

PRESENTACIÓN

La construcción con madera ofrece beneficios ambientales relevantes si la materia prima proviene de plantaciones forestales locales y de una explotación sustentable. Costa Rica, desde los años 90, ha desarrollado una intensa política forestal, sin que esto se vea reflejado en el uso de la madera para construcción a nivel local. Actualmente, se cuenta con madera de plantación de buena calidad que está siendo mayoritariamente exportada. En un país con una alta amenaza sísmica, la construcción con entramado ligero de madera es muy pertinente, al presentar estas estructuras un buen comportamiento ante sismos de gran magnitud [1]. Estas estructuras no se limitan a una o dos alturas, varios ejemplos demuestran el potencial de construir de manera eficiente y sostenible en construcciones de media altura [2]. En este tipo de edificios, las acciones horizontales provocadas por el viento o los sismos son resistidas por un sistema de muros de cortante conectados a un diafragma de forjados [3]. El muro de cortante del entramado de madera consiste en montantes y durmientes de madera maciza, arriostrado por tableros estructurales conectados mediante clavijas tipo tirafondo o clavo. Esta investigación busca, mediante una campaña experimental, estudiar la capacidad de un sistema propuesto de entramado ligero, construido con madera nacional y materiales accesibles en el entorno local, ante cargas sísmicas.

METODOLOGÍA

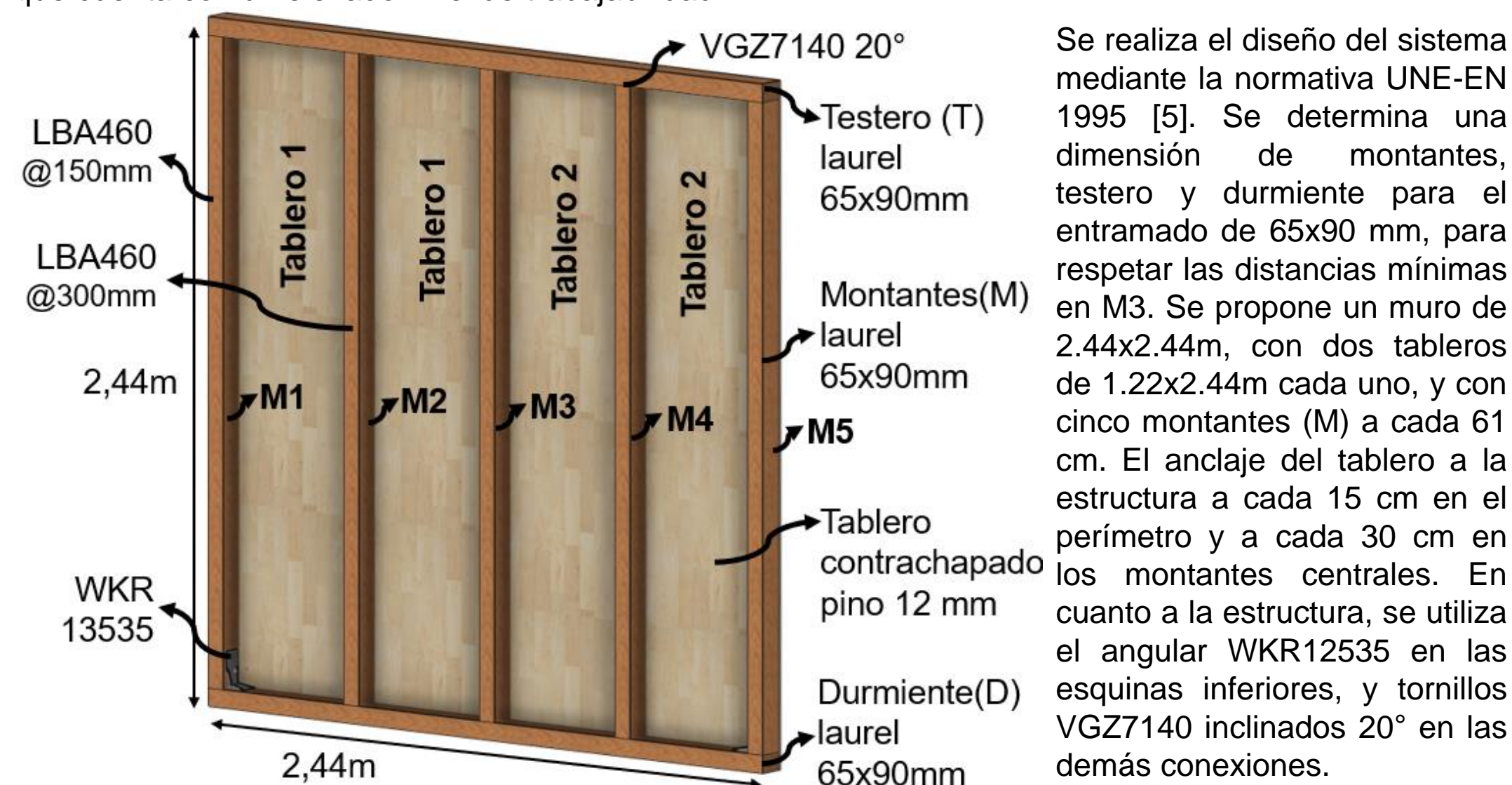
Buscando contar con información valiosa para la industria de construcción en Costa Rica, y para el análisis del entramado ligero ante cargas sísmicas, se realiza la investigación en tres fases: teórica, experimental y analítica.

En la revisión bibliográfica se determina que la mejor forma de realizar el abordaje experimental y analítico es mediante un enfoque multiescala, el cual permite abordar los desafíos generados por los modelos simplificados, especialmente en estructuras con comportamiento no lineal debido a las interacciones locales [4].

Como se puede observar en la figura, se determina que la primera escala se trate de dos conexiones con un gran impacto en la capacidad del sistema de entramado ligero para soportar cargas laterales, como lo son:

- Tablero-Entramado (T-E): mediante el clavo tipo anker LBA460
- Entramado-Entramado (E-E): escuadra de anclaje a tensión, tipo *hold-down*, WKR35135

La segunda escala se trata de un muro completo de entramado según el diseño propuesto. Se realiza un análisis de los materiales disponibles y accesibles, buscando proponer un sistema localmente viable. A nivel de tablero, se utiliza un contrachapado de 12 mm de espesor de pino (*Pinus radiata*). En cuanto a la madera, se decide utilizar la madera de Laurel (*Cordia alliodora*), que es una madera moderadamente liviana, con muy buenas capacidades mecánicas, conocida y disponible en el mercado costarricense, y que cuenta con un elevado nivel de trabajabilidad.

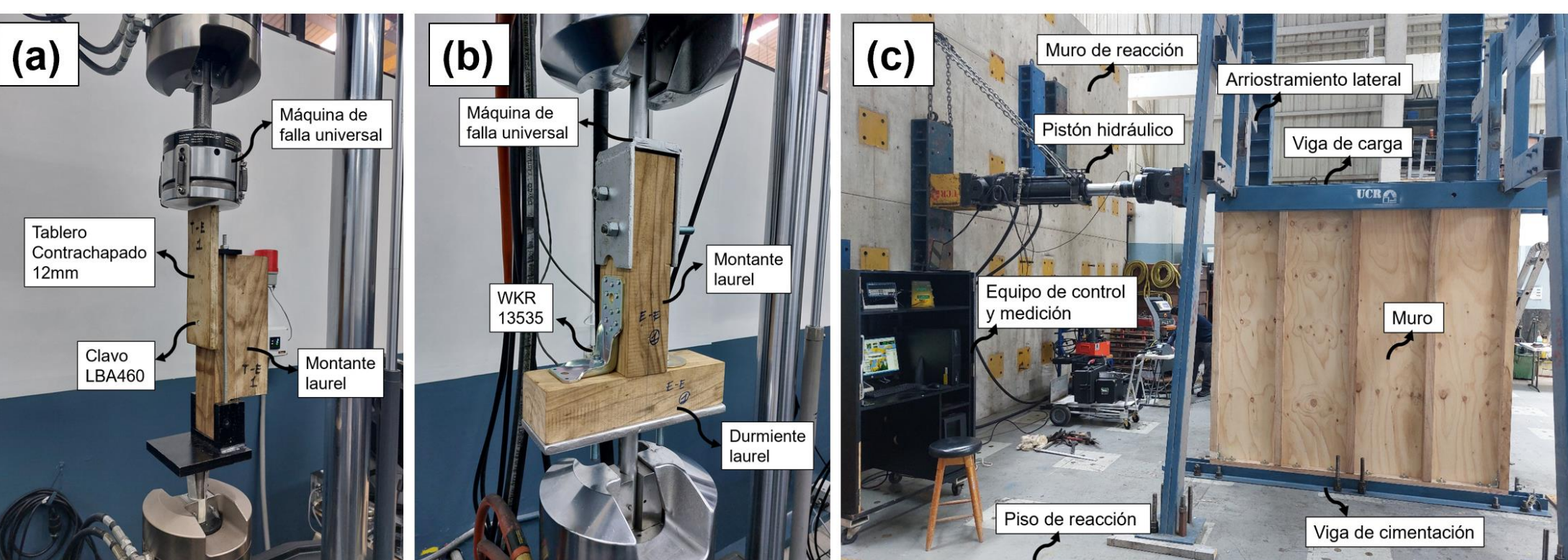


CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La fase experimental de la investigación se desarrolló en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la Universidad de Costa Rica (UCR), ubicado en San José.

La norma de referencia para la realización de las pruebas es la ASTM E2126 *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings* [6], que constituye la norma más actualizada para la ejecución de pruebas de carga cíclica quasi-estática.

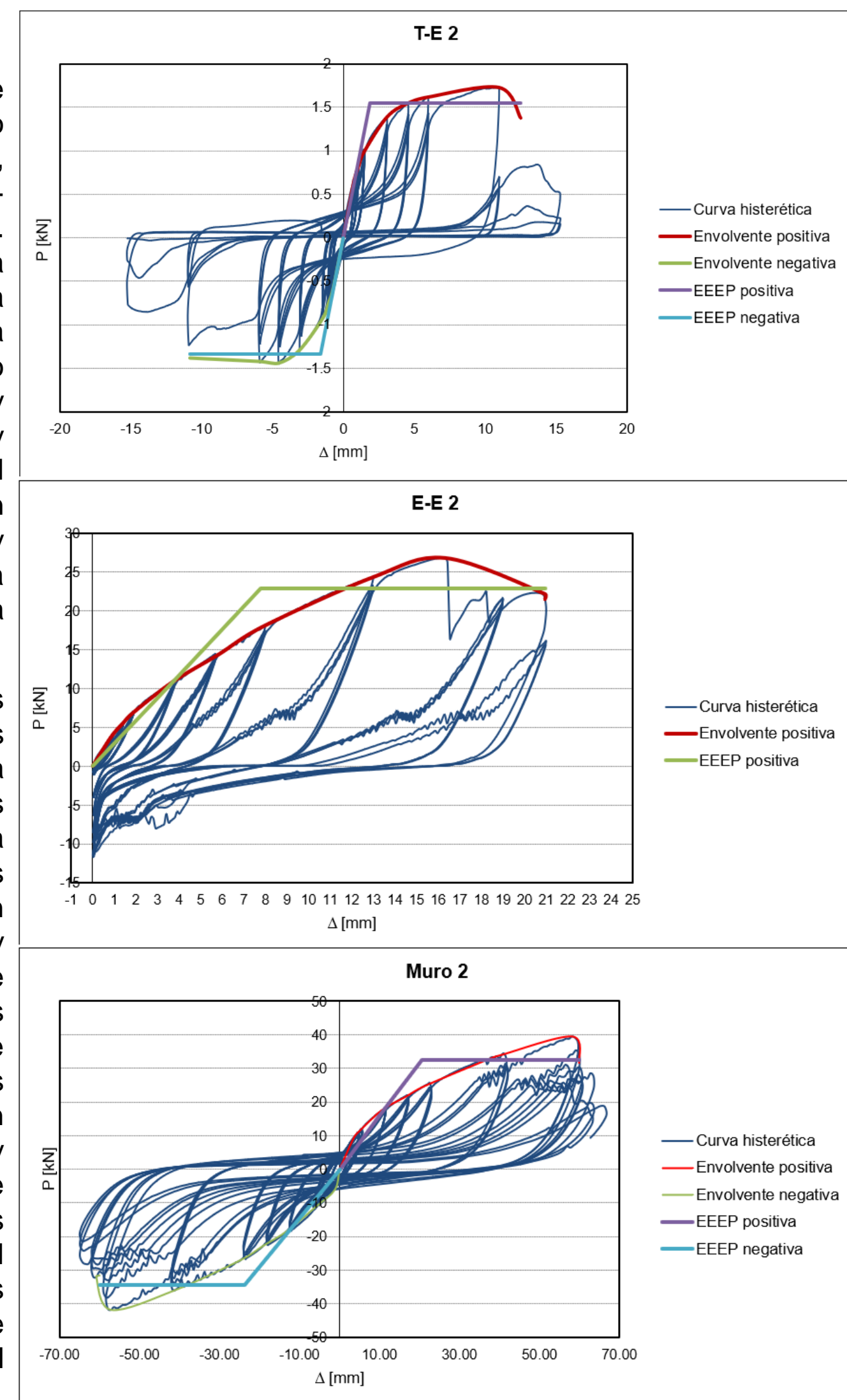
Se trabaja con tres probetas según las escalas de la investigación: conexión T-E (a), conexión para cargas de tensión E-E (b), y el muro completo (c). Para cada una de estas escalas se probaron tres especímenes, uno ante carga monotónica constante, para obtener valores límite, y dos ante carga cíclica quasi-estática, para determinar el comportamiento histerético ante cargas dinámicas. Los especímenes cuentan con una densidad y contenido de humedad de 385 kg/m³ y 14.02% para la madera laurel, y 521.45 kg/m³ y 10.87% para el tablero, respectivamente.



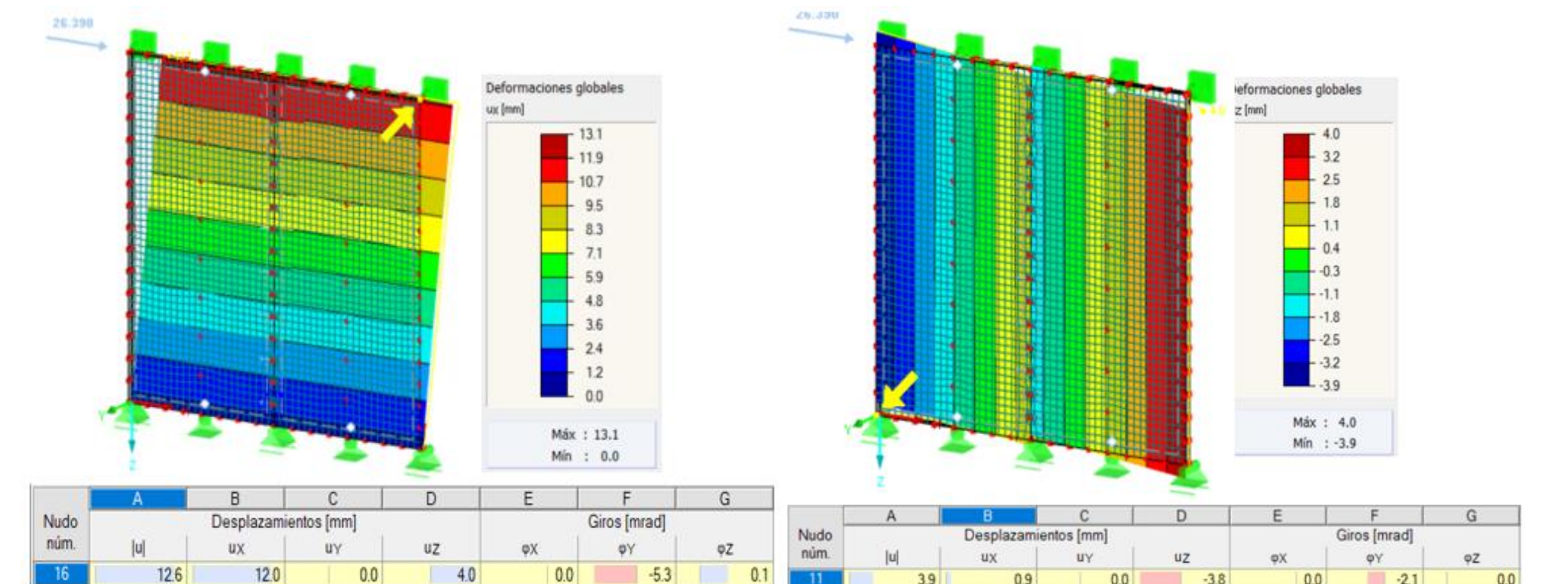
RESULTADOS

Para cada uno de los especímenes se obtienen curvas de comportamiento histerético. Se determina la envolvente, que abarca los puntos de carga-desplazamiento máximos de cada ciclo. Se determina la curva de energía elastoplástica equivalente (EEEE), cuya área bajo la curva es igual que el área bajo la curva envolvente. Este método se utiliza para determinar la carga y desplazamiento de cedencia (P_{ced} y Δ_{ced}), en la cual el espécimen pasa al rango plástico. En la figura se muestran las curvas histeréticas, envolventes y EEEP de los especímenes n°2 en cada una de las escalas, sometidos a carga cíclica quasi-estática.

Se obtuvieron los resultados mostrados en la siguiente tabla, los cuales permiten establecer una comparativa entre las capacidades de los especímenes sometidos a carga monotónica constante, y los sometidos a carga cíclica. Se puede establecer un análisis de la ductilidad, rigidez y energía disipada del sistema de entramado ligero, a partir de las propiedades de sus componentes. Se realiza un análisis comparativo de las capacidades del sistema propuesto con respecto a investigaciones anteriores y valores obtenidos según códigos de diseño. Se realiza también un análisis de las deformaciones obtenidas en el laboratorio, con respecto a las obtenidas utilizando un modelo de elementos finitos en el software Dlubal RFEM 5



Especimen	Ductilidad	P_{max} (kN)	Δ_{max} (mm)	P_{ced} (kN)	Δ_{ced} (mm)	Rigidez k_s (kN/m)
T-E 1 (monotónica)	4.30	1.99	13.20	1.75	3.62	488.68
T-E 2 (cíclica)	6.68	1.73	10.98	1.54	1.93	827.55
T-E 3 (cíclica)	4.40	1.70	10.99	1.53	3.54	438.67
E-E 1 (monotónica)	1.65	28.68	12.86	27.42	11.25	2447.03
E-E 2 (cíclica)	2.69	26.81	16.32	22.91	7.86	2936.09
E-E 3 (cíclica)	3.62	26.85	16.18	17.21	5.87	2966.42
Muro 1 (monotónica)	2.80	41.5	94.47	36.15	40.98	882.03
Muro 2 (cíclica)	2.92	39.5	58.53	32.62	20.69	1581.39
Muro 3 (cíclica)	2.43	42.82	58.86	35.82	24.90	1436.8



PRINCIPALES CONCLUSIONES

- El sistema de entramado ligero propuesto se puede clasificar como de ductilidad baja (DCL) según la versión actual del Eurocódigo 8. Se considera adecuada el cambio de los factores de modificación (q) para la nueva versión del Eurocódigo 8, mediante el cual el sistema se podría clasificar como de ductilidad media (DCM).
- La especie de madera utilizada en la estructura tiene una baja influencia sobre la capacidad de resistencia a carga lateral del sistema.
- La calidad de los conectores utilizados para unir el tablero a la estructura del muro ejerce una influencia directa en la capacidad de este frente a cargas laterales paralelas a su plano.
- La calidad y capacidad del conector angular tipo *hold-down* en los puntos de máxima tracción ejerce una influencia directa sobre la rigidez ante cargas horizontales paralelas al plano del muro.
- La aplicación de cargas cíclicas provoca un desgaste en los conectores que genera que su resistencia de carga máxima (P_{max}) caiga con respecto a la carga monotónica.
- La falla del sistema de entramado ligero se generó en los elementos de conexión del tablero a la estructura (T-E), lo cual garantizó una falla dúctil, como es deseado.
- El método de energía elastoplástica equivalente (EEEE) no es siempre el más adecuado para la obtención del valor de ductilidad, ya que se obtienen valores más pequeños que los observados en las curvas experimentales.
- El modelo de métodos numéricos de Dlubal RFEM 5 genera unos desplazamientos inferiores a los obtenidos en el laboratorio.
- Se generaron una serie de recomendaciones para el diseño y construcción de entramado ligero en Costa Rica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. W. Dinehart and H. W. Shenton, "Comparison of static and dynamic response of timber shear walls," vol. 124, no. 1, pp. 686–695, 1996.
- [2] S. Pei, J. W. Van De Lindt, S. E. Pryor, Hidemaru Shimizu, and D. R. Rammer, "Seismic testing of a full-scale mid-rise building: The NEESWood Capstone Test," vol. 0529903, no. Cmmi, 2010. Disponible <http://mceer.buffalo.edu>.
- [3] W. Seim, M. Kramar, T. Pazlar, and T. Vogt, "OSB and GFB As Sheathing Materials for Timber-Framed Shear Walls: Comparative Study of Seismic Resistance," vol. 142, no. Eta 2013, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001293.
- [4] Boudaud Clement y Daudeville Laurent, "Analyse de la vulnérabilité sismique des structures à ossature en bois Essais expérimentaux – Modélisation numérique – Calculs parasismiques", 2012.
- [5] AENOR, "UNE-EN 1995-1-1 Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación", 2006.
- [6] ASTM International, "ASTM E2126-19 Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings", 2019.