



ESTIMACION DE LA PERDIDA DE RIGIDEZ LATERAL DE MUROS CLT DE 2 PISOS CON TECNICAS NO DESTRUCTIVAS

ESTIMATION OF THE LOSS OF LATERAL STIFFNESS OF 2-STORIES CLT WALLS BY NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUES

Opazo-Vega, Alexander ^{(1)*}; Benedetti, Franco ⁽¹⁾; Rosales, Victor ⁽²⁾; Jara, Alan ⁽¹⁾; Sepúlveda Sebastián ⁽¹⁾, Oyarzo, Claudio ⁽³⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile

⁽²⁾ Departamento de Ciencias de la Construcción. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción.

* Contacto: aopazove@ubiobio.cl

CÓDIGO: 4620284

Resumen

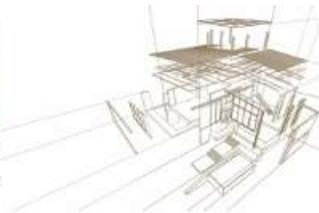
En Chile el sistema constructivo de paneles madera contralaminada (CLT) está surgiendo como una alternativa para alcanzar las metas de construcción sustentable en un país con alta sismicidad. La rigidez de este sistema estructural depende principalmente de sus conexiones, que generalmente consisten en elementos metálicos de pequeño espesor que se clavan o atornillan a la madera. Cuando ocurren movimientos sísmicos estas uniones pierden rigidez debido al daño provocado por la fluencia de los conectores y aplastamientos en la madera. Estos daños generalmente quedan escondidos por los revestimientos de terminación de muros y losas, por lo que es difícil inspeccionarlos luego de un evento sísmico. El objetivo del presente trabajo es estimar la pérdida de rigidez de muros CLT a través de ensayos no destructivos basados en vibraciones. Se construyen 2 muros de CLT de sección H de 2 pisos (2400mm x 4200 mm x 1200 mm), con sus respectivos conectores, y posteriormente se someten a ensayos cíclicos no reversibles de carga horizontal. Los muros se instrumentan con acelerómetros y se aplican ensayos de impacto modal después de cada ciclo de carga horizontal, obteniéndose la variación de sus propiedades dinámicas. Los resultados experimentales demuestran que cuando la rigidez tangente global del muro alcanza el 28% del valor original, el periodo fundamental de vibración aumenta en 1.52 veces. De esta forma se observa el potencial de esta técnica no destructiva para la inspección y rehabilitación sísmica de edificios con paneles CLT.

Palabras-clave: madera contralaminada, análisis modal experimental, daño sísmico.

Abstract

In Chile, the construction system of cross-laminated timber panels (CLT) is emerging as an alternative to achieve the goals of sustainable construction in a country with high seismicity. The stiffness of this structural system depends mainly on its connections, which generally consist of steel elements of small thickness that are nailed or screwed to the wood. When seismic movements occur, these joints lose stiffness due to the damage caused by the fluence of the connectors and crushing in the wood. These damages are usually hidden by the finishing boards of walls and slabs, so it is difficult to inspect them after a seismic event. The objective of the present work is to estimate the loss of stiffness of CLT walls through non-destructive vibration-based tests. Two CLT walls of two-story height (section H 2400mm x 4200mm x 1200mm) are constructed, with their respective connectors, and then subjected to non-reversible cyclic horizontal load tests. The walls are instrumented with accelerometers, and modal impact tests are applied after each horizontal load cycle, obtaining the variation of their dynamic properties. The experimental results show that when the global tangent stiffness of the wall reaches 28% of the original value, the fundamental period of vibration increase by 1.52 times. In this way, the potential of this non-destructive technique for seismic inspection and rehabilitation of buildings with CLT panels is observed.

Keywords: cross laminated timber, experimental modal analysis, seismic damage.



1. INTRODUCCIÓN

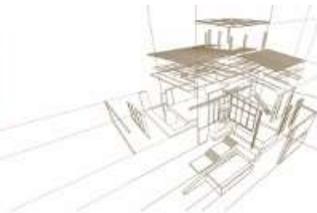
En Chile el sistema constructivo de paneles madera contralaminada (CLT) está surgiendo como una alternativa para alcanzar las metas de construcción sustentable en un país con alta sismicidad. La rigidez de este sistema estructural depende principalmente de sus conexiones, que generalmente consisten en elementos metálicos de pequeño espesor que se clavan o atornillan a la madera. Cuando ocurren movimientos sísmicos estas uniones pierden rigidez debido al daño provocado por la fluencia de los conectores y aplastamientos en la madera. Estos daños generalmente quedan escondidos por los revestimientos de terminación de muros y losas, por lo que es difícil inspeccionarlos luego de un evento sísmico.

Una de las formas de detectar el nivel de daño en edificios estructurados con muros CLT es medir la variación de su frecuencia fundamental de vibración lateral. Esta técnica ha sido utilizada frecuentemente en edificios compuestos por otros materiales, tales como hormigón armado, albañilería y acero. En términos generales, si se asume que un edificio no sufre cambios relevantes en su masa, la pérdida de rigidez se podría estimar indirectamente a partir de la disminución de su frecuencia fundamental lateral. Por lo anterior, usualmente se hacen mediciones comparativas de frecuencias de vibración, antes y después de algún evento que se estima podría provocar algún daño estructural.

La medición de frecuencias de vibración en edificios estructurados con muros CLT, ha sido motivo de interés para diversos investigadores, tanto en condiciones de laboratorio (Ceccotti et al. 2006, Ceccotti et al. 2013, Hristovski et al. 2013, Flatscher et al. 2015, Popovski et al. 2015, Yasamura et al. 2016, Hristovski et al. 2017) como en terreno (Reynolds et al. 2015, Reynolds et al. 2016). En general estos estudios reportan frecuencias laterales de vibración que van entre 1.76 Hz para edificios de 7 pisos, hasta 16.21 Hz para prototipos de 1 piso. En algunos estudios de laboratorio también se midieron las disminuciones en las frecuencias laterales antes y después de alguna sollicitación lateral que inducía daño. Estas disminuciones generalmente variaban entre un 5% y un 36% dependiendo del tipo de sollicitación lateral.

Los resultados de las investigaciones mencionadas en los párrafos anteriores, aunque son una muy buena referencia y guía, no pueden aplicarse directamente a la práctica de construcción de edificios estructurados en CLT en Chile. La principal especie maderera utilizada en Chile para fabricar paneles CLT es el Pino Radiata, proveniente de bosques de rápido crecimiento asociados a la industria de la celulosa. Por lo tanto, estas piezas de madera tienen densidades y propiedades mecánicas inferiores a las informadas por otros investigadores. Además, en Chile, el desarrollo relacionado con la fabricación y montaje de los paneles CLT es aún incipiente. De esta forma se justifica realizar ensayos adicionales compatibles con la realidad constructiva chilena.

El objetivo del presente trabajo es estimar la pérdida de rigidez lateral de muros CLT de 2 pisos, construidos en Chile, a través de ensayos no destructivos basados en vibraciones. Para lograr lo anterior, se intercalaron ciclos incrementales de carga lateral estática a los muros, con golpes de baja energía que inducían pequeñas vibraciones. De esta forma, instrumentando los muros con acelerómetros y utilizando técnicas de análisis modal experimental, se analizaron las posibles relaciones entre la pérdida de rigidez lateral estática y la disminución de la frecuencia lateral fundamental de vibración. Los datos obtenidos son información valiosa para la futura implementación de esta metodología en los próximos edificios estructurados con muros de CLT que se construirán en Chile.



2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Descripción de los prototipos de muros CLT y la implementación de ensayos vibratorios

Se ensayaron 2 prototipos de muros CLT de 2 pisos, fabricados con piezas de madera de Pino Radiata, grado estructural mecánico C16, y pegados con adhesivos del tipo poliuretano. Se configuraron paneles de 3 capas, con espesores finales de 100 mm. Un módulo 3D típico de 2 pisos de altura se configuro con el ensamble de 10 paneles. En la Figura 1 se muestran algunas vistas del prototipo y las dimensiones nominales.



Figura 1: Dimensiones, vistas de los muros e implementación en laboratorio

La diferencia entre los 2 muros construidos básicamente radica en los tipos de herrajes metálicos y elementos de conexión entre paneles. Todos estos fueron donados por la empresa Simpson Strong Tie. En la Tabla 1 se detalla los elementos constructivos de unión utilizados.

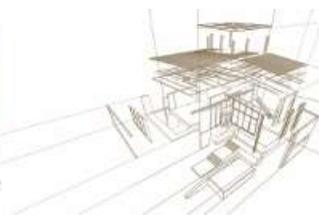


Tabla 1: Características de los elementos de unión en los muros

Tipo de union	Uniones en muro 1	Uniones en muro 2
Muros laterales (alas) con losas	Hold down HTT4, clavos anulares CNA 4x60, tornillos SDWS22800	Hold down HTT4, clavos anulares CNA 4x60, tornillos SDWS22800
Muros centrales (alma) con losas	Hold down HTT4, Angle brackets ABR255, clavos anulares CNA 4x60, tornillos SDWS22800	Angle brackets ABR255, clavos anulares CNA 4x60, tornillos SDWS22800
Muro central con muro central	Unión tipo spline con pieza madera pino radiata y tornillos DSVT3R	Unión tipo spline con pieza madera pino radiata y tornillos DSVT3R
Muros laterales con muros centrales	tornillos SDWS22800	tornillos SDWS22800

El ensayo de carga estática lateral cíclica no reversible se realizó a través de un actuador hidráulico ubicado a nivel superior del segundo piso de los muros. Además, se instalaron una serie de transductores de desplazamientos para monitorear el comportamiento de los muros en las direcciones horizontales y verticales, tanto en términos globales como relativos entre paneles. Se realizaron ciclos de carga-descarga, con incrementos de 0.5 T hasta llegar a las 5 T. De esa carga en adelante, se aplicaron incrementos de 1 T hasta la falla del muro, o una eventual pérdida de estabilidad que pusiera en peligro a los operarios y la instrumentación.

Para realizar los ensayos no destructivos basados en vibraciones se instalaron 6 acelerómetros uniaxiales, en el muro lateral ubicado en el sector opuesto a la aplicación de carga del actuador hidráulico. Los acelerómetros fueron distribuidos en toda la altura del muro, tenían una sensibilidad de 100 mV/g y sus señales fueron registradas a una frecuencia de muestreo 1652 Hz. La excitación vibratoria de los muros se realizó a través de una serie de impactos de baja energía, aplicados a distintas alturas, pero en la misma dirección de la carga estática.

2.2. Técnicas de identificación de las frecuencias de vibración de los muros CLT

Para identificar las propiedades modales de los muros (frecuencias, razones de amortiguamiento y modos de vibrar) se utilizaron herramientas de análisis modal operacional (OMA), ya que estas requieren conocer solo la respuesta vibratoria de una estructura, pero no necesariamente el valor de la excitación. Dentro de los posibles métodos OMA se seleccionó el de Identificación de Subespacios Estocásticos (SSI) (Van Overschee and De Moor 1996), debido a las ventajas que presenta en términos de precisión al trabajar en el dominio del tiempo directamente. El software ARTeMIS Modal Pro fue utilizado para encontrar los modos de vibrar y las respectivas frecuencias vibratorias de los muros CLT al ser sometidos a impactos de baja energía.

SSI es un método paramétrico que se fundamenta en el análisis de la respuesta tiempo-historia o funciones de correlación. El objetivo principal del método SSI es ajustar un modelo paramétrico directamente a la serie de datos bruta. En ese contexto, se entiende un modelo paramétrico como un modelo matemático que posee ciertos parámetros que pueden ser modificados para cambiar la forma en que el modelo se ajusta a los datos medidos. Este set de parámetros puede minimizar la desviación entre la respuesta simulada (modelada) y la respuesta medida del sistema. El propósito de la estimación con modelos paramétricos es determinar un modelo adecuado, con un número razonable de parámetros (orden del modelo), tal que el



comportamiento dinámico y estadístico sea correctamente representado. En general, en el método SSI no es posible determinar de antemano el orden del modelo (dimensión “n”). Por lo tanto, es necesario repetir el análisis con diferentes valores de “n” y verificar la repetibilidad de los resultados. Este procedimiento iterativo se logra construyendo un diagrama de estabilización. Si se hace el seguimiento a la evolución de los modos, para distintos ordenes incrementales del modelo, es posible identificar aquellos que tienen sentido físico, ya que se alinean verticalmente de una forma estable. En cambio, los modos espurios matemáticos tienden a ser más desalineados e inestables. Mas detalles del método SSI se pueden encontrar en el libro de Rainieri et al. (2014).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Respuestas de los muros bajo cargas estáticas

En la Figura 2 se muestran las curvas de carga lateral versus desplazamiento lateral en el piso 2, para los 2 muros en estudio.

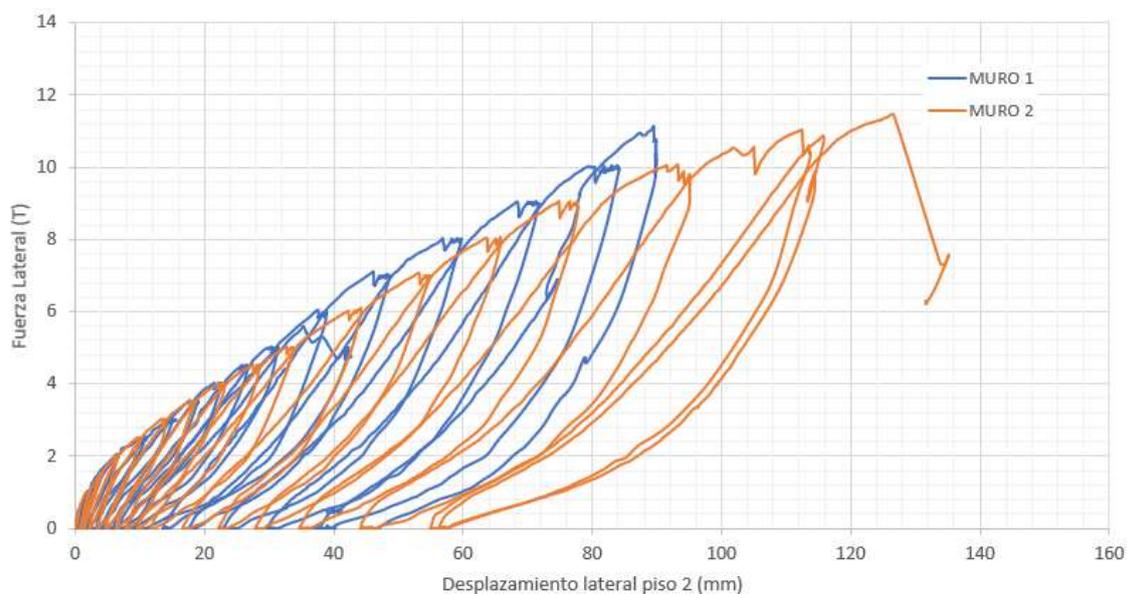


Figura 2: Curvas carga lateral vs desplazamiento lateral piso 2

Como se puede ver de la Figura 2, en los dos muros se generaron comportamientos globales bastante similares, con pérdidas de rigidez lateral evidentes a medida que se aumentaba la carga. Esto se debió a que los distintos conectores fueron ingresando de manera secuencial a su rango no lineal, principalmente en los herrajes anti-levantamiento (hold-down) de los extremos cercanos a la carga, y los tornillos instalados en la unión del tipo spline entre los paneles centrales. Ambos muros fueron capaces de resistir cargas hasta las 11 T aproximadamente, sin embargo, el muro 2 tuvo una capacidad de deformación lateral mayor antes de fallar.

3.2. Frecuencias detectadas en los muros

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de detección de las frecuencias de vibración lateral de los muros, inducidos por impactos de baja energía, a través del diagrama de estabilización del método SSI.

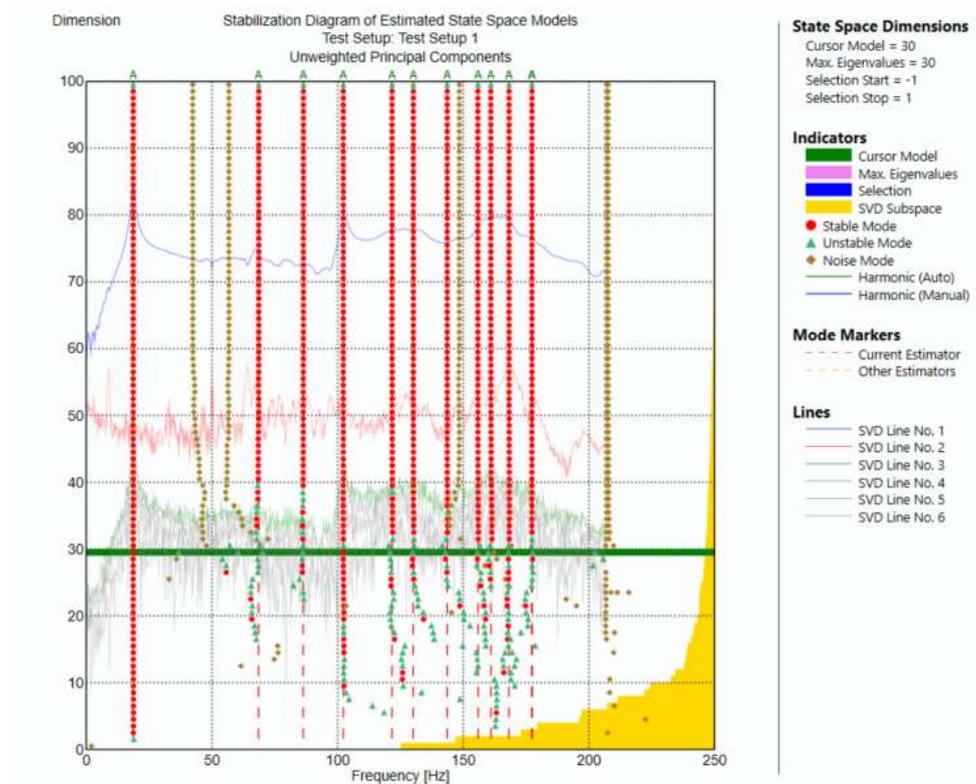
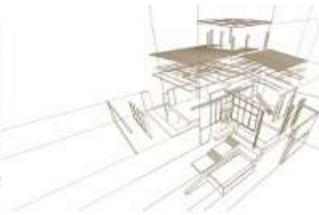
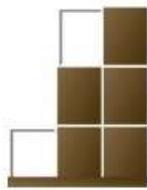


Figura 2: Diagrama de estabilización para la detección de frecuencias de vibración a través de SSI (muro1, carga lateral de 2.5 T)

De la Figura 2, se observan una serie de líneas verticales rojas, que se ordenan para distintos valores de frecuencias. La frecuencia lateral fundamental del muro para este caso fue de 18.67 Hz. En la Figura 3 se muestran las frecuencias laterales fundamentales obtenidas después de cada ciclo de carga lateral estática, para el muro 1.

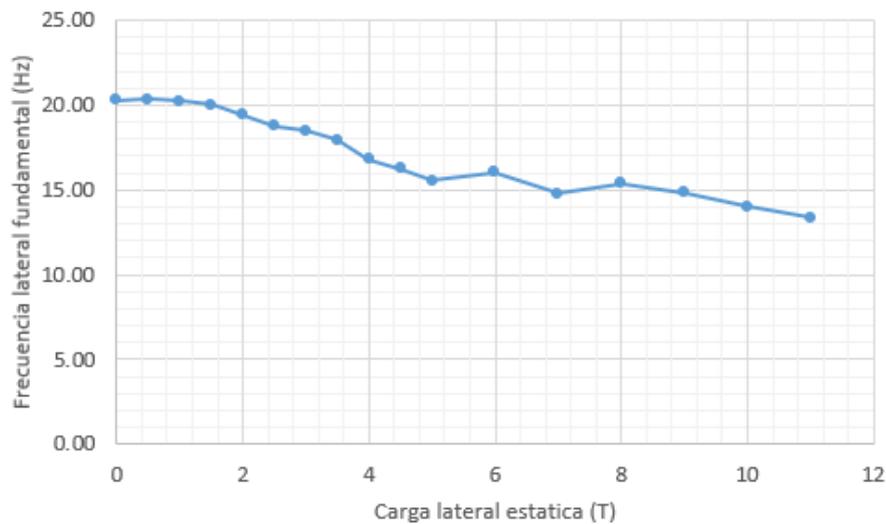


Figura 3: Variación de las frecuencias fundamentales laterales detectadas por el método SSI para distintos niveles de cargas laterales estáticas (muro1)



Como se puede ver de la Figura 3, la frecuencia fundamental en el muro 1 disminuyó desde un valor de 20.30 Hz (antes de aplicar cargas laterales estáticas, muro sin daño) hasta un valor de 13.38 Hz (muro con daño previo al colapso). Esta disminución de un 34% en la frecuencia fundamental, también se podría enunciar como un aumento en el periodo de vibración de 1.52 veces. Para esa condición de daño extremo, la rigidez tangente global del muro solo alcanzó a ser 0.28 veces la rigidez inicial. En la Figura 4 se muestra el nivel de daño que presentó el muro previo al colapso.



Figura 4: Modos de falla del muro 1 previo al colapso

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha logrado establecer una relación entre la pérdida de rigidez lateral y el aumento del periodo natural de vibración de un prototipo de estructura de 2 pisos conformada por paneles CLT fabricados y montados en Chile. Para el caso de estudio se concluyó que un aumento de 1.5 veces en el periodo fundamental de vibración de la estructura (con respecto a su condición sin daño), corresponde a una pérdida de rigidez considerable, asociada a un estado previo al colapso. Con los resultados obtenidos en este estudio se pueden comenzar a plantear criterios de evaluación del daño estructural de este tipo de estructuras en terreno, a través de la medición periódica de la frecuencia natural de vibración, utilizando métodos no destructivos en base a vibraciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del contexto del Grupo de Investigación “Desarrollo de Sistemas Estructurales en Madera” de la Universidad del Bío-Bío, y del programa de Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARTEMIS Modal Pro, Version 5.3, Structural Vibration Solutions A/S, Aalborg Denmark, Copyright 1999–2013.
- Boscato, G.; Russo, S.; Ceravolo, R. (2015). Global sensitivity-based model updating for heritage structures. *Comput-Aided Civ. Inf.*, v.30, n. 8, p. 620-635.
- Ceccotti, A., Sandhaas, C., Okabe, M., Yasumura, M., Minowa, C., & Kawai, N. (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. <https://doi.org/10.1002/eqe.2309>
- Flatscher, G., & Schickhofer, G. (2015). Shaking-table test of a cross-laminated timber structure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 168(11), 878-888. <https://doi.org/10.1680/stbu.13.00086>
- Hristovski Viktor, Dujic Bruno, Stojmanovska Marta, & Mircevska Violeta. (2013). Full-Scale Shaking-Table Tests of XLam Panel Systems and Numerical Verification: Specimen 1. *Journal of Structural Engineering*, 139(11), 2010-2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000754](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000754)
- Hristovski, V., Mircevska, V., Dujic, B., & Garevski, M. (2018). Comparative dynamic investigation of cross-laminated wooden panel systems: Shaking-table tests and analysis. *Advances in Structural Engineering*, 21(10), 1421-1436. <https://doi.org/10.1177/1369433217749766>
- Popovski Marjan, & Gavric Igor. (2016). Performance of a 2-Story CLT House Subjected to Lateral Loads. *Journal of Structural Engineering*, 142(4), E4015006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001315)
- Rainieri, C.; Fabbrocino, G. (2014). *Operational modal analysis of civil engineering structures*. Springer, New York.
- Reynolds, T., Harris, R., Chang, W.-S., Bregulla, J., & Bawcombe, J. (2015). Ambient vibration tests of a cross-laminated timber building. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 168, 121-131.
- Reynolds, Thomas, Casagrande, D., & Tomasi, R. (2016). Comparison of multi-storey cross-laminated timber and timber frame buildings by in situ modal analysis. *Construction and Building Materials*, 102, 1009-1017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.056>
- Van Overschee, P.; De Moor, B.L. (1996). *Subspace identification for linear systems: Theory—Implementation—Applications*, Kluwer Academic Publishers; The Netherlands, Dordrecht.
- Yasumura Motoi, Kobayashi Kenji, Okabe Minoru, Miyake Tatsuya, & Matsumoto Kazuyuki. (2016). Full-Scale Tests and Numerical Analysis of Low-Rise CLT Structures under Lateral Loading. *Journal of Structural Engineering*, 142(4), E4015007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001348](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001348)