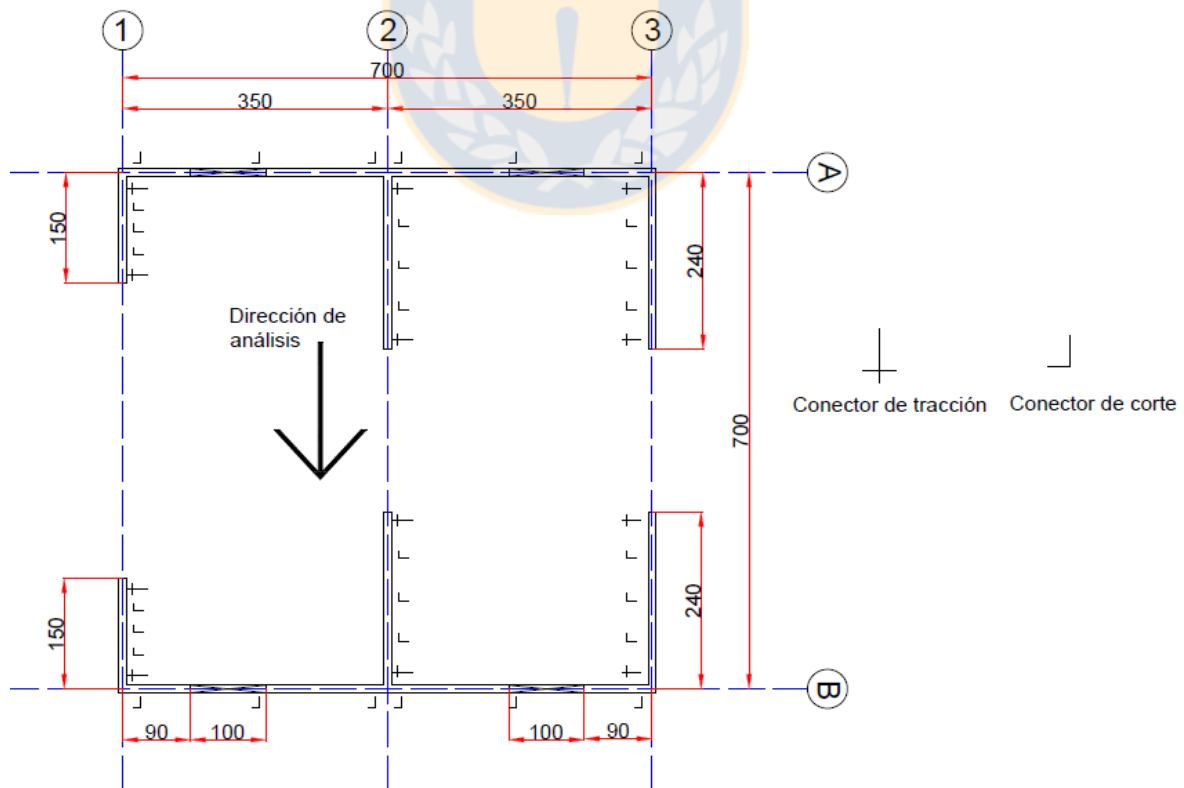


Figura 3.3 Planta de estructura modelada de un piso

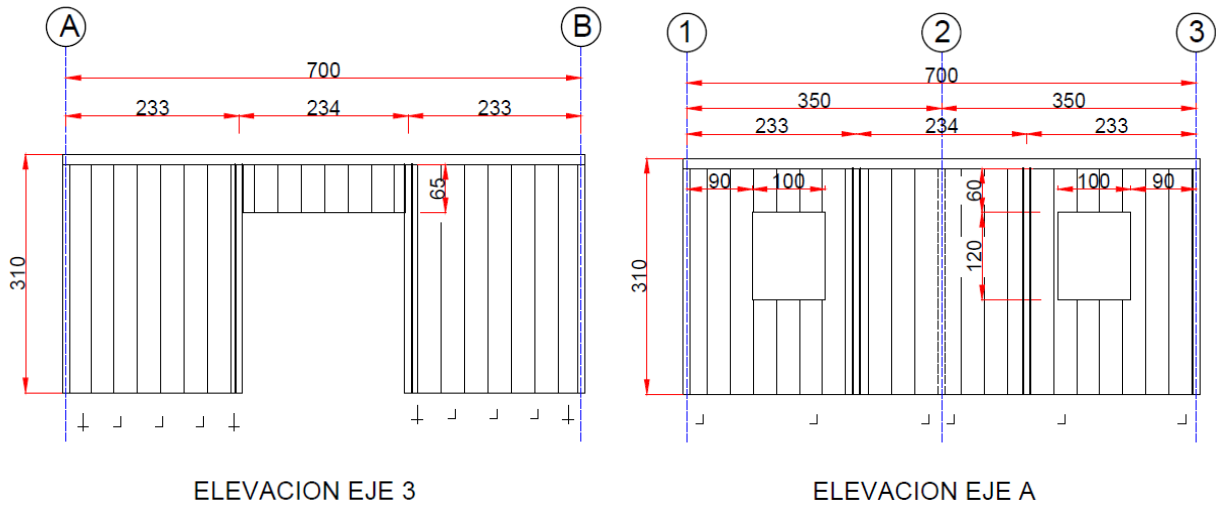


Figura 3.4 Elevaciones de estructura modelada de un piso

En el modelo estructural de un piso, se realizó un análisis donde se aplicó un patrón de desplazamientos laterales cíclicos en el techo de la estructura, la respuesta obtenida en este análisis se comparó con el resultado del ensayo pseudo-dinámico de la estructura descrita por Lauriola y Sandhaas (2006). Aunque en el ensayo real se aplicó un desplazamiento equivalente al sismo de Kobe y en el modelo se aplicó un patrón de desplazamientos cíclicos, ambas respuestas se compararon, debido a que tanto en el modelo como en el ensayo la carga se aplicó como desplazamiento a bajas velocidades. De esta manera, se pudo observar si las curvas del corte y desplazamiento lateral son similares, lo que permite corroborar si modelación va por el camino correcto. Luego, en el mismo modelo de la estructura de un piso, se realizó otro análisis donde se aplicaron los registros sísmicos de Kobe 0,5g y Kobe 0,82g. Este fue del tipo *time history* (historia en el tiempo) no lineal, el que proporciona una respuesta estructural dinámica bajo una carga que varía en el tiempo, aplicándola como un registro de aceleraciones. Se utilizó el análisis *time history* modal (definido como análisis no lineal rápido en SAP2000), el cual se recomienda para modelos que son principalmente lineales elásticos, pero con un número limitado de miembros no lineales (ideal para incorporar dispositivos disipadores o aisladores sísmicos). Este fue utilizado, debido a que no se notó una diferencia con el análisis *time-history* de integración directa. La respuesta del análisis *time history* se comparó con la respuesta del ensayo a escala real de tres pisos en mesa vibradora descrito por Ceccotti y Follesa (2006) y comentado en el Capítulo 2. Se realizó esta comparación, porque la estructura modelada cuenta con la misma carga vertical, estructuración y registro de aceleraciones aplicado que el ensayo a escala real.

Todos los análisis realizados para estructuras en esta investigación como es la aplicación de desplazamientos o registros de aceleraciones, se hicieron en el sentido paralelo a los ejes 1, 2 y 3 observados en la Figura 3.3. Esto es debido a que los ensayos en estructuras reales han sido realizados en esta dirección, porque es donde los muros presentan aberturas y así se puede analizar la posible torsión y el comportamiento más desfavorable de éstas. Antes de comenzar un análisis con cargas laterales de cualquier tipo se aplicaron las cargas de gravedad, condición muy importante para análisis no lineales.

A continuación, se modelaron estructuras de dos y tres pisos (en Anexo 3.1 se muestran los modelos de uno, dos y tres pisos con conectores convencionales) y para ambas, se mantuvo la misma planta de la estructura de un piso y se conservó la carga viva correspondiente a una estructura de tres pisos repartida en las losas del primer y segundo piso (para el modelo de tres pisos no se aplicó carga en la losa de techo). Lo anterior se realizó para poder comparar las respuestas de los modelos con el ensayo a escala real de tres pisos en mesa vibradora descrito por Ceccotti y Follesa (2006). En los modelos, se consideraron todos los conectores convencionales, añadiendo los anclajes y conectores de corte para las uniones entre las losas CLT y los muros de pisos superiores. A ambas estructuras se les aplicó una carga cíclica en forma de desplazamientos, las cuales se aplicaron al nivel del diafragma de cada piso en forma triangular invertida. También se aplicó en cada modelo un análisis *time history* con el registro de Kobe 0,82g al igual que el realizado en la estructura de un piso. Los resultados de estos análisis se compararon con la respuesta del ensayo a escala real realizado en mesa vibradora por Ceccotti para la estructura de tres pisos.

Para todos los modelos, ya sea de estructuras de uno, dos y tres pisos, se analizaron y compararon parámetros como desplazamientos, deformaciones, aceleraciones y cortes en cada piso. En la Tabla 3.4, se mencionan los análisis realizados en estructuras con conectores convencionales, mientras que los resultados de estos modelos se muestran en el Capítulo 5.

Tabla 3.4 Análisis de modelos realizados para estructuras con conectores convencionales

Tipo Estructura	Lugar aplicación de la carga	Tipo de carga	Carga vertical
-----------------	------------------------------	---------------	----------------

1 piso	Techo de la estructura	Patrón cíclico de desplazamientos	Carga vertical en losa correspondiente a 3 pisos
1 piso	Registro de aceleraciones en el suelo	Kobe 0,5 g	Carga vertical en losa correspondiente a 3 pisos
1 piso	Registro de aceleraciones en el suelo	Kobe 0,82 g	Carga vertical en losa correspondiente a 3 pisos
2 pisos	Entrepiso y techo de la estructura	Patrón cíclico de desplazamientos	Carga vertical correspondiente a 3 pisos, repartida en losas del primer y segundo piso
2 pisos	Registro de aceleraciones en el suelo	Kobe 0,82 g	Carga vertical correspondiente a 3 pisos, repartida en losas del primer y segundo piso
3 pisos	Entrepiso y techo de la estructura	Patrón cíclico de desplazamientos	Carga vertical correspondiente a 3 pisos, repartida en losas del primer y segundo piso
3 pisos	Registro de aceleraciones en el suelo	Kobe 0,82 g	Carga vertical correspondiente a 3 pisos, repartida en losas del primer y segundo piso

3.6 Conclusiones

De este capítulo se puede concluir que se lograron modelar los distintos ensayos experimentales mencionados, lo que incluye la modelación de paneles y conectores, como también la aplicación de cargas de gravedad, cargas laterales y registros sísmicos. Se logró reproducir la geometría de los distintos ensayos, utilizando las mallas de modelos finitos adecuados y se definieron los distintos parámetros necesarios para definir las histéresis de los modelos de conectores. Todos los modelos de estructuras con conectores convencionales fueron realizados para reproducir de la manera más ideal posible el comportamiento de este tipo de estructuras en la realidad y poder comparar los datos obtenidos con los de modelos de estructuras CLT con conectores disipadores de energía que se comentan más adelante.

CAPÍTULO 4 MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS CLT UTILIZANDO EL SISTEMA *BALLOON* CON CONECTORES DISIPADORES DE ENERGÍA

4.1 Introducción

Una vez desarrollados los modelos numéricos de estructuras CLT con conectores convencionales y después de haber verificado su capacidad con resultados de ensayos de publicaciones científicas, se cuenta con una poderosa herramienta para la simulación de este material, incorporando disipadores de energía. En el presente capítulo se menciona como se desarrollaron los modelos de muros y estructuras CLT utilizando el sistema tipo *balloon* con disipadores de energía sísmica. Los resultados de estos modelos se evaluarán y compararán en los capítulos siguientes con los resultados de los modelos de paneles CLT con conectores convencionales.

La principal falencia en edificios CLT con conectores convencionales es su gran rigidez, lo que genera fuerzas de corte y aceleraciones muy altas. Lo que se busca lograr con la incorporación de disipadores de energía es dar más ductilidad a la estructura y así poder disminuir los cortes y las aceleraciones por piso, aumentando la energía disipada en el sistema. En las estructuras con disipadores de energía, se trabajó con el sistema constructivo tipo *balloon* a diferencia de los edificios con conectores convencionales que utilizan el sistema plataforma. El sistema *balloon* es innovativo en estructuras de madera de mediana altura, con él se pretende disminuir los niveles de aceleraciones y con ello la demanda del corte basal. Los disipadores que se quieren implementar funcionan con el movimiento relativo que existe entre los muros, los cuales realizan un movimiento de balanceo en su base. Como se explicará más adelante, la disminución del corte basal depende fundamentalmente de la relación de aspecto de los muros (largo/alto) y para disminuirla se deben utilizar muros más altos, por lo tanto, es necesario usar el sistema tipo *balloon* que permite considerar un muro continuo en todos los pisos y de esta manera la relación de aspecto se ve disminuida al igual que el corte basal.

En primer lugar, en este capítulo se modelaron los conectores disipadores de energía. Se definió un disipador friccional que funciona como anclaje a tracción en los extremos inferiores de los muros y un disipador de fluencia que va ubicado en la unión entre paneles. Luego, se realizaron

distintos análisis en muros con disipadores de energía y se compararon sus respuestas con las de muros con conectores convencionales. Finalmente, se incorporaron los disipadores a estructuras en tres dimensiones que utilizan el sistema *balloon* y se realizaron análisis estáticos, aplicando desplazamientos cíclicos a nivel de los distintos pisos y análisis dinámicos *time history* con registros sísmicos, comprobándose la efectividad de los modelos a través de la evaluación distintos parámetros de importancia.

4.2 Modelación de disipadores de fricción y de fluencia

Como ya se ha mencionado, se pretende que los muros CLT generen un movimiento de balanceo, así se puede aprovechar el levantamiento en los extremos y los desplazamientos relativos entre paneles. Para poder disipar energía con el movimiento de pivoteo de los paneles se pensó en utilizar anclajes que disipen energía por fricción cuando el muro levanta su extremo inferior del suelo, y a su vez, disipadores de fluencia que sirvan para unir los paneles entre sí y aprovechar el movimiento relativo vertical entre sus bordes. Así un muro completo contará con varios paneles que al momento de recibir cargas laterales pivotarán y disiparán energía por el movimiento relativo entre ellos y por el levantamiento de los paneles con respecto a la fundación.

Los disipadores friccionales consisten en una placa central que va apernada al sobrecimiento de hormigón, la cual tiene un agujero ovalado que permite el desplazamiento de un perno. Éste genera la unión de la placa central con otras dos placas que van fijas al panel, por lo tanto, el agujero en la placa central permite el levantamiento del panel y genera fricción entre la placa central y las laterales. Se pueden colocar láminas de cobre, bronce u otro material entre la placa central y las dos placas laterales para generar una mayor disipación por fricción al momento del pivoteo de los paneles. El deslizamiento en los disipadores se va a generar cuando la fuerza de tracción supere el umbral de fricción estática entre las placas. Loo *et al.* (2012b) trabajaron en la modelación de muros de entramado liviano de madera con este tipo de disipadores, de su trabajo se obtuvo la forma de modelación de éstos. Uno de los problemas que se podrían presentar en los disipadores friccionales es la pérdida de la tensión en los pernos debido al *creep* que existe en la madera, este caso se considera como una línea futura de investigación.

Por otro lado, los disipadores de fluencia podrían ser simplemente barras de acero que se deforman con el movimiento relativo de los paneles, las que podrían ser reemplazadas si tienen algún daño después de un evento sísmico. Se podría ocupar otro tipo de disipador como, por ejemplo, placas metálicas en forma de “U” (*U-shaped flexural plates*), las que también disipan energía mediante la deformación del acero. Los disipadores de fluencia comenzarán a disipar energía cuando se logre la fuerza de fluencia en el material. En las Figuras 4.1 y 4.2, se muestran los dos tipos de disipadores y su ubicación en los muros, sin embargo, éstas son simples propuestas, puesto que no es la finalidad de esta investigación diseñarlos. Para poder determinar los disipadores definitivos, es necesario realizar una serie de ensayos e investigar la mejor forma de incorporar los disipadores a los paneles, lo cual se considera una línea futura de investigación.

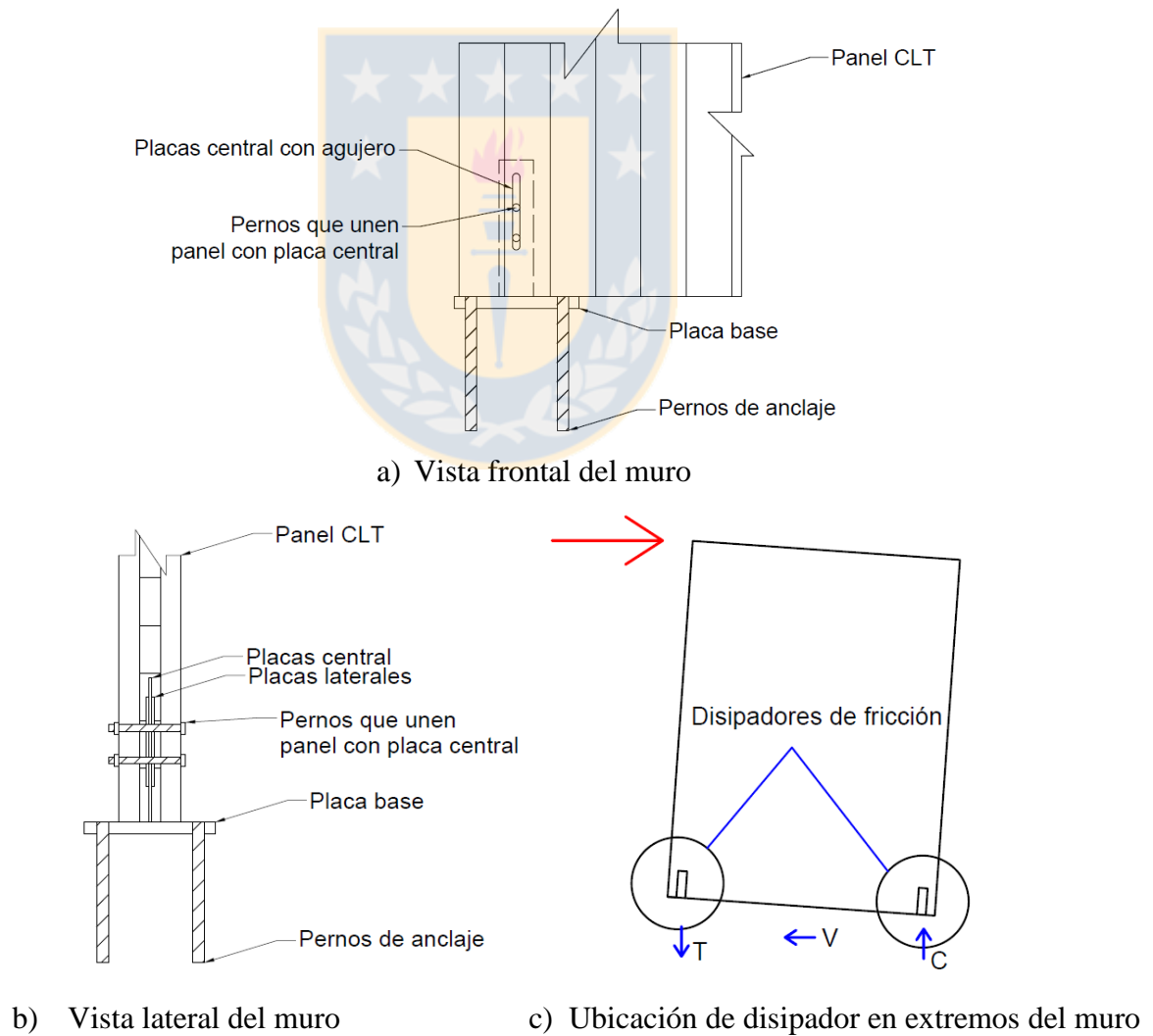


Figura 4.1 Disipador friccional en muro CLT

La modelación de los disipadores friccionales se realizó utilizando tres tipos de elementos *link*, el primero es un elemento elasto-plástico que representa el momento cuando se produce la tracción, se llega al umbral de fuerza y luego se produce el deslizamiento en el disipador. El segundo es un elemento tipo *gap* que representa el momento en que el disipador está en compresión, mientras que el tercero es un elemento tipo *hook* que considera una rigidez alta cuando el disipador llega al límite de su deslizamiento. La Figura A.4.1 del Anexo 4.1 muestra las tres curvas y el modelo final producto de la combinación de todos los *links* utilizados. Éste se aplicó al disipador en la dirección vertical donde ocurre la fuerza de tracción en el muro.

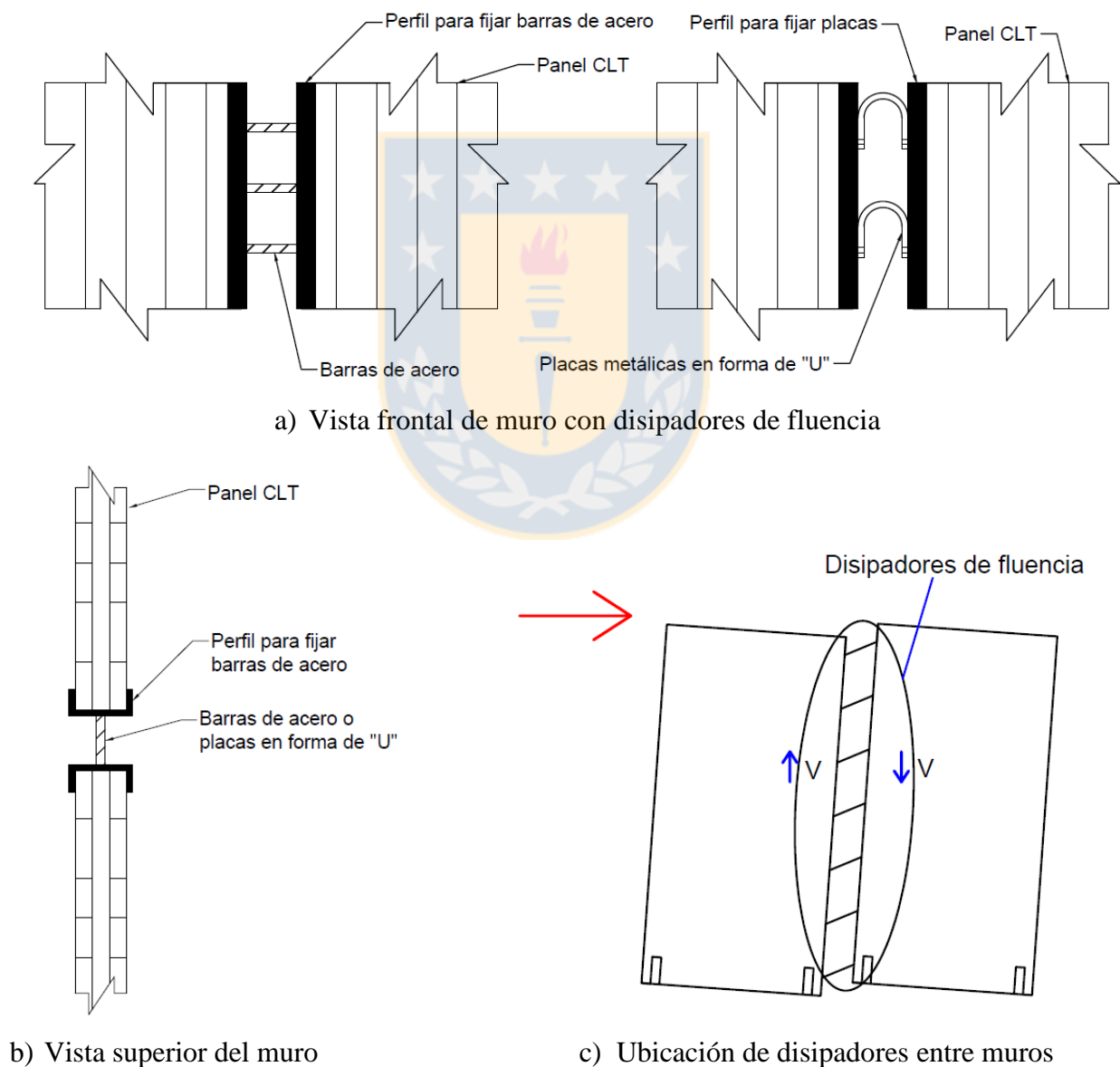


Figura 4.2 Disipador de fluencia en muros CLT

Los disipadores de fluencia se modelaron solo con elementos tipo *link* elasto-plásticos, a los cuales se les asignó la fuerza de fluencia que permite pasar a la etapa de deformación plástica. El modelo elasto-plástico se aplicó solo en la dirección en que las barras trabajan a corte y para cargas axiales se aplicó una rigidez alta que idealiza el movimiento de pivoteo en los muros.

4.3 Modelación de muros CLT con conectores disipadores de energía

En el Capítulo 3, se explicó cómo se realizó la modelación de los muros 1.1, 1.2 y 2.1 con conectores convencionales. En este punto, se tratará la modelación de los tres muros, pero ahora utilizando disipadores energía. Más adelante se explicará la configuración de tales muros y la ubicación de los disipadores, puesto que primero se analizará cómo realizar el diseño de los disipadores. Hay que mencionar que el objetivo de añadir disipadores de energía es poder limitar el corte basal a un porcentaje del peso total de un muro o de una estructura, logrando de esta manera reducir los cortes y las aceleraciones; además, la energía disipada.

Se definió F_{slip} como la fuerza necesaria para que el disipador friccional comience a deslizar, esta fuerza será la que se debe definir para alcanzar el corte objetivo. Para representar mejor el problema se hizo un equilibrio de fuerzas en un muro, donde se generó la curva del corte y desplazamiento del extremo superior del muro (Figura 4.3). Se consideraron seis puntos en la curva del muro, el punto uno es cuando recién aparece la carga lateral, el punto dos es cuando se alcanza la fuerza F_{slip} en el disipador y el muro comienza a levantar, el punto tres es cuando el muro llega a su máximo desplazamiento lateral manteniendo la carga horizontal fija debido al deslizamiento en el disipador. Entre los puntos tres y cuatro la fuerza lateral comienza a disminuir hasta cambiar de dirección y llegar a la fuerza necesaria para que el muro vuelva a su posición inicial en el punto cinco, ahora se debe llegar nuevamente a la fuerza F_{slip} en el disipador del otro extremo para que el muro comience a levantar nuevamente en el punto seis. Así se vuelve a producir el mismo efecto cada vez que aparece una fuerza horizontal en uno u otro sentido. En la Figura 4.4 se muestran diagramas de fuerza con el movimiento que ocurre en el muro en distintos puntos de la curva, con lo cual se generó un equilibrio de momentos en los puntos de pivoteo del muro, generando las ecuaciones que definen el diseño de los disipadores.

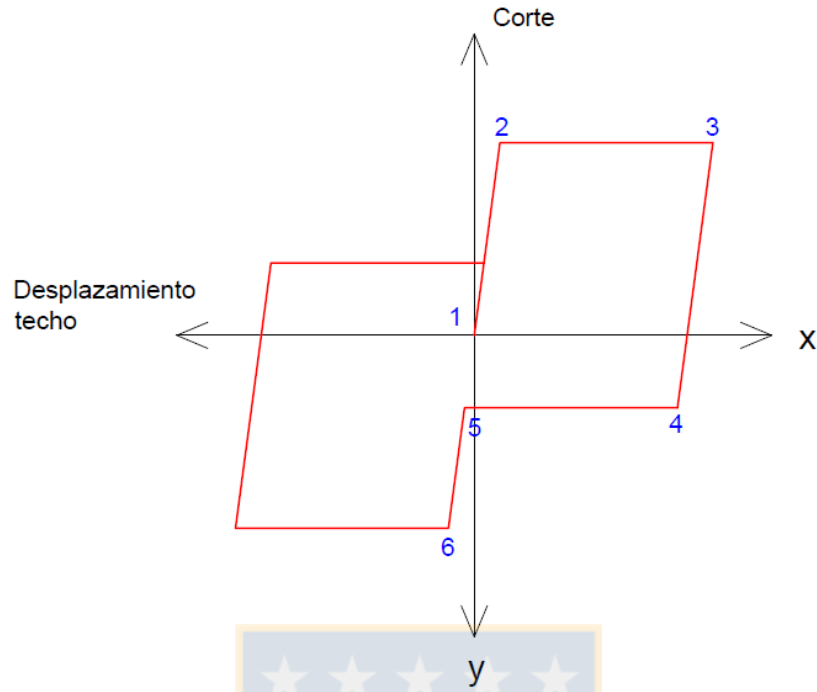


Figura 4.3 Curva corte-desplazamiento de muro

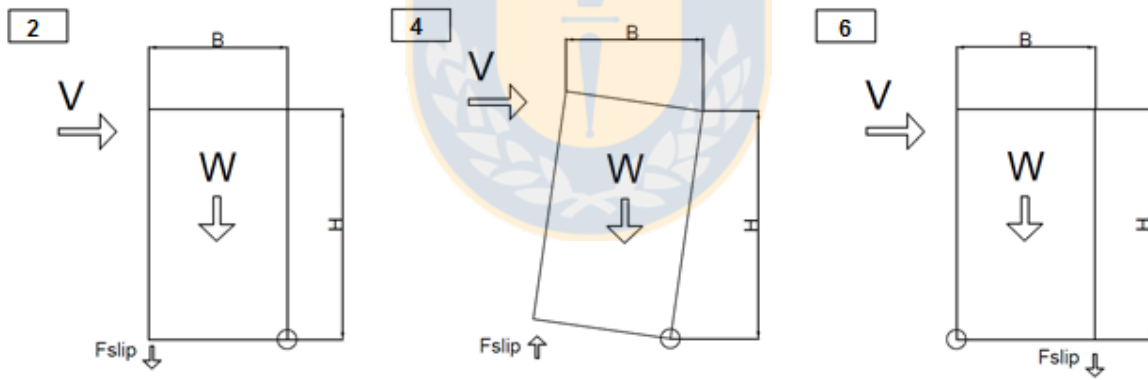


Figura 4.4 Fases de movimiento de balanceo en muro con disipadores

En el punto dos de la curva se tiene el siguiente equilibrio:

$$Fslip B + \frac{WB}{2} = VH \rightarrow Fslip = \frac{VH}{B} - \frac{W}{2} > 0, \tag{4.1}$$

$$V = Fslip \frac{B}{H} + \frac{WB}{2H}, \tag{4.2}$$

donde V es la fuerza lateral que actúa en el muro, W es el peso total del muro, H es la altura del muro y B es el largo del muro.

Se puede observar que la fuerza de corte que se desea limitar va a depender de la fuerza F_{slip} , del peso del muro, de su largo y alto.

En el punto cuatro se tiene el siguiente equilibrio:

$$F_{slip} B - V H + \frac{W B}{2} \rightarrow V = - \left(F_{slip} \frac{B}{H} - \frac{W B}{2 H} \right), \quad (4.3)$$

El corte que se obtiene de la Ecuación 4.3 corresponde a la fuerza necesaria para que el muro vuelva a su posición original luego de haber levantado.

En el punto seis se tiene el siguiente equilibrio:

$$F_{slip} B + \frac{W B}{2} = - V H \rightarrow V = - \left(F_{slip} \frac{B}{H} + \frac{W B}{2 H} \right), \quad (4.4)$$

El corte que se obtiene de la Ecuación 4.4 es la fuerza necesaria para que el muro levante ahora en el otro sentido. Esta fuerza es la misma obtenida en la Ecuación 4.2, pero con signo contrario.

Se consideraron algunas restricciones en la curva corte-desplazamiento del muro, una de ellas es que la fuerza F_{slip} sea siempre mayor que cero para que el disipador cumpla su función de disipar energía cuando el muro levante. Para esto se debe cumplir la relación que se muestra a continuación, donde V se definió como αW en que α representa el porcentaje del peso del muro al que se quiere llevar el corte.

$$V \rightarrow \alpha W, \text{ se tiene de la Ecuación 4.1 que } F_{slip} = \frac{V H}{B} - \frac{W}{2} \rightarrow F_{slip} = \frac{\alpha W H}{B} - \frac{W}{2} > 0 \rightarrow 0 < W \left(\frac{\alpha H}{B} - \frac{1}{2} \right) \\ \rightarrow \frac{B}{H} < 2\alpha, \quad (4.5)$$

Por lo tanto, la relación de aspecto del muro B/H debe ser siempre menor que 2α para que F_{slip} sea mayor que cero. Si F_{slip} es cero se llega al menor corte posible, el cual solo depende del peso del muro, en ese caso el corte mínimo sería igual a $\frac{WB}{2H}$. Además, si la fuerza F_{slip} es igual a cero, el punto dos y cuatro de la Figura 4.3 tienen el mismo valor y no se generaría disipación de energía en el muro (ver Anexo 6.1)

Otra restricción que se quiso hacer es que el corte alcanzado en el punto cuatro de la curva (Figura 4.3) siempre corte bajo el eje “x”. Esto para poder disipar más energía en el sistema, ya que mientras más se acerca el corte del punto cuatro de la curva al corte del punto dos la energía disipada disminuye. Para esto, el corte en el punto cuatro siempre debe ser menor a cero.

Se tiene de la Ecuación 4.4, $V = - \left(F_{slip} \frac{B}{H} - \frac{WB}{2H} \right) < 0 \rightarrow 0 < F_{slip} = \frac{B}{H} \cdot \frac{WB}{2H} \rightarrow F_{slip} > \frac{W}{2}$

$$\text{Como } F_{slip} = \frac{\alpha WH}{B} - \frac{W}{2} \rightarrow \frac{\alpha WH}{B} - \frac{W}{2} > \frac{W}{2} \rightarrow \frac{\alpha H}{B} > 1 \rightarrow \frac{B}{H} < \alpha, \quad (4.6)$$

De tal forma, la relación de aspecto del muro B/H debe ser siempre menor que α . Esto indica que si se quiere reducir el corte a valores bajos se necesitan muros altos para evitar tener paneles muy cortos. Con todas las ecuaciones desarrolladas se cuenta con las herramientas para poder definir los parámetros necesarios para modelar muros y estructuras con disipadores de energía.

Los primeros modelos fueron los realizados en los muros definidos en el Capítulo 3. El muro 1.1 mantuvo las mismas dimensiones y carga vertical del modelado con conectores convencionales, pero los *hold-downs* ubicados en los extremos inferiores se cambiaron por disipadores friccionales, mientras que los conectores de corte se mantuvieron. Al muro 1.1 con disipadores, se le aplicó el mismo patrón de desplazamientos cíclicos que al muro 1.1 con conectores convencionales. Para el muro 1.1 con disipadores se realizaron tres modelos donde se varió la longitud del agujero del disipador friccional, las longitudes utilizadas fueron de 2 mm, 10 mm y 30 mm. éstas fueron escogidas aleatoriamente para analizar cómo se desarrollaba el corte basal cuando aumenta el deslizamiento en el disipador. Los tres modelos fueron analizados y se compararon los cortes y la energía de deformación con respecto al modelo del muro 1.1 con conectores convencionales.

Para el muro 1.2 se siguió el mismo procedimiento, conservando las mismas dimensiones y carga vertical del muro con conectores convencionales. Los *hold-downs*, ubicados en los extremos inferiores, se cambiaron por disipadores friccionales, mientras que los conectores convencionales de corte se mantuvieron. Se aplicó el mismo patrón de desplazamientos cíclicos que en el muro con conectores convencionales. Para el muro 1.2 con disipadores, se utilizaron tres longitudes en el agujero del disipador friccional, que variaron entre los 10 mm, 20 mm y 40 mm. Éstos fueron escogidos aleatoriamente para analizar cómo se desarrollaba el corte basal cuando aumenta el deslizamiento en el disipador. Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos de los tres modelos con los obtenidos en el modelo del muro 1.2 con conectores convencionales. En la Figura 4.5, se puede ver el modelo del muro 1.2 y la ubicación de los disipadores friccionales.

Para el muro 2.1 con disipadores se aplicó el mismo patrón de desplazamientos cíclicos que se utilizó en el muro 2.1 con conectores convencionales. En el muro con disipadores se colocaron dispositivos friccionales en los extremos inferiores de ambos paneles que forman el muro y, además, se utilizaron disipadores de fluencia para unirlos en toda su altura. En este caso, como se tienen dos paneles, si se hace un diagrama de cuerpo libre para cada muro y se realiza un equilibrio de momentos en el punto de pivoteo de cada panel, se llega a la igualdad mostrada en la Figura 4.6. La fuerza F_{fr} que actúa en el lado libre del muro debe ser igual a la fuerza F_{fr} que actúa en la unión de los muros más la suma de la fuerza de fluencia F_{flu} de los disipadores que unen los paneles, debido a que ahora trabajarán todos los disipadores que se accionan cuando el muro levante por la cinemática del conjunto. En el muro 2.1 se variaron las longitudes del agujero en el disipador friccional, se utilizaron longitudes de 5 mm, 10 mm y 20 mm, valores escogidos aleatoriamente para analizar cómo se desarrolla el corte basal cuando aumentaba el deslizamiento en el disipador. Los resultados obtenidos de los tres modelos se compararon con los obtenidos en el modelo del muro 2.1 con conectores convencionales. En la Figura 4.6 se puede ver el modelo del muro 2.1 con sus disipadores correspondientes.

Cabe destacar que en los análisis con desplazamientos cíclicos para los muros 1.1, 1.2 y 2.1 no se intentó limitar el corte basal a algún valor objetivo, porque las relaciones de aspecto de los muros no permitían cortes muy bajos. Sin embargo, estos resultados se utilizaron para corroborar que el

corte se mantiene en un valor fijo al momento en que los disipadores desplazan. Los resultados obtenidos de la modelación de los muros con disipadores de energía se muestran en el Capítulo 5.

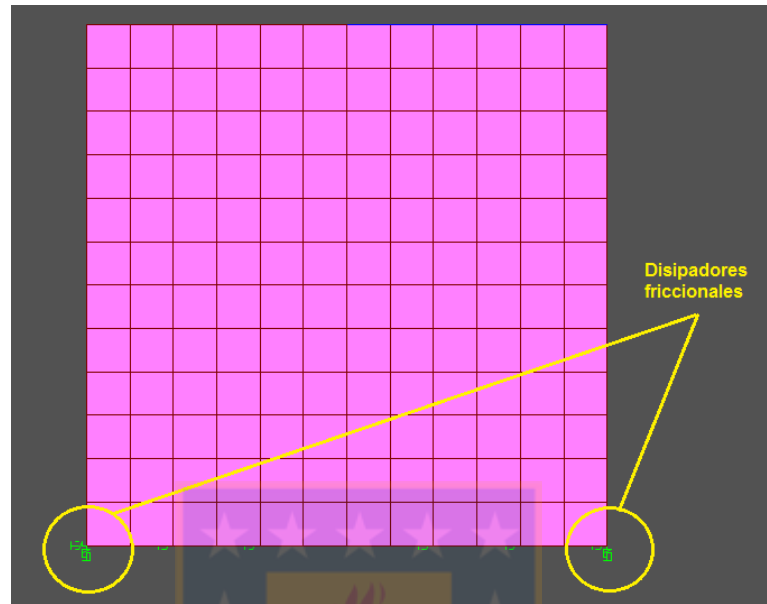


Figura 4.5 Muro 1.2 con disipadores friccionales

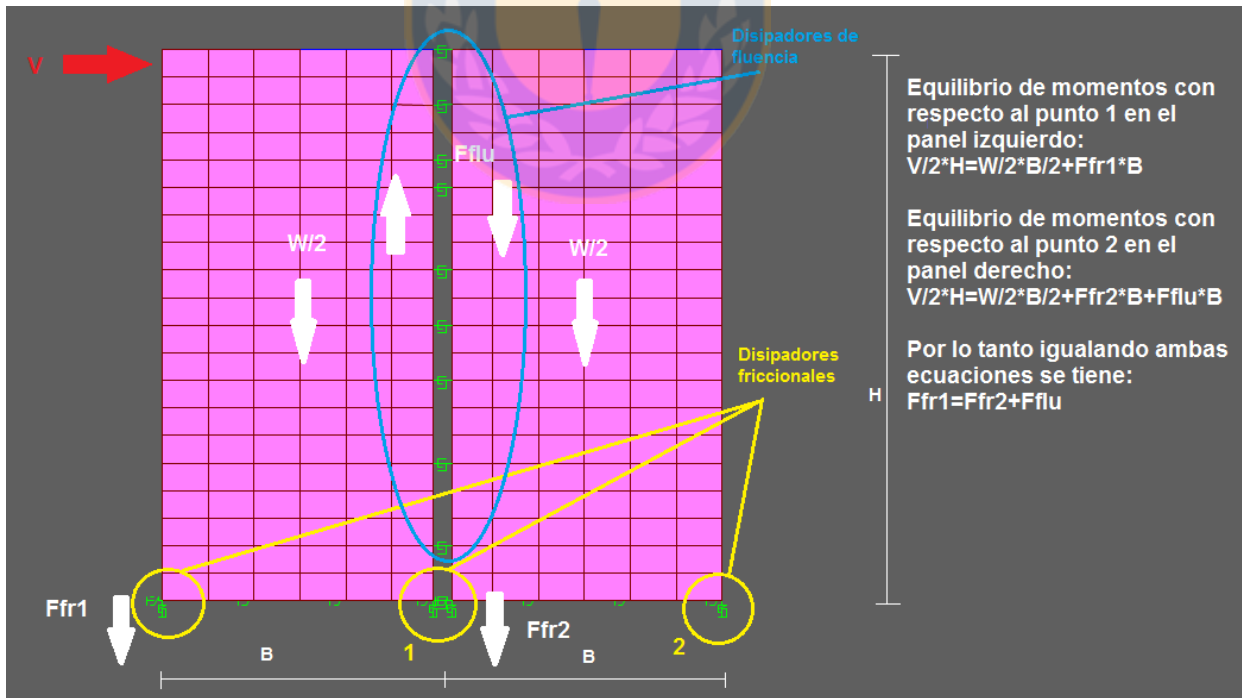


Figura 4.6 Muro 2.1 con disipadores friccionales y disipadores de fluencia

A continuación de haber realizado los análisis con desplazamientos cíclicos en los muros 1.1, 1.2 y 2.1, se modelaron dos más. El primero de ellos se llamó muro simple, el cual tiene un largo de 1,47 m y 3,1 m de alto, una carga vertical de 18,5 kN/m y cuenta con un disipador friccional en cada extremo inferior del muro, eligiendo este largo para poder reducir la relación de aspecto del panel y limitar el corte basal a un valor menor. Se utilizó la Ecuación 4.6 para encontrar el valor mínimo de α ($\alpha > \frac{B}{H} = \frac{1,47}{3,1} = 0,47$), con lo que se fijó el corte objetivo en un 50% del peso total del muro (incluye carga vertical). La Ecuación 4.1 permitió encontrar el valor de F_{slip} , el que se fijó en 16,3 kN ($F_{slip} = \frac{VH}{B} - \frac{W}{2} = \frac{\alpha WH}{B} - \frac{W}{2} = 16,3$ kN). El muro simple se consideró como un sistema de un grado de libertad, asignándole una masa de 3.000 kg para luego ser sometido al registro de Kobe 0,82g en tres modelos distintos, uno con conectores convencionales, otro con disipadores friccionales con un agujero de deslizamiento de 10 mm y otro con disipadores friccionales, pero sin un límite de deslizamiento. Finalmente, se analizaron y compararon los cortes y la energía total de deformación de los tres modelos.

Al otro muro se le llamó muro doble, el cual consta de dos muros simples unidos con disipadores de fluencia, la carga vertical se mantuvo en 18 kN/m. Al tener los paneles la misma dimensión que el muro simple, el corte basal se pudo reducir también a un 50% del peso total (incluye carga vertical). La fuerza F_{slip} fue la misma que para el muro simple, pero ahora esta fuerza debe ser igual a la suma de la fuerza de deslizamiento del disipador friccional y la fuerza de fluencia de los disipadores que unen los paneles (como indican las ecuaciones de la Figura 4.6). Al muro doble también se le aplicó el registro de Kobe 0,82g en tres modelos distintos (masa de 6.000 kg), uno con conectores convencionales, otro con disipadores friccionales con un agujero de deslizamiento de 10 mm y otro con disipadores, pero sin límite de deslizamiento. Se analizaron y compararon los cortes y la energía total de deformación de los tres modelos. Los resultados de los modelos para el muro simple y para el muro doble se muestran en el Capítulo 5. En la Tabla 4.1 se muestran todos los ensayos realizados en muros con disipadores de energía.

Tabla 4.1 Modelos realizados para muros con disipadores de energía

Muro	Lugar aplicación de	Tipo de carga	Carga vertical	Longitud de agujero disipador	Corte objetivo
------	---------------------	---------------	----------------	-------------------------------	----------------

	la carga			friccional	
1.1	Tope del muro	Patrón cíclico de desplazamientos	18 kN/m	2 mm, 10 mm y 30 mm	-
1.2	Tope del muro	Patrón cíclico de desplazamientos	18 kN/m	10 mm, 20 mm y 40 mm	-
2.1	Tope del muro	Patrón cíclico de desplazamientos	18 kN/m	5 mm, 10 mm y 20 mm	-
Simple	Registro de aceleraciones	Kobe 0,82 g	18 kN/m	10 mm y libre	50% del peso total
Doble	Registro de aceleraciones	Kobe 0,82 g	18 kN/m	10 mm y libre	50% del peso total

4.4 Modelación de estructuras CLT utilizando el sistema *balloon* con disipadores de energía

Después de realizar modelos de muros con disipadores de energía, se continuó modelando estructuras con disipadores que utilizan el sistema *balloon*. Se analizaron edificios de uno hasta siete pisos, manteniéndose la misma planta para todas las estructuras. En la Figura 4.7, se muestran las elevaciones, la planta y la ubicación de los disipadores de energía en la estructura de dos pisos. Para los modelos de más pisos, replicando los niveles sin sufrir modificaciones. Todos los edificios modelados con disipadores tienen las mismas dimensiones y cargas verticales que los modelados con conectores convencionales (presentados en Capítulo 3). Para todas las estructuras se utilizó el sistema *balloon* en donde los muros son continuos desde el suelo hasta el techo, optándose por este sistema constructivo, debido a que la limitación del corte basal depende de la relación de aspecto de los paneles, la que al disminuir reducirá en mayor medida el corte basal. Los muros tienen 85 mm de espesor y las losas 142 mm en todos los pisos.

Uno de los problemas que se encontró en la modelación de las estructuras CLT con disipadores fue como apoyar la losa, porque al dejarla fija en todo su contorno, los muros no pivotaron como se esperaba debido a que la losa rigidizó mucho la estructura, por ende, los cortes basales aumentaron, alejándose del valor de diseño. Una solución que se propuso fue apoyar la losa en un

segmento central de cada panel y colocar deslizadores que permitan que ésta pueda levantar cuando los muros pivoteen en su base. la idea es no apoyar la losa en el panel completo, sino solo en un segmento de éste para que el levantamiento de la losa sea menor. De esta forma, se tiene un apoyo en cada segmento y dada la rigidez de la losa, ésta no tendrá mayores deformaciones. Otra solución es unir una viga a cada panel con tornillos autoperforantes instalados diagonalmente a efecto de obtener un apoyo rígido y así poder apoyar la losa sobre las vigas. La unión entre losa y viga debe permitir el libre movimiento vertical, evitando rigidizar la estructura y admitiendo el pivoteo en los paneles. Las respectivas propuestas para el apoyo de las losas se muestran en el Anexo 4.2. Para mantener la continuidad de los muros en altura, se pueden utilizar paneles completos o también unir segmentos con conectores rígidos que impidan la deformación en las uniones de los paneles. En los modelos las losas se apoyaron en los paneles utilizando conexiones rígidas en la dirección horizontal. En la dirección vertical, se colocó un elemento tipo *gap*, permitiendo esto el apoyo de la losa, pero a la vez posibilitando su levantamiento. Se asignaron diafragmas rígidos a todas las losas.

Para los modelos de estructuras, desde uno a siete pisos, los disipadores friccionales se ubicaron solo en el primer piso de los paneles extremos y no en los centrales, mientras que los disipadores de fluencia se colocaron en la unión entre cada panel como se muestra en la Figura 4.7. Los paneles son continuos en toda la altura como indica el sistema *balloon*, los conectores de corte que unen los paneles con la base son rígidos para simplificar el modelo y permitir que los muros balanceen sin producir desplazamientos horizontales en los apoyos. En la unión de los paneles de los extremos con los muros perpendiculares de los ejes A y B, se colocaron tres disipadores de fluencia por piso, debido a que se cuenta con disipadores friccionales en ambos ejes. Por otro lado, en la unión entre los paneles intermedios, se colocaron cinco disipadores de fluencia por piso. Para las estructuras de más de un piso se siguió un procedimiento similar al utilizado para definir las Ecuaciones 4.1 a 4.6, pero vale señalar que en este caso la carga horizontal actúa en cada diafragma de piso. Se consideró que el porcentaje del corte que actúa en cada piso como carga externa es igual al porcentaje del peso de tal piso con respecto al peso total de la estructura. Otra opción en este caso hubiera sido aplicar el corte en forma triangular, pero los valores alcanzados para el corte objetivo variaban muy poco.

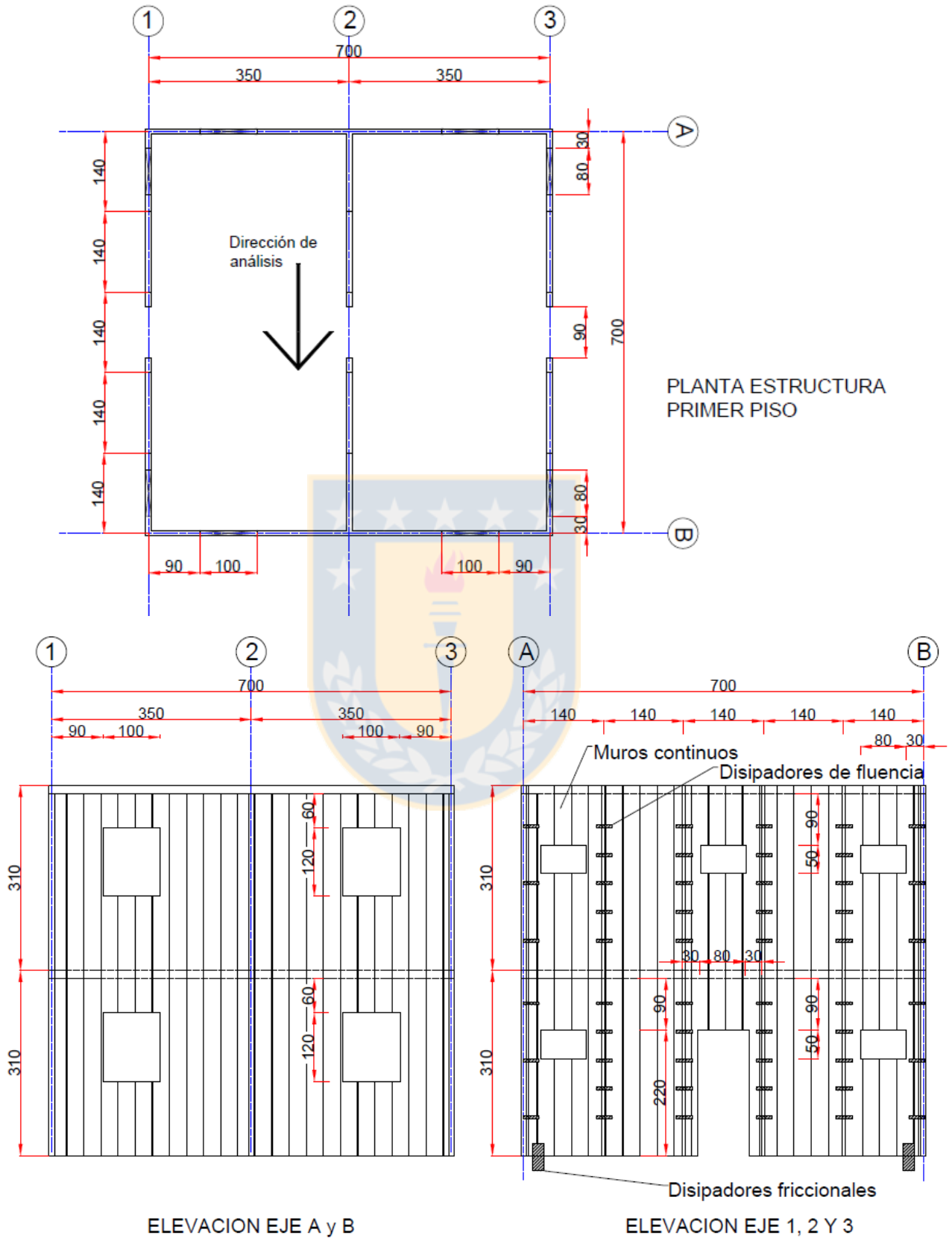


Figura 4.7 Planta y elevaciones de estructura de dos pisos con disipadores

A continuación, como ejemplo se describe el procedimiento para encontrar las fuerzas de diseño de los disipadores de la estructura de tres pisos. Se siguió en mismo procedimiento para todas las estructuras con disipadores.

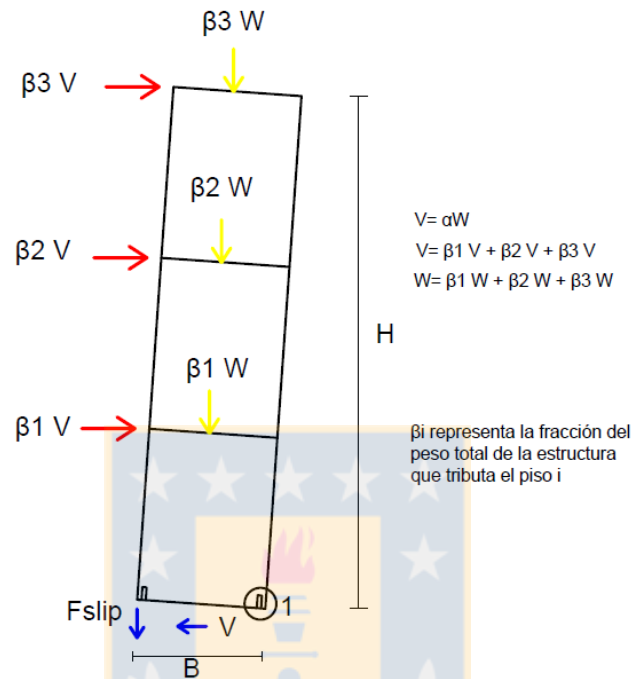


Figura 4.8 Equilibrio de fuerzas en muro de tres pisos con disipador de energía

En la estructura de 3 pisos el peso se distribuye en un 42%, 42% y 16% desde el primer al tercer piso. Si se realiza un equilibrio de momentos con respecto al punto uno de la Figura 4.8, se tiene:

$$F_{slip} B + \frac{WB}{2} = \frac{\beta_1 V H}{3} + \frac{\beta_2 V 2H}{3} + \frac{\beta_3 V 3H}{3} = \frac{0,42V H}{3} + \frac{0,42V 2H}{3} + \frac{0,16V 3H}{3} \rightarrow F_{slip} = \frac{0,58V H}{B} - \frac{W}{2} > 0, \quad (4.7)$$

$$V = \frac{F_{slip} B + \frac{WB}{2}}{0,58H}, \quad (4.8)$$

donde V es el corte basal que actúa en el muro, W es el peso total que tributa sobre el muro, H es la altura del muro y B es el largo del muro.

Al igual que en el análisis realizado al muro de un piso, se quiso lograr que el corte en el punto cuatro de la curva de la Figura 4.3 siempre fuera menor que cero. Por lo tanto, se tiene:

$$\begin{aligned}
 V = -\frac{F_{slip}B \cdot \frac{WB}{2}}{0,58H} < 0 \rightarrow 0 < \frac{F_{slip}B \cdot \frac{WB}{2}}{0,58H} \rightarrow F_{slip} > \frac{W}{2}, \text{ como } F_{slip} = \frac{0,58V H}{B} - \frac{W}{2} \\
 \rightarrow \frac{0,58\alpha WH}{B} - \frac{W}{2} > \frac{W}{2} \rightarrow \frac{0,58\alpha H}{B} > 1 \rightarrow \alpha > 1,72 \frac{B}{H} = \frac{1,72 \cdot 1,4}{9,3} = 0,25,
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

En consecuencia, para la estructura de tres pisos el corte objetivo será el 25% del peso total de la estructura, el cual corresponde a $0,25 \cdot 507 \text{ kN} = 126,75 \text{ kN}$.

Se debe señalar que para encontrar la fuerza F_{slip} en cada panel, se calculó la carga vertical que tributa en cada segmento. Por ejemplo, para el muro del eje 2 la carga vertical que tributa es de un 50% del peso total de la estructura, al ser cinco paneles en cada uno tributa un 10% del peso total, por lo tanto, W en cada uno será $0,1 \cdot 507 \text{ kN} = 50,7 \text{ kN}$. Utilizando la Ecuación 4.7 se tiene:

$$F_{slip} = \frac{0,58V H}{B} - \frac{W}{2} = \frac{0,58\alpha WH}{B} - \frac{W}{2} = \frac{0,58 \cdot 0,25 \cdot 50,7 \cdot 9,3}{1,4} - \frac{50,7}{2} \approx 23,5 \text{ kN}$$

Por consiguiente, para los paneles del eje 2, F_{slip} que incluye la fuerza de deslizamiento en los disipadores friccionales más la fuerza de fluencia en los disipadores de fluencia es igual a 23,5 kN. Como se ha señalado anteriormente, los paneles de los extremos tienen 3 disipadores de fluencia por piso más el disipador friccional, y los muros intermedios tienen cinco disipadores de fluencia por piso, por lo tanto, siguiendo el procedimiento utilizado para llegar a la igualdad representada en la Figura 4.6 se tiene:

$$F_{slip} = F_{fr} + 3 \cdot (3 F_{flu}) = 3 \cdot (5 F_{flu}) = 23,5 \rightarrow F_{flu} = \frac{23,5}{15} = 1,57 \text{ kN} \rightarrow F_{fr} = 6 F_{flu} = 9,4 \text{ kN}, \tag{4.10}$$

donde F_r es la fuerza de deslizamiento en el disipador friccional y F_{flu} la fuerza de fluencia en el disipador de fluencia.

De esta manera, se obtienen las fuerzas de diseño de los disipadores para incorporarlas a los modelos. El procedimiento descrito para la estructura de tres pisos, se utilizó para todos los modelos con disipadores de energía. Se definió un corte objetivo que depende de la geometría de los paneles para todas las estructuras. Como se trabaja con el sistema *balloon*, los muros

aumentan su altura al ir incrementando los pisos de los edificios, por lo cual los cortes objetivos van disminuyendo. Si se hubiera seguido utilizando el sistema plataforma como en las construcciones típicas en CLT, los cortes no podrían haber disminuido como se hizo con el nuevo sistema. Así también se logra incursionar en estructuras de mediana altura en madera con el sistema *balloon*.

A los modelos de estructuras que utilizan el sistema *balloon* de uno, dos y tres pisos con disipadores de energía se les aplicó un patrón de desplazamientos cíclico en cada diafragma o piso, evaluando el corte alcanzado en cada modelo, siendo verificado con el corte objetivo.

Luego, a los modelos de las estructuras de uno, dos y tres pisos con disipadores, se les aplicó el registro de Kobe 0,82g. Para cada modelo se hicieron dos análisis, uno en donde no se limitó el deslizamiento de los disipadores friccionales y otro en donde sí se limitó. Esto para poder evaluar como aumenta el corte cuando los disipadores llegan al tope de deslizamiento y la estructura se rigidiza. La longitud de deslizamiento de los disipadores para el modelo de un piso fue de 10 mm, mientras que para los modelos de dos y tres pisos fueron de 20 mm. Se evaluaron parámetros como aceleraciones y desplazamientos en cada modelo. Se utilizó el registro de Kobe 0,82g, debido a que en las estructuras modeladas con conectores convencionales (comentadas en Capítulo 3) y en los ensayos a escala real de estructuras CLT se utilizó el mismo registro. Así se puede hacer una comparación de los resultados en base al mismo registro sísmico. Realizando el mismo procedimiento descrito en las Ecuaciones 4.7 a 4.10, se llegó a cortes objetivos de 45%, 30% y 25% del peso total de las estructuras de uno, dos y tres pisos respectivamente (incluye carga viva). Los cortes obtenidos dependen de la geometría de los paneles, porque al ser éstos continuos en toda la altura del edificio, el corte necesario para alcanzar el mismo momento volcante disminuye a medida que aumenta la altura del panel, haciendo que la fuerza horizontal o corte objetivo sea menor para edificios más altos.

En los modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores hasta ahora introducidos, se utilizó el registro del sismo de Kobe, debido a que los resultados obtenidos de éstos debieron ser comparados con los resultados obtenidos en los modelos de estructuras con conectores convencionales a efecto de evaluar ambos desempeños. Para evaluar el

comportamiento en el escenario local de las estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía se realizaron adicionalmente análisis con una serie de registros chilenos (ver Tabla 3.3 para revisar características de los registros). Primero, para los modelos de uno, dos y tres pisos con disipadores de energía, se aplicó el registro de Concepción del terremoto del 2010. Para los tres modelos se mantuvo el corte objetivo utilizado en los análisis anteriores realizados con el registro de Kobe 0,82g. Debido a que los *drift* logrados fueron muy bajos y los disipadores no trabajaron lo suficiente, se disminuyó la fuerza F_{slip} para lograr mayores desplazamientos, lo que implicó disminuir también el corte objetivo. Al modelo de la estructura de tres pisos con disipadores, se le aplicaron tres registros más de la región del Maule del terremoto del 2010 (ver Tabla 3.3). En estos análisis, se varió el corte objetivo en un 25%, 19% y 16% del peso total de la estructura, comparando las curvas de corte-desplazamiento y la energía total de deformación para los distintos modelos.

En el Anexo 6.6, se muestran distintos análisis en la estructura de tres pisos con disipadores de energía donde se variaron algunos parámetros como la carga vertical y la fuerza F_{slip} . Esto para ver los cambios que se producen en el corte basal, el cual depende de varios factores como se ha mostrado en las ecuaciones antes desarrolladas. Los resultados corroboraron los valores obtenidos con las fórmulas, lo que indica que la modelación funciona de buena manera. Para el registro Maule 2, se amplificaron las aceleraciones en 1,5 y 2 veces para evaluar la respuesta de la estructura de tres pisos con disipadores y observar como varía el corte objetivo ante aceleraciones extremas, mostrando los resultados de estos análisis en el Anexo 6.6.

Finalmente, se aumentó la cantidad de pisos en los modelos de estructuras con disipadores a cuatro, cinco y siete niveles, a los que se les aplicó una carga vertical por piso de $2,5 \text{ kN/m}^2$ a efecto de simular una sobrecarga (excepto en la losa del techo). Puesto que con el sistema *balloon* la relación de aspecto de los muros disminuyó aún más, el corte objetivo se llevó a un 20%, 20% y 15% del peso total de las estructuras de cuatro, cinco y siete pisos respectivamente. Estos cortes se obtuvieron de la misma manera que la mostrada para la estructura de tres pisos con las Ecuaciones 4.7 a 4.10. En cada modelo, se realizó un análisis *time history* con los registros de Kobe, Concepción y Maule 2, donde se compararon las respuestas en cuanto a los corte obtenidos, los desplazamientos, las aceleraciones y la energía total de deformación.

En la estructura de siete pisos, la respuesta ideal que se quería obtener no se logró, el corte objetivo no fue el esperado y la curva corte-desplazamiento no se acercó a la forma deseada que muestra la Figura 4.3. Posiblemente esto se debe a que la rigidez de los muros disminuyó mucho, debido a la altura de los paneles (periodo fundamental de 1,5 s), por lo tanto, ahora otros modos de vibración tienen un factor de participación mayor en la dinámica de la estructura. Por otro lado, la hipótesis de movimiento rígido en los paneles que se había propuesto empieza a perderse, dada la deformación de estos. Debido al efecto observado, se modeló otro edificio de siete pisos, aumentando el largo B de los muros, lo que hizo incrementar la rigidez de la estructura. De esta manera, se logró que los muros pivotaran como cuerpos rígidos nuevamente. En el nuevo modelo, se utilizaron tres paneles por eje y no cinco como en los otros modelos, éstos son de 2,3 m de largo y de la altura total del edificio, lo que implica realizar una unión rígida a efecto de otorgar continuidad a la estructura y asegurar el movimiento de cuerpo rígido de los paneles. El corte objetivo se mantuvo en un 15% del peso total de la estructura y se aplicaron los registros de Kobe, Concepción y Maule 2. Aumentando el largo B de los muros, se logró reducir el corte basal a lo esperado y se pudieron comparar los distintos parámetros de importancia en cada análisis. Los resultados de los modelos realizados en las estructuras CLT desde uno a siete pisos que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía se muestran en el Capítulo 6. En el Anexo 4.1, se presentan algunos de los modelos realizados en estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon*, mientras que en la Tabla A.4.1 se muestran las características de todos los modelos realizados en tales estructuras.

4.5 Conclusiones

De este capítulo, se puede concluir que se lograron modelar las distintas configuraciones de muros y estructuras de distinta cantidad de pisos, incluyendo la modelación de paneles, disipadores friccionales y disipadores de fluencia. Se lograron aplicar distintos tipos de cargas de gravedad, cargas laterales y registros sísmicos. Se logró replicar de buena manera la geometría de las estructuras en los modelos, como también los distintos tipos de uniones y apoyos de las losas. Los resultados de los modelos con disipadores sirvieron para comparar su respuesta con aquellos con conectores convencionales y así poder analizar las ventajas del sistema propuesto.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS DE MODELOS DE ESTRUCTURAS CLT CON CONECTORES CONVENCIONALES

5.1 Introducción

En el Capítulo 3, se mostró el procedimiento para realizar los modelos con conectores convencionales, mientras que en este capítulo se visualizaron los resultados de aquellos, a nivel de conectores, muros o estructuras completas. Los resultados obtenidos se compararon con datos de otros investigadores para corroborar la aproximación de los modelos. Sin embargo, los modelos de estructuras CLT con conectores convencionales ante registros sísmicos, no se compararon con ensayos experimentales, debido a que no existen registros de los datos. Estos análisis se realizaron para comparar sus resultados con los de estructuras CLT con disipadores que utilizan el sistema *balloon*. En la siguiente tabla, se resumen las masas y periodos fundamentales obtenidos en los modelos de muros y estructuras de CLT con conectores convencionales realizados en esta investigación.

Tabla 5.1 Masas y periodos fundamentales en modelos con conectores convencionales

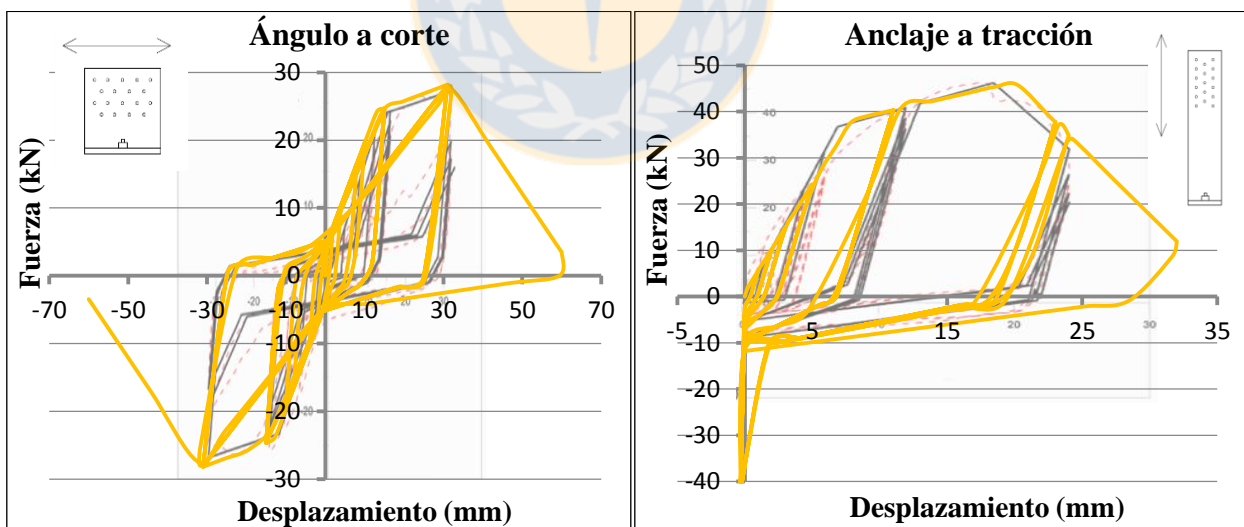
Modelo	Masa (kg)	Periodo fundamental, dirección de análisis (s)
Muro 1.1	6.010	0,32
Muro 1.2	6.010	0,25
Muro 2.1	5.920	0,26
Estructura 1 piso	49.480	0,36
Estructura 2 pisos	45.500	0,47
Estructura 3 pisos	49.170	0,56

5.2 Modelos de conectores convencionales

Como se explicó en el subcapítulo 3.2 de la presente investigación, se realizaron modelos para representar el comportamiento de los conectores convencionales, los resultados obtenidos de éstos se muestran a continuación y se comparan con las curvas de los ensayos reales utilizados

como base para las modelaciones (ver Tabla 3.1). En la Figura 5.1 a) se muestra la curva fuerza-desplazamiento ante cargas de corte del ángulo metálico que sirve para unir los paneles a la fundación, al que se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclicos a tracción y a corte. La Figura 5.1 b) muestra la curva fuerza-desplazamiento ante cargas de tracción del *hold-down* que une los extremos de los paneles a la fundación, al que se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclicos a tracción y a corte. En el Anexo 5.1, se muestran las curvas de fuerza-desplazamiento del ángulo metálico ante fuerzas de tracción, del *hold-down* ante cargas de corte y de la unión tipo *half-lap* para cargas de extracción lateral y extracción directa.

Como se señaló en el Capítulo 3, los modelos intentan reproducir los ensayos mostrados por Rinaldin *et al.* (2013) para los tres tipos de conectores. En la Figura 5.1, se puede ver de fondo una curva de color negro que indica el ensayo experimental mostrado por Rinaldin *et al.* (2013), la que se compara con la obtenida en los modelos realizados en esta investigación y que se muestra en color naranja. Las histéresis de los conectores de corte y anclajes metálicos para las uniones entre losas y muros CLT también fueron reproducidas e incluidas en los modelos de estructuras con conectores convencionales, estas curvas se muestran en el Anexo 5.1.



a) Ángulo metálico ante fuerzas de corte

b) Anclaje metálico ante fuerzas de tracción

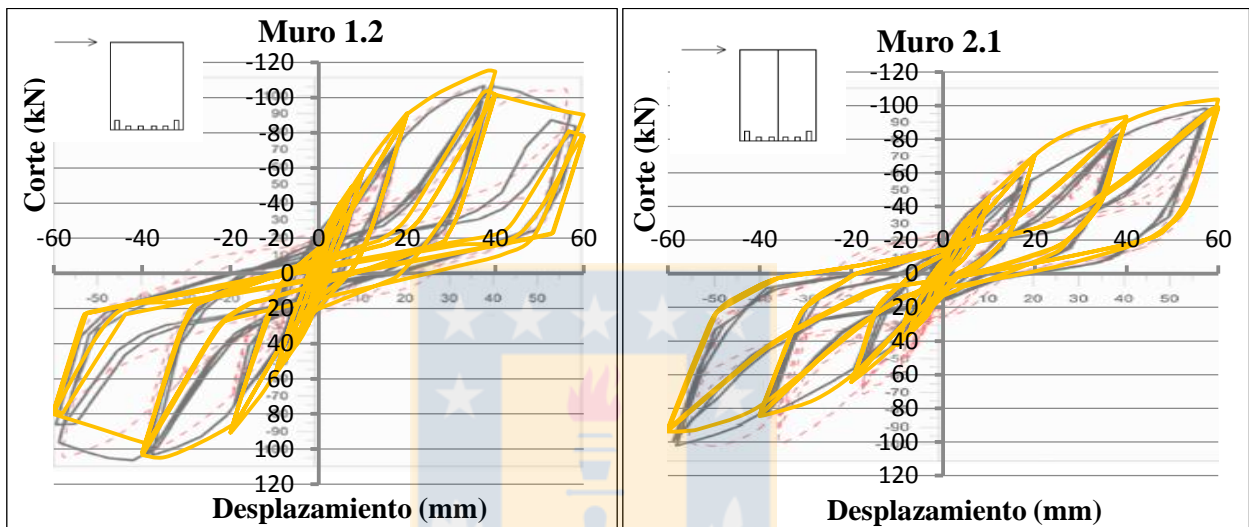
Figura 5.1 Curvas fuerza-deformación en *hold-down* y ángulo metálico de corte

Luego de calibrar los modelos y comparar las curvas en la Figura 5.1, se puede observar que en general los modelos se acercan bastante a los utilizados como referencia, puesto que las rigideces de carga y descarga no son idénticas, pero sí muy similares. Esto hace que las curvas sean parecidas y la que disipación de energía se asemeje entre los ensayos reales y la modelación. Algunas diferencias en los resultados podrían generarse debido a que el *software* y modelo utilizados no son los mismos que en el trabajo de Rinaldin, además, el patrón de cargas tampoco es idéntico, sin embargo, con la calibración de los parámetros las histéresis logran asemejarse bastante bien.

5.3 Modelos de muros CLT con conectores convencionales

En el subcapítulo 3.4, se mostró como se modelaron tres muros de CLT con conectores convencionales, a los que se les llamó muro 1.1, 1.2 y 2.1, cada uno de éstos con distinta cantidad y tipos de conectores, pero con la misma carga vertical. A todos los muros se les realizó un análisis donde se aplicó un patrón de desplazamientos cíclicos en el nivel superior de los paneles, simulando los ensayos mostrados por Rinaldin *et al.* (2013) (ver Tabla 3.2). En la Figura 5.2 a) se puede ver el gráfico que representa el corte basal en el muro 1.2 y el desplazamiento en el nivel superior del mismo, de fondo se observa una curva de color negro que indica el ensayo experimental mostrado por Rinaldin *et al.* (2013), mientras que con línea naranja se muestra la curva del modelos realizados en este trabajo. La Figura 5.2 b) representa lo mismo que la Figura 5.2 a), pero para el muro 2.1. A continuación, en la Figura 5.3 a) y b) se ven dos gráficos que muestran la energía total de deformación y la suma del desplazamiento lateral alcanzado en el extremo superior del muro durante los análisis con desplazamientos cíclicos para los muros 1.2 y 2.1 respectivamente. Al igual que en la Figura 5.2, se ve la curva negra que representan el ensayo realizado por Rinaldin *et al.* (2013) y la curva naranja que muestra el resultado del modelo realizado en este trabajo. La curva corte-desplazamiento del muro 1.1 se puede ver en el Anexo 5.2, mientras que el gráfico que muestra la energía de deformación no se incluyó, porque no se tenían datos del ensayo real.

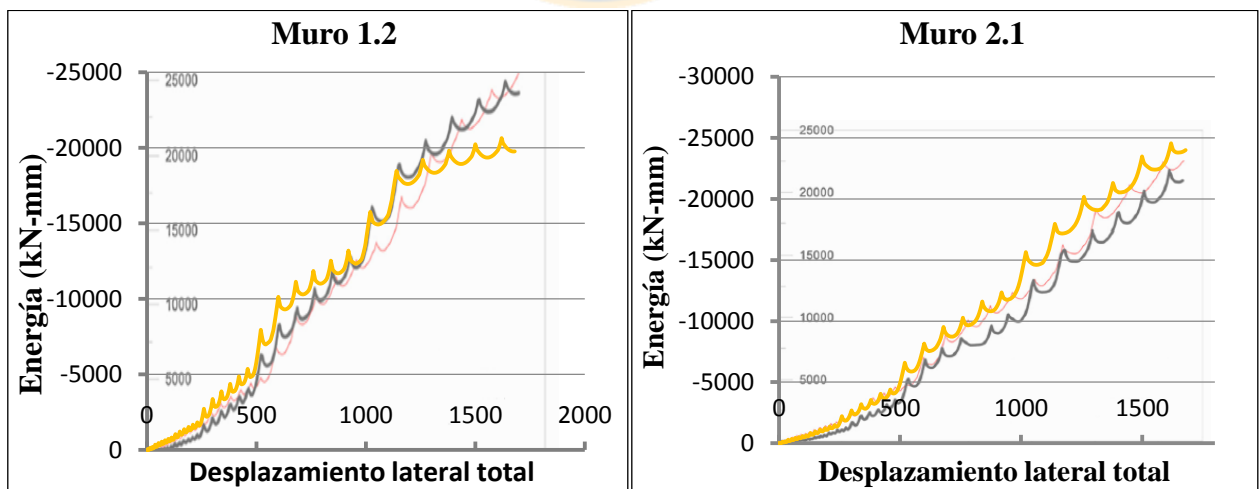
En general, se puede ver una buena aproximación en los modelos, debido a que las formas de las histéresis en la Figura 5.2 y la energía de deformación (deformación elástica más deformación plástica) observada en la Figura 5.3 se acercan bastante a las registradas en los ensayos mostrados por Rinaldin *et al.* (2013). De este comportamiento se puede indicar que tanto los conectores como los paneles CLT están bien aproximados y que pueden ser utilizados para realizar modelos de estructuras de uno o más pisos.



a) Muro 1.2

b) Muro 2.1

Figura 5.2 Curva corte-desplazamiento en muros con conectores convencionales



a) Muro 1.2

b) Muro 2.1

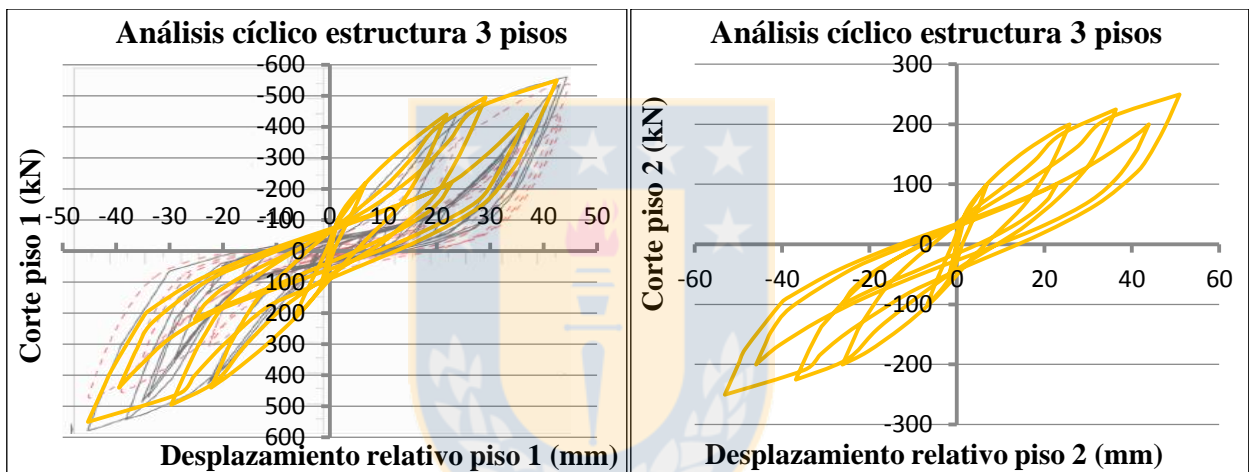
Figura 5.3 Curva Energía-desplazamiento lateral total en muros con conectores convencionales

5.4 Modelos de estructuras CLT con conectores convencionales

Luego de haber realizado distintos análisis en muros con conectores convencionales, se modelaron tres estructuras con paneles CLT de uno, dos y tres pisos, utilizando los mismos conectores. En el subcapítulo 3.5, se mostró como se realizaron las modelaciones para estas estructuras y los análisis realizados en cada una de ellas (ver Tabla 3.4). Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran las dimensiones en planta y elevación de las estructuras utilizadas para todos los modelos.

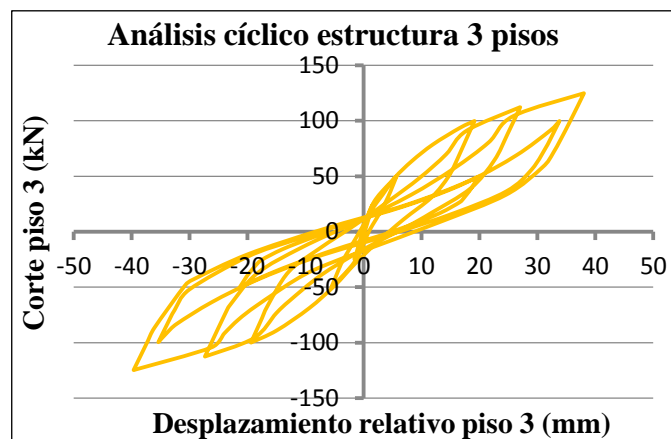
En primer lugar, se muestran los resultados de los análisis que se realizaron con cargas estáticas cíclicas en las estructuras de uno, dos y tres pisos. En la Figura A.5.6 del Anexo 5.3, se muestra en línea naranja la curva que indica el corte basal y el desplazamiento en el techo del modelo de la estructura de un piso para el análisis cíclico y de fondo en color negro se puede ver la curva del ensayo descrito por Lauriola y Sandhaas (2006) en la misma estructura que fue modelada. En el ensayo a escala real comentado por Lauriola y Sandhaas (2006), se aplicó una carga pseudo-dinámica que reproduce el sismo de Kobe 0,5g aplicado en forma de desplazamientos a baja velocidad, al ensayo se le aplicó una carga vertical correspondiente a una estructura de tres pisos al igual que al modelo. Se compararon las curvas y se observó una histéresis similar en su forma, manteniendo las rigideces de carga y descarga. En el modelo de un piso ante cargas estáticas cíclicas, se llegó a un *drift* de 1,3%, los conectores de corte que unen los paneles a la fundación tuvieron una deformación lateral de 31 mm y los *hold-downs* una deformación vertical máxima de 18 mm. Para los modelos de las estructuras de dos y tres pisos también se aplicaron cargas estáticas cíclicas en forma de desplazamientos, como se comentó en el subcapítulo 3.5 ambos modelos tienen la carga vertical correspondiente a un edificio de tres pisos, mientras que los desplazamientos se aplicaron a nivel de los diafragmas en todos los pisos. Para los análisis de los modelos de uno, dos y tres pisos con cargas estáticas cíclicas, se utilizó un patrón en donde se fue aumentando el desplazamiento lateral en cada ciclo hasta llegar al desplazamiento alcanzado en el ensayo a escala real mostrado por Lauriola y Sandhaas (2006). En la Figura 5.4 a), b) y c), se muestran en líneas naranjas los cortes y desplazamientos relativos en los pisos uno, dos y tres respectivamente para el análisis con cargas cíclicas en el modelo de tres pisos. De fondo en la Figura 5.4 a), se ve la curva obtenida por Rinaldin *et al.* (2013) para el ensayo en la estructura de

un piso. Se compara la Figura 5.4 a) con el ensayo a escala real para la estructura de un piso, debido a que la carga vertical tanto en el modelo como en el ensayo intenta replicar el comportamiento de una estructura de tres pisos. Para el análisis cíclico en el modelo de tres pisos, se obtuvo un desplazamiento relativo de 46 mm (*drift* 1,4%), 53 mm (*drift* 1,7%) y 40 mm (*drift* 1,3%) en el primer, segundo y tercer piso respectivamente. Los conectores de corte del tuvieron una deformación lateral de 20 mm, 24 mm y 7 mm en el primer, segundo y tercer piso respectivamente. Los anclajes tuvieron una deformación vertical de 23 mm, 6 mm y 6 mm en el primer, segundo y tercer piso respectivamente. Las curvas de corte-desplazamiento para el análisis cíclico de la estructura de dos pisos se muestran en el Anexo 5.3.



a) Primer piso

b) Segundo piso



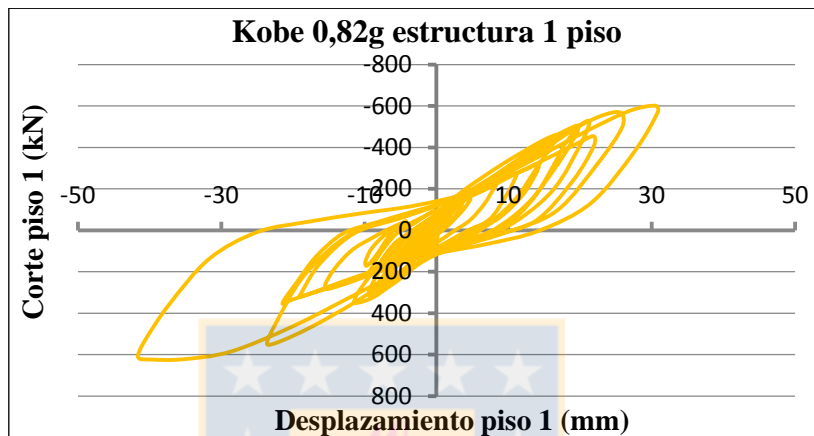
c) Tercer piso

Figura 5.4 Curvas corte-desplazamiento para análisis cíclico de estructura de tres pisos

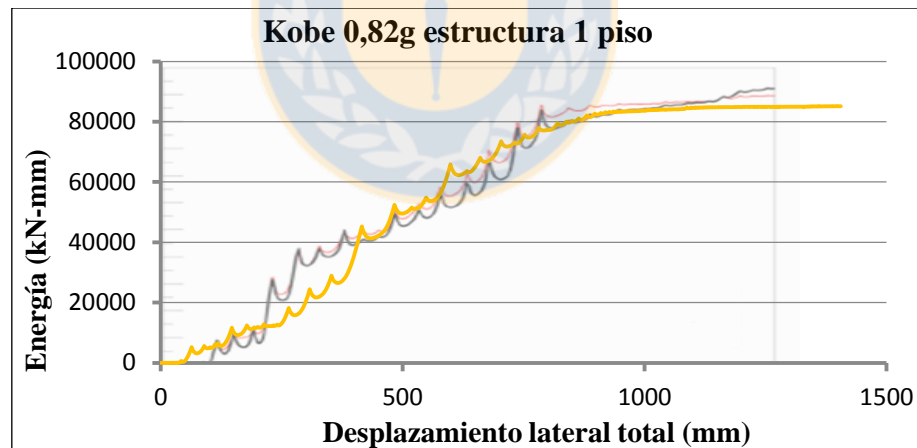
Se puede observar en la Figura 5.4 a) que la curva obtenida en el primer piso del modelo mantienen una forma similar a la del ensayo descrito por Lauriola y Sandhaas (2006), lo que indica que los análisis realizados logran representar el comportamiento de las estructuras CLT con conectores convencionales con un nivel de aproximación equivalente a la del ensayo a escala real en la estructura de un piso. Como el ensayo a escala descrito por Lauriola y Sandhaas (2006) es en una estructura de un piso, pero que tiene una carga vertical de una estructura de tres pisos, se comparó su respuesta con la del primer piso en los modelos de uno, dos y tres pisos. Sin embargo, la respuesta de los modelos en los pisos superiores no pudo ser comparada con ningún ensayo y a pesar de ello, se observa que las curvas de los pisos superiores tienen una forma similar a las del primer piso, pero con un corte obviamente menor, indicando esto la correcta modelación de las estructuras. En los resultados de los modelos, se comparó solo la forma de la curva corte-desplazamiento para poder corroborar la aproximación de la modelación a la realidad, pero no se compararon las deformaciones en los conectores, debido a que no se cuenta con datos.

Luego de realizar los análisis con cargas estáticas cíclicas, se aplicaron cargas dinámicas con registros de aceleraciones en la base de las estructuras de uno, dos y tres pisos con conectores convencionales. Las estructuras son las mismas utilizadas para los análisis con cargas cíclicas y descritas en el Capítulo 3. El primer paso fue realizar un análisis *time history* con el sismo de Kobe 0,5g (ver Tabla 3.3) para el modelo de la estructura de un piso (con carga vertical correspondiente a tres pisos), mostrándose en el Anexo 5.3 los resultados de este análisis. A continuación, se realizó en el mismo modelo de la estructura de un piso con conectores convencionales un análisis *time history*, pero ahora con el sismo de Kobe 0,82g (Tabla 3.3), en la Figura 5.5 a) se muestra la curva que indica el corte y el desplazamiento lateral en el techo de la estructura para este análisis. En definitiva, se obtuvo un desplazamiento lateral en el techo de 42 mm (*drift* 1,35%), una deformación lateral en los conectores de corte de 40 mm y una deformación vertical de 8 mm en los *hold-down*, además, se alcanzó una aceleración máxima de 1,10 g en el techo del modelo. De la comparación entre la Figura 5.5 a) y la Figura A.5.8 a) del Anexo 5.3 que muestra la curva corte-desplazamiento en la estructura de un piso ante el sismo de Kobe 0,5g, se puede ver por la forma de las curvas que al aumentar la energía de entrada del sismo, la estructura tiene deformaciones mayores e incurre en mayor medida en el rango inelástico. En la Figura 5.5 b), se representa en línea naranja la energía total de deformación en el

modelo y la suma de los desplazamientos laterales en el techo del modelo, de fondo se observa en color negro la curva que muestra la energía total de deformación en el ensayo descrito por Lauriola y Sandhaas (2006) en la misma estructura que fue modelada en este trabajo. La curva del ensayo muestra una forma similar a la obtenida en el modelo, corroborándose la eficacia en la modelación de los paneles CLT y conectores convencionales.



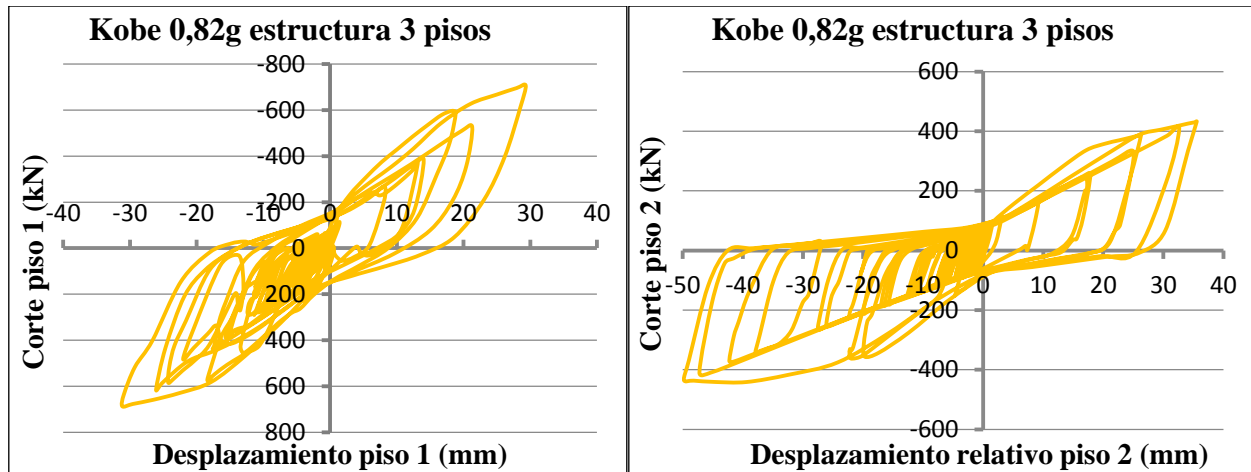
a) Curvas corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g en estructura de un piso



b) Curva energía deformación-desplazamiento, registro de Kobe 0,82g en estructura un piso

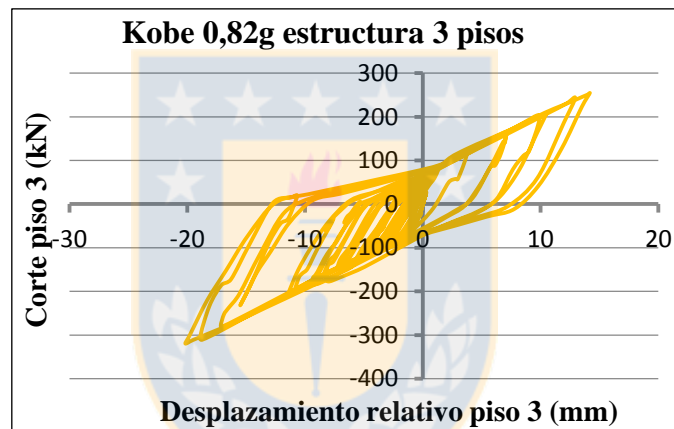
Figura 5.5 Resultados de análisis *time-history* para sismo Kobe 0,82g, estructura un piso

Como era de esperar, se pudo observar en las figuras que los cortes y desplazamientos laterales en el análisis con el registro de Kobe 0,82g aumentaron con respecto al análisis con el registro de Kobe 0,5g. Por otro lado, las deformaciones en los conectores, la energía de deformación y las aceleraciones en la estructura aumentaron, debido al incremento en las aceleraciones del registro.



a) Primer piso

b) Segundo piso



c) Tercer piso

Figura 5.6 Curvas corte-desplazamiento para análisis *time-history* con sismo Kobe 0,82g, estructura de tres pisos

Para los modelos de las estructuras de dos y tres pisos, también se hicieron análisis *time-history* con el registro de Kobe 0,82g, ambos tienen la carga vertical correspondiente a un edificio de tres pisos. En la Figura 5.6, se muestran las curvas que indican el corte y el desplazamiento lateral en cada nivel del modelo de la estructura de tres pisos al aplicar el registro de Kobe 0,82g. El desplazamiento lateral relativo alcanzó los 32 mm (*drift* 1,0%), 49 mm (*drift* 1,6%) y 21 mm (*drift* 0,6%), en el primer, segundo y tercer piso respectivamente. Se obtuvo una deformación lateral en los conectores de corte de 26 mm, 44 mm y 16 mm, en el primer, segundo y tercer piso respectivamente. Los anclajes tuvieron una deformación vertical de 9 mm y se alcanzó una aceleración máxima de 1,26 g en la losa del tercer piso del modelo. En un ensayo a escala real en

mesa vibradora de una estructura de tres pisos igual a la modelada, donde se aplicó el mismo registro y la misma carga vertical (Ceccotti y Follesa, 2006), se obtuvo un *drift* en el primer piso de 1,2%, el que está dentro del rango obtenido en el modelo, el cual es de 1,0%. Esto indica que el modelo representa el comportamiento de una estructura real de CLT con conectores convencionales. Los resultados del análisis *time-history* para el sismo Kobe 0,82g en la estructura de dos pisos con conectores convencionales se muestran en el Anexo 5.3.

Las curvas cortes-desplazamiento de las Figuras 5.5 y 5.6 corroboran la correcta modelación de las estructuras con conectores convencionales, ya que se observa una forma estable con desplazamientos dentro de los rangos esperados; también una disminución en el corte al ir subiendo de piso. Se ve que las estructuras entran en el rango inelástico, puesto que las rigideces pierden la linealidad que define el comportamiento elástico. Los resultados de los modelos de estructuras con conectores convencionales ante registros sísmicos no fueron comparados con ningún ensayo, porque no se contaba con datos (excepto el *drift* mencionado, obtenido por Ceccotti y Follesa (2006)). Sin embargo, la aproximación de los modelos con ensayos reales se comprobó con modelos ante cargas cíclicas y el ensayo descrito por Lauriola y Sandhaas (2006).

5.5 Conclusiones

Como se comentó en la comparación de los resultados de modelos de estructuras CLT con conectores convencionales y los obtenidos en ensayos a escala real ante cargas estáticas o dinámicas, en general se observó una buena aproximación de los modelos a la realidad. Los datos de ensayos reales que existen no son muchos, pero se aprecia una respuesta similar a nivel global tanto en los cortes y los desplazamientos observados como en la energía de deformación desarrollada. Se puede concluir que los datos obtenidos de los modelos son confiables, lo que permite proyectar análisis no lineales de distintas estructuras, utilizando los modelos de conectores convencionales y paneles CLT para distintos registros sísmicos. Los modelos de estructuras CLT con conectores convencionales ante cargas sísmicas se realizaron con el fin de comparar su respuesta con la de modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon*, los que se muestran en el Capítulo 6.

CAPÍTULO 6 RESULTADOS DE MODELOS DE ESTRUCTURAS CLT CON DISIPADORES DE ENERGÍA QUE UTILIZAN EL SISTEMA *BALLOON*

6.1 Introducción

En el Capítulo 5, se mostraron los resultados de los modelos con conectores convencionales y en este capítulo se analizarán los correspondientes a modelos de muros y estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía. Estos fueron introducidos en el Capítulo 4, donde se mencionó el procedimiento de su modelación. En la siguiente tabla, se muestran las masas y periodos fundamentales de los modelos de muros y de estructuras CLT con disipadores de energía (el *software* utiliza las rigideces elásticas de los conectores para calcular los periodos).

Tabla 6.1 Masas y periodos fundamentales en modelos con disipadores de energía

Modelo	Masa (kg)	Periodo fundamental, dirección de análisis (s)
Muro 1.1	6.010	0,32
Muro 1.2	6.010	0,25
Muro 2.1	5.920	0,26
Muro simple	3.005	0,26
Muro doble	5.910	0,24
Estructura 1 piso	49.810	0,13
Estructura 2 pisos	46.990	0,23
Estructura 3 pisos	51.690	0,30
Estructura 4 pisos	68.460	0,52
Estructura 5 pisos	88.850	0,81
Estructura 7 pisos	128.380	1,06

6.2 Modelos de muros CLT con conectores disipadores de energía

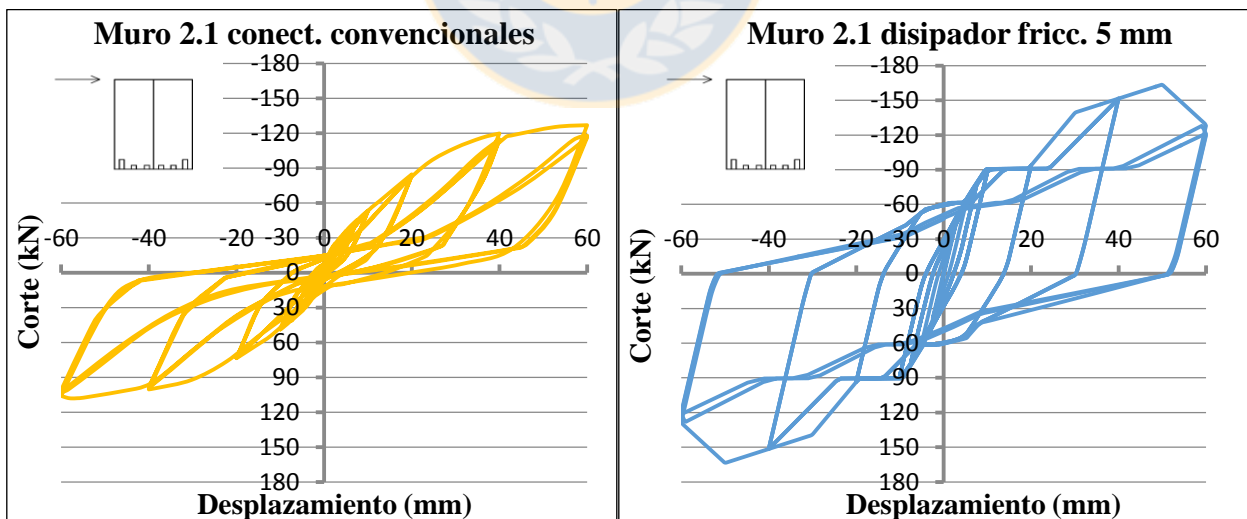
En este subcapítulo, se muestran los resultados obtenidos de la modelación de muros aislados de CLT con disipadores de energía y se comparan con los de muros con conectores convencionales.

En el subcapítulo 4.2, se explicó el procedimiento utilizado para modelar los disipadores de fluencia y fricción que fueron utilizados en los modelos de muros y estructuras CLT con disipación de energía. En los muros aislados con disipadores, se realizaron análisis con cargas cíclicas y también con registros sísmicos de aceleraciones. En la Tabla 4.1, se enumeran los análisis realizados en los modelos de muros aislados con disipadores.

El primer modelo realizado fue el del muro 1.1, el cual corresponde al mismo muro 1.1 modelado con conectores convencionales (se mantuvo la misma carga vertical), pero ahora se cambiaron los anclajes ubicados en los extremos del muro por disipadores de fricción. Al muro 1.1 se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclico en el extremo superior igual al aplicado al muro 1.1 con conectores convencionales. En este caso, el corte objetivo no se intentó limitar a porcentajes muy bajos, ya que las relaciones de aspecto de los muros no lo permitían (largo/alto), sin embargo, el análisis sirvió para corroborar el comportamiento de los disipadores y observar si el corte basal se mantenía en un valor fijo al momento que los disipadores comenzaban a deslizar. Para el muro 1.1 con disipadores, se realizaron tres modelos donde se varió la longitud de deslizamiento que tiene el disipador friccional, en el primero se utilizó una longitud de 2 mm, en el segundo 10 mm y en el tercero 30 mm.

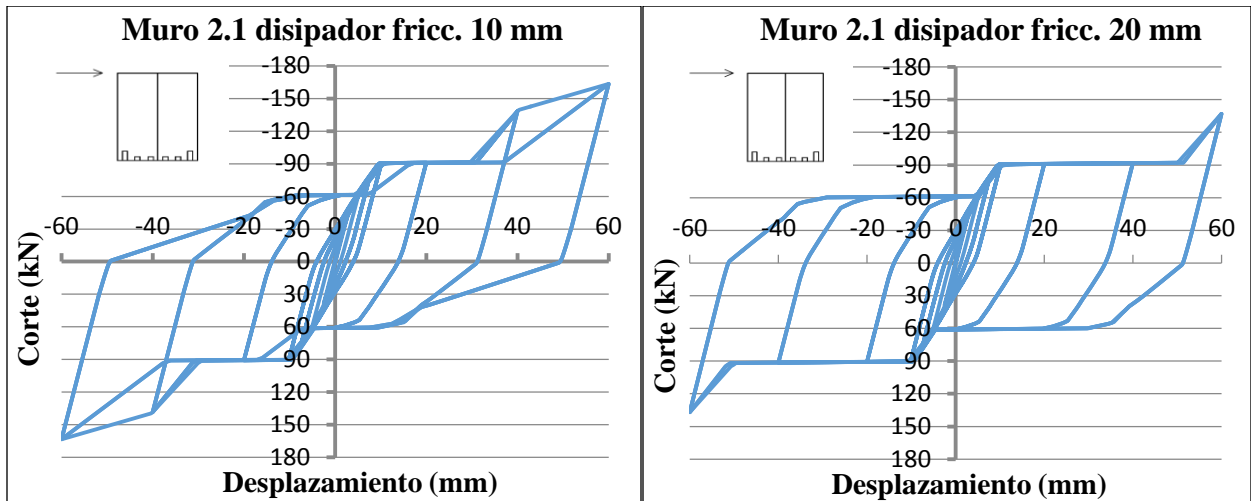
El segundo modelo realizado fue el del muro 1.2, el cual corresponde al mismo muro 1.2 modelado con conectores convencionales (se mantiene la misma carga vertical), pero reemplazando por disipadores friccionales los anclajes ubicados en los extremos inferiores del muro. A este muro, se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclico en el extremo superior igual al aplicado al muro 1.2 con conectores convencionales, el corte objetivo no se limitó a porcentajes muy bajos, debido a que la relación de aspecto en el muro era muy alta (relación 1/1 para muro 1.1 y muro 1.2). Sin embargo, al igual que en el muro 1.1, el análisis sirvió para corroborar el comportamiento del muro 1.2 con disipadores de energía. Para el muro 1.2 con disipadores se realizaron tres modelos donde se variaron las longitudes de deslizamiento en los disipadores friccionales, las cuales fueron de 10 mm, 20 mm y 40 mm. En el Anexo 6.2 se pueden observar los resultados de la modelación del muro 1.1 y 1.2 con disipadores de energía.

El tercer modelo realizado fue el del muro 2.1, el que corresponde al mismo modelado con conectores convencionales (se mantiene la misma carga vertical), pero reemplazando por disipadores friccionales los anclajes ubicados en los extremos inferiores del muro e insertando disipadores de fluencia en la posición de las uniones *half-lap* que unen los paneles que lo forman. Se realizó un análisis con cargas estáticas cíclicas idénticas a las del muro con conectores convencionales. Como se definió en la Ecuación 4.6, la restricción del porcentaje del corte objetivo con respecto al peso del muro no puede ser menor que B/H , por lo tanto, con las dimensiones del muro 2.1 no se intentó limitar el corte objetivo, dado que la relación de aspecto era muy alta (relación 1/2). Sin embargo, los análisis sirvieron para corroborar el comportamiento del muro 2.1 con disipadores de energía. Cabe mencionar que si se utilizara una fricción igual a cero, la curva de descarga volvería por el mismo lugar que la curva de carga, por lo tanto, no habría disipación de energía (ver Anexo 6.1). Para el muro 2.1 con disipadores, se realizaron tres modelos donde las longitudes de deslizamiento en los disipadores friccionales fueron de 5 mm, 10 mm y 20 mm. En la Figura 6.1 a), se puede observar la curva del corte y desplazamiento en el extremo superior del muro 2.1 con conectores convencionales, mientras que en la Figura 6.2 b), 6.2 c) y 6.2 d), se muestran las curvas del corte y desplazamiento en el extremo superior del muro con disipadores con longitud de deslizamiento de 5 mm, 10 mm y 20 mm correspondientemente.



a) Muro 2.1 con conectores convencionales

b) Muro 2.1 con disipador de 5 mm de capacidad de deslizamiento

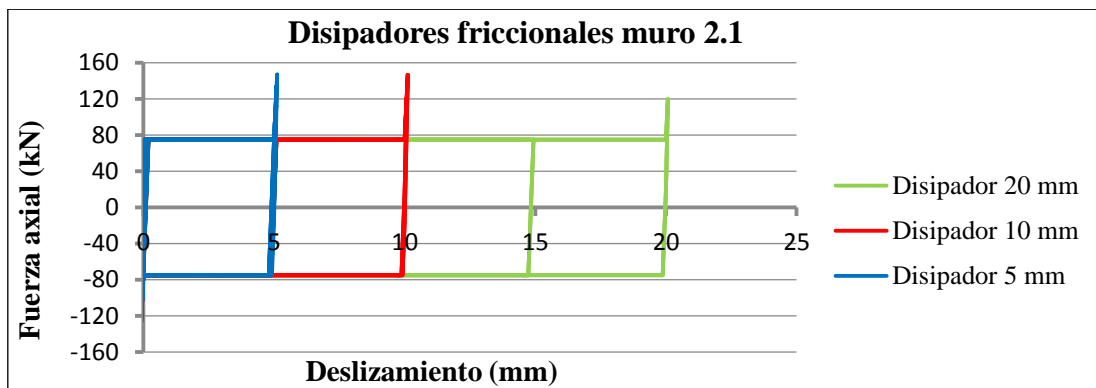


c) Muro 2.1 con disipador de 10 mm capacidad de deslizamiento

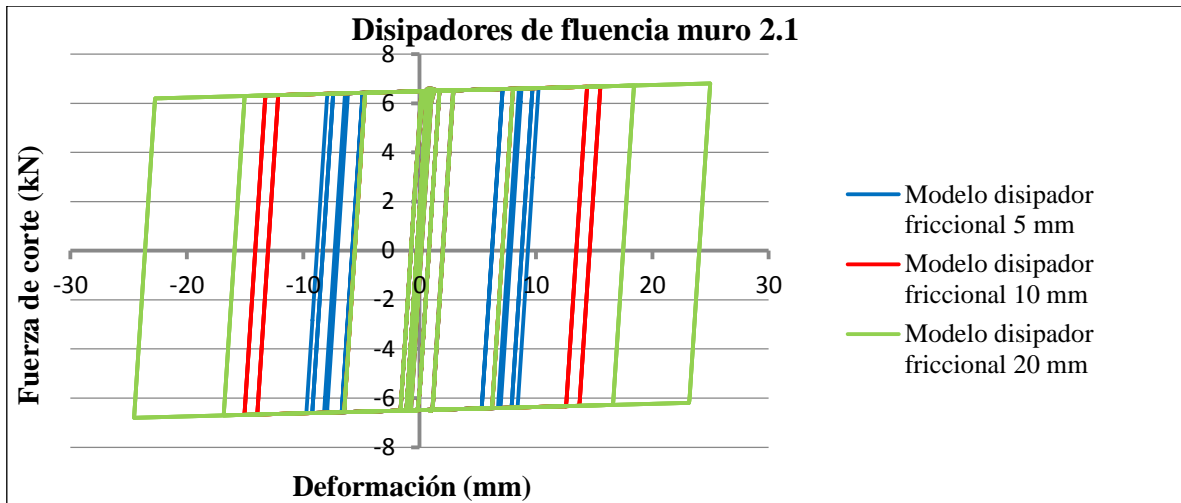
d) Muro 2.1 con disipador de 20 mm capacidad de deslizamiento

Figura 6.1 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en muro 2.1

Por otro lado, en la Figura 6.2 a), se puede ver la fuerza axial y el deslizamiento en los disipadores con longitud de deslizamiento de 5 mm, 10 mm y 20 mm para los modelos del muro 2.1. Se observa claramente que la fuerza axial se limita a la fuerza de deslizamiento en los disipadores hasta llegar al tope máximo que tiene cada uno, para después aumentar la rigidez e impedir el deslizamiento. En la Figura 6.2 b), se ve la fuerza de corte y la deformación en un disipador de fluencia de los modelos del muro 2.1 con disipadores con distintas longitudes de deslizamiento. En la Figura 6.3, se observa la energía total de deformación durante las etapas de tiempo del análisis de los modelos del muro 2.1 con conectores convencionales y con disipadores con longitudes de deslizamiento de 5 mm, 10 mm y 20 mm.



a) Curva fuerza-desplazamiento para disipadores friccionales en muro 2.1



b) Curva fuerza-deslizamiento de un disipador de fluencia en muro 2.1

Figura 6.2 Comportamiento de disipadores friccionales y de fluencia en muro 2.1

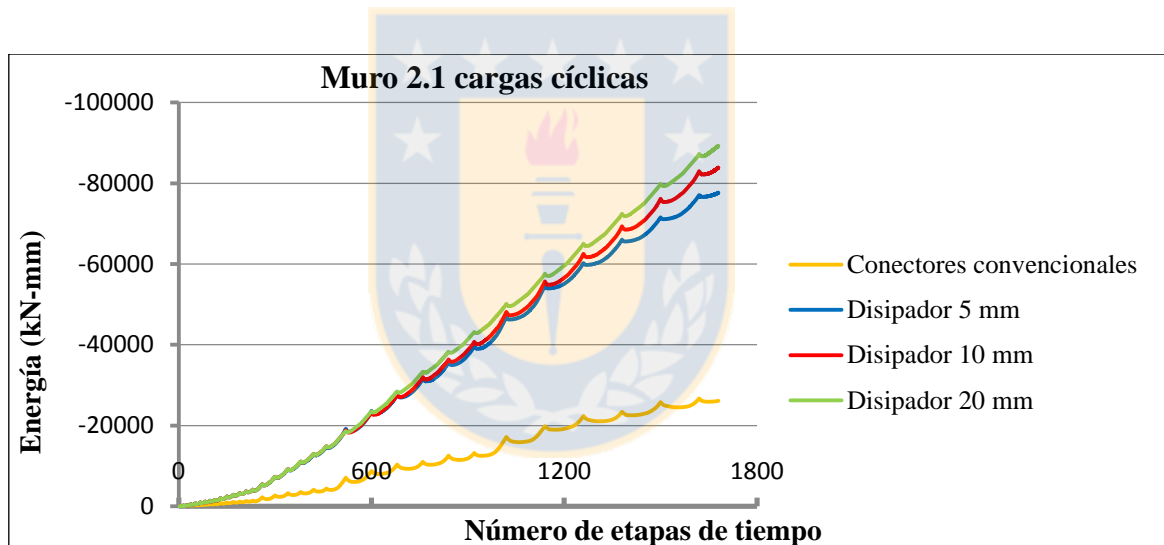


Figura 6.3 Curva energía deformación-número de etapas de tiempo, análisis cíclico en muro 2.1

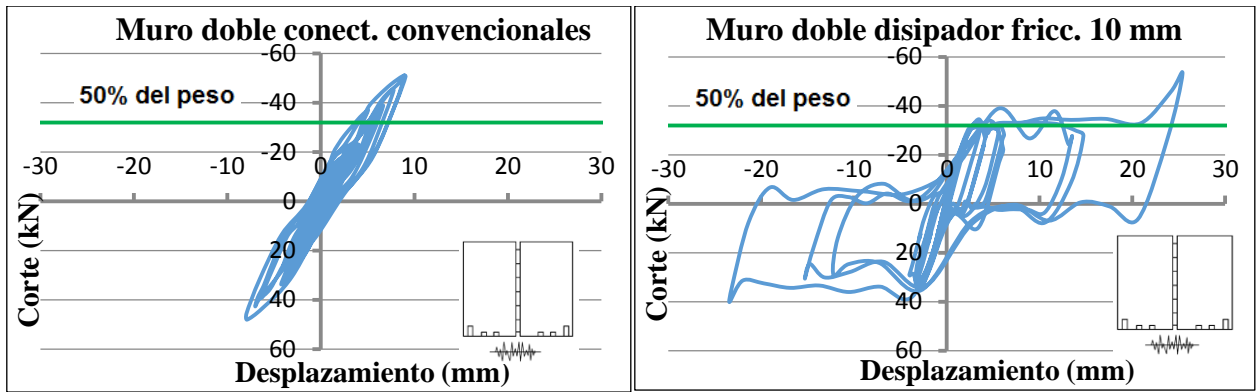
Se observa en la Figura 6.1 que en los muros con disipadores, el corte basal se mantiene en un valor fijo hasta que el disipador llega al tope de su deslizamiento, momento en el que la rigidez aumenta al igual que el corte en el muro; también, que mientras la longitud de deslizamiento del disipador aumenta, el valor del corte se mantiene fijo durante más tiempo a medida que aumenta el *drift* del muro. Lo señalado anteriormente, ocurre porque el mayor recorrido en el disipador friccional permite que el pivoteo del muro aumente antes de llegar al tope del deslizamiento del disipador y que el corte comience a aumentar. En la Figura 6.3, se puede ver que la energía total

de deformación en los modelos con disipadores de energía es mayor que en el con conectores convencionales. Esto se debe a que el corte objetivo en los modelos con disipadores se mantuvo en un valor similar al del modelo con conectores convencionales, pero la histéresis encierra un área mayor debido al deslizamiento de los disipadores. Si el disipador tiene una longitud de deslizamiento mayor, la energía disipada aumenta y, por ende, también la energía total de deformación (energía elástica más energía disipada). La energía de deformación no siempre será mayor en estructuras CLT con disipadores en comparación con las con conectores convencionales, puesto que va a depender del corte objetivo al que se quiera llegar y del *drift* que se alcance. Si el corte se reduce mucho, el área que encierre la histéresis será menor y la energía total también se verá reducida. En los modelos de los muros 1.1, 1.2 y 2.1, las fuerzas en los disipadores no se diseñaron para llegar a un corte en particular, sino que se definieron aleatoriamente, porque el objetivo era verificar el comportamiento de los muros con disipadores y no limitar el corte a un valor en específico.

Luego de realizar los análisis en modelos de muros CLT con disipadores ante cargas estáticas cíclicas, se modelaron dos muros ante registros de aceleraciones sísmicos como se explicó en el subcapítulo 4.3. Uno fue el muro simple que solo tiene dos disipadores de fricción en la base y el otro el muro doble que consta de dos muros simples con dos disipadores de fricción en la base y ocho disipadores de fluencia en la unión entre ambos paneles. Se aplicó el registro sísmico de Kobe 0,82g para ambos muros (ver Tabla 4.1). Siguiendo el procedimiento desarrollado en el Capítulo 4 y en las Ecuaciones 4.1 a 4.6, se calculó la fuerza F_{slip} para cada muro, dadas las dimensiones de los paneles, la fuerza de corte se redujo a un 50% del peso total de los muros. Para cada muro se realizó un modelo donde los disipadores de fricción no tienen una longitud límite de deslizamiento y otro donde la longitud es de 10 mm. En el Anexo 6.2, se muestran los resultados de la modelación del muro simple ante el registro sísmico de Kobe 0,82g. En la Figura 6.4 a), se observa la curva del corte basal y el desplazamiento en el extremo superior del muro doble con conectores convencionales. En la Figura 6.4 b), se ve la curva del corte y desplazamiento en el muro doble con disipadores friccionales con una longitud de deslizamiento de 10 mm. Mientras que en la Figura 6.4 c), se muestra la curva corte-desplazamiento del muro doble con disipadores friccionales sin un límite de deslizamiento, las tres curvas ante el registro de aceleraciones del sismo de Kobe 0,82g. Por otro lado, en la Figura 6.5 a), se muestra el

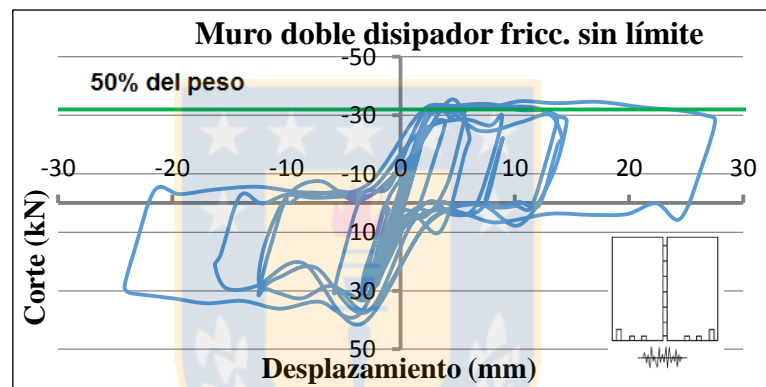
comportamiento de un disipador friccional sin límite de deslizamiento ubicado en la base del muro doble, en cambio en la Figura 6.5 b), se ve el comportamiento de uno de los disipadores de fluencia que une los paneles del muro doble, ambos ante el registro de Kobe 0,82g (todos los disipadores de fluencia trabajaron igual). Por último, en la Figura 6.6, se observa la energía de deformación en el tiempo para el muro doble con conectores convencionales y con disipadores para el sismo de Kobe 0,82g.

Comparando la Figura 6.4 a) con las Figuras 6.4 b) y 6.4 c), se puede observar claramente cómo se reduce el corte basal en los modelos con disipadores a un valor cercano al corte objetivo del 50% del peso total del muro. Por otro lado, se observa que al utilizar disipadores sin un límite de deslizamiento, el valor objetivo del corte se mantiene fijo en todo momento, sin embargo, al utilizar disipadores con un límite de deslizamiento, se observa que en una parte de la curva el corte aumenta de manera repentina, lo que quiere decir que el disipador llega al límite de su deslizamiento y la rigidez en el muro aumenta. Esto indica que el disipador debe ser diseñado con holgura para que no se produzcan aumentos en la rigidez de los muros. En la Figura 6.5, se observa en las histéresis de los disipadores que las fuerzas de deslizamiento y de fluencia corresponden a las definidas por diseño, lo que indica la correcta modelación y explica por qué se llega al corte objetivo de diseño correctamente. En la Figura 6.6, se puede ver que en el modelo donde se utilizaron disipadores sin un límite de deslizamiento la energía total de deformación fue mayor que en el modelo con disipadores con un límite de deslizamiento, ya que no existe una restricción del *drift* en los muros, lo que hace que el área que cubre la histéresis sea mayor. Por otro lado, se observa que no siempre que se utilicen disipadores la energía total de deformación será mayor que cuando se utilizan conectores convencionales. Esto va a depender estrictamente del corte objetivo que se quiera alcanzar, porque si el corte es muy bajo, el área que encierra la histéresis también disminuirá y podrá llegar a haber una menor energía de deformación que cuando se utilizan conectores convencionales. En general, tanto en la modelación de muros con disipadores ante cargas estáticas o dinámicas, se puede decir que se logró el objetivo de limitar el corte al valor deseado y que la metodología utilizada para encontrar las fuerzas de diseño en los disipadores friccionales y de fluencia es correcta. Ahora, siguiendo el mismo procedimiento utilizado en la modelación de muros individuales, se deben modelar estructuras de uno o más pisos que utilicen el sistema *balloon* con disipadores de energía.



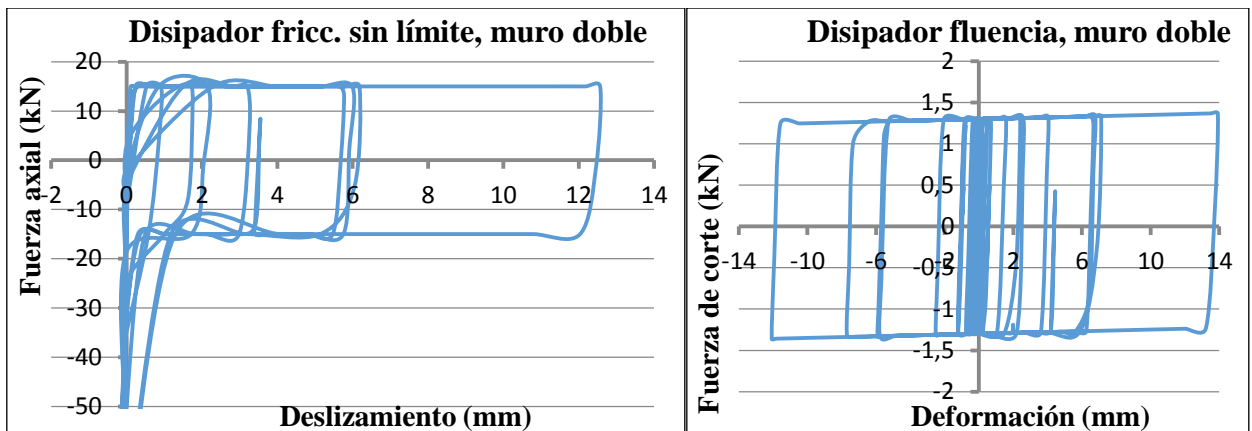
a) Muro doble con conectores convencionales

b) Muro doble con disipador de 10 mm de capacidad de deslizamiento



c) Muro doble con disipador sin límite de deslizamiento

Figura 6.4 Curvas corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g en muro doble



a) Curva fuerza-deslizamiento en disipador sin límite de deslizamiento

b) Curva fuerza-deformación en un disipador de fluencia

Figura 6.5 Curvas en disipadores de muro doble para registro de Kobe 0,82g

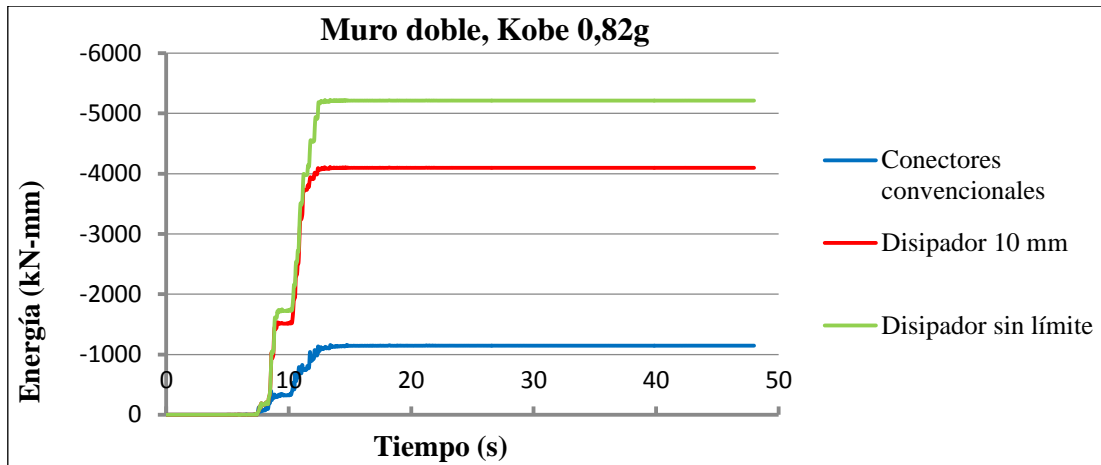


Figura 6.6 Curva energía deformación- tiempo en muro doble para registro de Kobe 0,82g

6.3 Modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con conectores disipadores de energía

Considerando que se tienen resultados de modelos de estructuras CLT con conectores convencionales y que también se modelaron muros individuales con disipadores, logrando limitar los cortes a los valores esperados, el siguiente paso fue realizar modelos de estructuras de paneles CLT con disipadores de energía, utilizando el sistema *balloon*. Como se ha explicado en el subcapítulo 4.4 y como se muestra en la Tabla A.4.1, se realizaron análisis con cargas estáticas cíclicas y análisis *time history* con distintos registros sísmicos para estructuras CLT con disipadores de uno hasta siete pisos, utilizando el sistema *balloon*. Los resultados de estos análisis y comparaciones con los modelos de estructuras con conectores convencionales se muestran en este capítulo. En la Figura 4.7, se mostraron las dimensiones de las estructuras modeladas desde uno hasta siete pisos (se repitió la misma planta en todos los pisos); también la ubicación de los paneles y de los disipadores de energía. Las estructuras con disipadores tienen las mismas dimensiones y cargas verticales que las estructuras modeladas con conectores convencionales, lo que permite tener un punto de comparación al evaluar las ventajas y falencias de incorporar disipación de energía al sistema constructivo CLT utilizando el sistema *balloon*.

El primer modelo realizado fue el de una estructura de un piso, a la que se le aplicó una carga vertical correspondiente al peso de una estructura de tres pisos. Esto debido a que el modelo

intenta reproducir un ensayo a escala real realizado en la misma estructura con la carga vertical mencionada. Siguiendo el mismo procedimiento mostrado en las Ecuaciones 4.7 a 4.10 para calcular las fuerzas de diseño en los disipadores de fricción y de fluencia de la estructura de tres pisos, se definió un corte de 45% del peso total de la estructura de un piso (incluyendo toda la carga vertical). Hay que mencionar que el corte mínimo al que se podría llegar sería a la mitad del valor fijado, para lo cual la fuerza de deslizamiento en el disipador friccional debería ser igual a cero, siendo la única resistencia al pivoteo del muro la carga vertical (ver Anexo 6.1). Sin embargo, se definió el corte objetivo, considerando la restricción mencionada en la Ecuación 4.6 para lograr una curva que disipe más energía y pueda controlar el *drift*. Al modelo de un piso con disipadores se le aplicó una carga lateral estática a nivel del techo. En el Anexo 6.3, se muestra el corte y el desplazamiento en el techo de la estructura para el análisis mencionado, observándose que el corte se puede reducir al valor objetivo de diseño.

Luego al mismo modelo de la estructura de un piso con disipadores se le aplicó el registro sísmico de Kobe 0,82g. En el Anexo 6.3, se muestra el corte basal versus el desplazamiento en el techo para el análisis; además la energía total de deformación en el tiempo para la estructura de un piso con conectores convencionales y con disipadores de energía, aplicando el registro de aceleraciones de Kobe 0,82g. La energía total de deformación se calculó, obteniendo el área que encierra la curva del corte y el desplazamiento lateral del primer piso. Se observa en el análisis que el corte basal logra reducirse al valor objetivo, mientras que en la estructura con conectores convencionales la energía de deformación es mayor que en la estructura con disipadores, debido a que el corte máximo en el modelo sin disipadores es más del doble que el del modelo con disipadores (cortes máximos se muestran en Tabla 6.2). Para la estructura de un piso con disipadores sin límite de deslizamiento ante el sismo de Kobe 0,82g, se obtuvo un desplazamiento máximo en el techo de 41 mm (1,3% *drift*), un deslizamiento máximo en los disipadores de fricción de 19 mm y una aceleración máxima de 0,72 g en el techo del modelo.

Siguiendo con el sistema constructivo *balloon*, la estructura fue aumentando en altura a dos y tres pisos, utilizando disipadores de energía. A ambos modelos se les aplicó una carga vertical correspondiente al peso de la estructura de tres pisos, lo cual sirvió para poder comparar los resultados con las estructuras modeladas con conectores convencionales que contaban con la

misma carga vertical. Con el mismo método utilizado para definir los cortes objetivos de los muros y la estructura de un piso, se definió un corte de 30% y 25% del peso total de la estructura de dos y tres pisos respectivamente. Como se explicó en el subcapítulo 4.4, en las estructuras CLT con disipadores de energía se utilizó el sistema constructivo *balloon* que considera los muros de una altura igual a la altura del edificio, lo que quiere decir que los muros no tienen separaciones entre pisos, sino que son continuos. Los muros tienen dos disipadores friccionales en la unión con la fundación y disipadores de fluencia para las uniones entre paneles (como se muestra en Figura 4.7). A ambos modelos con disipadores, de dos y tres pisos, se les aplicó una carga lateral estática donde a cada piso se le asignó un porcentaje de la carga total igual al porcentaje del peso de cada piso con respecto al peso total de la estructura. En el Anexo 6.3, se muestra el resultado del análisis con cargas laterales estáticas para la estructura de dos pisos que utiliza el sistema *balloon* con disipadores de energía. En la Figura 6.7 se observa el corte y el desplazamiento en el techo de la estructuras de tres pisos para el análisis con cargas estáticas, al igual que en el modelo de uno y dos pisos, se observa que el corte alcanzó el valor objetivo.

También a los modelos de dos y tres pisos con disipadores se les aplicó el registro sísmico de Kobe 0,82g. En el Anexo 6.3, se muestra el resultado en la estructura de dos pisos que utiliza el sistema *balloon* ante el registro de Kobe 0,82g. En la Figura 6.8, se muestra el corte basal versus el desplazamiento en el techo del modelo para la estructura de tres pisos, observándose que el corte basal logra reducirse al valor propuesto. Finalmente, en la Figura 6.9, se observa la energía total de deformación en el tiempo para las estructura de tres pisos con conectores convencionales y con disipadores de energía, aplicando el registro de Kobe 0,82g. La energía de deformación (energía elástica más energía disipada) se calculó sumando las áreas que encierran las curvas del corte y el desplazamiento relativo en cada piso. Se observa que en el modelo con conectores convencionales la energía de deformación es mayor que en el modelo con disipadores, debido a que el corte alcanzado en las estructuras con disipadores es entre dos a tres veces menor. En el análisis de la estructura de dos pisos con disipadores sin límite de deslizamiento, se obtuvo un *drift* máximo de 2,4%, un deslizamiento de 33 mm en los disipadores friccionales y una aceleración máxima de 1,09g en la losa del segundo piso. Mientras que para el mismo análisis en la estructuras de tres pisos, se obtuvo un *drift* máximo de 2,1%, un deslizamiento de 28 mm en los disipadores friccionales y una aceleración máxima de 1,41 g en la losa del segundo piso.

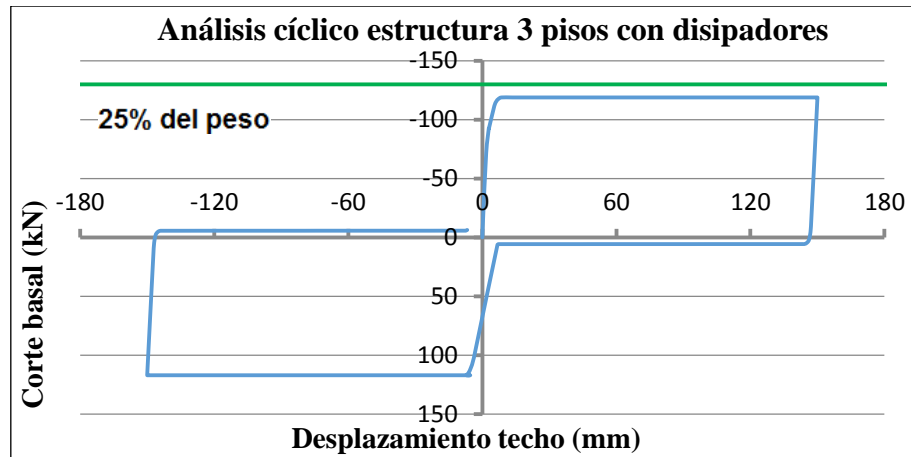


Figura 6.7 Curva corte-desplazamiento en análisis cíclico, estructura tres pisos con disipadores

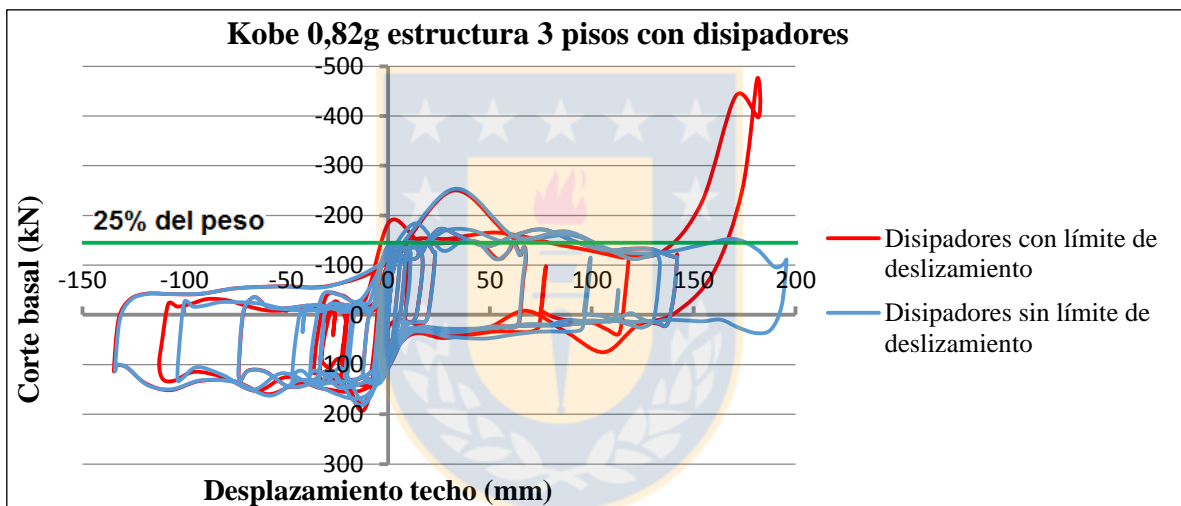


Figura 6.8 Curva corte-desplazamiento registro Kobe 0,82g, estructura tres piso con disipadores

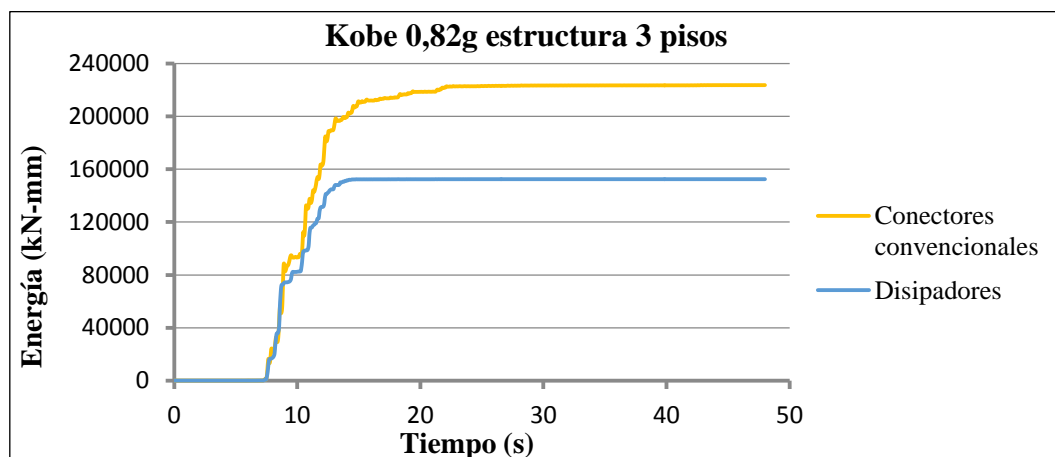


Figura 6.9 Curva energía deformación-tiempo registro Kobe 0,82g en estructura tres pisos

Como se ha comentado, el corte objetivo queda condicionado por la relación de aspecto en los paneles. Este trabajo se centró en detectar las ventajas de utilizar el sistema *balloon*, el cual permite utilizar muros más altos al aumentar la cantidad de pisos, así la relación de aspecto va disminuyendo y se logra reducir el corte a valores más pequeños. En los modelos de uno, dos y tres pisos, se logró reducir el corte al valor objetivo propuesto, lo que quiere decir que el método para estimar las fuerzas de diseño en los disipadores es adecuado. Sin embargo, en algunos casos se observa un *peak* repentino en el corte de las estructuras con disipadores de energía, el cual se da en el momento en que el elemento *gap* en la base de los paneles se cierra, lo que representa el impacto del muro con la fundación cuando éste baja después de haberse levantado. Este aumento en el corte se acentúa más con el registro sísmico de Kobe, el cual es más bien impulsivo. Más adelante se muestra que con otros registros utilizados el aumento en el corte no es tan marcado.

En general, el sistema con disipadores logra el objetivo de reducir los cortes a los valores deseados, lo que implica que las fuerzas que actúan en los distintos conectores también disminuyan y se evitan daños en éstos. Los disipadores no presentarán deterioros, por lo que no necesitarán ser cambiados después de eventos sísmicos fuertes, como si puede darse en el caso de utilizar conectores convencionales, lo que implica un costo extra. Por otro lado, la energía total de deformación (energía elástica más la energía disipada por deformación plástica) en las estructuras con conectores convencionales fue mayor que en los modelos con disipadores, lo que se da principalmente, porque el corte alcanzado cuando se utilizan conectores convencionales es más del doble del valor que cuando se ocupan disipadores. En la Tabla 6.2, se observa que los *drifts* en las estructuras con disipadores son mayores que en las con conectores convencionales, ya que cuando hay disipadores, la rigidez de la estructura baja en el momento en que los disipadores comienzan a deslizar o deformarse, generando que los desplazamientos laterales aumenten. Se observa que las aceleraciones disminuyen en promedio un 22% en los modelos con disipadores comparados con los modelos con conectores convencionales en estructuras de hasta tres pisos. Más adelante, se observa que en estructuras de más pisos se ve una reducción aún mayor en las aceleraciones.

Tabla 6.2 Valores máximos de distintos parámetros para modelos de estructuras con conectores convencionales y con disipadores de energía, para registro de Kobe 0,82g

Estructura modelada		Corte (kN)	Drift máx. (%)	Aceleración máx. (g)	Levantamiento paneles (mm)	Periodo fund. (s)
1 piso	Conectores convencionales	623	1,32	1,10	8	0,36
	Disipadores de energía	295	1,30	0,72	19	0,13
2 pisos	Conectores convencionales	637	1,22	1,30	8	0,47
	Disipadores de energía	225	2,40	1,09	33	0,23
3 pisos	Conectores convencionales	706	1,58	1,69	9	0,56
	Disipadores de energía	253	2,10	1,41	28	0,30

En todos los resultados de los modelos que se han mostrado, tanto en muros individuales como en estructuras con conectores convencionales y con disipadores de energía, se ha utilizado el registro del sismo de Kobe para poder comparar con publicaciones que han utilizado tal registro, pero es esencial representar la sismicidad chilena y poder evaluar la respuesta del sistema CLT con disipadores ante registros nacionales. Por tal motivo, se aplicaron distintos registros sísmicos chilenos a distintos modelos de estructuras con disipadores, utilizando el sistema *balloon* (Tabla 3.3 muestra los registros utilizados). Se aplicó el registro de Concepción del terremoto de Chile del 2010 en los modelos de las estructuras que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de uno, dos y tres pisos, se mantuvo el mismo corte objetivo de diseño utilizado anteriormente con el registro de Kobe 0,82g (45%, 30% y 25% del peso total de cada estructura). En el Anexo 6.4, se pueden ver las curvas del corte basal y desplazamiento en el techo para los modelo de uno dos y tres pisos con el registro de Concepción. En los tres modelos, se observó que el corte se limitó al valor objetivo y no se ven los *peaks* de fuerza tan pronunciados como era el caso de los modelos con el registro de Kobe 0,82g, debido a que el registro de Concepción no es tan impulsivo y tiene aceleraciones menores. Sin embargo, los *drifts* en las estructuras son bajos y se disipa poca cantidad de energía, lo cual indica que la fuerza de fricción en los disipadores es muy alta y los

dispositivos no alcanzan a generar mayores deslizamientos. Por lo tanto, para evaluar como aumenta el desplazamiento lateral en la estructura de tres pisos con disipadores, se redujo a la mitad la fuerza de deslizamiento y de fluencia en los dispositivos, obteniendo según las ecuaciones desarrolladas un corte objetivo de diseño de 19% del peso total de la estructura, a la cual se le aplicó el registro de Concepción. En las figuras mostradas en el Anexo 6.4, se puede observar como disminuye el corte basal y aumenta el desplazamiento en el techo en la estructura de tres pisos con disipadores con corte objetivo de 19% en comparación con el modelo con corte objetivo de 25% del peso total. Sin embargo, se puede ver que los *peaks* en el corte comienzan a aparecer, lo que indica que al disminuir la fuerza de deslizamiento en los disipadores, el *drift* y el levantamiento en los paneles también aumenta, produciendo fuerzas mayores al momento que los paneles golpean con la fundación. Se debe tener cuidado en tratar de controlar este fenómeno, definiendo fuerzas de diseño que lo eviten o incorporando alguna solución constructiva a futuro. En los resultados mostrados en el Anexo 6.4, se puede observar que la energía de deformación para la estructura de tres pisos con disipadores y corte objetivo de 19% del peso total es tres veces mayor que en la estructura de tres pisos con disipadores y corte objetivo del 25% del peso total, lo cual ocurre, porque al aumentar el desplazamiento lateral en el edificio la energía de deformación también aumenta.

Para contar con más datos de análisis con registros sísmicos locales en modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon*, a la misma estructura de tres pisos con disipadores analizada con los registros anteriores se le aplicaron tres registros de Maule del sismo de Chile del 27 de febrero de 2010 (en la Tabla 3.3 se muestran las características de los registros utilizados). Los resultados para dos de los registros se muestran en el Anexo 6.4. Para el registro en particular denominado Maule 2, se realizaron tres análisis en la estructura de tres pisos con disipadores, donde se limitó el corte a un 25%, 19% y un 16% del peso total del edificio. En la Figura 6.10, se muestra el gráfico que incluye el corte basal y el desplazamiento en el techo de la estructura de tres pisos para los tres modelos realizados con el registro Maule 2. Se observa en la Figura 6.10, al igual que en otros casos, que al disminuir el corte objetivo en la estructura los desplazamientos laterales aumentan, debido a la reducción de la fuerza de deslizamiento y de fluencia en los disipadores, lo cual acentúa los *peaks* en el corte basal que se producen cuando los paneles entran en contacto con la fundación. En la Figura 6.11, se puede ver la energía total de deformación para

los tres modelos, se observa que la energía aumenta cuando se disminuye el corte objetivo, ya que los desplazamientos y la deformación en los disipadores aumentan, lo que implica una mayor disipación de energía. En la Tabla A.6.1 del Anexo 6.4, se muestran los valores máximos del corte basal, aceleraciones en el techo, *drifts* y levantamiento en el primer piso de los paneles para los modelos de estructuras CLT con disipadores que utilizan el sistema *balloon* ante el registro de Maule 2. En la tabla, se observa que la aceleración máxima en el modelo de la estructura con corte objetivo de 16% es mayor que en el modelo con corte objetivo de 19%. Este fenómeno se puede explicar debido a los *peaks* repentinos que aparecen en el corte producto del impacto de los paneles con la fundación, los que son mayores cuando aumentan los *drifts* en los modelos.

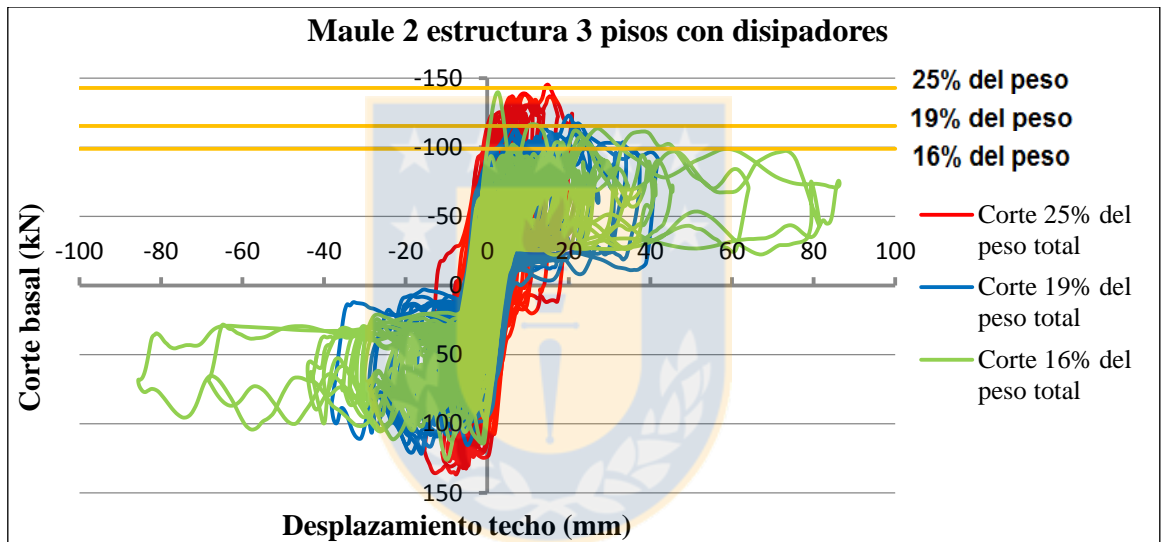


Figura 6.10 Curvas corte-desplazamiento registro Maule 2, estructura tres pisos con disipadores

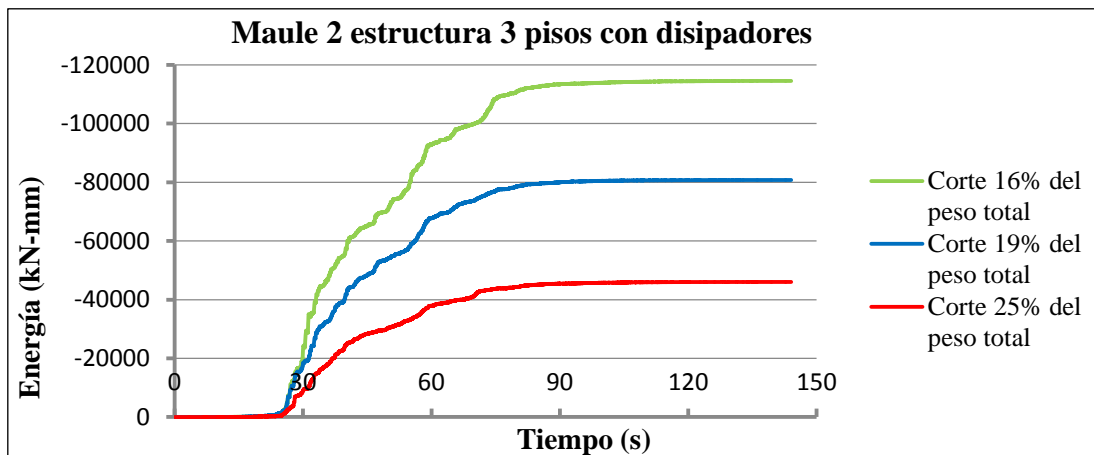


Figura 6.11 Curvas energía deformación-tiempo registro Maule 2 en estructura tres pisos

En el Anexo 6.6, se muestran los resultados de la modelación de la estructura de tres pisos con disipadores y un corte objetivo de 19% del peso total del edificio, a la cual se aplicó el registro de Maule 2 amplificado en 1,5 y 2 veces, con el fin de analizar como al aumentar la aceleración del registro, incrementan las aceleraciones laterales y *drifts*, acentuando los *peaks* en el corte basal.

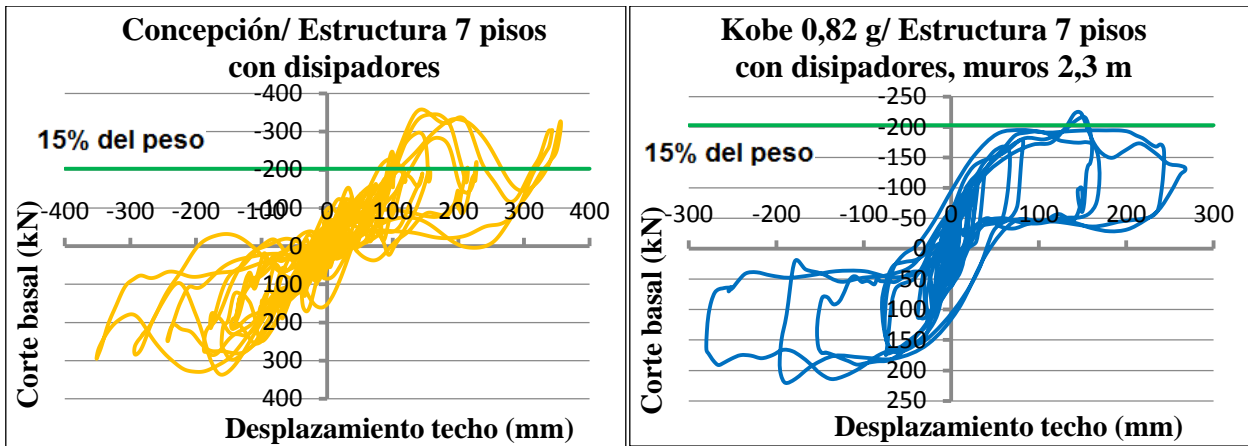
Con los resultados de los modelos de estructuras de uno a tres pisos con conectores convencionales y con disipadores de energía, se ha podido comparar y analizar los beneficios y falencias que pueden existir al agregar dispositivos disipadores a construcciones CLT que utilizan el sistema constructivo tipo *balloon*.

En el subcapítulo 4.4, se analizó la misma estructura mostrada en la Figura 4.7 que utiliza el sistema *balloon* con diferentes números de pisos, variando desde cuatro hasta siete niveles. Para la estructura de cuatro pisos, se aplicó una carga vertical de $2,5 \text{ kN/m}^2$ equivalente a una sobrecarga de uso en la losa del primer, segundo y tercer piso (más el peso propio del edificio), mientras que el corte objetivo en la estructura se limitó a un 20% del peso total del edificio (incluyendo la sobrecarga). Se aplicó un análisis *time history* con el registro de Kobe 0,82g, el registro de Concepción y el de Maule 2 (ver Tabla 3.3). En el Anexo 6.5, se muestran los resultados obtenidos de los análisis de la estructura de cuatro pisos que utiliza el sistema *balloon* ante registros sísmicos, donde se pudo observar que el corte objetivo se limitó al valor deseado.

A continuación, se modeló una estructura de cinco pisos con disipadores, utilizando el sistema *balloon*, manteniéndose las mismas dimensiones y estructuración que el modelo de cuatro pisos. Se aplicó una carga vertical de $2,5 \text{ kN/m}^2$ en la losa del primer, segundo, tercer y cuarto piso (más el peso propio del edificio), mientras que el corte también se limitó a un 20% del peso total del edificio (incluyendo la sobrecarga). Se realizó un análisis *time history* con el registro de Kobe 0,82g, Concepción y Maule 2 (ver Tabla 3.3). En el Anexo 6.5, se muestran los resultados de los modelos de la estructura de cinco pisos que utiliza el sistema *balloon* con disipadores de energía. En este caso, se observó que el corte se acerca al valor objetivo, pero para el sismo de Kobe se percibe una curva que no tiene la forma ideal mostrada en la Figura 4.4 y analizada en el Capítulo 4. Esta debería mantener un valor fijo cuando se supera la fuerza de deslizamiento en los disipadores friccionales. Es posible que para esta estructura (dado su periodo fundamental y la

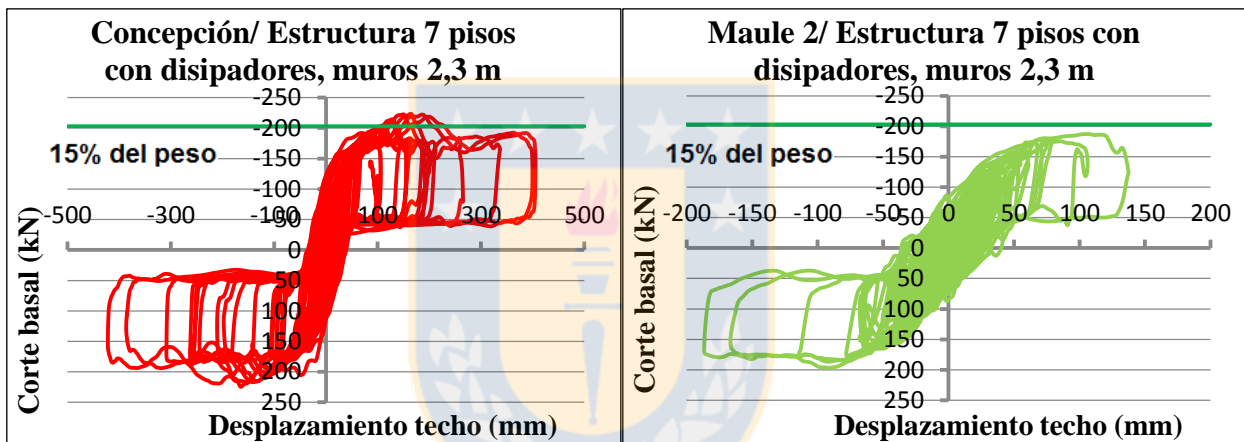
rigidez de los paneles) y para el registro de Kobe en particular, comiencen a dominar otros modos de vibración que no representan el movimiento de cuerpo rígido que se consideró como hipótesis para calcular las fuerzas de diseño en los disipadores.

Finalmente, se modeló una estructura de siete pisos con disipadores, manteniendo las mismas dimensiones y estructuración que los demás modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon*, aplicando una carga vertical de $2,5 \text{ kN/m}^2$ en todas las losas excepto la del techo (más el peso propio del edificio). El corte basal se limitó a un 15% del peso total del edificio (incluyendo la sobrecarga) y se aplicó el registro de Concepción. En la Figura 6.12 a), se percibe claramente que el comportamiento hipotético que debería tener el edificio y que se muestra en la Figura 4.4 no se cumple, puesto que los muros son muy flexibles dada su relación de aspecto (periodo fundamental de vibración de la estructura es de 1,5 s) y aparecen otros modos de vibración que no representan el movimiento de cuerpo rígido en los paneles, por lo tanto, el corte no se limita al valor objetivo al momento en que los disipadores alcanzan la fuerza de deslizamiento. Para mantener el concepto desarrollado de muros rígidos, se realizó otro modelo donde se seleccionaron paneles de largo mayor a efecto de controlar la razón de aspecto de éstos. Se aumentó el largo de los paneles a 2,3 m para lograr una relación de aspecto mayor en los muros (utilizando el sistema *balloon* que mantiene paneles continuos en toda la altura del edificio) y poder aumentar la rigidez de la estructura (periodo fundamental de vibración disminuyó de 1,5 s a 1,06 s). Al nuevo modelo con los paneles de mayor razón de aspecto se le aplicó el registro de Kobe 0,82g, Concepción y Maule 2. En la Figura 6.12 b), c) y d), se muestra la curva del corte basal y el desplazamiento en el techo del modelo para los registros mencionados. Ahora si se observa que el corte se logra limitar al valor objetivo, lo que corrobora que el problema se relaciona con la flexibilidad de la estructura. En la Figura A.6.25 del Anexo 6.5, se muestra la energía total de deformación para los tres registros en el modelo de la estructura de siete pisos con disipadores y paneles de 2,3 m de largo. Para esta estructura la energía total de deformación es bastante mayor para el registro de Concepción, porque es donde se alcanzan mayores desplazamientos laterales y durante más ciclos en el modelo. En la Tabla A.6.3 del Anexo 6.5, se muestran los valores máximos del corte basal, aceleraciones, *drifts* y levantamiento en el primer piso de los paneles para las estructuras de cuatro, cinco y siete pisos que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía ante los registros de Kobe, Concepción y Maule 2.



a) Registro Concepción, muros 1,4 m

b) Registro Kobe 0,82 g, muros 2,3 m



c) Registro Concepción, muros 2,3 m

d) Registro Maule 2, muros 2,3 m

Figura 6.12 Curvas corte-desplazamiento estructura siete pisos con disipadores, corte objetivo 15% del peso total

En general en los modelos de estructuras de cuatro, cinco y siete pisos con disipadores no se observaron *peaks* tan altos en los cortes basales como en modelos de menos pisos. Esto se debe a que los *drifts* y aceleraciones fueron menores, lo que implica que la fuerzas generadas por el impacto de los muros con la fundación se reducen, evitando aumentos repentinos en el corte basal. En relación a las aceleraciones, se puede decir que éstas se reducen para estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con conectores disipadores de energía en comparación con las estructuras CLT con conectores convencionales. Específicamente para el modelo de siete pisos, las aceleraciones se reducen notablemente (aceleración máxima de 1,09 g), ya que en la estructura a escala real de siete pisos ensayada por Ceccotti conectada con uniones

convencionales se obtuvo una aceleración máxima de 3,76 g para el registro de Kobe 0,82g, aceleración que no es aceptable en una vivienda para un ser humano. Incorporando disipadores de energía a estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon*, se agrega ductilidad y se pueden evitar daños en los contenidos de los edificios, como los observados en el ensayo de la estructura de siete pisos mostrado por Ceccotti *et al.* (2010). Además, el daño en los conectores convencionales implica que estos deben ser reemplazados luego de un evento sísmico importante, lo que no sería necesario en el caso de utilizar disipadores de energía. Por otro lado, dada la disminución en los cortes al agregar disipadores, se reducirían los costos asociados a conectores convencionales que son requeridos como complemento para estructuras CLT con disipadores de energía.

6.4 Conclusiones

Se puede concluir que los modelos de muros y estructuras de uno o más pisos que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía lograron reducir el corte a los valores propuestos y definidos según las ecuaciones desarrolladas. Se logró mantener el corte basal en un valor fijo luego del deslizamiento de los disipadores. Tanto las aceleraciones como los cortes lograron reducirse en comparación con los modelos con conectores convencionales, logrando tener estructuras menos rígidas y disipando mejor la energía en las conexiones. Sin embargo, no se recomienda limitar el corte a porcentajes muy bajos, porque la resistencia al levantamiento de los paneles disminuye y los desplazamientos laterales en la estructura aumentan, lo que hace que la fuerza de impacto de los muros con la fundación sea mayor y genere aumentos repentinos en el corte basal. Otro aspecto importante a tener en cuenta es controlar la razón de aspecto en los muros a efecto de no flexibilizar en demasía las estructuras, ya que se puede perder el concepto de movimiento rígido utilizado como hipótesis en el desarrollo del método propuesto. Por otro lado, también se debe tener especial cuidado en que el límite de deslizamiento en los disipadores friccionales no sea alcanzado, lo que puede rigidizar la estructura llegando a cortes muy altos. Se debe llegar a un corte objetivo que logre desarrollar un buen desempeño en el edificio, analizando la respuesta de cada estructura con cada registro en particular para evaluar su comportamiento y evitar generar alguno de los problemas antes mencionados, manteniendo desplazamientos laterales que permitan hacer trabajar a los dispositivos y disipar energía.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

Las estructuras de CLT de mediana altura construidas con el sistema *balloon*, con muros que mantienen ciertas proporciones en su geometría y que incorporan dispositivos disipadores de energía, mejoran sustancialmente su desempeño estructural ante cargas sísmicas, consiguiendo controlar el corte basal y reduciendo las aceleraciones de los pisos de mejor manera que estructuras convencionales de CLT que utilizan el sistema constructivo tipo plataforma. De esta manera, se pueden aprovechar las cualidades del CLT ante cargas estáticas y su buen nivel de serviciabilidad, pero adaptado a la realidad nacional donde las cargas sísmicas son muy importantes.

Los resultados numéricos de modelos de estructuras de CLT que utilizan el sistema constructivo tipo plataforma con conectores convencionales, indicaron que es posible reproducir de manera eficaz el comportamiento global de las estructuras y local de los conectores (anclajes a tracción, conectores de corte y uniones entre muros con tornillos autoperforantes) ante cargas cíclicas. Esto fue corroborado, utilizando resultados de ensayos de investigaciones internacionales, demostrando que las histéresis de los modelos numéricos se asemejan bastante bien en su forma y magnitud a los ensayos de muros CLT con conectores convencionales frente a cargas cíclicas. Además, los cortes basales, rigideces y desplazamientos en modelos de estructuras CLT fueron similares a los ensayos a escala real en estructuras convencionales de CLT ante registros sísmicos. Por lo tanto, se concluye que es posible modelar distintas estructuras de paneles CLT con conectores convencionales ante distintos tipos de cargas. En general los modelos no lineales de estructuras CLT con conectores convencionales que utilizan el sistema constructivo tipo plataforma, sirvieron para comparar y proyectar el desempeño esperado de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía.

Los modelos de muros CLT con disipadores de energía ante cargas cíclicas lograron limitar el corte a un valor fijo cuando los disipadores se activan al alcanzar su capacidad de diseño. Se llegó a obtener de los resultados numéricos bastante similitud para las curvas de corte-desplazamiento que se definieron en la fase de diseño de los disipadores, donde se idealizó el movimiento de los muros como cuerpos rígidos que pivotean en uno de sus extremos inferiores.

Los modelos de muros CLT con disipadores de energía ante registros sísmicos pudieron reducir el corte basal a los valores de diseño propuestos, corroborando la eficacia de las ecuaciones desarrolladas para definir las fuerzas de diseño en los disipadores, las cuales definen finalmente el corte objetivo. Se compararon las respuestas de los muros con disipadores con aquellos con conectores convencionales, observándose una disminución en el corte basal, reducción que depende de las relaciones de aspecto en los paneles y de la elección de una adecuada capacidad de diseño de los disipadores (como indican las relaciones matemáticas propuestas). Sin embargo, se debe cuidar que el disipador friccional no alcance el límite de su capacidad de deslizamiento, puesto que en esos casos se observó un aumento repentino en la rigidez y corte basal de los muros. La energía disipada en los muros con disipadores de energía aumentó en comparación con los que poseen conectores convencionales, lo cual se debe a que los *drifts* fueron mayores y se logró disipar más energía mediante la acción de los disipadores.

En los modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía de uno, dos y tres pisos sometidos a análisis con cargas laterales cíclicas y con el registro sísmico de Kobe, se observó que los cortes basales se redujeron a los valores propuestos de 45%, 30% y 25% del peso total de las estructuras de uno, dos y tres pisos respectivamente, corroborándose la eficacia del método propuesto para definir las fuerzas de diseño en los disipadores. Se comprobó al igual que en los análisis para muros individuales, que al limitar el deslizamiento de los disipadores friccionales en las estructuras el corte y la rigidez aumentaron drásticamente cuando los disipadores llegaron al límite de su deslizamiento, por lo que se debe cuidar que los disipadores no alcancen tal límite. Los cortes basales de los modelos de estructuras CLT que utilizaron el sistema *balloon* con disipadores de energía de uno, dos y tres pisos lograron reducirse en promedio un 60% para el sismo de Kobe en comparación con los cortes obtenidos de los mismos modelos, pero con conectores convencionales que utilizan el sistema plataforma, mientras que las aceleraciones se redujeron en promedio un 22%. Los *drifts* alcanzados en las estructuras con disipadores de energía no superaron el 2,4%, pero es necesario mencionar que el desplazamiento lateral depende en gran medida del corte objetivo que se quiere alcanzar, porque al disminuir el corte los desplazamientos aumentan, por lo cual es necesario analizar cada estructura en particular para llegar a un buen balance entre el corte que se quiere lograr y el desplazamiento permitido. Se calculó la energía total de deformación (energía elástica más la

energía disipada) en los modelos de estructuras de uno hasta tres pisos con disipadores de energía, observándose una disminución promedio de un 30% en comparación con los modelos de las mismas estructuras con conectores convencionales. Esto se debe principalmente a que los cortes obtenidos al agregar disipadores disminuyeron hasta tres veces con respecto a las estructuras convencionales, por tanto, la energía disipada fue menor.

Los modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía de cuatro, cinco y siete pisos demostraron que es posible limitar el corte basal a los valores que indican las relaciones matemáticas propuestas en la investigación, verificación que fue realizada para registros sísmicos chilenos y extranjeros de variada amplitud y contenido frecuencial. Específicamente para la estructura de siete pisos que utiliza el sistema *balloon*, se pudo disminuir la aceleración máxima de los pisos para el sismo de Kobe en comparación con un ensayo realizado en una mesa vibradora a escala real en una estructura similar, pero que utilizó conectores convencionales. La aceleración registrada en el ensayo fue de 3,76 g (muy altas incluso para habitar el edificio), mientras que en el modelo con disipadores se llegó a una aceleración máxima de 1,09 g, lográndose una reducción notable de un 71%, lo que indica que para estructuras CLT de mediana altura, el sistema constructivo *balloon* con disipadores de energía es efectivo para reducir las aceleraciones en relación a la construcción convencional en CLT y, por ende, disminuir los daños luego de un evento sísmico. Los *drifts* en las estructuras de cuatro a siete pisos con disipadores de energía llegaron a un valor máximo de 1,9%.

Una de las observaciones importantes de los resultados de las múltiples simulaciones fue comprobar que la rigidez de los muros influye considerablemente en la efectividad de la metodología propuesta para estimar el corte de diseño, puesto que al utilizar muros con razón de aspecto muy bajos, no se logra el comportamiento esperado y no se puede limitar el corte al valor deseado. Esto ocurre, principalmente, porque en muros muy esbeltos comienzan a dominar otros modos de vibración que no representan el movimiento de cuerpo rígido en los paneles, supuesto desarrollado en esta investigación para definir el corte basal de diseño. Este fenómeno fue controlado, aumentando el largo de los muros y, por ende, su rigidez, con lo que se pudo llegar al valor del corte basal propuesto. Por otro lado, en varios de los modelos realizados en estructuras CLT con disipadores que utilizan el sistema *balloon*, se observó un *peak* repentino en la fuerza de

corte, corroborándose que el momento en que éste se produce coincide con el momento en que los muros impactan con la fundación después de pivotar. Por lo tanto, no es recomendable limitar el corte a porcentajes tan bajos, ya que el aumento en el *drift* puede generar *peaks* en el corte basal.

Los modelos con conectores convencionales tienen una rigidez alta y los cortes por piso son muy elevados, por lo que se necesita una gran cantidad de conectores que pueden transmitir dichas fuerzas. La inclusión de disipadores da más ductilidad a las estructuras y permite disminuir las fuerzas de corte y la cantidad de conectores convencionales que complementan una estructura CLT construida con el sistema *balloon*. Por otro lado, la disminución de las aceleraciones en las estructuras CLT con disipadores de energía puede evitar daños en los contenidos de los edificios luego de un evento sísmico. Con respecto a la disipación de energía, se puede concluir que ésta se concentra principalmente en los dispositivos disipadores y no en los conectores convencionales, los cuales ante varios ciclos de carga van perdiendo sus capacidades. Así se evita tener que cambiar anclajes y conectores que sufren daños ante cargas sísmicas elevadas. En el caso de los disipadores de energía, éstos no sufren mayores daños y pueden seguir funcionando luego de un movimiento sísmico.

Se puede decir que los modelos CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía no lineales cumplieron con el objetivo de poder representar el comportamiento real de estructuras CLT de distinta cantidad de pisos. Se recomienda siempre analizar cada estructura con registros que representen la sismicidad local de la zona donde serán emplazadas las edificaciones, a efecto de predecir de la mejor manera posible cuáles serán los cortes y desplazamientos alcanzados. Se debe intentar llegar a un diseño óptimo que impida tener *peaks* muy altos en los cortes y mantener desplazamientos que permitan hacer trabajar a los disipadores, pero no excesivos que puedan activar efectos de segundo orden y poner en riesgo la estructura. Esta primera investigación permite posicionar el sistema constructivo tipo *balloon* en estructuras de madera de mediana altura, utilizando CLT como un potencial sistema constructivo con ventajas frente al sistema tipo plataforma. Este sistema constructivo no está muy explorado para edificios de madera en general, pero con la inclusión de disipadores de energía se logran obtener buenos resultados del punto de vista estructural. Con el sistema *balloon* se puede aprovechar de mejor

manera la disipación de energía, debido a que se puede lograr un movimiento de pivoteo regular en toda la altura de los paneles haciendo trabajar a los disipadores conjuntamente.

Como líneas futuras de investigación se pueden mencionar los siguientes temas:

- Realizar ensayos a escala real en los disipadores de energía propuestos en paneles CLT fabricados con pino radiata y obtener las histéresis de éstos, comparando los resultados con los modelos realizados en este trabajo y recalibrarlos si es necesario. Investigar sobre las pérdidas de fuerza de tensión que pueden presentarse en los pernos de los disipadores friccionales producto del *creep* en la madera y proponer soluciones factibles.
- Realizar ensayos a escala real de muros CLT ante cargas laterales, incorporando los disipadores de energía y analizar su comportamiento. Comparar los resultados con los modelos realizados en este trabajo e incorporar datos que permitan mejorar la modelación.
- Generar modelos no lineales de distintos edificios con conectores convencionales y con disipadores de energía variando plantas, ejes estructurales y muros. Aplicar diferentes registros sísmicos a los utilizados en esta tesis para poder tener una mayor cantidad de datos que puedan confirmar las conclusiones obtenidas.
- Analizar comportamientos locales en muros CLT, como, por ejemplo, el efecto de la compresión en los paneles a nivel de fundación al momento del balanceo o el efecto de la aparición de *peaks* repentinos en el corte basal cuando los muros impactan la fundación.
- Analizar y probar de manera tangible las soluciones constructivas que permitan llevar a cabo el sistema propuesto en esta investigación. Por ejemplo, la solución constructiva del apoyo de la losa en los muros para estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon*.
- Construir un prototipo de estructura CLT, utilizando el sistema *balloon* a efecto de visualizar aspectos constructivos y detallamiento estructural.

REFERENCIAS

ANSI (2011) **Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. ANSI/APA PRG 320-2011.** American National Standards Institute. Nueva York. Estados Unidos.

Blass, H. y P. Fellmoser (2004) Design of solid wood panels with cross layers. **Cátedra de Ingeniería de la Madera y construcción de edificios, University of Karlsruhe.** Karlsruhe. Alemania.

Blass, H. y T. Uibel (2006) Load carrying capacity of joints with dowel type fasteners in solid wood panels. **International Council for Research and Innovation in Building and Construction Working Commission W18 - Timber Structures.** Florencia. Italia. Agosto.

Blass, H. y T. Uibel (2007) Edge joints with dowel type fasteners in cross laminated timber. **International Council for Research and Innovation in Building and Construction Working Commission W18 - Timber Structures.** Bled. Eslovenia. Agosto.

Blass, H. y T. Uibel (2014) **Joints with Dowel Type Fasteners in CLT Structures.** FH Aachen University of Applied Sciences, Karlsruhe Institute of Technology. Alemania.

Castro, F. (2012) **Primer Premio Concurso Internacional Vivienda Social “Una Comunidad para Crecer en Via Cenni” / Rossiprodi Associati.** (<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-214646/primer-premio-concurso-internacional-vivienda-social-una-comunidad-para-crecer-en-via-cenni-rossiprodi-associati>). Visitado el 16/08/2017.

Ceccotti, A., C. Sandhaas, M. Okabe, M. Yasumura, C. Minowa y N. Kawai (2013) SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics.** **42(13).** 2003-2021.

Ceccotti, A., C. Sandhaas y M. Yasumura (2010) Seismic behaviour of multistorey cross-laminated timber buildings. **Proceedings of the International Convention of Society of Wood**

Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe. Ginebra. Suiza. Octubre.

Ceccotti, A., M. Follesa, M. Lauriola y C. Sandhaas (2006) Sofie Project - test results on the lateral resistance of cross-laminated wooden panels. **First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.** Ginebra. Suiza. Septiembre.

Ceccotti, A. y M. Follesa (2006) **Seismic Behaviour of Multi-Storey XLam Buildings.** IVALSAC-CNR. Trento. Italia.

Craft, S. (2011) **Fire Performance of CLT Assemblies.** FPInnovations. Vancouver. Canadá.

CSI (2015) **SAP2000 Versión 18.1.1.** Computers and Structures Inc. Berkeley.

Dinehart, D., R. Hoffman y A. Sekin (2004) Viscoelastic hold-down device for wood shear walls. **8th World Conference on Timber Engineering.** Lahti. Finlandia. Junio.

Dujic, B. (2006) Dynamic testing of two different timber wall construction systems. **COST E29, Innovative Timber and Composite Elements/Components for Buildings.** Coimbra. Portugal. Noviembre.

Dujic, B., K. Strus, R. Zarnic y A. Ceccotti (2010) Prediction of dynamic response of a 7-storey massive x-lam wooden building tested on a shaking table. **World Conference on Timber Engineering 2010.** Trento. Italia. Agosto.

Dujic, B., M. Fragiaco y I. Sustersic (2011) Elastic and ductile design of multi-storey crosslam massive wooden buildings under seismic actions. **Engineering Structures.** **33(11).** 3043-3053.

Dujic, B., S. Aicher y R. Zarnic (2005) Testing of wooden wall panels applying realistic boundary conditions. **Otto Graf Journal.** **16.** 259-272.

Dujic, B., S. Klobcar y R. Zarnic (2007) Influence of openings on shear capacity of wooden walls. **NZ Timber Design Journal**. **16(1)**. 5-17

Dunbar, A., H. Buchanan y S. Pampanin (2014) **Seismic design of core-wall systems for multi-storey timber buildings**. Thesis for the Degree of Master of Engineering in Earthquake Engineering. Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury. Christchurch, Nueva Zelanda.

EnviroSpec (2017) **Cross Laminated Timber Could be Future of Building**. (<http://envirospec.nz/resources/advanced-tech/cross-laminated-timber-could-be-future-of-building.aspx>). Visitado el 27/07/2017.

Falk, P., I. Darrigrande y M. Moroni (2010) **Análisis del comportamiento de estructuras de acero provistas de disipadores de energía tipo “slotted bolted connection”**. Memoria de Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Santiago.

Fellmoser, P. y H. Blass (2004) Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements. **International Council for Research and Innovation in Building and Construction Working Commission W18 - Timber Structures**. Edinburgo. Reino Unido. Agosto.

FPInnovations (2013) **CLT handbook: Cross-laminated timber**. U.S. Edition. Pointe-Claire.

Franco, J. T. (2013) **Se Inaugura en Australia el Edificio de Madera Laminada más Alto del Mundo**. (<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-261048/se-inaugura-en-australia-el-edificio-de-madera-laminada-mas-alto-del-mundo>). Visitado 16/08/2017.

Fragiacomo, M., C. Amadio, G. Rinaldin y L. Sancin (2012) Non-linear modelling of wooden light-frame and x-lam structures. **World Conference on Timber Engineering 2012**. Auckland. Nueva Zelanda. Julio.

Frangi, A., G. Bochicchio y A. Ceccotti (2008) **Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building**. CNR-IVALSA. Trento. Italia.

Gagnon, S. y M. Mohammad (2011) **Structural Performance and Design of CLT Building**. FPInnovations. Moncton. Canadá.

Ganey, R. (2015) **Seismic design and testing of rocking cross laminated timber walls**. A Thesis for the Degree of Master of Science in Civil Engineering. Department of Civil Environmental Engineering, University of Washington. Washington. Estados Unidos.

Gavric, I., G. Rinaldin, C. Amadio, M. Fragiaco y A. Ceccotti (2012a) Experimental-numerical analyses of the seismic behaviour of cross-laminated wall systems. **World Conference on Earthquake Engineering 2012**. Lisboa. Portugal. Septiembre.

Gavric, I., M. Fragiaco y A. Ceccotti (2012b) Strength and deformation characteristics of typical x-lam connections. **World Conference on Timber Engineering 2012**. Auckland. Nueva Zelanda. Julio.

Gavric, I., M. Fragiaco y A. Ceccotti (2015) Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. **Materials and Structures**. **48(6)**. 1841-1857.

Gavric, I., M. Fragiaco, M. Popovski y A. Ceccotti (2014) Behaviour of cross-laminated timber panels under cyclic loads. **Rilem Bookseries, Materials and Joints in Timber Structures**. **9**. 689-702.

González, P., E. Saavedra, E. Pérez, C. Burgos, F. Piña y M. Wagner (2014) **Sistema Constructivo en Madera Contralaminada para Edificios**. CLT Chile. Santiago.

Hashemi, A., W. Loo, R. Masoudnia, P. Zarnani y P. Quenneville (2016) Ductile cross laminated timber (CLT) platform structures with passive damping. **World Conference on Timber Engineering 2016**. Viena. Austria. Agosto.

Hernández, S. y Y. Chui (2012) Vibrational performance of cross laminated timber floors. **World Conference on Timber Engineering 2012**. Auckland. Nueva Zelanda. Julio.

KLH UK (2017) **Stadthaus Murray Grove**. (<http://www.klhuk.com/portfolio/residential/stadthaus,-murray-grove.aspx>). Visitado el 16/08/2017.

Kovacs, M. y L. Wiebe (2016) Controlled rocking cross-laminated timber walls for regions of low-to-moderate seismicity. **World Conference on Timber Engineering 2016**. Viena. Austria. Agosto.

Latour, M., G. Rizzano y G. Torello (2012) Seismic performance of cross-laminated timber panel buildings with dissipative connections. **World Conference on Earthquake Engineering 2012**. Lisboa. Portugal. Septiembre.

Lauriola, M. y C. Sandhaas (2006) **Quasi-Static and Pseudo-Dynamic Tests on XLAM Walls and Buildings**. IVALSA-CNR. Trento. Italia.

Loo, W., P. Quenneville y N. Chouw (2011) **Seismic Behaviour of Timber Shear Walls with Load Limiting Slip-Friction Connectors**. Faculty of Engineering, The University of Auckland. Auckland, Nueva Zelanda.

Loo, W., P. Quenneville y N. Chouw (2012a) A numerical approach for simulating the behaviour of timber shear wall. **Structural Engineering and Mechanics**, **42 (3)**. 383-407.

Loo, W., P. Quenneville y N. Chouw (2012b) A numerical study of the seismic behaviour of timber shear walls with slip-friction connectors. **Engineering Structures**. **34**. 233-243.

Mestek, P., H. Kreuzinger y S. Winter (2008). Design of cross laminated timber (CLT). **Chair of Timber Structures and Building Construction, Technical University Munich**. Munich. Alemania.

- Mohammad, M. (2011) **Connections in CLT Assemblies**. FPIInnovations. Vancouver. Canadá.
- Pei, S., J. Dolan, H. Liu, J. Van de Lindt y J. Ricles (2012a) Active damping for cross-laminated timber structures to improve seismic performance. **World Conference on Timber Engineering 2012**. Auckland. Nueva Zelanda. Julio.
- Pei, S., J. W. Van de Lindt, M. Popovski, J. W. Berman, J. D. Dolan, J. Ricles, R. Sause, H. Blomgren y D. R. Rammer (2014) Cross-laminated timber for seismic regions: progress and challenges for research and implementation. **Journal of Structural Engineering**. **142(4)**.
- Pei, S., M. Popovski y J. W. van de Lindt (2012b) Seismic design of a multi-story cross laminated timber building based on component level testing. **World Conference on Timber Engineering 2012**. Auckland. Nueva Zelanda. Julio.
- Pei, P., M. Popovski y J. W. van de Lindt (2013) Analytical study on seismic force modification factors for cross-laminated timber buildings. **Canadian Journal of Civil Engineering**. **40(9)**. 887-896.
- Perez, E. (2014) **Estudios de Ingenieria para Introducir en Chile un Sistema Constructivo de Rapida Ejecucion para Edificios de Mediana Altura, Utilizando Elementos de Madera Contralaminada**. PROYECTO Innova Chile CORFO 12BPC2-13553.
- Popovski, M. (2010) **Seismic Performance of CLT Construction**. FPIInnovations. Quebec. Canadá.
- Popovski, M. y E. Karacabeyli (2012) Seismic behaviour of cross-laminated timber structures. **World Conference on Earthquake Engineering 2012**. Lisboa. Portugal. Septiembre.
- Pozza, L., D. Trutalli, A. Polastri y A. Ceccotti (2013) Seismic design of CLT buildings: definition of the suitable q factor by numerical and experimental procedures. **Second International Conference on Structures and Architecture**. Guimaraes. Portugal. Julio.

Pozza, L., R. Scotta, D. Trutalli, M. Pinna, A. Polastri y P. Bertoni (2014) Experimental and numerical analyses of new massive wooden shear-wall systems. **Buildings. 4(3)**. 355-374.

Quebec Wood Export Bureau (2017) **Massive Wood Frame and Engineered Wood**. (<http://www.quebecwoodexport.com/en/produits-3/wood-construction/glulam-2>). Visitado el 27/07/2017.

Rinaldin, G., C. Amadio y M. Fragiacomio (2013) A component approach for the hysteretic behaviour of connections in cross-laminated wooden structures. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 42(13)**. 2023-2042.

Schneider, J., S.F. Stiemer, S. Tesfamariam, E. Karacabeyli y M. Popovski (2012) Damage assessment of cross laminated timber connections subjected to simulated earthquake loads. **World Conference on Timber Engineering 2012**. Auckland. Nueva Zelanda. Julio.

Stojmanovska, M. y V. Hristovski (2008) Experimental and analytical investigations of solid wooden wall panel elements subjected to lateral loads. **The 14th World Conference on Earthquake Engineering**. Beijing. China. Octubre.

Stojmanovska, M., V. Hristovski y B. Dujic (2012) Experimental research of xlam wooden system specimen KLH2-preliminary results. **World Conference on Earthquake Engineering 2012**. Lisboa. Portugal. Septiembre.

Storaenso (2017) **Via Cenni**. (<http://buildingandliving.storaenso.com/news/rethink-articles/viacenni>). Visitado el 27/07/2017.

Sustersic, I., M. Fragiacomio y B. Dujic (2012) Influence of the connection behaviour on the seismic resistance of multi-storey crosslam buildings. **World Conference on Timber Engineering 2012**. Auckland. Nueva Zelanda. Julio.

Symans, M., W. Cofer, Y. Du y K. Fridley (2001) Fluid dampers for seismic protection of woodframe structures. **2001 Structures Congress and Exposition, ASCE**. Washington D.C. Estados Unidos. Mayo.

Waugh Thistleton Architects (2017) **Murray Grove The Original Timber Tower**. (<http://waughthistleton.com/murray-grove/>). Visitado el 27/07/2017.

Weckendorf, J. y I. Smith (2012) Dynamic characteristics of shallow floors with cross-laminated-timber spines. **World Conference on Timber Engineering 2012**. Auckland. Nueva Zelanda. Julio.



ANEXOS

ANEXO 2.1 Métodos analíticos para el diseño de paneles CLT

Método gamma: Este método también es conocido como el de vigas con uniones mecánicas, debido a que, principalmente, se toman en cuenta los efectos de corte de la interfaz de unión entre capas, dependiendo si dicha unión es rígida o flexible. Para considerar el efecto de los dos tipos de uniones, el método utiliza un factor γ , así se toma en cuenta la rigidez a corte de las capas transversales (G_r). Las capas longitudinales se consideran vigas conectadas con uniones imaginarias con una rigidez igual a la rigidez de corte de las capas transversales. Solo utiliza las capas que actúan en la dirección de la carga (Figura A.2.1 muestra el efecto del factor γ). La rigidez efectiva a flexión se calcula con la siguiente formula:

$$(EI)_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2), \quad (\text{A.2.1})$$

donde:

E_i : Modulo de elasticidad de cada capa.

I_i : Inercia de cada capa.

A_i : Área de cada capa.

a_i : distancia desde el centro de cada capa el centro del panel.

γ_i : factor de rigidez de la unión de cada capa.

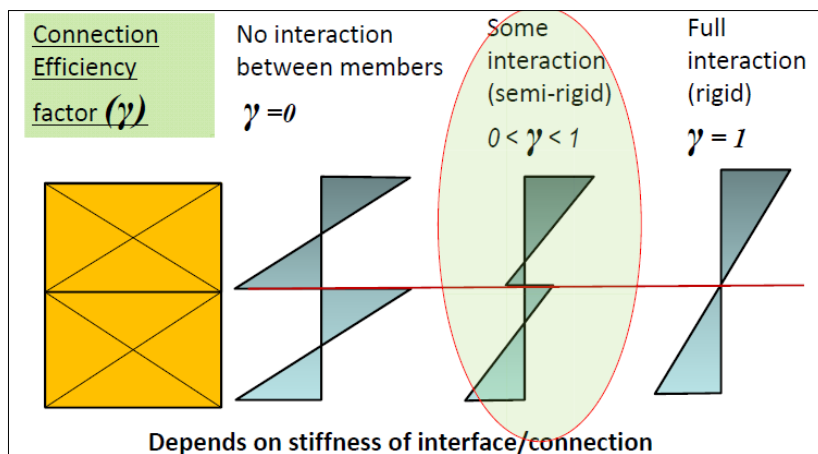
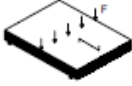
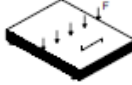

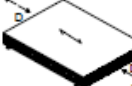




Figura A.2.1 Factores de unión de método gamma (Gagnon y Mohammad, 2011)

Método k: También llamada teoría para materiales compuestos, se basa en el método utilizado para madera contrachapada, pero modificada. Acá se utiliza la rigidez de todas las capas involucradas y la rigidez perpendicular a la fibra se considera como 30 veces menos que la rigidez paralela a la fibra. De esta forma, se calculan factores de composición (k_i) para distintas configuraciones de carga con los que se calcula la rigidez efectiva. En la Figura A.2.2, se ven algunos ejemplos de factores k_i , los que se obtienen del trabajo de Blass y Fellmoser (2004).

	k_i
	$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0} \right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0} \right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
 	$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0} \right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$
 	$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} + \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0} \right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$

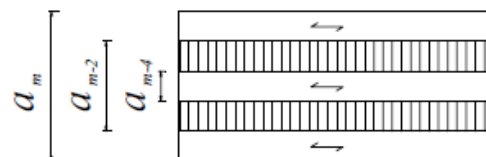


Figura A.2.2 Ejemplos de factores k para distintas configuraciones de carga (Blass y Fellmoser, 2004)

ANEXO 3.1 Modelos de estructuras CLT con conectores convencionales

Los conectores convencionales fueron modelados en el *software* SAP2000, donde cada conector se definió como un elemento tipo *link* no lineal (elementos de enlace). Se utilizó una curva multi-linear plástica no lineal con el modelo más completo que existe en el *software*, el cual recibe el nombre de “pivote”. Este modelo considera la degradación de rigidez, donde la carga y descarga tienden a dirigirse hacia puntos denominados pivotes. Se asignaron los parámetros alfa y beta que definen los puntos de pivoteo del modelo. En la Figura A.3.1, se muestra el modelo de “pivote” que contiene el *software*.

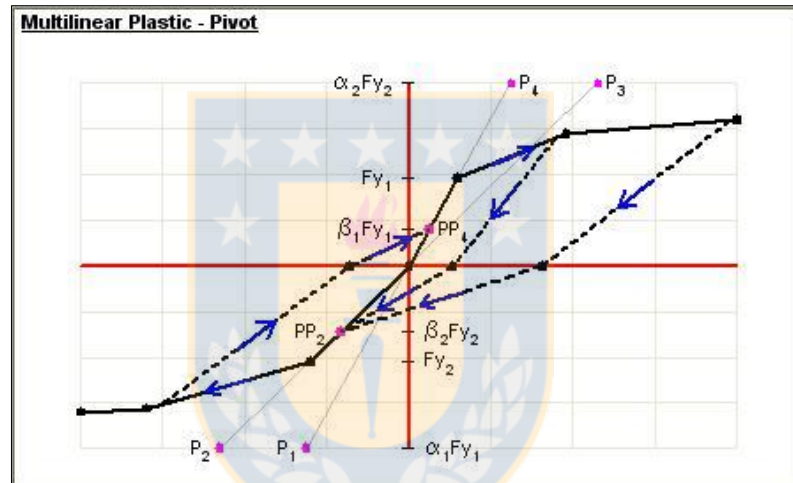


Figura A.3.1 Modelo tipo “pivote” (CSI, 2015)

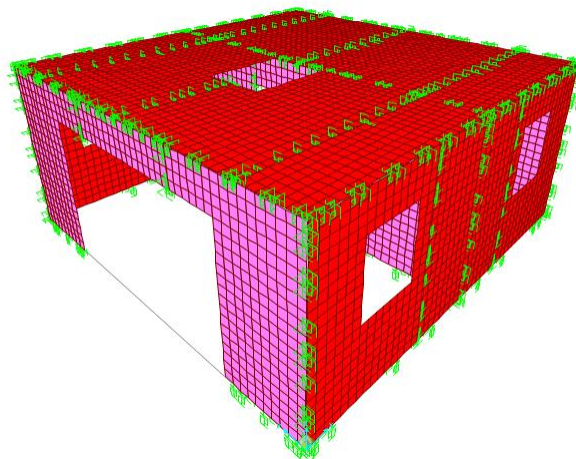


Figura A.3.2 Modelo de estructura de un piso

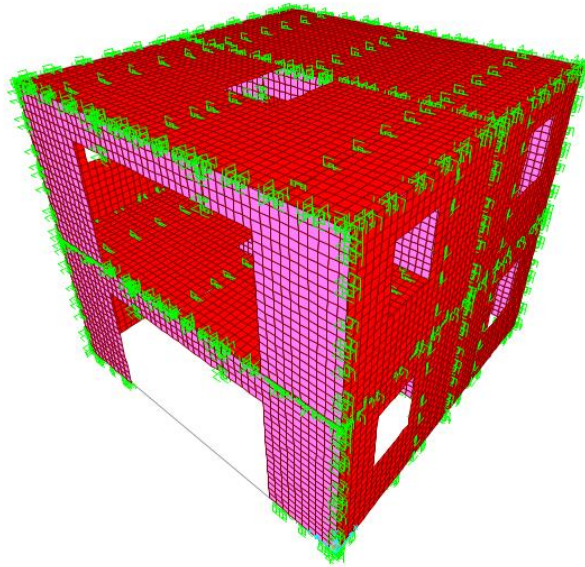


Figura A.3.3 Modelo de estructura de dos pisos

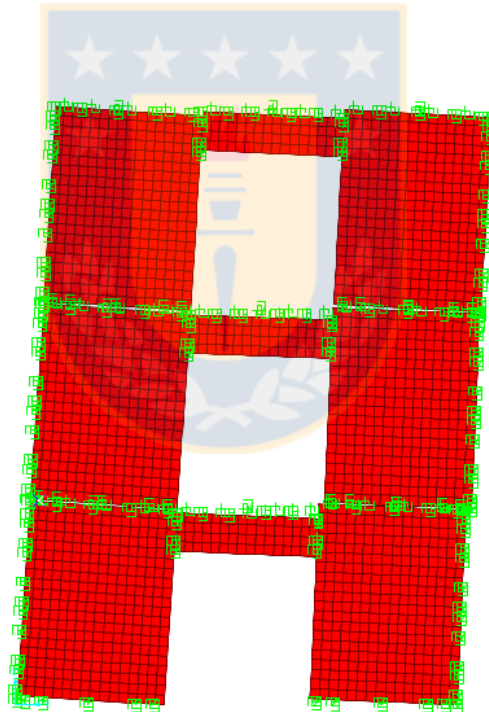


Figura A.3.4 Modelo de estructura de tres pisos deformada lateralmente

En las Figuras A.3.2, A.3.3 y A.3.4, se muestran los modelos de las estructuras CLT de uno, dos y tres pisos con conectores convencionales realizados en el *software* SAP2000.

ANEXO 4.1 Modelos de estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía

La modelación de los disipadores friccionales se realizó utilizando tres tipos de elementos *link*, el primero es un elemento elasto-plástico que representa el momento cuando se produce la tracción, se llega al umbral de fuerza y luego se produce el deslizamiento en el disipador. El segundo es un elemento tipo *gap* que representa el momento en que el disipador está en compresión y el tercero es un elemento tipo *hook*, el que considera una rigidez alta cuando el disipador llega al límite de su deslizamiento. La Figura A.4.1 muestra las tres curvas y el modelo final que resulta de la combinación de todos los *links* utilizados.

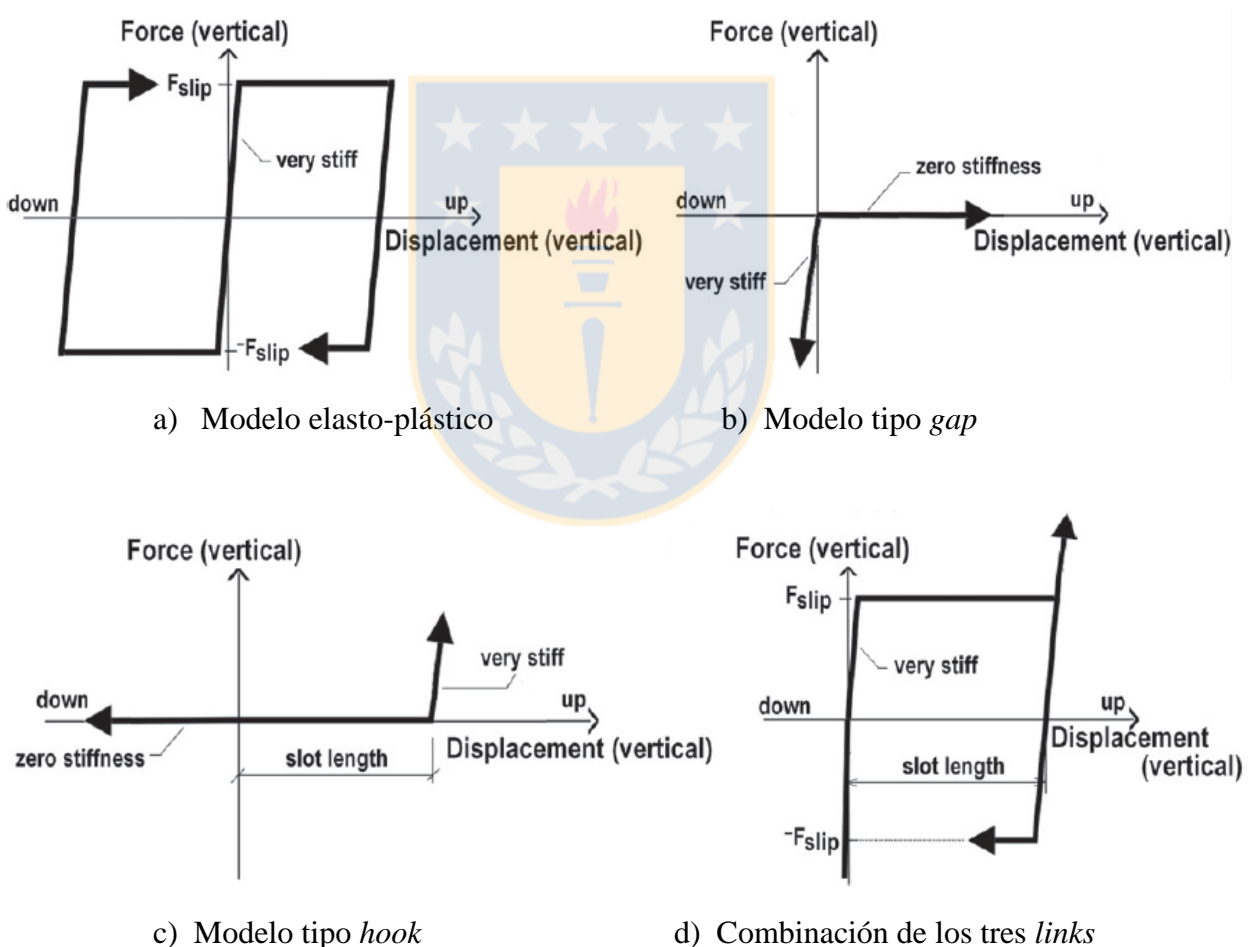


Figura A.4.1 Modelo de disipador friccional (Loo *et al.*, 2012b)

A continuación, en las Figuras A.4.2, A.4.3 y A.4.4, se muestran algunos de los modelos de las estructuras CLT que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía realizados en el *software* SAP2000.

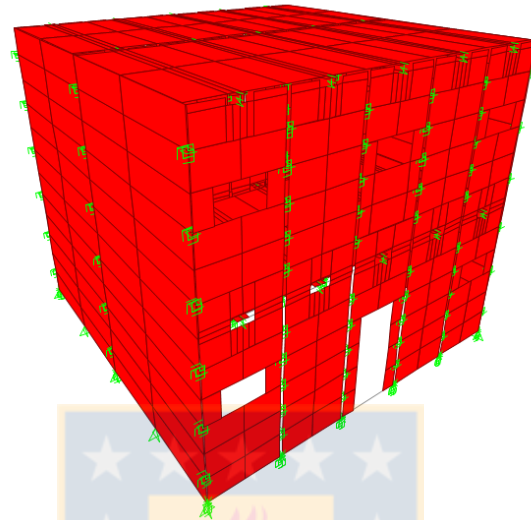


Figura A.4.2 Modelo de estructura de dos pisos con disipadores de energía

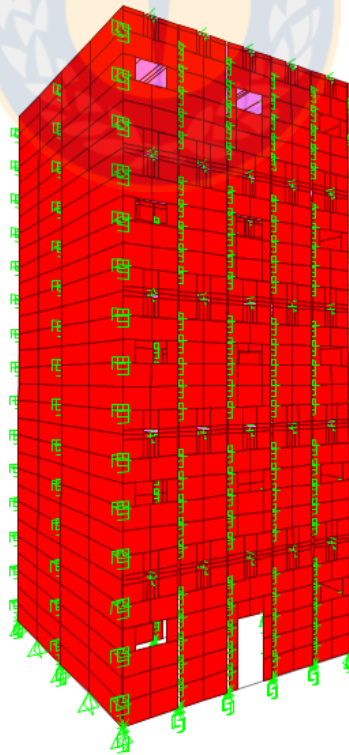


Figura A.4.3 Modelo de estructura de cinco pisos con disipadores de energía

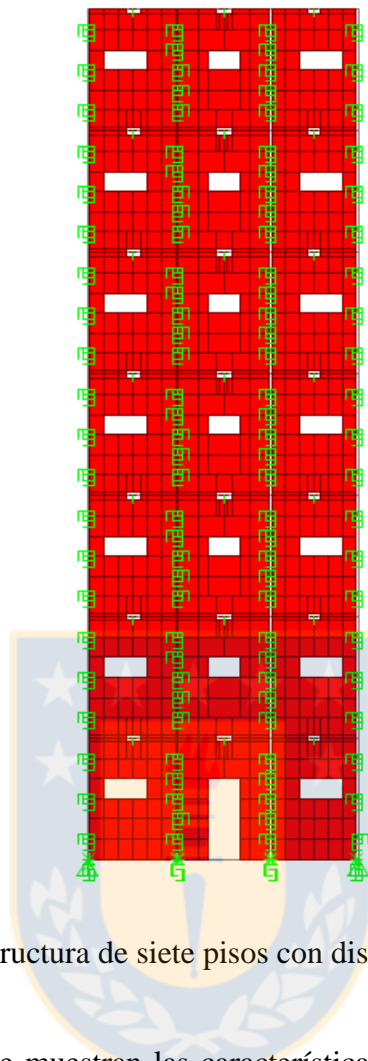


Figura A.4.4 Modelo de estructura de siete pisos con disipadores y muros de 2,3 m de largo

En la siguiente Tabla A.4.1, se muestran las características de todos los modelos realizados en esta investigación para estructuras que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía.

Tabla A.4.1 Modelos realizados para estructuras con disipadores de energía

Tipo Estructura	Lugar aplicación de la carga	Tipo de carga	Carga vertical	Corte objetivo
1 piso	Techo de la estructura	Patrón cíclico de desplazamientos	Corresponde a 3 pisos	45% del peso total
1 piso	Registro de aceleraciones del suelo	Kobe 0,82 g	Corresponde a 3 pisos	45% del peso total
2 pisos	Entrepiso y techo de la estructura	Patrón cíclico de desplazamientos	Corresponde a 3 pisos	30% del peso total

2 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Kobe 0,82 g	Corresponde a 3 pisos	30% del peso total
3 pisos	Entrepiso y techo de la estructura	Patrón cíclico de desplazamientos	Corresponde a 3 pisos	25% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Kobe 0,82 g	Corresponde a 3 pisos	25% del peso total
1 piso	Registro de aceleraciones del suelo	Concepción	Corresponde a 3 pisos	45% del peso total
2 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Concepción	Corresponde a 3 pisos	30% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Concepción	Corresponde a 3 pisos	25% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Concepción	Corresponde a 3 pisos	19% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 1	Corresponde a 3 pisos	25% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 1	Corresponde a 3 pisos	19% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 3	Corresponde a 3 pisos	25% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 3	Corresponde a 3 pisos	19% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 2	Corresponde a 3 pisos	25% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 2	Corresponde a 3 pisos	19% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 2	Corresponde a 3 pisos	16% del peso total
3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 2 amplificado 1,5 veces	Corresponde a 3 pisos	19% del peso total

3 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 2 amplificado 2,0 veces	Corresponde a 3 pisos	19% del peso total
4 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Kobe 0,82g	Corresponde a 4 pisos	20% del peso total
4 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Concepción	Corresponde a 4 pisos	20% del peso total
4 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 2	Corresponde a 4 pisos	20% del peso total
5 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Kobe 0,82g	Corresponde a 5 pisos	20% del peso total
5 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Concepción	Corresponde a 5 pisos	20% del peso total
5 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 2	Corresponde a 5 pisos	20% del peso total
7 pisos	Registro de aceleraciones del suelo	Concepción	Corresponde a 7 pisos	15% del peso total
7 pisos muros 2,3 m	Registro de aceleraciones del suelo	Kobe 0,82g	Corresponde a 7 pisos	15% del peso total
7 pisos muros 2,3 m	Registro de aceleraciones del suelo	Concepción	Corresponde a 7 pisos	15% del peso total
7 pisos muros 2,3 m	Registro de aceleraciones del suelo	Maule 2	Corresponde a 7 pisos	15% del peso total

ANEXO 4.2 Propuesta de apoyo de losa a muros CLT en sistema constructivo tipo *balloon*

Para evitar que la losa rigidizara las estructuras y permitiera a los paneles pivotar libremente, se propusieron dos soluciones que evitan que la losa se fije en todo su contorno en los muros. La primera es la mostrada en la Figura A.4.5, en donde la losa se apoya en un segmento central de cada panel y se utilizan deslizadores que permitan que la losa pueda levantar cuando los muros

pivoteen en su base, y a su vez admitan el levantamiento hasta el límite del deslizador. La idea es apoyar la losa solo en un segmento de cada panel y no en panel completo, lo que hace que el levantamiento en la losa disminuya. Dada la rigidez que tienen las losas de CLT, estas no tendrán mayores deformaciones.

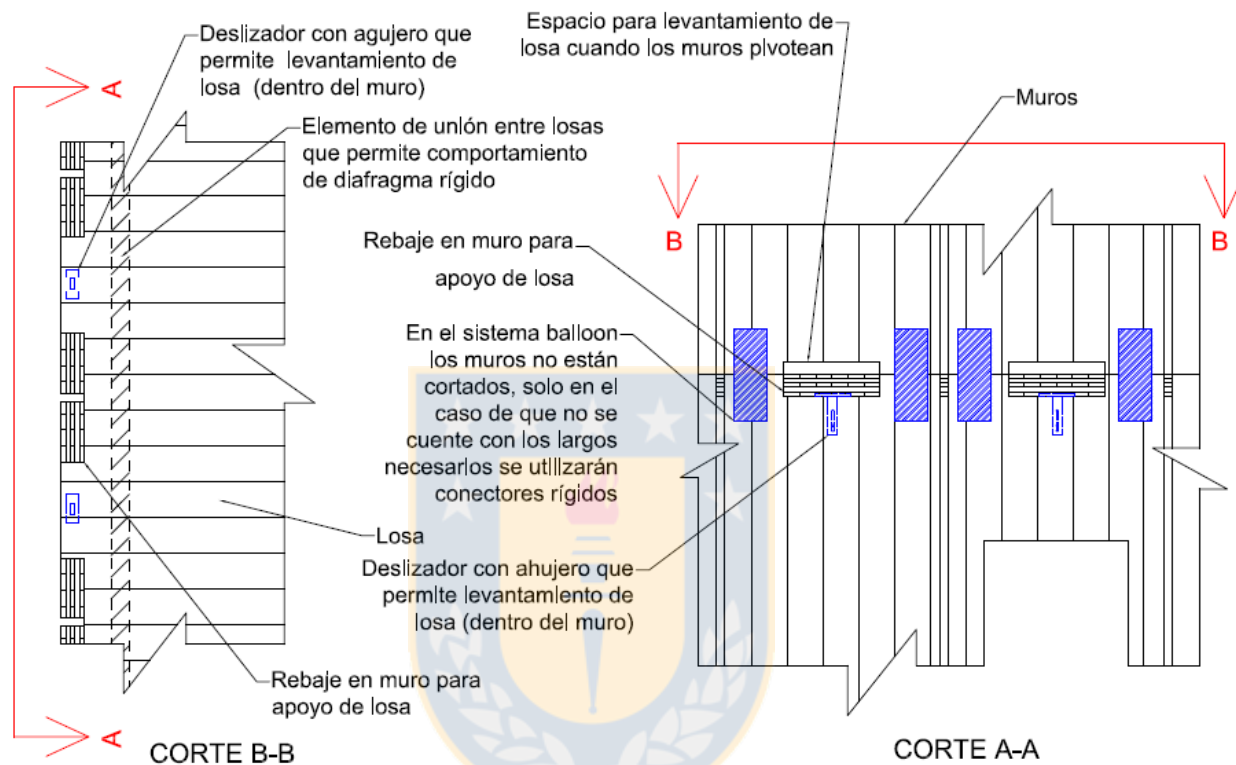


Figura A.4.5 Unión propuesta para apoyo de losa sobre muros

La otra solución propuesta es la mostrada en la Figura A.4.6, la que consiste en unir una viga a cada panel con tornillos autoperforantes instalados de manera diagonal a efecto de obtener una unión rígida y apoyar la losa sobre las vigas. La unión losa-viga debe permitir el libre movimiento vertical de la losa, evitando rigidizar la estructura y permitiendo el pivoteo en los paneles. En ambas propuestas, se debe utilizar algún elemento que una los paneles que forman la losa, lo que asegura el comportamiento de diafragma rígido en todos los pisos. Para mantener la continuidad de los muros en altura, se pueden utilizar paneles completos o también unir segmentos de paneles con conectores rígidos que impidan la deformación en las uniones.

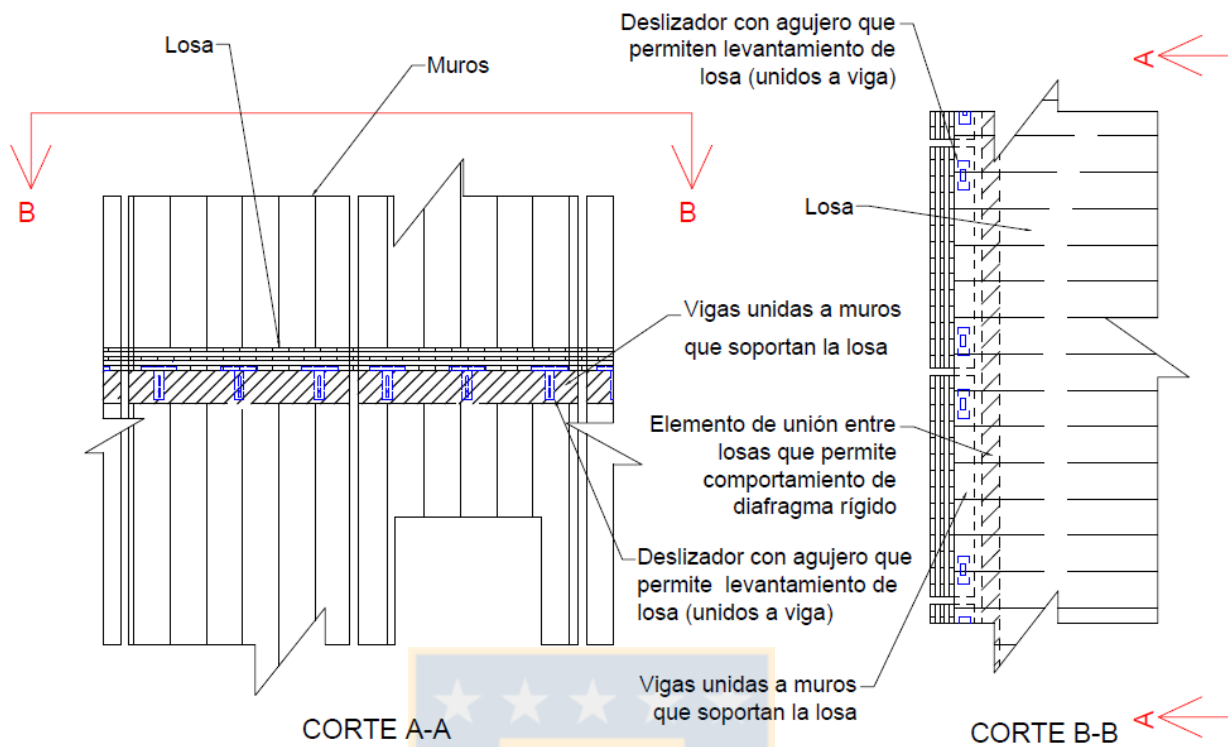
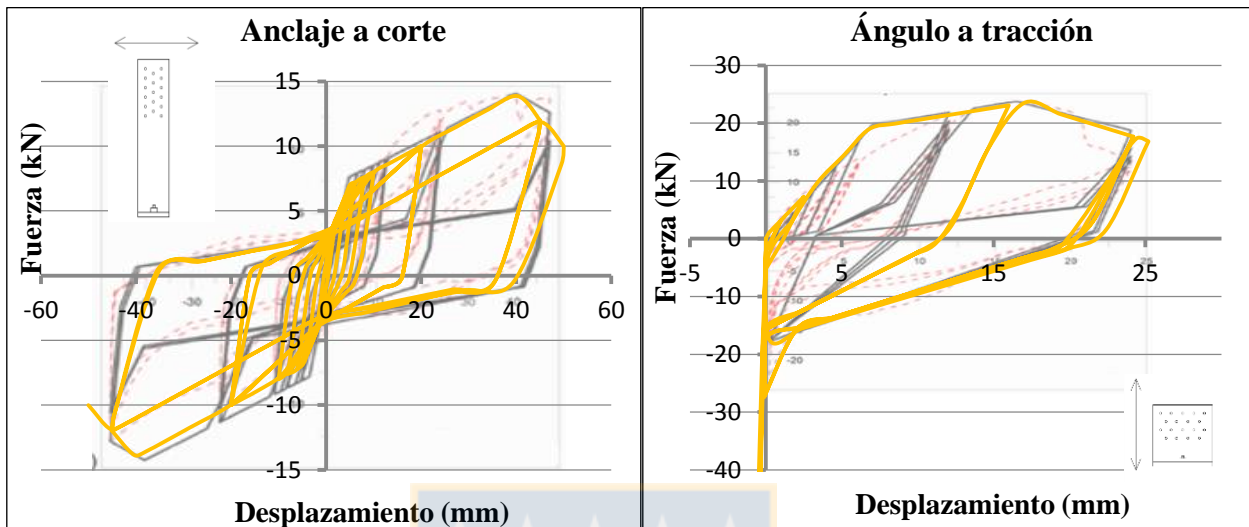


Figura A.4.6 Unión propuesta para apoyo de losa sobre vigas

ANEXO 5.1 Resultados de modelación de ángulos de corte y *hold-downs* para uniones de muro CLT a fundación y a losas

Como se comentó en el Capítulo 3, se modelaron las conexiones con placas metálicas de corte y de tracción para la unión de muros CLT a la fundación y a losas de pisos superiores. Se utilizaron los datos de las rigideces obtenidos por Rinaldin *et al.* (2013), los cuales fueron incorporados a los modelos y sirvieron para calibrar las histéresis de los conectores. En la Figura A.5.1 a), se muestra la curva fuerza-desplazamiento del *hold-down* que sirve para unir los paneles a la fundación, al que se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclicos a tracción y a corte. La figura muestra los resultados para cargas de corte. La Figura A.5.1 b) muestra la curva fuerza-desplazamiento del ángulo metálico que une los extremos de los paneles a la fundación, al que también se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclicos a tracción y a corte. La figura muestra los resultados para cargas de tracción. La Figura A.5.2 a) muestra la curva para la unión tipo *half-*

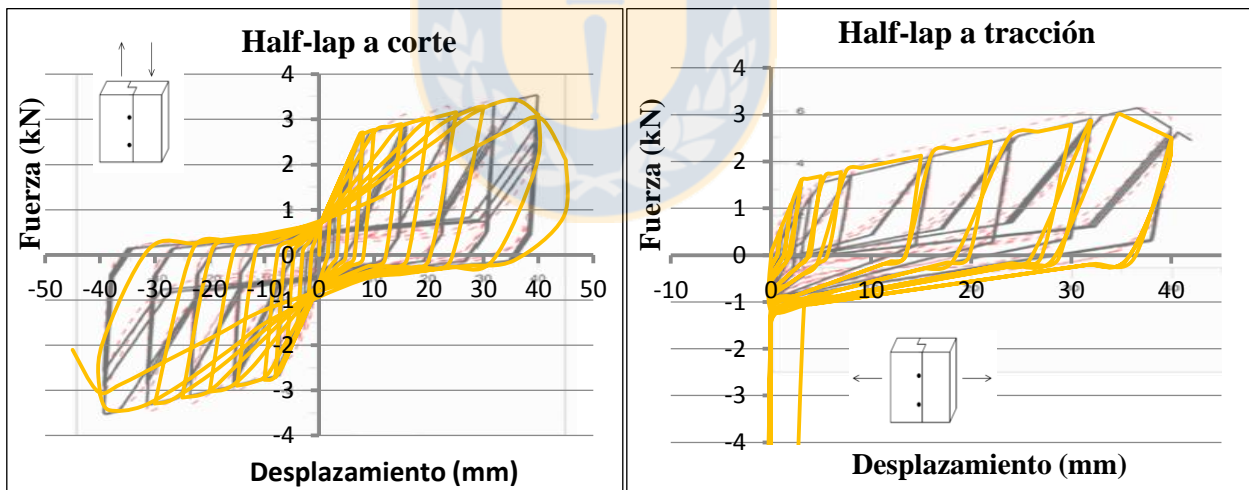
lap que sirve para unir paneles entre sí ante cargas de extracción lateral; y la Figura A.5.2 b), para cargas de extracción directa.



a) Anclaje metálico ante fuerzas de corte

b) Ángulo metálico ante fuerzas de tracción

Figura A.5.1 Curvas fuerza-deformación en *hold-down* y ángulo metálico de corte



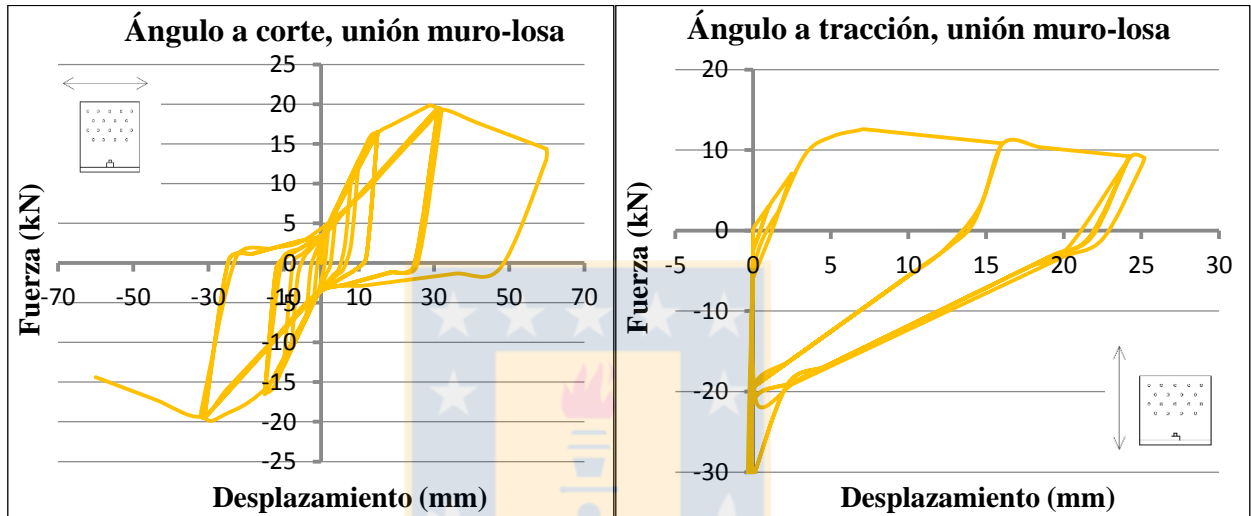
a) *Half-lap* ante fuerzas de extracción lateral

b) *Half-lap* ante fuerzas extracción directa

Figura A.5.2 Curvas fuerza-deformación *half-lap* para uniones de losas y muros

Para las uniones muro-losa, se realizó el mismo procedimiento de modelación utilizado para los conectores convencionales que unen los paneles CLT a la fundación. En la Figura A.5.3, se muestran las curvas fuerza-desplazamiento del conector metálico de corte que sirve para unir los

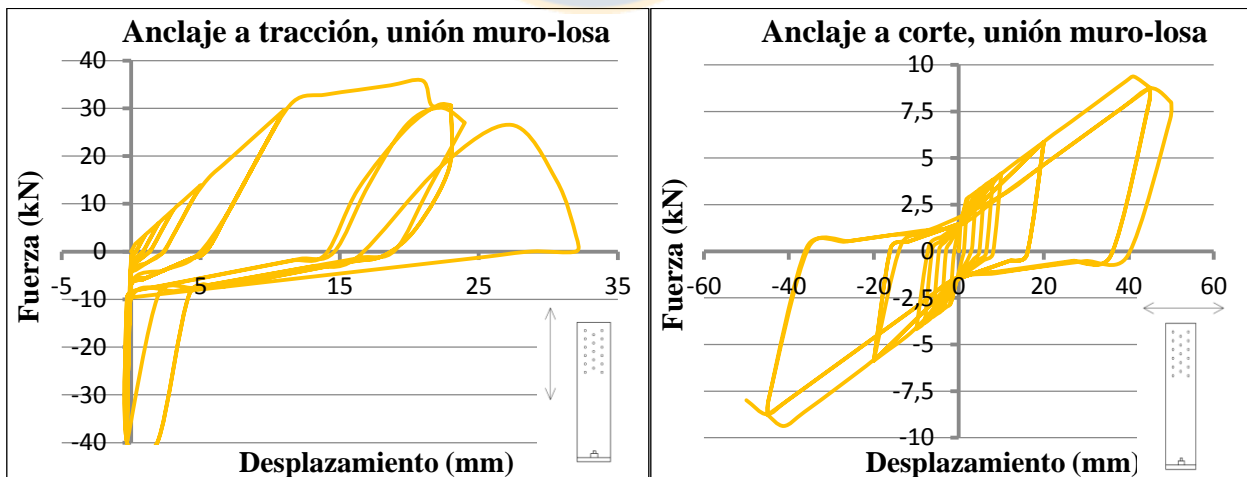
muros a las losas de paneles CLT. Al conector se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclicos a tracción y a corte, en la Figura A.5.3 a), se ve la curva para cargas de corte; y en la Figura A.5.3 b), para cargas de tracción. La Figura A.5.4 muestra las curvas fuerza-desplazamiento del *hold-down* que une los extremos de los muros a las losas CLT, al cual se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclicos a tracción y a corte. En la Figura A.5.4 a), se ve la curva para cargas de tracción; y en la Figura A.5.4 b), para cargas de corte.



b) Ángulo metálico ante fuerzas de corte

b) Ángulo metálico ante fuerzas de tracción

Figura A.5.3 Curvas fuerza-deformación ángulo metálico de corte, unión muro-losa



a) Anclaje metálico ante fuerzas de corte

b) Anclaje metálico ante fuerzas de tracción

Figura A.5.4 Curvas fuerza-deformación anclaje metálico o *hold-down*, unión muro-losa

En las Figuras A.5.1 y A.5.2, se puede ver de fondo una curva de color negro que indica el ensayo experimental mostrado por Rinaldin *et al.* (2013). Esta curva se compara con la obtenida en los modelos realizados en esta investigación, la cual se muestra en color naranja. Se puede observar que en general los modelos se acercan bastante a los utilizados como referencia, ya que las histéresis tienen formas similares.

ANEXO 5.2 Resultados de modelación del muro 1.1 con conectores convencionales

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la modelación del muro 1.1 con conectores convencionales. En la Figura A.5.5, se ve el gráfico que representa el corte basal en el muro 1.1 y el desplazamiento en el nivel superior del mismo, de fondo se observa una curva de color negro que indica el ensayo experimental mostrado por Rinaldin *et al.* (2013), mientras que con línea naranja se muestra la curva del modelo realizado en este trabajo.

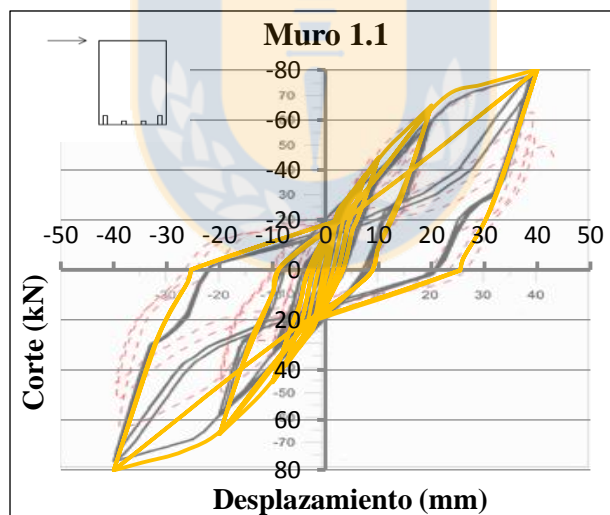


Figura A.5.5 Curva corte-desplazamiento en muros 1.1 con conectores convencionales

Se observa una buena aproximación en el modelo, puesto que la forma de la histéresis en la Figura A.5.5 se acerca bastante a la registrada en el ensayo mostrados por Rinaldin *et al.* (2013). Del comportamiento de este y los demás muros modelados, se puede indicar que tanto los conectores como los paneles CLT están bien aproximados y que pueden ser utilizados para realizar modelos de estructuras de uno o más pisos.

ANEXO 5.3 Resultados de la modelación de estructuras CLT con conectores convencionales

En la Figura A.5.6, se muestra en línea naranja la curva que indica el corte basal y el desplazamiento en el techo del modelo de la estructura de un piso para el análisis cíclico, de fondo en color negro, se puede ver la curva del ensayo descrito por Lauriola y Sandhaas (2006) en la misma estructura que fue modelada. Comparando las curvas, se observó una histéresis similar en su forma, manteniendo las rigideces de carga y descarga.

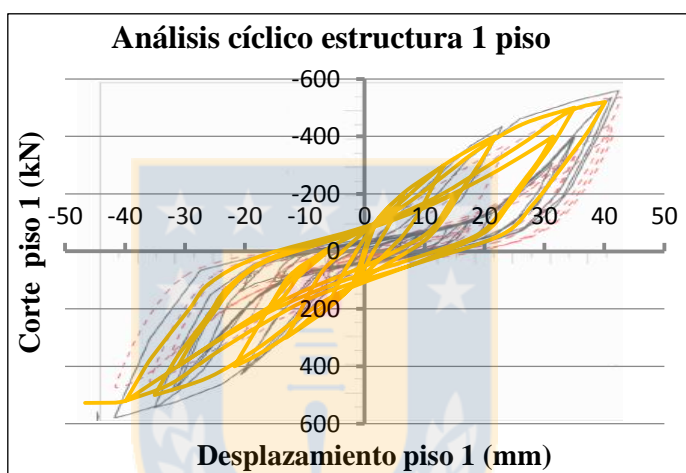


Figura A.5.6 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en estructura un piso

En la Figura A.5.7 a), se muestra en línea naranja el corte basal y el desplazamiento en el primer nivel del modelo de la estructura de dos pisos para el análisis cíclico, de fondo se ve la misma curva que en el fondo de la Figura A.5.6 para el ensayo en la estructura de un piso obtenida por Rinaldin *et al.* (2013). En este caso en la Figura A.5.7 a), se compara el comportamiento del primer piso para el modelo de la estructura de dos niveles con el ensayo descrito por Lauriola y Sandhaas (2006) para la estructura de un piso, debido a que la carga vertical tanto en el modelo como en el ensayo intenta replicar el comportamiento de una estructura de tres pisos. En la Figura A.5.7 b), se muestra el corte en el segundo piso y el desplazamiento relativo del segundo piso en el modelo de la estructura de dos niveles para el análisis cíclico. En el análisis realizado al modelo de dos pisos, se obtuvo un desplazamiento de 49 mm (*drift* 1,5%) en el primer piso y un desplazamiento relativo de 53 mm en el segundo piso (*drift* 1,7%). Los conectores de corte del primer piso tuvieron una deformación lateral de 24 mm y los anclajes del primer piso una

deformación vertical de 24 mm. En el segundo piso, los conectores de corte tuvieron una deformación lateral de 24 mm y los *hold-downs* una deformación vertical de 5 mm.

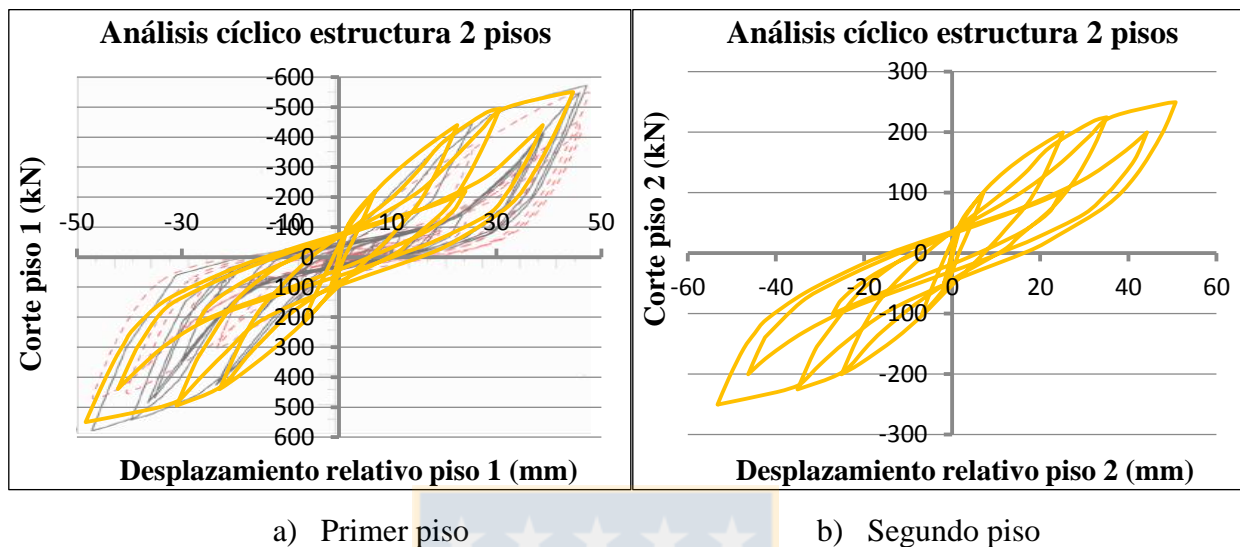


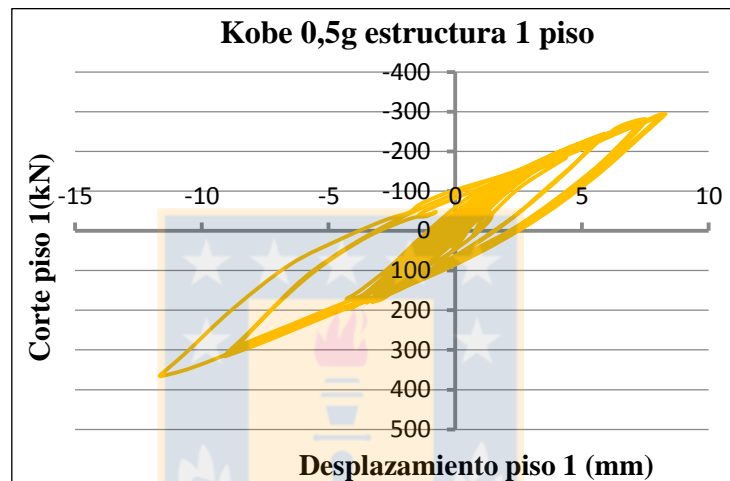
Figura A.5.7 Curvas corte-desplazamiento para análisis cíclico en estructura de dos pisos

En la Figura A.5.8 a), se muestra la curva que indica el corte y el desplazamiento lateral en el techo del modelo de la estructura de un piso con conectores convencionales para el registro de Kobe 0,5g. Se obtuvo un desplazamiento de 12 mm (*drift* 0,38%), una deformación lateral en los conectores de corte de 10 mm y deformación vertical en los anclajes de 3 mm, además, se alcanzó una aceleración máxima de 0,63 g en el techo del modelo. En la Figura A.5.8 b), se ve la energía de deformación en el modelo (correspondiente al área total que encierra la curva del corte-desplazamiento) y la suma de los desplazamientos laterales en el techo del modelo durante la aplicación del sismo, lo que representa la energía de deformación elástica no disipada y la energía disipada por efectos histeréticos de deformación plástica en el modelo.

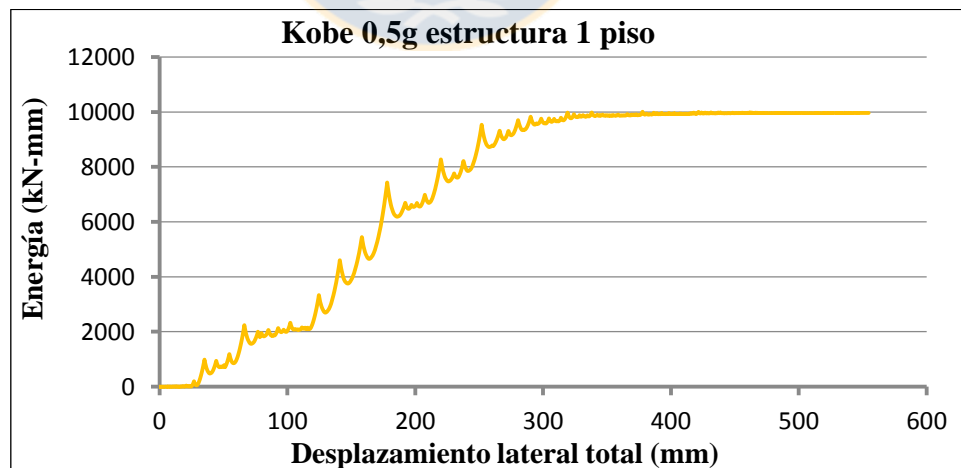
En la Figura A.5.9 a) y A.5.9 b), se muestran las curvas que indican el corte y el desplazamiento lateral en el modelo de la estructura de dos pisos para el primer y segundo nivel respectivamente cuando se aplica el registro de Kobe 0,82g. El desplazamiento lateral en el primer piso alcanzó los 25 mm (*drift* 0,8%), mientras que el desplazamiento relativo en el segundo piso fue de 39 mm (*drift* 1,2%). En el primer piso se obtuvo una deformación lateral en los conectores de corte de 20 mm y en el segundo piso 39 mm, los anclajes tuvieron una deformación vertical de 8 mm. La

Figura A.5.10 muestra en línea naranja la energía total de deformación en el modelo durante el transcurso del registro sísmico. Se alcanzó una aceleración máxima de 1,30 g en la losa del segundo piso.

Por último, en la Figura A.5.11, se muestra la energía total de deformación en el modelo de la estructura de tres pisos con conectores convenciones durante el transcurso del registro sísmico de Kobe 0,82g.



a) Curvas corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,5g en estructura de un piso



b) Curva energía deformación–desplazamiento, registro de Kobe 0,5g en estructura un piso

Figura A.5.8 Resultados de análisis *time-history* para sismo Kobe 0,5g, estructura un piso

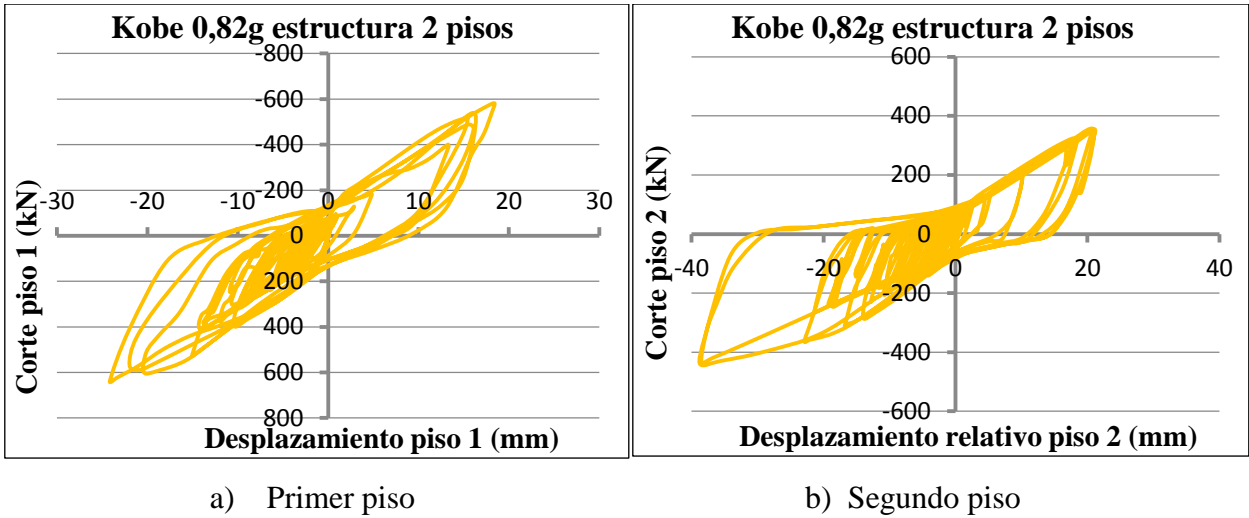


Figura A.5.9 Curvas corte-desplazamiento para análisis *time-history* con sismo Kobe 0,82g, estructura de dos pisos

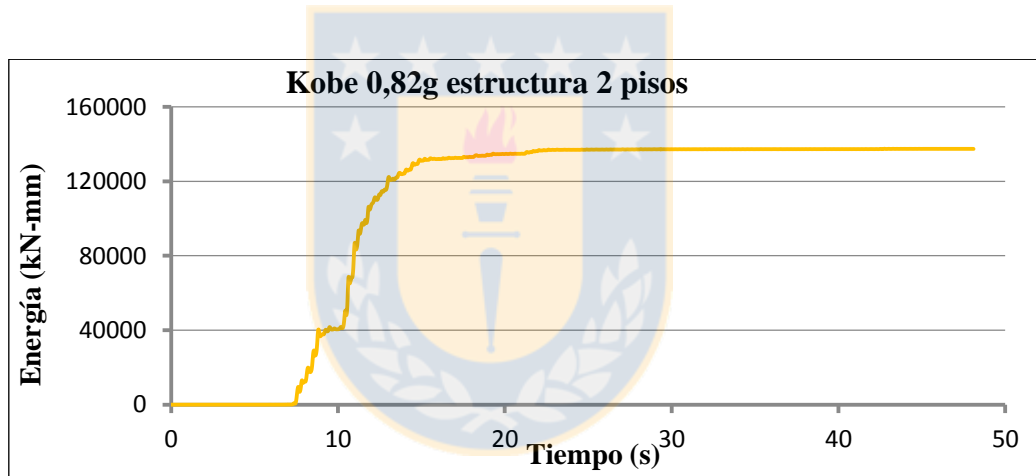


Figura A.5.10 Curva energía deformación-tiempo, registro de Kobe 0,82g en estructura dos pisos

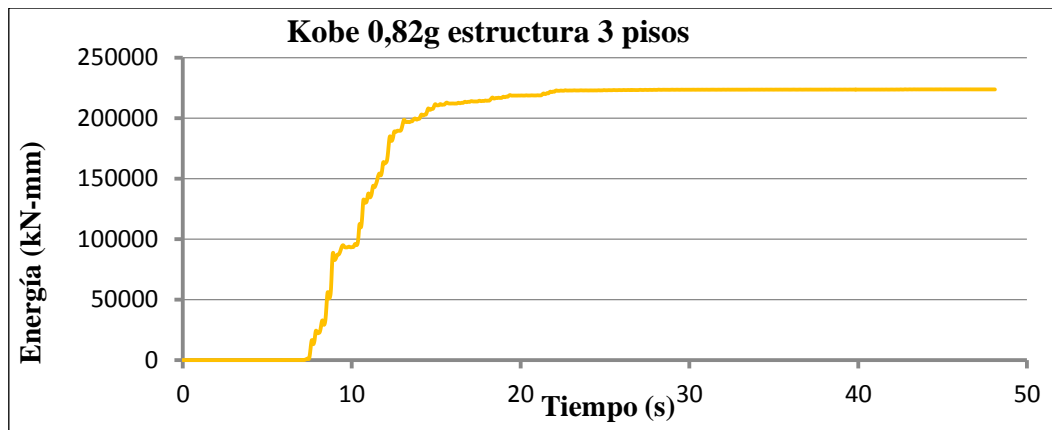


Figura A.5.11 Curva energía deformación-tiempo, registro de Kobe 0,82g en estructura tres pisos

ANEXO 6.1 Muro con disipador friccional con fuerza de deslizamiento igual a cero

Se realizó el mismo análisis con carga cíclicas que en el modelo del muro 1.1 con disipadores de energía, pero se utilizó una fuerza de deslizamiento en los disipadores friccionales igual a cero. Se observa en la Figura A.6.1, como se había comentado en el Capítulo 4, que cuando la fuerza F_{slip} definida en las Ecuaciones 4.1 a 4.6 es igual a cero, el corte solo depende del peso en el muro. En este caso, la Ecuación 4.2 y 4.3 correspondientes a los puntos dos y cuatro de la Figura 4.4 tienen el mismo valor, lo que implica que la curva de carga y descarga en la Figura A.6.1 tenga el mismo valor de corte basal. La figura muestra que la disipación de energía en el muro es nula, esto explica por qué se incluyeron las restricciones descritas en las Ecuaciones 4.5 y 4.6.

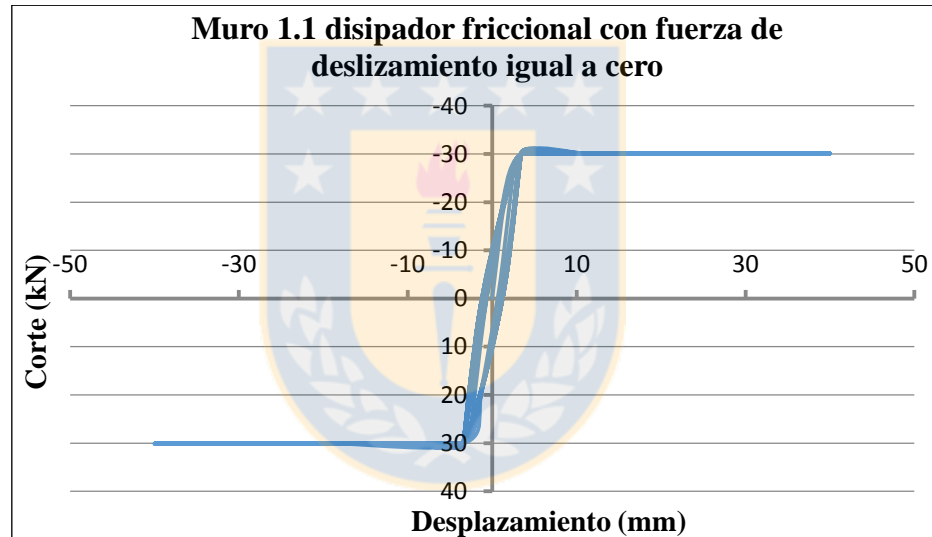
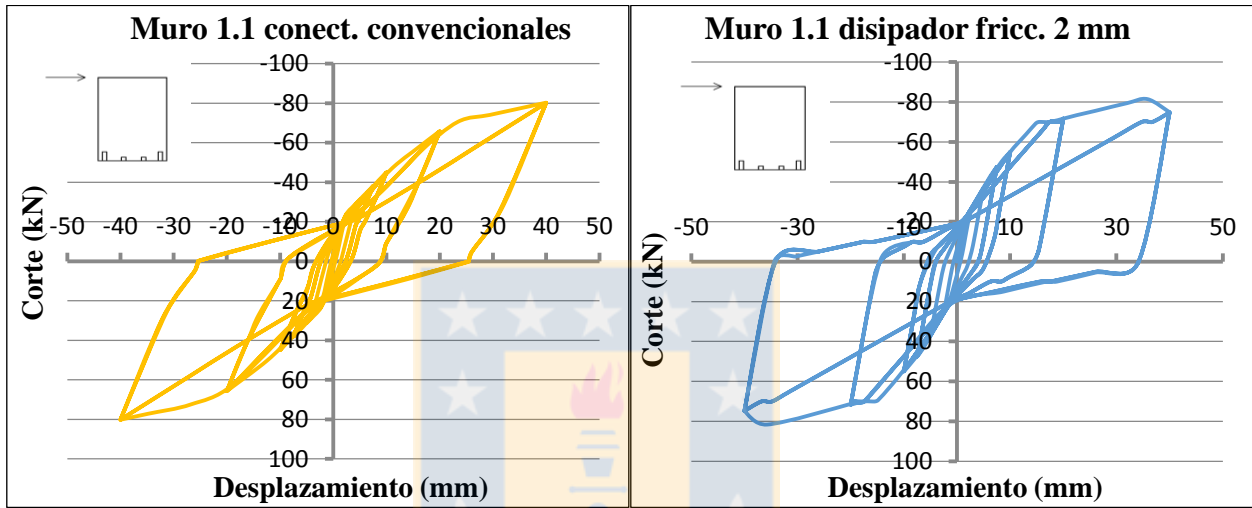


Figura A.6.1 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en muro 1.1 con disipador friccional con fuerza de deslizamiento igual a cero

ANEXO 6.2 Resultados de muros CLT con disipadores de energía

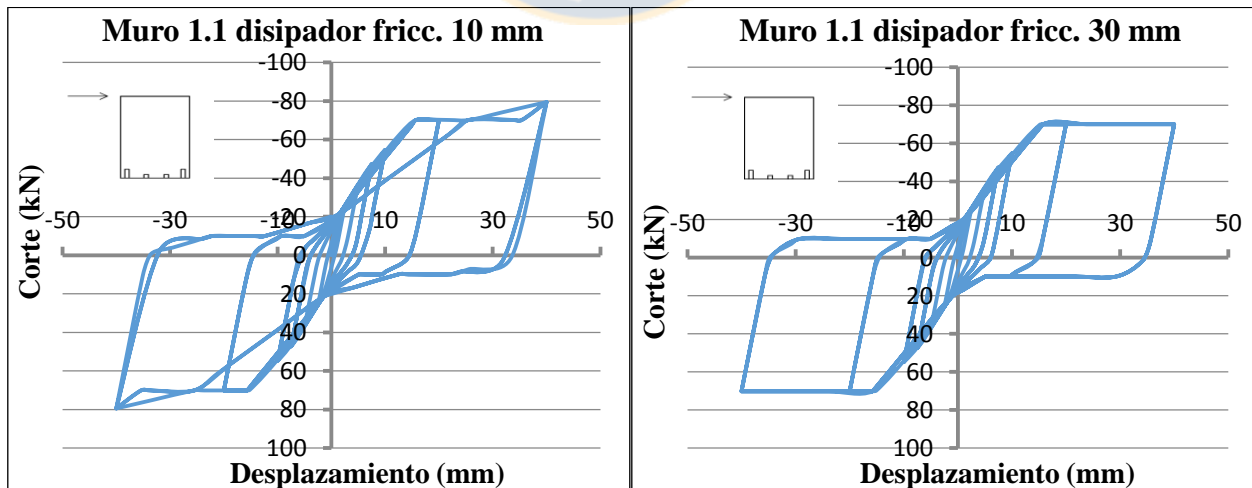
El primer modelo realizado en muros con disipadores de energía fue el del muro 1.1, el cual corresponde al mismo muro 1.1 modelado con conectores convencionales, pero se cambiaron los anclajes ubicados en los extremos del muro por disipadores de fricción. Al muro 1.1 se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclico en el extremo superior igual al aplicado al muro 1.1 con

conectores convencionales. Se realizaron tres modelos en donde se varió la longitud de deslizamiento que tiene el disipador friccional. En el primero, se utilizó una longitud de 2 mm, en el segundo una de 10 mm y en el tercero una de 30 mm. La Figura A.6.2 a) muestra la curva del corte y desplazamiento en el extremo superior del muro 1.1 con conectores convencionales, mientras que en la Figura A.6.2 b), A.6.2 c) y A.6.2 d), se ven las curvas del corte y desplazamiento en el muro 1.1 con disipadores con longitud límite de 2 mm, 10 mm y 30 mm.



a) Muro 1.1 con conectores convencionales

b) Muro 1.1 con disipador de 2 mm de capacidad de deslizamiento



c) Muro 1.1 con disipador de 10 mm de capacidad de deslizamiento

d) Muro 1.1 con disipador de 30 mm de capacidad de deslizamiento

Figura A.6.2 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en muro 1.1

Por otro lado, la Figura A.6.3 muestra la fuerza axial y el deslizamiento en los disipadores de los modelos del muro 1.1 con longitud de deslizamiento de 2 mm, 10 mm y 30 mm en los disipadores. Se ve claramente que la fuerza axial se limita a la fuerza de deslizamiento en los disipadores, el deslizamiento llega al tope máximo que tiene cada disipador para después aumentar la rigidez e impedir el deslizamiento. En la Figura A.6.4, se ve la energía de deformación durante las etapas de tiempo del análisis de los modelos con conectores convencionales y con disipadores con longitud de deslizamiento de 2 mm, 10 mm y 30 mm.

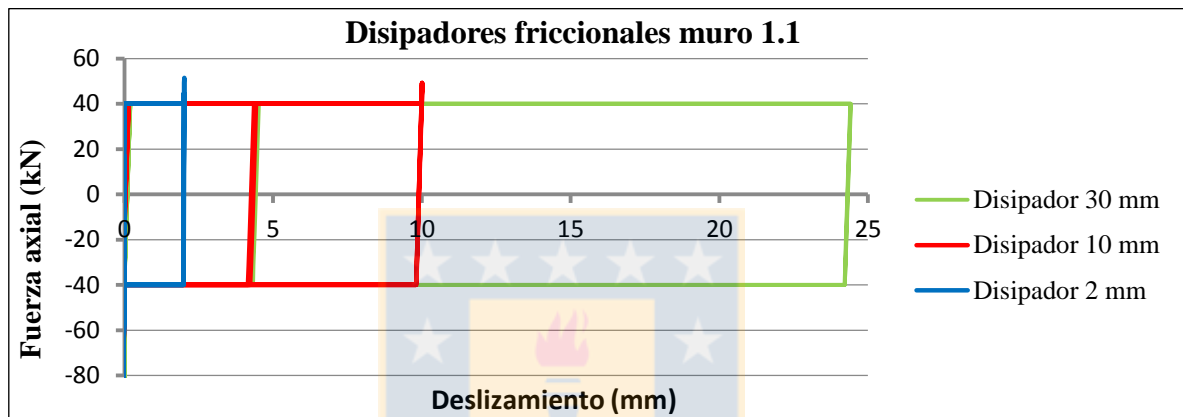


Figura A.6.3 Curva fuerza-deslizamiento para disipadores friccionales en muro 1.1

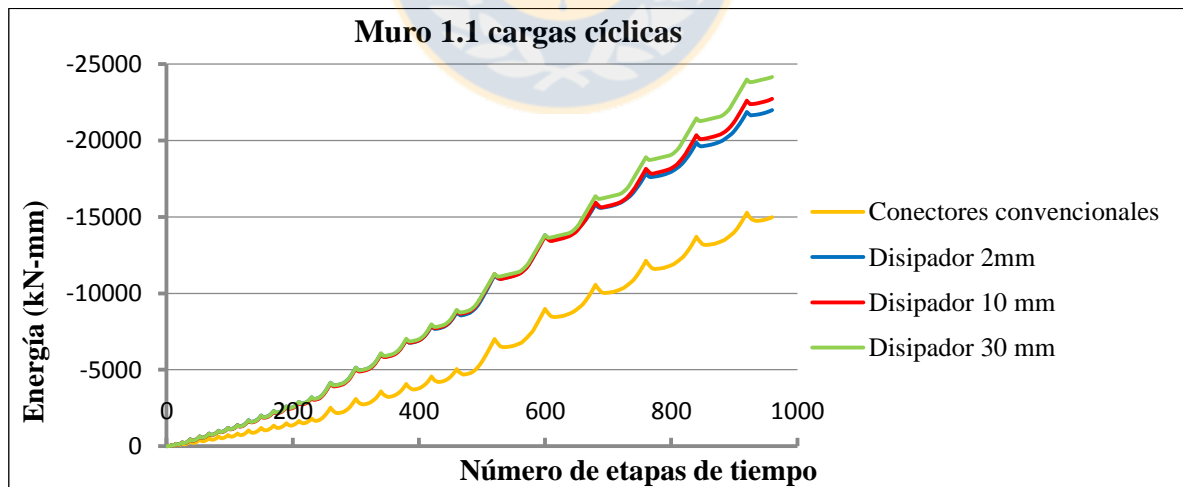
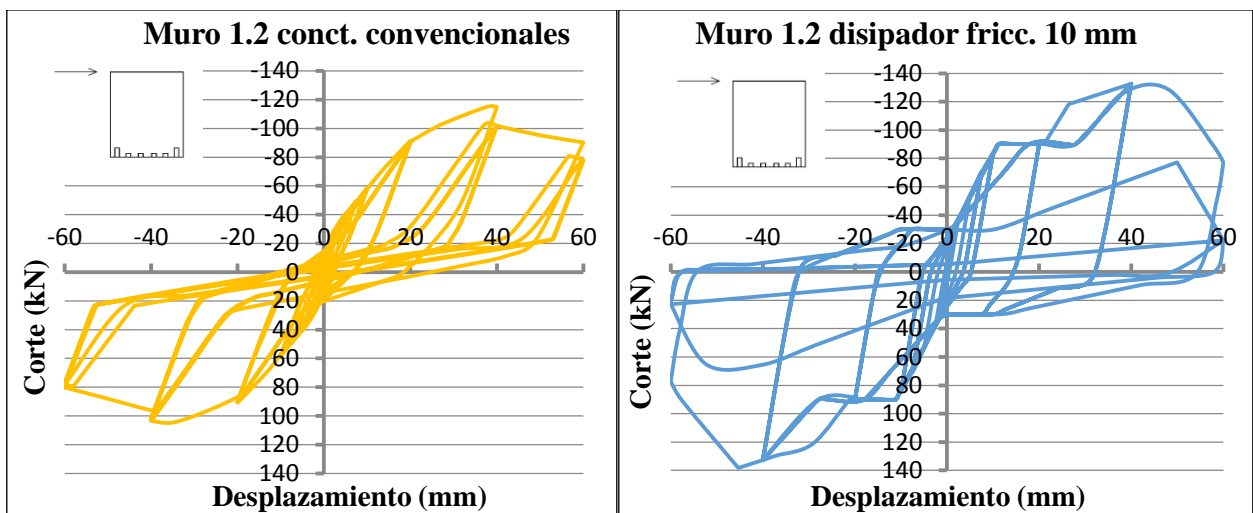


Figura A.6.4 Curva energía deformación-desplazamiento lateral total, análisis cíclico en muro 1.1

El segundo modelo realizado fue el del muro 1.2, el cual corresponde al mismo muro 1.2 modelado con conectores convencionales, pero reemplazando por disipadores friccionales los

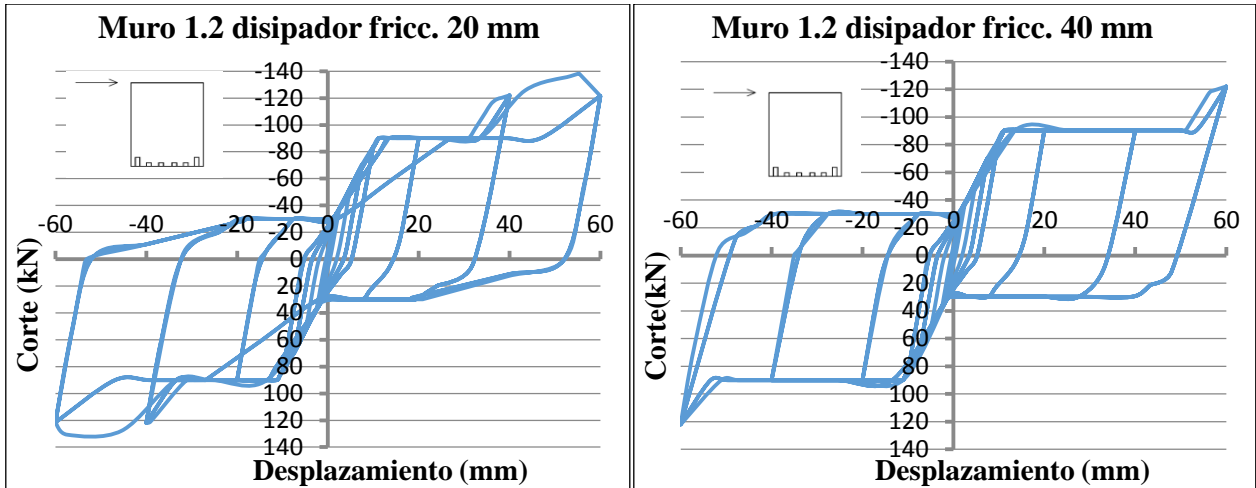
anclajes ubicados en los extremos inferiores del muro. A este muro se le aplicó un patrón de desplazamientos cíclico en el extremo superior igual al aplicado al muro 1.2 con conectores convencionales. Para el muro 1.2 con disipadores, se realizaron tres modelos en donde las longitudes de deslizamiento en los disipadores friccionales fueron de 10 mm, 20 mm y 40 mm. En la Figura A.6.5 a), se puede ver la curva del corte y desplazamiento en el extremo superior del muro 1.2 con conectores convencionales, mientras que en la Figura A.6.5 b), A.6.5 c) y A.6.5 d), se muestran las curvas del corte y desplazamiento en el extremo superior del muro 1.2 con disipadores con longitud de deslizamiento de 10 mm, 20 mm y 40 mm respectivamente. La Figura A.6.6 muestra la fuerza axial y el deslizamiento en los disipadores de los modelos del muro 1.2 con longitud de deslizamiento de 10 mm, 20 mm y 40 mm en los disipadores. Al igual que en el muro 1.1, se observa que la fuerza axial se limita a la fuerza de deslizamiento en los disipadores y que el deslizamiento llega al tope máximo que tiene cada disipador para después aumentar la rigidez e impedir seguir deslizando. En la Figura A.6.7, se ve la energía total de deformación durante las etapas de tiempo del análisis de los modelos con conectores convencionales y con disipadores con longitud de deslizamiento de 10 mm, 20 mm y 40 mm.

Como se definió en la Ecuación 4.6, la restricción del porcentaje del corte objetivo con respecto al peso del muro no puede ser menor que B/H , por lo tanto, con las dimensiones de los muros 1.1 y 1.2 no se intentó limitar el corte objetivo, dado que las relaciones de aspecto eran muy altas.



a) Muro 1.2 con conectores convencionales

b) Muro 1.2 con disipador de 10 mm de capacidad de deslizamiento



c) Muro 1.2 con disipador de 20 mm de capacidad de deslizamiento d) Muro 1.2 con disipador de 40 mm de capacidad de deslizamiento

Figura A.6.5 Curva corte-desplazamiento para análisis cíclico en muro 1.2

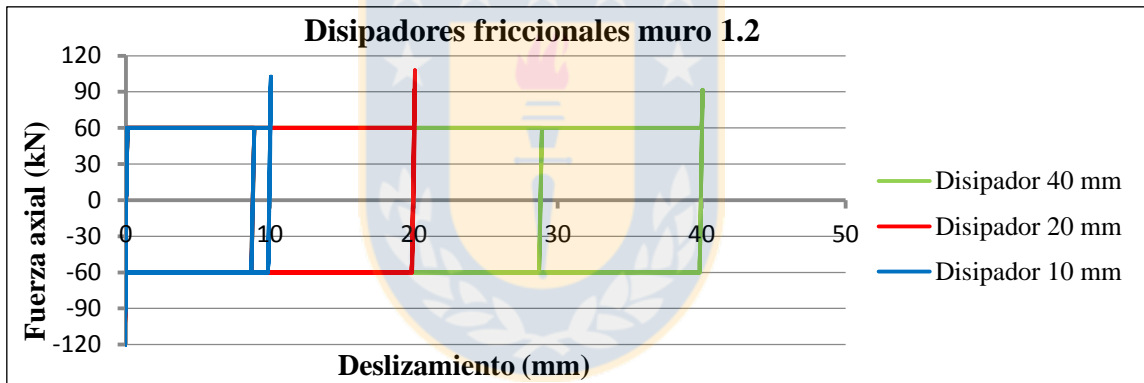


Figura A.6.6 Curva fuerza-deslizamiento para disipadores friccionales en muro 1.2

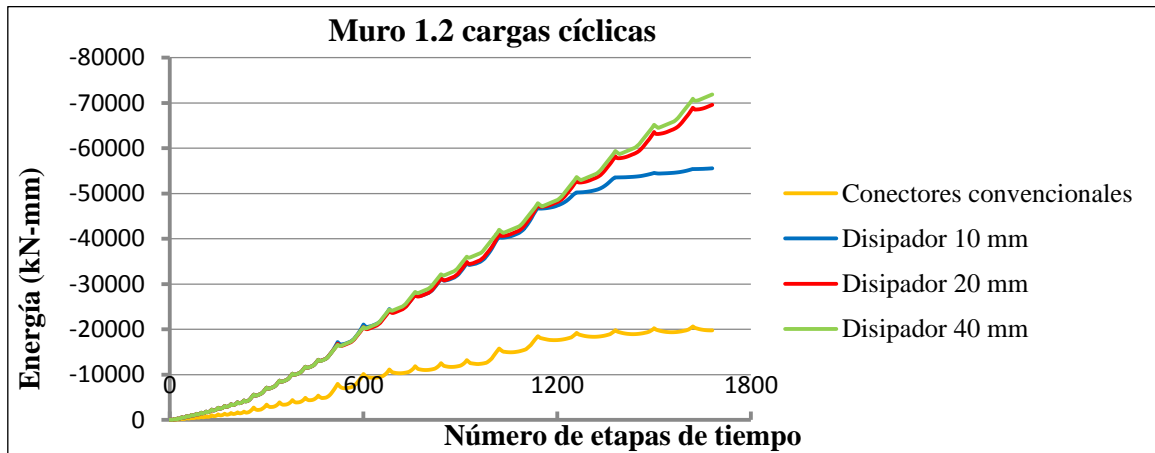
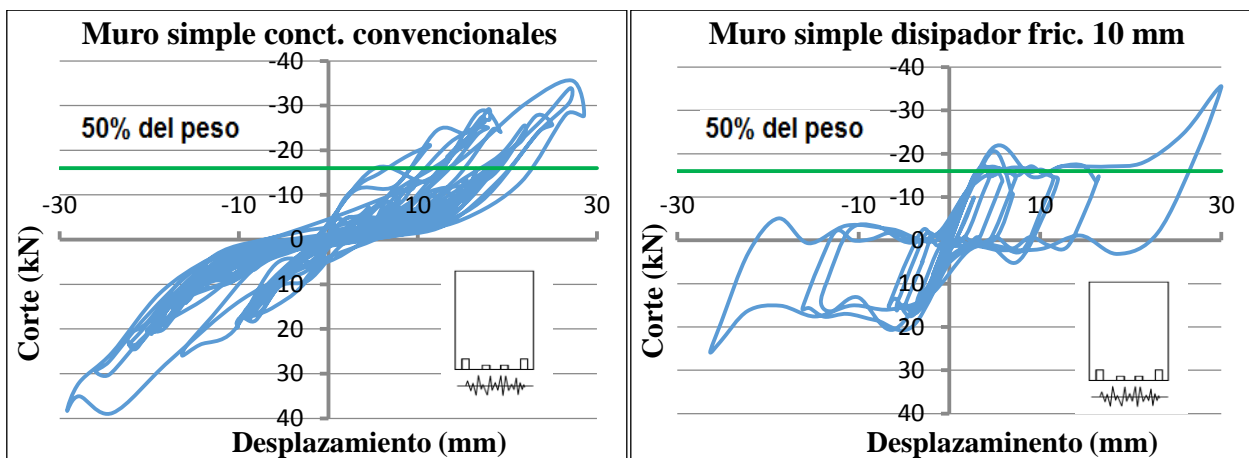


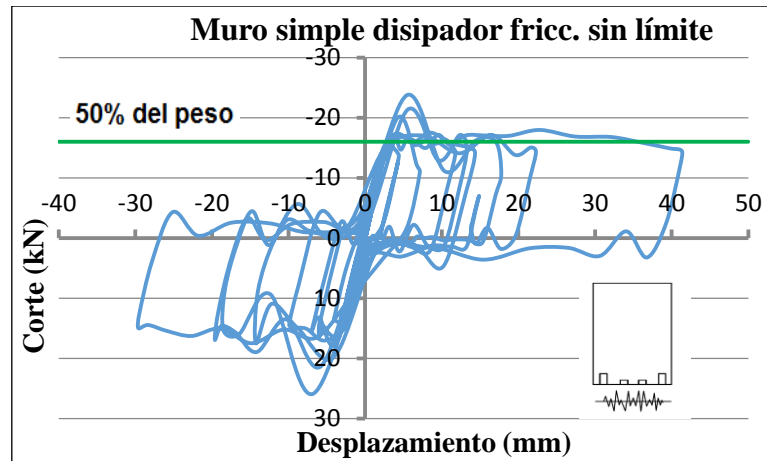
Figura A.6.7 Curva energía deformación-desplazamiento lateral total, análisis cíclico en muro 1.2

Se puede observar que en los muros con disipadores el corte basal se mantiene en un valor fijo hasta que el disipador llega al tope de su deslizamiento, momento en el que la rigidez aumenta al igual que el corte en el muro. Se observa también que mientras la longitud de deslizamiento del disipador aumenta, el valor del corte se mantiene fijo durante más tiempo a medida que aumenta el *drift* del muro. Esto se explica debido a que el mayor recorrido en el disipador friccional permite que el pivoteo del muro aumente antes de llegar al tope del deslizamiento del disipador. La energía total de deformación en los modelos con disipadores de energía es mayor que en los con conectores convencionales, lo que se debe a que el corte objetivo en los modelos con disipadores se mantuvo en un valor similar al de los modelos con conectores convencionales, pero las histéresis encerraron un área mayor dado el deslizamiento de los disipadores.

En la Figura A.6.8 a), se puede ver la curva del corte basal y el desplazamiento en el extremo superior del muro simple con conectores convencionales ante el registro sísmico de Kobe 0,82g. En la Figura A.6.8 b), se ve la curva del corte y desplazamiento en el muro simple con disipadores friccionales con una longitud de deslizamiento de 10 mm, mientras que la Figura A.6.8 c) muestra la curva corte-desplazamiento del muro simple con disipadores friccionales sin un límite de deslizamiento, ambos ante el sismo de Kobe 0,82g. En la Figura A.6.9, se observa el comportamiento de un disipador friccional sin límite de deslizamiento del muro simple para el sismo de Kobe 0,82g. La Figura A.6.10 muestra la energía de deformación en el tiempo para los tres modelos del muro simple ante el registro de Kobe 0,82g.



a) Muro simple con conectores convencionales b) Muro simple con disipador de 10 mm de capacidad de deslizamiento



c) Muro simple con dissipador sin límite de deslizamiento

Figura A.6.8 Curva corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g en muro simple

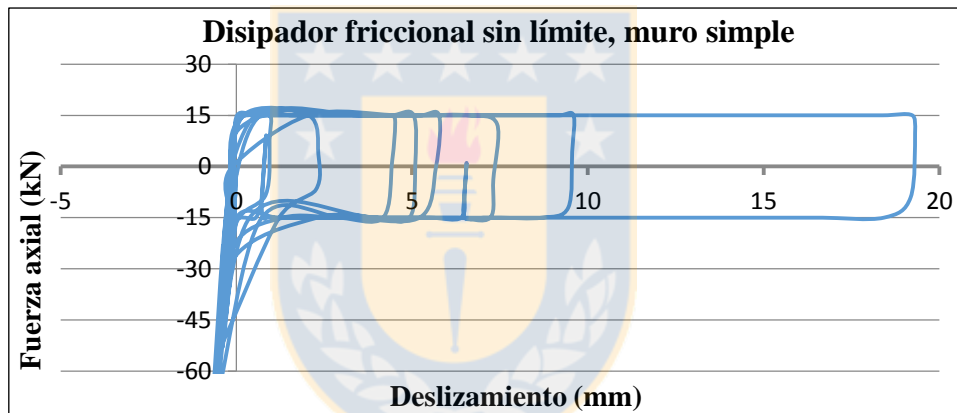


Figura A.6.9 Curva fuerza-deslizamiento en disipador sin límite, sismo Kobe 0,82g muro simple

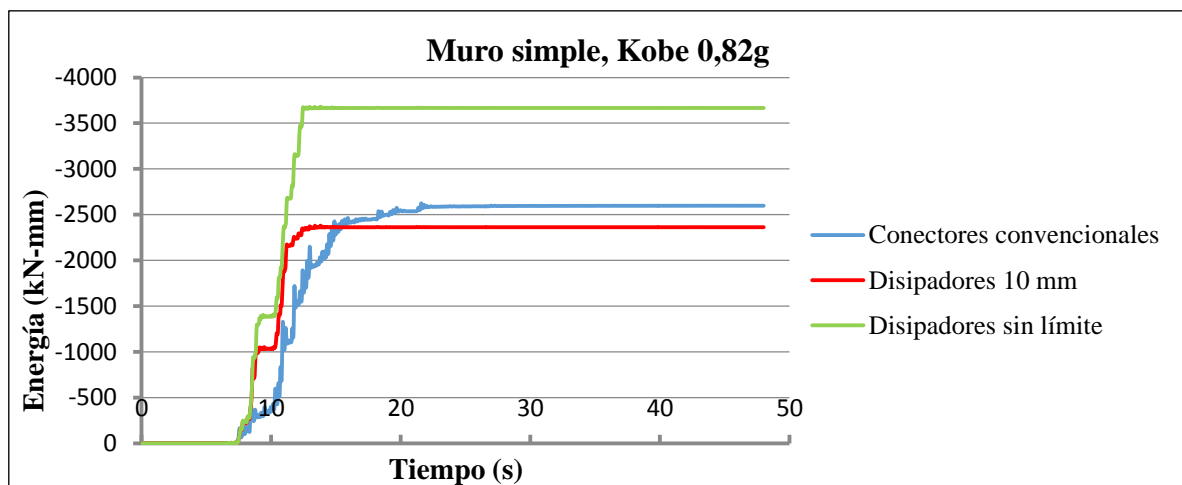


Figura A.6.10 Curva energía deformación- tiempo en muro simple para registro de Kobe 0,82g

Comparando la Figura A.6.8 a) con la Figura A.6.8 b) y A.6.8 c), se puede ver cómo se reduce el corte basal en los modelos con disipadores a un valor cercano al corte objetivo del 50% del peso total del muro. Por otro lado, se observa que al utilizar disipadores sin un límite de deslizamiento, el valor objetivo del corte se mantiene fijo en todo momento, sin embargo, al utilizar disipadores con un límite de deslizamiento, se observa que en una parte de la curva el corte aumenta de manera repentina, lo que se da porque el disipador llega al límite de su deslizamiento. En la Figura A.6.9, se observa en la histéresis del disipador que la fuerza de deslizamiento corresponde a la definida por diseño, lo que indica la correcta modelación y explica por qué se llega al corte objetivo de diseño correctamente. En la Figura A.6.10, se puede ver que en el modelo donde se utilizaron disipadores sin un límite de deslizamiento, la energía total de deformación fue mayor que en el modelo con disipadores con un límite de deslizamiento, ya que no existe una restricción del *drift* en los muros, lo que hace que el área que cubre la histéresis sea mayor. Por otro lado, se debe indicar que no siempre que se utilicen disipadores, la energía total de deformación será mayor que cuando se utilizan conectores convencionales. Esto va a depender estrictamente del corte objetivo que se quiera alcanzar y del desplazamiento alcanzado en el muro.

ANEXO 6.3 Resultados de modelos en estructuras CLT de uno a tres pisos con disipadores de energía que utilizan el sistema *balloon* ante el registro de Kobe

Al modelo de la estructura de un piso con disipadores de energía se le aplicó una carga lateral estática a nivel del techo de la estructura. La Figura A.6.11 muestra el corte y el desplazamiento en el techo de la estructura para el análisis con cargas estáticas, se puede observar que se logró reducir el corte al valor objetivo de diseño del 45% del peso total del modelo. En la Figura A.6.12, se muestra el corte basal versus el desplazamiento en el techo del modelo de la estructura de un piso con disipadores para el análisis con el registro sísmico de Kobe 0,82g. Se observa que el corte basal logra reducirse al valor objetivo. En la Figura A.6.13, se puede ver la energía total de deformación en el tiempo para la estructura de un piso con conectores convencionales y con disipadores de energía aplicando el registro de aceleraciones de Kobe 0,82g. La energía total de deformación se calculó obteniendo el área que encierra la curva del corte basal y el desplazamiento lateral del primer piso.

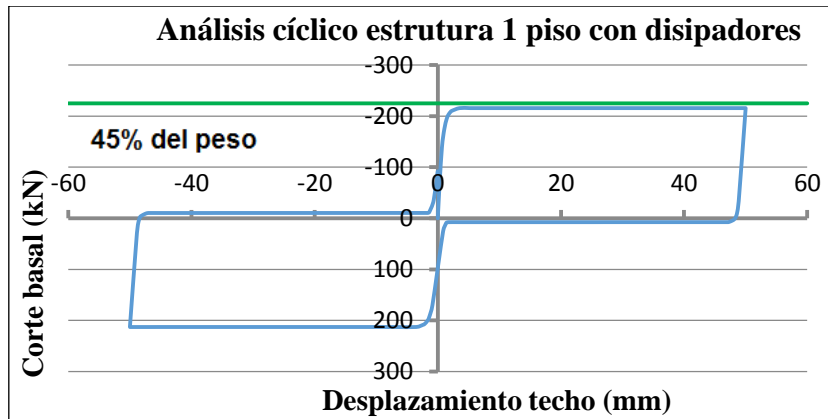


Figura A.6.11 Curva corte-desplazamiento en análisis cíclico, estructura un piso con disipadores

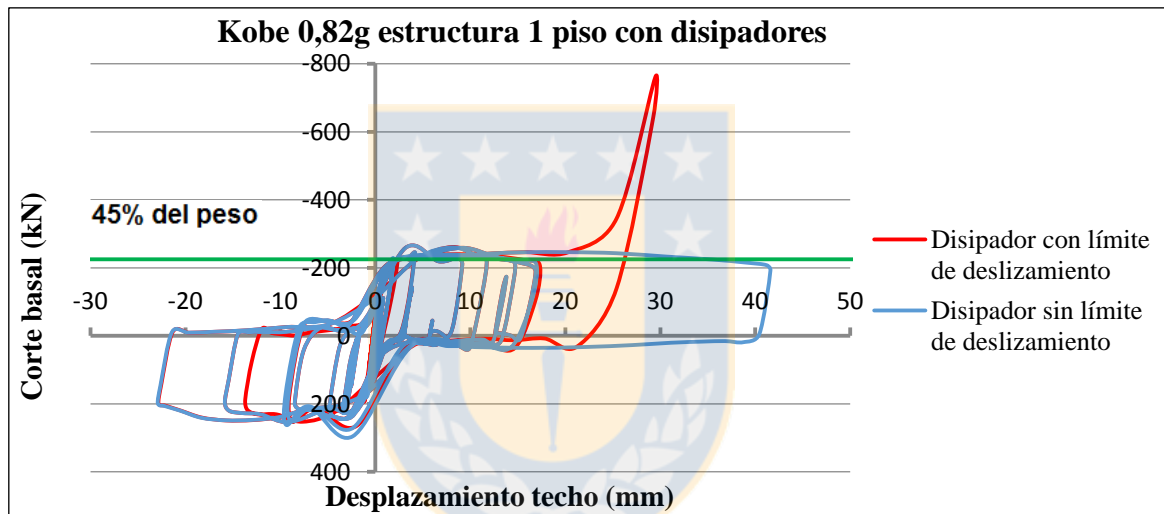


Figura A.6.12 Curva corte-desplazamiento sismo Kobe 0,82g, estructura un piso con disipadores

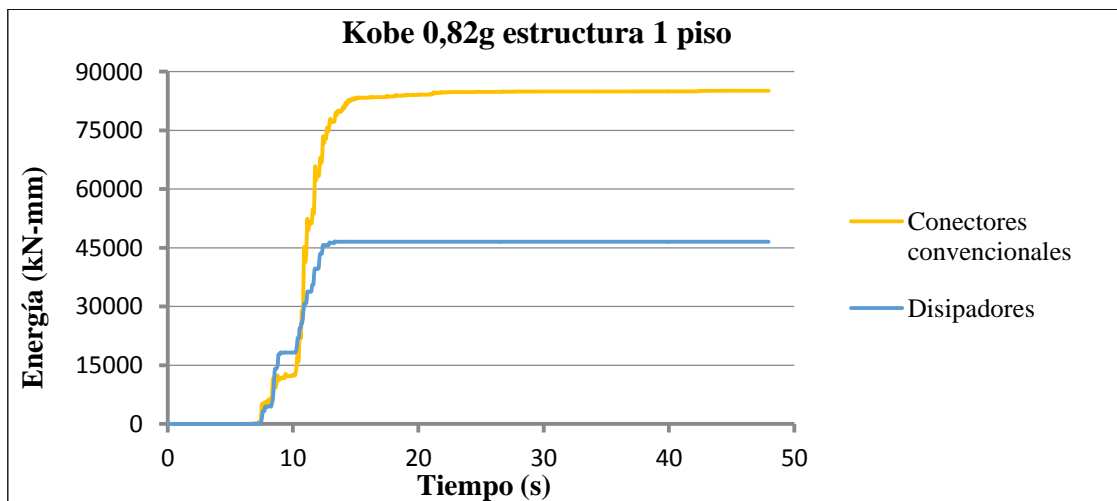


Figura A.6.13 Curva energía deformación-tiempo registro Kobe 0,82g en estructura un piso

Al modelo de la estructura de dos pisos con disipadores que utiliza el sistema *balloon* se le aplicó una carga lateral estática, donde a cada piso se le asignó un porcentaje de la carga total igual al porcentaje del peso de cada piso con respecto al peso total de la estructura. En la Figura A.6.14, se ve el corte y el desplazamiento en el techo de la estructura de dos pisos para el análisis con cargas estáticas. Al igual que en el modelo de un piso, se observa que el corte se logró reducir al valor objetivo de diseño del 30% del peso total de la estructura. Al modelo de dos pisos con disipadores también se le aplicó el registro sísmico de Kobe 0,82g. En la Figura A.6.15, se muestra el corte basal versus el desplazamiento en el techo del modelo de la estructura de dos pisos que utiliza el sistema *balloon* ante el registro de Kobe 0,82 g, se observa que el corte basal logra reducirse al valor propuesto. Finalmente, la Figura A.6.16 muestra la energía total de deformación en el tiempo para la estructura de dos pisos con conectores convencionales y con disipadores de energía aplicando el registro de Kobe 0,82g. La energía de deformación (energía elástica más energía disipada) se calculó sumando las áreas que encierran las curvas del corte y el desplazamiento relativo en cada piso.

Los modelos de las estructuras que utilizan el sistema *balloon* de uno y dos pisos logran limitar el corte a los valores propuestos, lo que indica que la formulación matemática para encontrar las fuerzas de diseño en los disipadores es correcta. En las estructuras con conectores convencionales, la energía de deformación es mayor que en las estructura con disipadores, puesto que el corte alcanzado en los modelos sin disipadores es más del doble que el alcanzado en los modelos con disipadores (cortes máximos se muestran en Tabla 6.2)

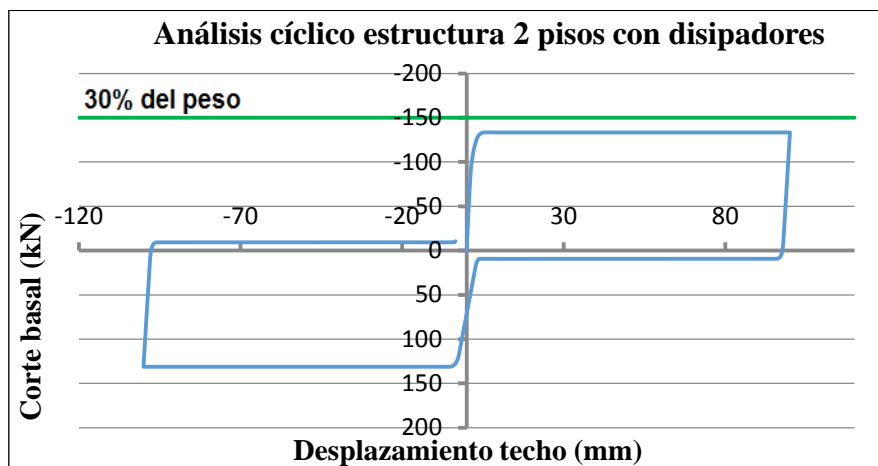


Figura A.6.14 Curva corte-desplazamiento análisis cíclico, estructura dos pisos con disipadores

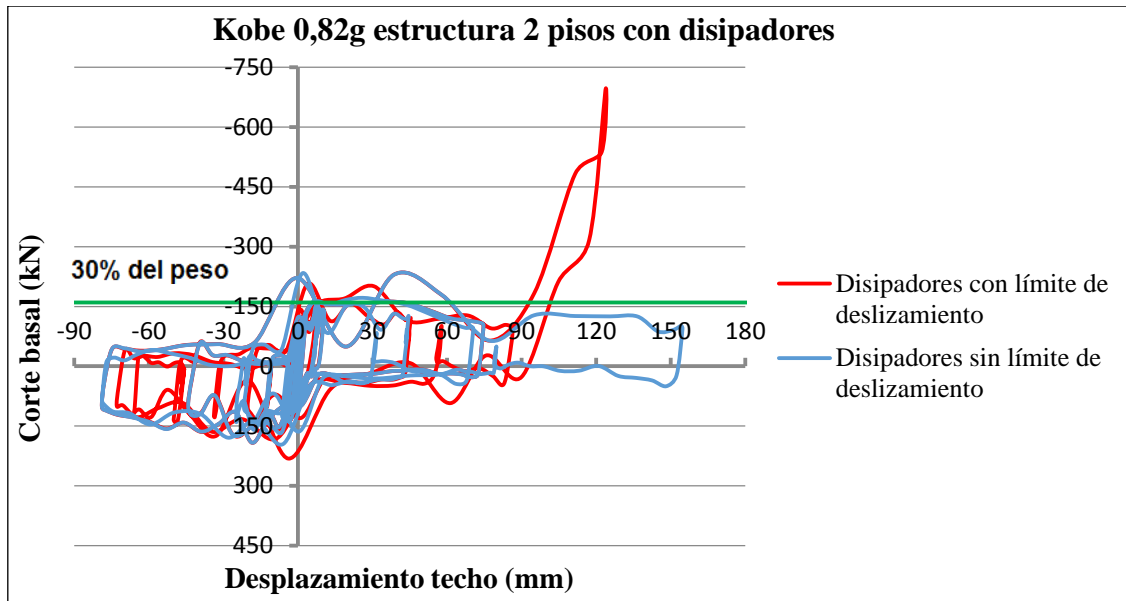


Figura A.6.15 Curva corte-desplazamiento sismo Kobe 0,82g, estructura dos pisos con disipadores

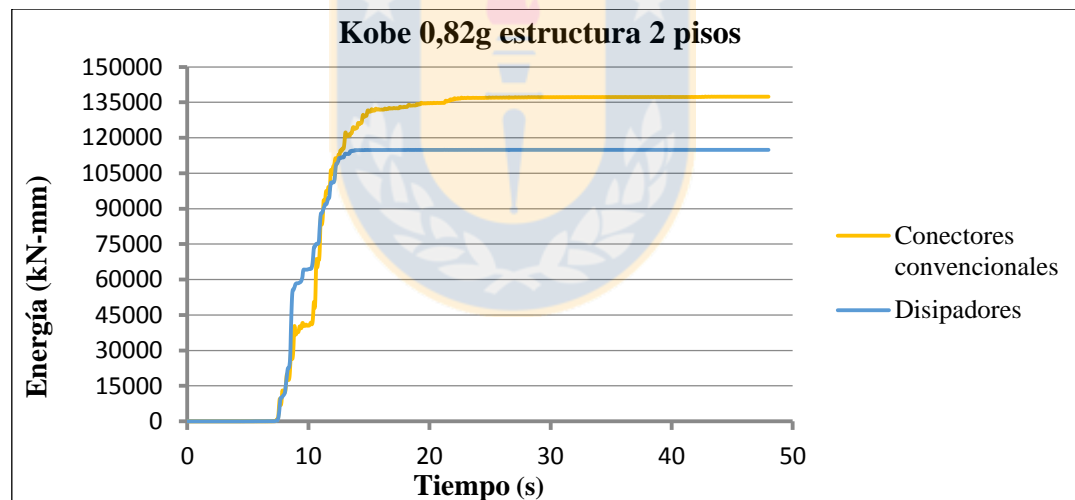
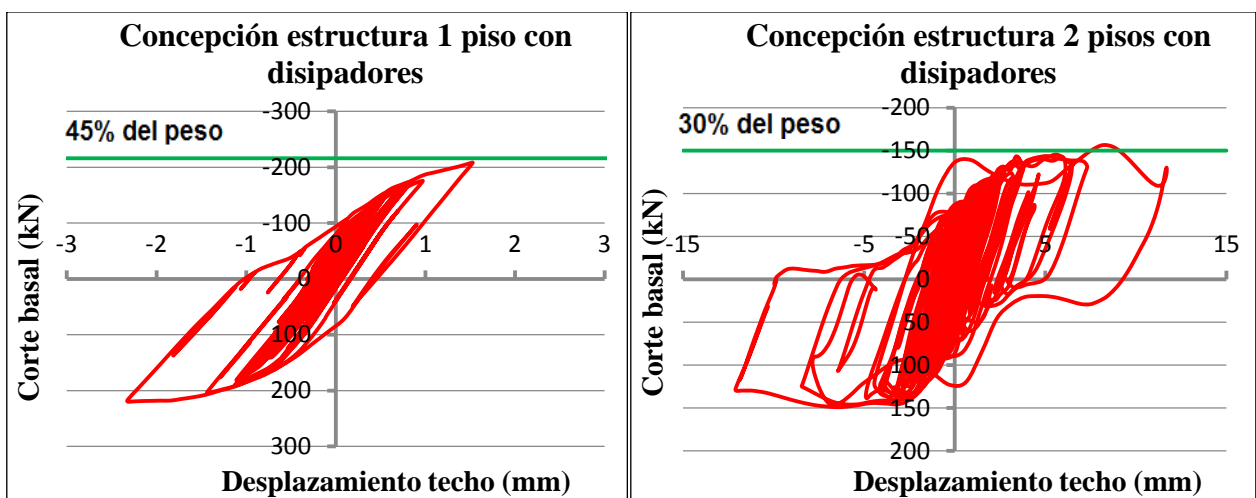


Figura A.6.16 Curva energía deformación-tiempo registro Kobe 0,82g en estructura dos pisos

ANEXO 6.4 Resultados de modelos en estructuras CLT de uno a tres pisos con disipadores de energía que utilizan el sistema *balloon* ante registros locales

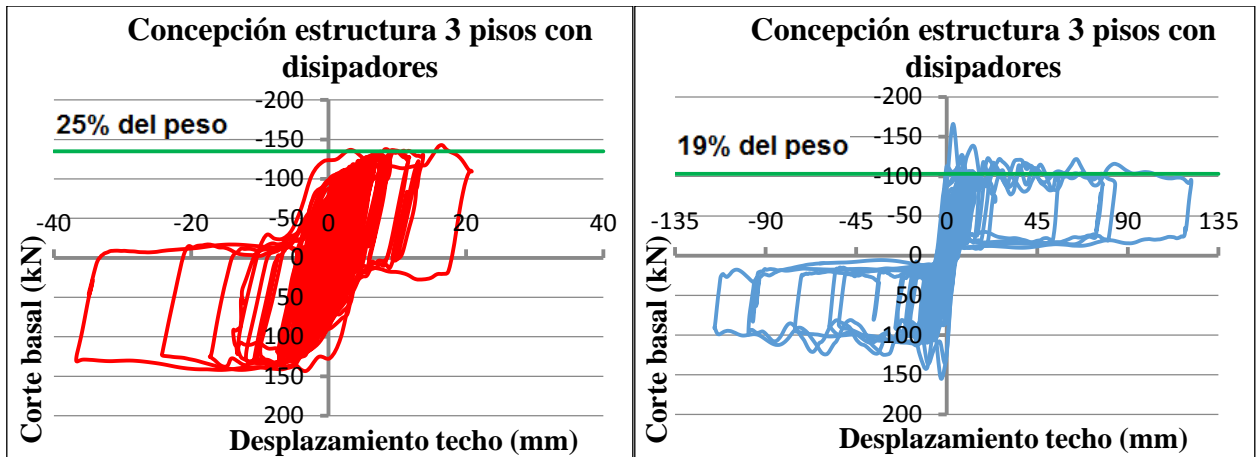
Se aplicó el registro de Concepción del terremoto de Chile del 2010 en los modelos de las estructuras con disipadores de uno, dos y tres pisos, donde se mantuvo el mismo corte objetivo de

diseño utilizado con el registro de Kobe 0,82g (45%, 30% y 25% del peso total de cada estructura). En la Figura A.6.17 a), b) y c), se pueden ver las curvas de corte basal y desplazamiento en el techo para los modelos de uno, dos y tres pisos con el registro de Concepción, se observa que el corte se limitó al valor objetivo propuesto. Sin embargo, los *drifts* en las estructuras son bajos y no se aprovecha la disipación de energía que podrían desarrollar los disipadores sísmicos, lo que indica que la fuerza de fricción en los disipadores es muy alta y que los dispositivos no alcanzan a generar mayores deslizamientos. Para evaluar como aumenta el desplazamiento lateral en la estructura de tres pisos con disipadores, se redujo a la mitad la fuerza de deslizamiento y de fluencia en los dispositivos, llegando a un corte objetivo de diseño de 19% del peso total de la estructura, a la cual se le aplicó el registro de Concepción. La Figura A.6.17 d) muestra como disminuye el corte basal y aumenta el desplazamiento en el techo en la estructura de tres pisos con disipadores con el corte objetivo de 19% comparado con el modelo con corte objetivo de 25% del peso total. Sin embargo, aparecen *peaks* en el corte basal, lo que indica que al disminuir la fuerza de deslizamiento en los disipadores, el *drift* y el levantamiento en los paneles aumentan, produciendo fuerzas mayores al momento que los paneles golpean con la fundación. En la Figura A.6.18, se observa que la energía de deformación para la estructura de tres pisos con disipadores y corte objetivo de 19% del peso total es tres veces mayor que en el modelo con disipadores y corte objetivo del 25% del peso total, dado que los desplazamientos laterales aumentaron.



a) Estructura un piso con disipadores
(corte objetivo 45% del peso total)

b) Estructura dos pisos con disipadores
(corte objetivo 30% del peso total)



a) Estructura tres pisos con disipadores
(corte objetivo 25% del peso total)

b) Estructura tres pisos con disipadores
(corte objetivo 19% del peso total)

Figura A.6.17 Curvas corte-desplazamiento para registro Concepción en estructuras con disipadores

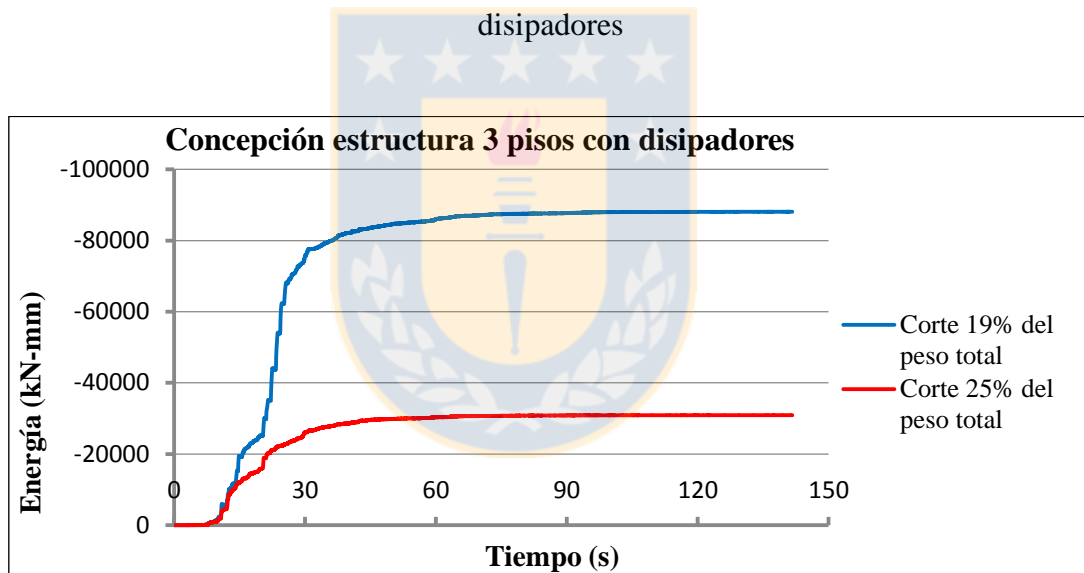


Figura A.6.18 Curva energía deformación-tiempo registro Concepción en estructura tres pisos

La Tabla A.6.1 muestra los valores máximos del corte basal, aceleraciones, *drifts* y levantamiento en los paneles para los modelos de estructuras CLT con disipadores ante el registro de Concepción.

Tabla A.6.1 Valores máximos de distintos parámetros para modelos de estructuras con disipadores de energía, para registro de Concepción

Modelo	Corte (kN)	Drift máx. (%)	Aceleración máx. (g)	Levantamiento paneles (mm)	Periodo fund. (s)
Estructura de 1 piso (corte objetivo de 45%)	218	0,08	0,45	0,7	0,13
Estructura de 2 pisos (corte objetivo de 30%)	156	0,20	0,53	2,5	0,23
Estructura de 3 pisos (corte objetivo de 25%)	141	0,40	0,55	5	0,30
Estructura de 3 pisos (corte objetivo de 19%)	155	1,20	0,82	17	0,30

En el Capítulo 6, se mostraron los resultados de los análisis del modelo de la estructura de tres pisos con disipadores para el registro de aceleraciones Maule 2. La Tabla A.6.2 muestra los valores máximos del corte basal, aceleraciones, *drifts* y levantamiento en los paneles para los modelos de la estructura CLT con disipadores de tres pisos con cortes objetivos de 25%, 19% y 16% del peso total del edificio ante el registro de Maule 2.

Tabla A.6.2 Valores máximos de distintos parámetros para modelos de estructuras con disipadores de energía, para registro de Maule 2

Modelo	Corte (kN)	Drift máx. (%)	Aceleración máx. (g)	Levantamiento paneles (mm)	Periodo fund. (s)
Estructura de 3 pisos (corte objetivo de 25%)	145	0,23	0,59	3,2	0,30
Estructura de 3 pisos (corte objetivo de 19%)	118	0,45	0,58	6,2	0,30
Estructura de 3 pisos (corte objetivo de 16%)	126	0,92	0,85	12,5	0,30

A la estructura de tres pisos con disipadores que utiliza el sistema *balloon* también se le aplicaron los registros Maule 1 y Maule 3 (ver Tabla 3.3 de registros sísmicos). En las Figuras A.6.19 y A.6.20, se muestra la curva del corte basal y el desplazamiento del techo en el modelo de tres

pisos con disipadores para los registros Maule 1 y Maule 3 respectivamente. Para cada registro se hicieron dos análisis, uno en donde el corte se limitó a un 25% del peso total y otro donde el corte se limitó a un 19% del peso total de la estructura. Se puede observar, al igual que en otros modelos realizados, que el corte basal obtenido de la modelación se acerca bastante al corte objetivo que se había definido, mientras que la disminución en el corte basal también genera que el *drift* en la estructura aumente. Para estos registros, no se ven aumentos repentinos en el corte basal, ya que los desplazamientos laterales en los modelos no fueron tan altos como, por ejemplo, en el registro de Kobe, dado que ambos registros de Maule no son tan impulsivos ni tienen *peaks* de aceleraciones tan altos como es el caso del sismo de Japón. Se observó en otros análisis mostrados en el Capítulo 6 que mientras más aumenta el *drift* comienzan a aparecer *peaks* en el corte basal más marcados, al disminuir el corte objetivo la resistencia al levantamiento de los paneles es menor y tanto los desplazamientos laterales como las aceleraciones en la estructura aumentan. Esto hace que la fuerza de impacto de los muros con la fundación sea mayor y genere aumentos repentinos en el corte basal. Se corroboró en los modelos que el momento en que se produce el *peak* en el corte basal coincide con el momento en que el elemento *gap* en el borde del muro se acciona, lo que verifica que el aumento en el corte basal se produce por el impacto de los paneles con la fundación. Por lo tanto, no es recomendable limitar el corte basal a porcentajes tan bajos, porque el aumento en el *drift* puede generar *peaks* repentinos en el corte.

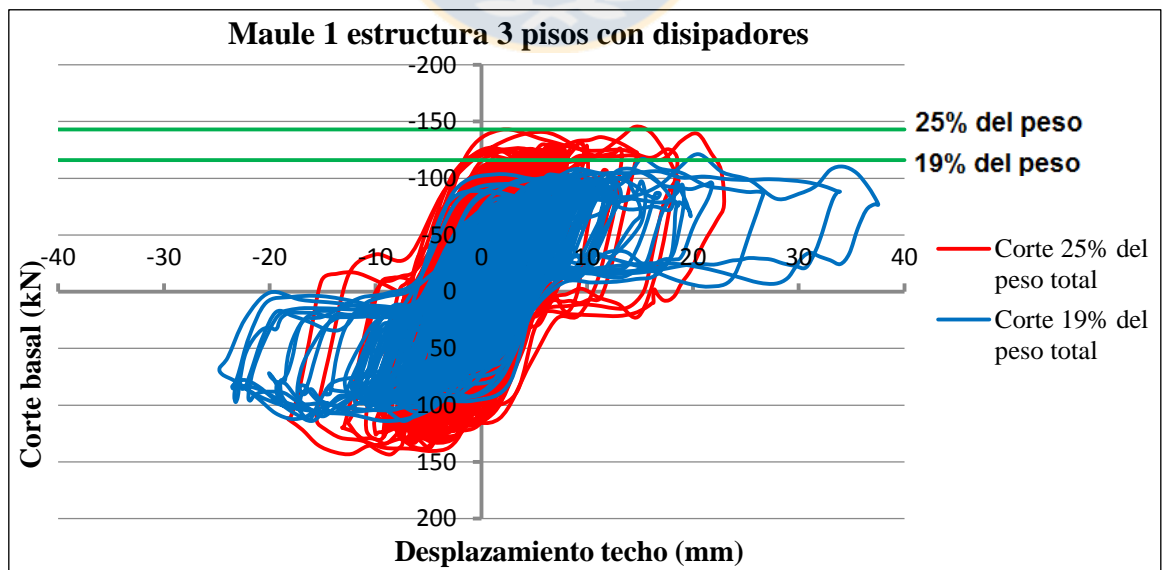


Figura A.6.19 Curva corte-desplazamiento registro Maule 1, estructura tres pisos con disipadores

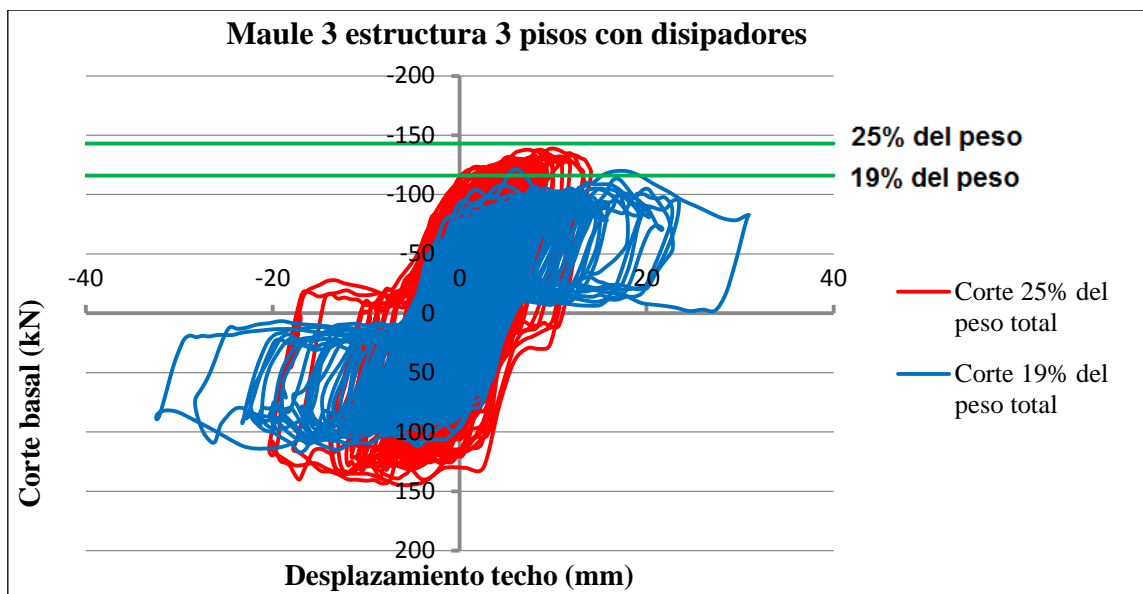
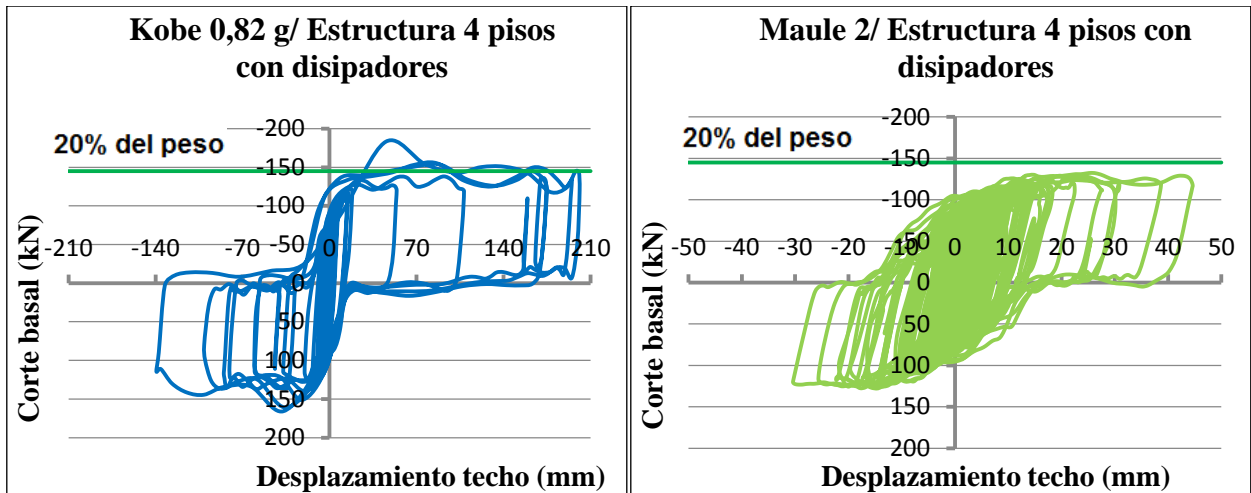


Figura A.6.20 Curva corte-desplazamiento registro Maule 3, estructura tres pisos con disipadores

Se recomienda siempre analizar cada estructura con registros de la zona donde será construida y verificar cuáles son los cortes y desplazamientos alcanzados. Se debe intentar llegar a un diseño óptimo que impida tener *peaks* muy altos en los cortes y mantener desplazamientos que permitan hacer trabajar a los disipadores de energía.

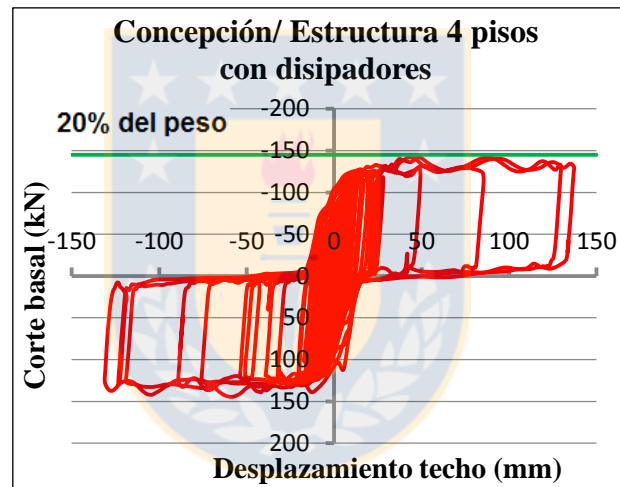
ANEXO 6.5 Resultados de modelos en estructuras CLT de cuatro a siete pisos con disipadores de energía que utilizan el sistema *balloon*

Se aplicó un análisis *time history* con el registro de Kobe 0,82g, el registro de Concepción y el de Maule 2 a la estructura de cuatro pisos que utiliza el sistema *balloon* con disipadores de energía, en la cual el corte objetivo se limitó a un 20% del peso total de la estructura. En la Figura A.6.21 a), b) y c), se observa la curva del corte basal y el desplazamiento en el techo del edificio para los registros de Kobe, Concepción y Maule respectivamente. Se observa que el corte se acerca al valor definido como objetivo y que el desplazamiento lateral es mayor para el sismo de Kobe. En la Figura A.6.2, se presenta la energía total de deformación para los tres registros analizados en el modelo de la estructura de cuatro pisos con disipadores, se observa que para el sismo de Kobe es donde más energía se disipa.



a) Registro Kobe 0,82 g

b) Registro Maule 2



c) Registro Concepción

Figura A.6.21 Curvas corte-desplazamiento estructura cuatro pisos con disipadores, corte objetivo 20% del peso total

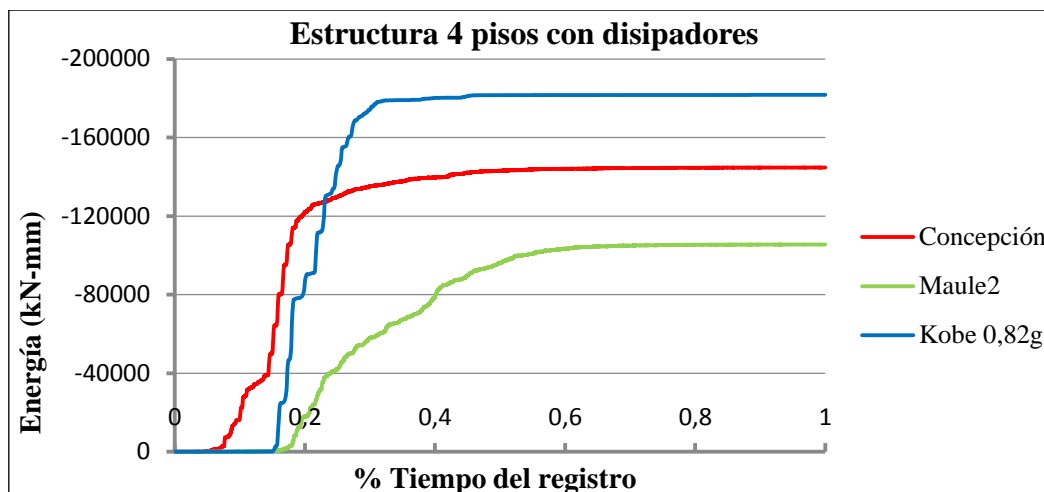
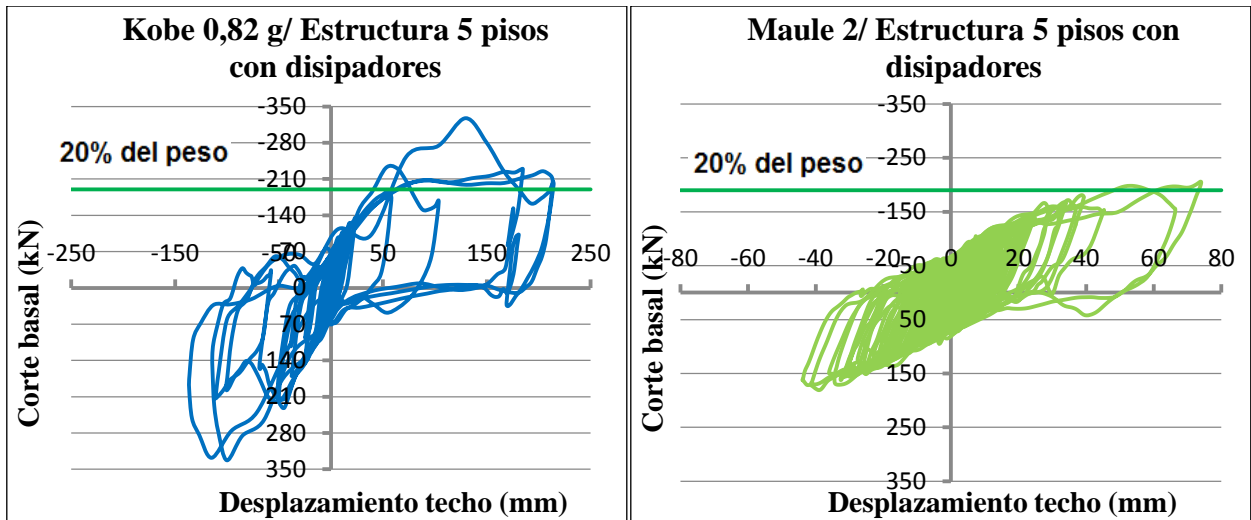


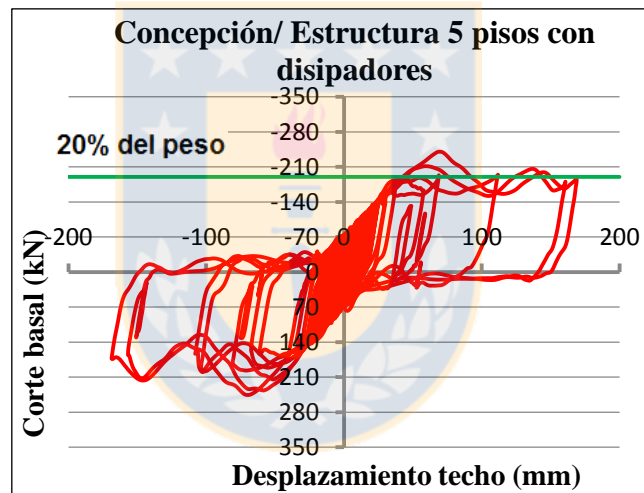
Figura A.6.22 Curvas energía deformación-tiempo para estructura cuatro pisos, corte objetivo 20% del peso total

Se aplicó un análisis *time history* con el registro de Kobe 0,82g, el registro de Concepción y el de Maule 2 a la estructura de cinco pisos que utiliza el sistema *balloon* con disipadores de energía, en la cual el corte objetivo se limitó a un 20% del peso total de la estructura. En la Figura A.6.23 a), b) y c), se observa la curva del corte basal y el desplazamiento en el techo del edificio para los registros de Kobe, Concepción y Maule respectivamente. En este análisis, se observa que en la Figura A.6.23 b) y c) el corte se acerca al valor objetivo, pero en la Figura A.6.23 a), se ve una curva que no tiene la forma ideal que considera el diseño de la estructura y los disipadores, la curva debería mantener un valor fijo cuando se supera la fuerza de deslizamiento de los disipadores friccionales. Esto ocurre, porque comienzan a dominar otros modos de vibración que no representan el movimiento de cuerpo rígido que se consideró como hipótesis para calcular las fuerzas de diseño en los disipadores. En la Figura A.6.24, se ve la energía total de deformación para los tres registros en el modelo de la estructura de cinco pisos con disipadores, se observa que la energía disipada es mayor para el registro de Concepción.



a) Registro Kobe 0,82 g

b) Registro Maule 2



c) Registro Concepción

Figura A.6.23 Curvas corte-desplazamiento estructura cinco pisos con disipadores, corte objetivo 20% del peso total

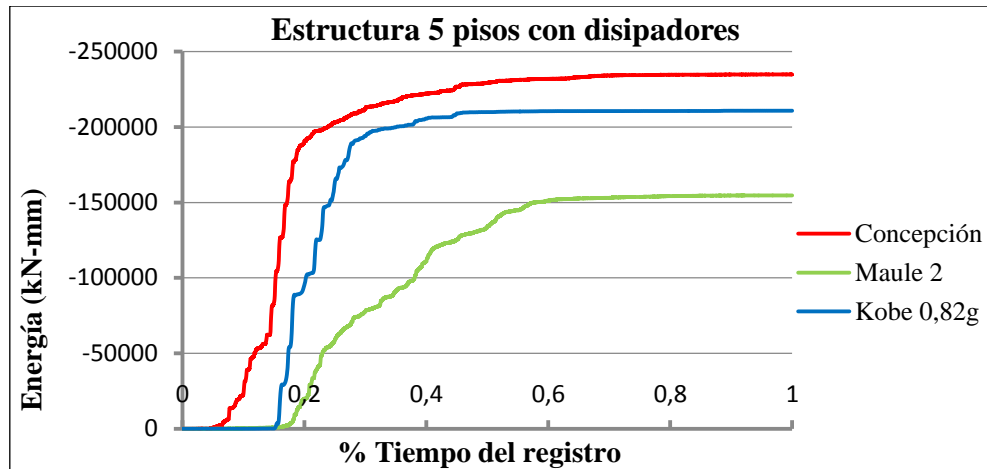


Figura A.6.24 Curvas energía deformación-tiempo para estructura cinco pisos, corte objetivo 20% del peso total

En la Figura A.6.25, se muestra la energía total de deformación para los registros de Kobe 0,82g, Concepción y Maule 2 en el modelo de la estructura de siete pisos con disipadores y paneles de 2,3 m de largo. Para esta estructura, la energía total de deformación es bastante mayor para el registro de Concepción, ya que es donde se alcanzan mayores desplazamientos laterales y durante más ciclos en el modelo. La Tabla A.6.3 muestra los valores máximos del corte basal, aceleraciones, *drifts* y levantamiento en el primer piso de los paneles para las estructuras de cuatro, cinco y siete pisos que utilizan el sistema *balloon* con disipadores de energía ante los registros de Kobe 0,82g, Concepción y Maule 2.

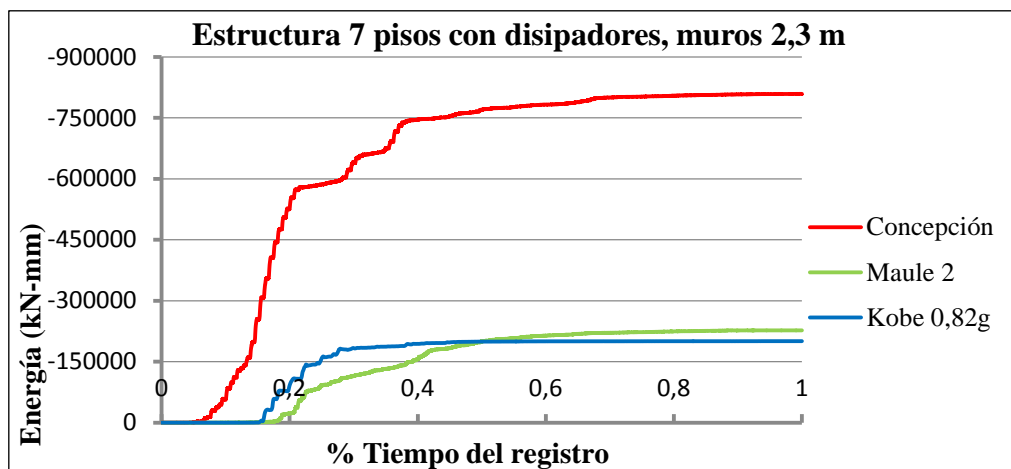


Figura A.6.25 Curvas energía deformación-tiempo para estructura siete pisos con muros de 2,3m, corte objetivo 15% del peso total

Tabla A.6.3 Valores máximos de distintos parámetros para modelos de estructuras con disipadores de energía, para registros de Kobe 0,82g, Concepción y Maule 2

Modelo	Registro	Corte (kN)	Drift máx. (%)	Aceleración máx. (g)	Levantamiento paneles (mm)	Periodo fund. (s)
Estructura 4 pisos (corte obj. de 20%)	Kobe 0,82g	175	1,57	1,03	21,6	0,52
	Concepción	140	1,10	0,75	15,1	
	Maule 2	131	0,36	0,58	4,9	
Estructura 5 pisos (corte obj. de 20%)	Kobe 0,82g	322	1,38	1,37	18,9	0,81
	Concepción	234	1,08	0,66	14,7	
	Maule 2	210	0,48	0,68	6,4	
Estructura 7 pisos, muros 2,3 m (corte obj. de 15%)	Kobe 0,82g	218	1,29	1,09	17,4	1,06
	Concepción	217	1,93	0,95	26,4	
	Maule 2	200	0,86	0,43	11,4	

ANEXO 6.6 Distintos análisis en estructuras CLT con conectores disipadores de energía que utilizan el sistema *balloon*

Uno de los análisis que se realizó para verificar la efectividad de las Ecuaciones 4.1 a 4.6 que definen las cargas de deslizamiento y de fluencia en los disipadores fue aumentar la carga vertical en el modelo de la estructura de tres pisos con disipadores y analizar si el corte alcanzado se mantenía en el porcentaje obtenido en las ecuaciones. Para esto, el corte objetivo se mantuvo en un 25% del peso de la estructura, pero se varió el peso total de 507 kN a 820 kN y se aplicó el registro de Kobe 0,82g a ambos modelos. En la Figura A.6.26, se observa la curva del corte basal y el desplazamiento en el techo de la estructura, se puede ver el aumento en el valor de la fuerza de corte manteniéndose en el 25% del peso total en cada modelo (excluyendo los *peaks* aislados

que aparecen en el corte basal). De esta manera, se corrobora que el corte objetivo definido en las Ecuaciones 4.1 a 4.6 depende de la carga vertical que tenga la estructura.

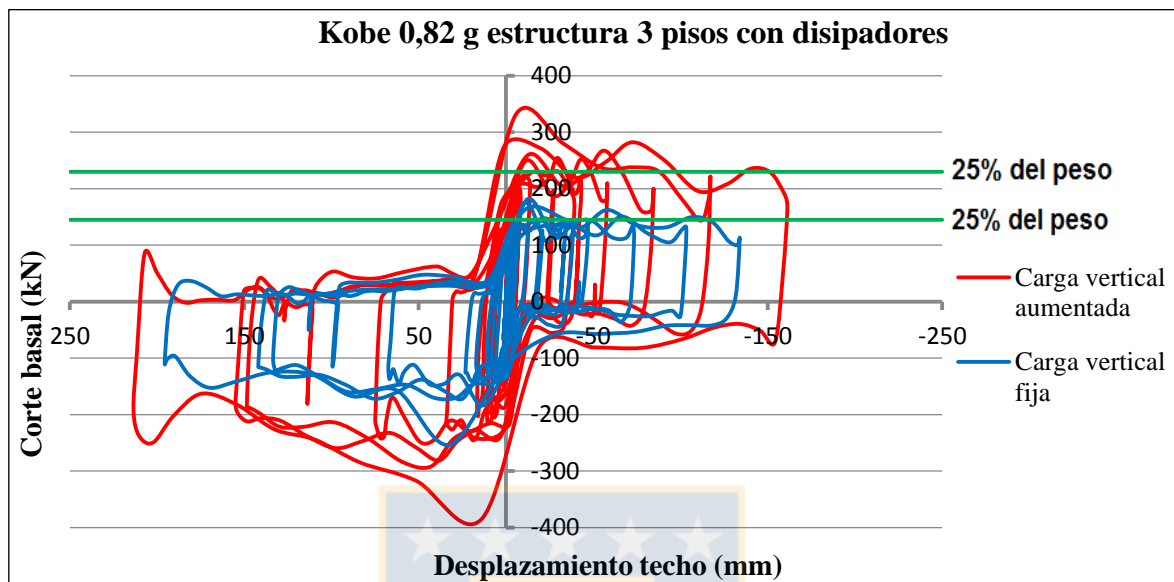


Figura A.6.26 Curva corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g, estructura tres pisos con disipadores y distinta carga vertical

Otro de los análisis que se realizó para verificar la efectividad de las Ecuaciones 4.1 a 4.6 fue aumentar la fuerza de deslizamiento en los disipadores friccionales en el modelo de la estructura de tres pisos con disipadores utilizando el sistema *balloon* y analizar si el corte basal alcanzado aumentaba en el porcentaje que indican las ecuaciones utilizadas. Se aumentó en un 85% la fuerza de deslizamiento en los disipadores, según las ecuaciones desarrolladas el corte basal debía aumentar de un 25% a un 35% del peso total de la estructura. A ambos modelos se les aplicó el registro de Kobe 0,82g. En la Figura A.6.27, se observa la curva del corte basal y el desplazamiento en el techo de la estructura, se puede ver que la fuerza de corte aumentó en el porcentaje que se esperaba (excluyendo los *peaks* aislados que aparecen en el corte basal). Esto quiere decir que mediante las Ecuaciones 4.1 a 4.6, se obtienen valores confiables que definen el comportamiento de las estructuras, y que el corte objetivo depende de la fuerza de deslizamiento y de fluencia que tengan los disipadores.

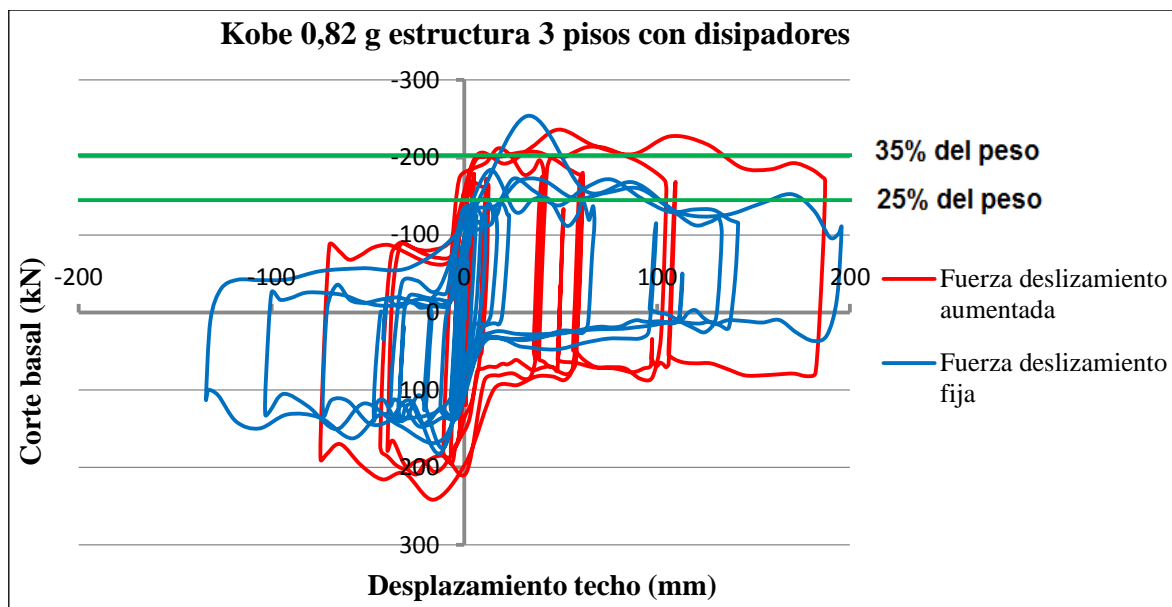


Figura A.6.27 Curva corte-desplazamiento para registro de Kobe 0,82g, estructura tres pisos con disipadores y distinta carga de deslizamiento en disipador friccional

Se realizó otro análisis en el cual se aplicó el registro Maule 2 amplificado en 1,5 y 2 veces al modelo de la estructura de tres pisos que utiliza el sistema *balloon* con disipadores para un corte objetivo de 19% del peso total del modelo. En las Figuras A.6.28 y A.6.29, se pueden ver las curvas del corte basal y el desplazamiento en el techo del modelo para cada análisis. Se observó que el corte se mantuvo en el valor objetivo cuando los muros ya habían pivoteado y se estaban desplazando lateralmente, pero se pueden ver *peaks* muy marcados en el corte basal en el momento en que los muros vuelven a su posición inicial e impactan con la fundación para luego volver a pivotar. Este fenómeno se presenta generalmente cuando los desplazamientos laterales y las aceleraciones son muy altos, debido a que mientras más se amplificó el registro, este fenómeno fue aumentando. Se obtuvieron aceleraciones máximas de 1,16g y 1,48g en la losa del segundo piso y *drifts* de 1,31% y 1,91% en los modelos para el registro Maule 2 amplificado en 1,5 y 2 veces respectivamente.

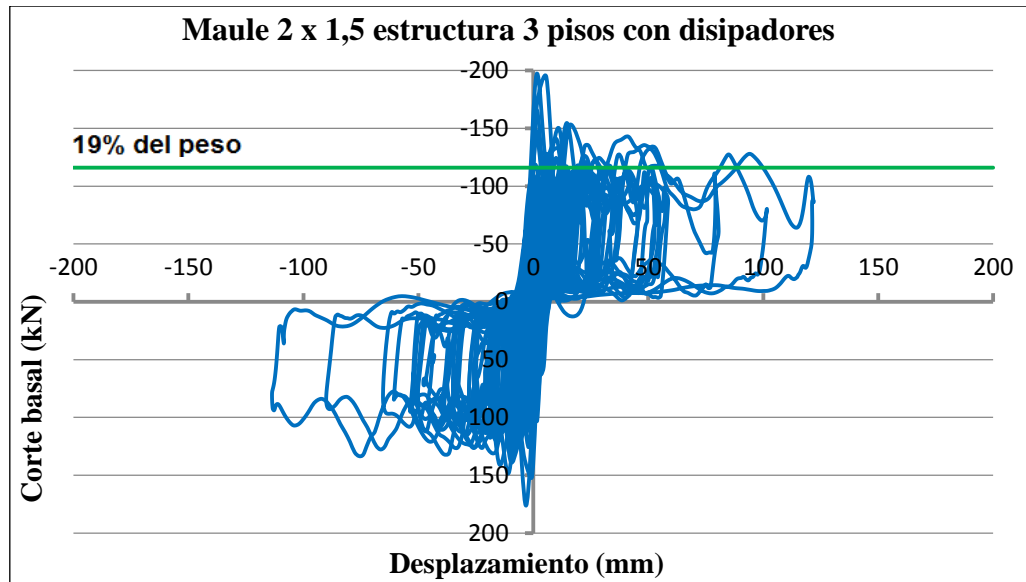


Figura A.6.28 Curva corte-desplazamiento para registro Maule 2 amplificado 1,5 veces, estructura tres pisos con disipadores

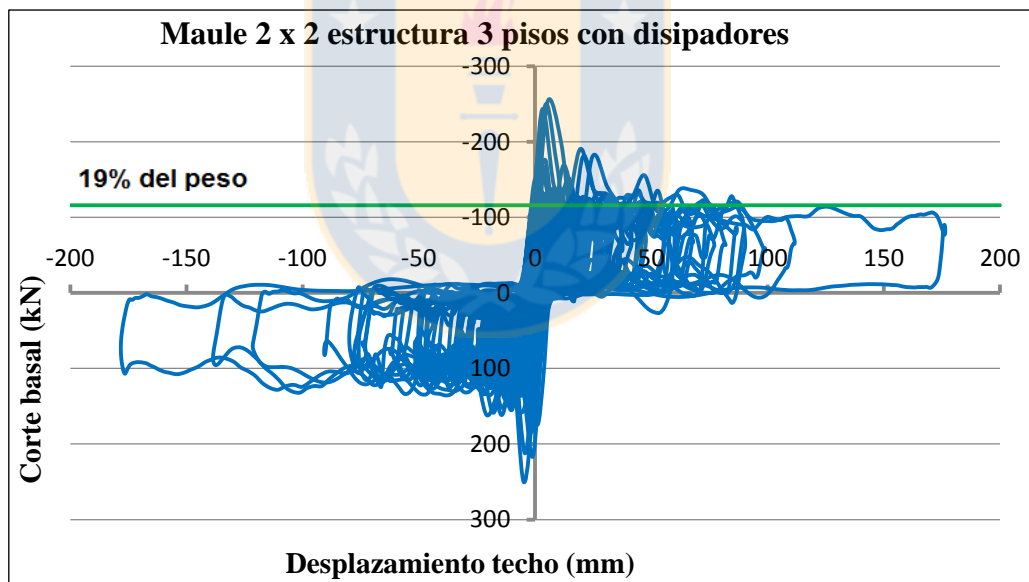


Figura A.6.29 Curva corte-desplazamiento para registro Maule 2 amplificado 2 veces, estructura tres pisos con disipadores