



CONCURSO

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN

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





EQUIPO ING2500

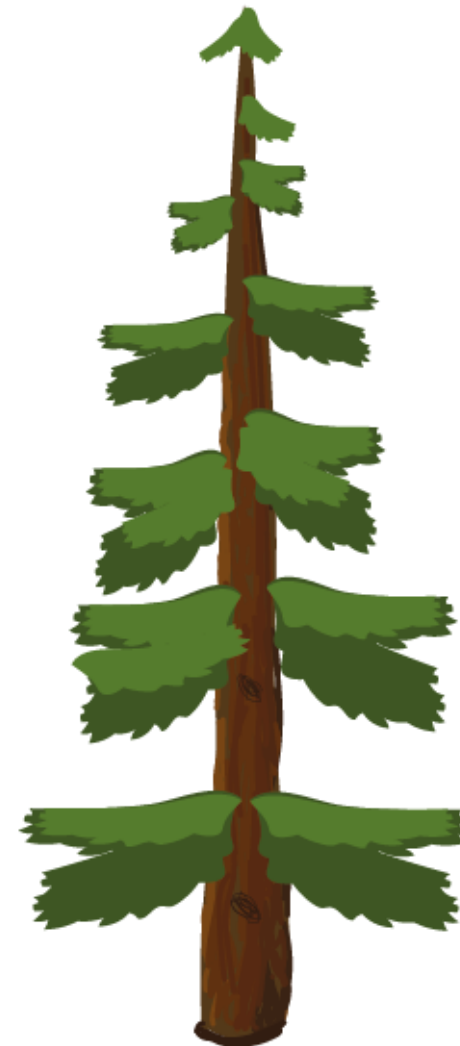
**Análisis termo-mecánico de
la madera por medio de un
enfoque de homogeneización
asintótica**

Introducción

- **La madera es un material sustentable y renovable.** Presenta propiedades de aislamiento térmica, comportamiento sísmico favorable y la capacidad de protegerse frente al fuego.
- **Existe incertidumbre con respecto a sus propiedades termo-mecánicas.** Las propiedades de la madera presentan variabilidad y dependen de la dirección de medición.
- **La madera posee una compleja y jerárquica microestructura.** En su microestructura se presentan ciertos patrones que se repiten, desde los nanómetros hasta el nivel macroscópico.

Objetivos

- Estudiar las propiedades termo-mecánicas de la madera usando un enfoque multi-escala basado en la homogeneización asintótica.
 - ✓ Implementar en MATLAB [1], un marco numérico basado en la homogeneización asintótica para problemas termo-mecánicos multi-escala en 3D.
 - ✓ Desarrollar un modelo multi-escala termo-mecánico para la madera que abarque desde la escala nanoscópica hasta la escala estructural, incluyendo las características morfológicas, mecánicas y térmicas más relevantes en cada nivel. La geometría del modelo multi escala se desarrolla utilizando ANSYS [2].



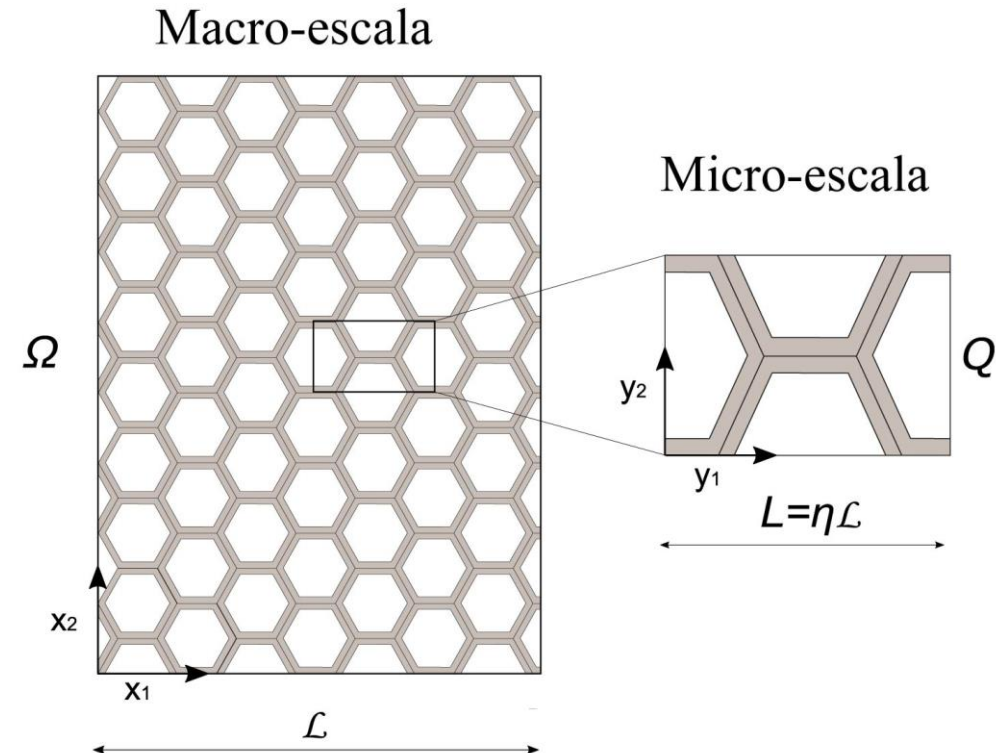
Homogeneización asintótica

Ventajas

- La homogeneización asintótica [3] incorpora explícitamente las características morfológicas más relevantes en la estimación de las propiedades de material efectivas.
- A diferencia de las técnicas de homogeneización computacional, la homogeneización asintótica permite obtener directamente los tensores constitutivos mecánicos y térmicos, es decir, el tensor de elasticidad de cuarto orden (${}^4\mathbf{C}$), el tensor de expansión térmica de segundo orden ($\boldsymbol{\alpha}$) y el tensor de conductividad térmica de segundo orden (\mathbf{K}).

Limitaciones

- Se limita al rango elástico



Homogeneización asintótica

- Ecuaciones de equilibrio

Problema mecánico

$$\vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \vec{0}. \quad (1)$$

Problema térmico

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{q} = 0. \quad (2)$$

- Relaciones constitutivas

$$\boldsymbol{\sigma}(\vec{x}) = {}^4\mathcal{C}(\vec{y}) : (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}(\vec{x}) - \boldsymbol{\alpha}(\vec{y}) \Delta \theta(\vec{x})), \quad (3)$$

$$\vec{q}(\vec{x}) = -\mathbf{K}(\vec{y}) \cdot \vec{\nabla} \theta(\vec{x}), \quad (4)$$

donde $\vec{y} = \vec{x}/\eta$.

- Expansión asintótica

Campo de desplazamientos

$$\vec{u}(\vec{x}) = \vec{u}_0(\vec{x}, \vec{x}/\eta) + \eta \vec{u}_1(\vec{x}, \vec{x}/\eta) + \eta^2 \vec{u}_2(\vec{x}, \vec{x}/\eta) + \dots \quad (5)$$

Campo de temperaturas

$$\theta(\vec{x}) = \theta_0(\vec{x}, \vec{x}/\eta) + \eta \theta_1(\vec{x}, \vec{x}/\eta) + \eta^2 \theta_2(\vec{x}, \vec{x}/\eta) + \dots \quad (6)$$

- Propiedades efectivas

Problema mecánico

$${}^4\bar{\mathcal{C}} = \frac{1}{|Q|} \int_Q {}^4\mathcal{C}(\vec{y}) : (\vec{\nabla}_y {}^3N_1(\vec{y}) + {}^4I^s) dQ \quad (7)$$

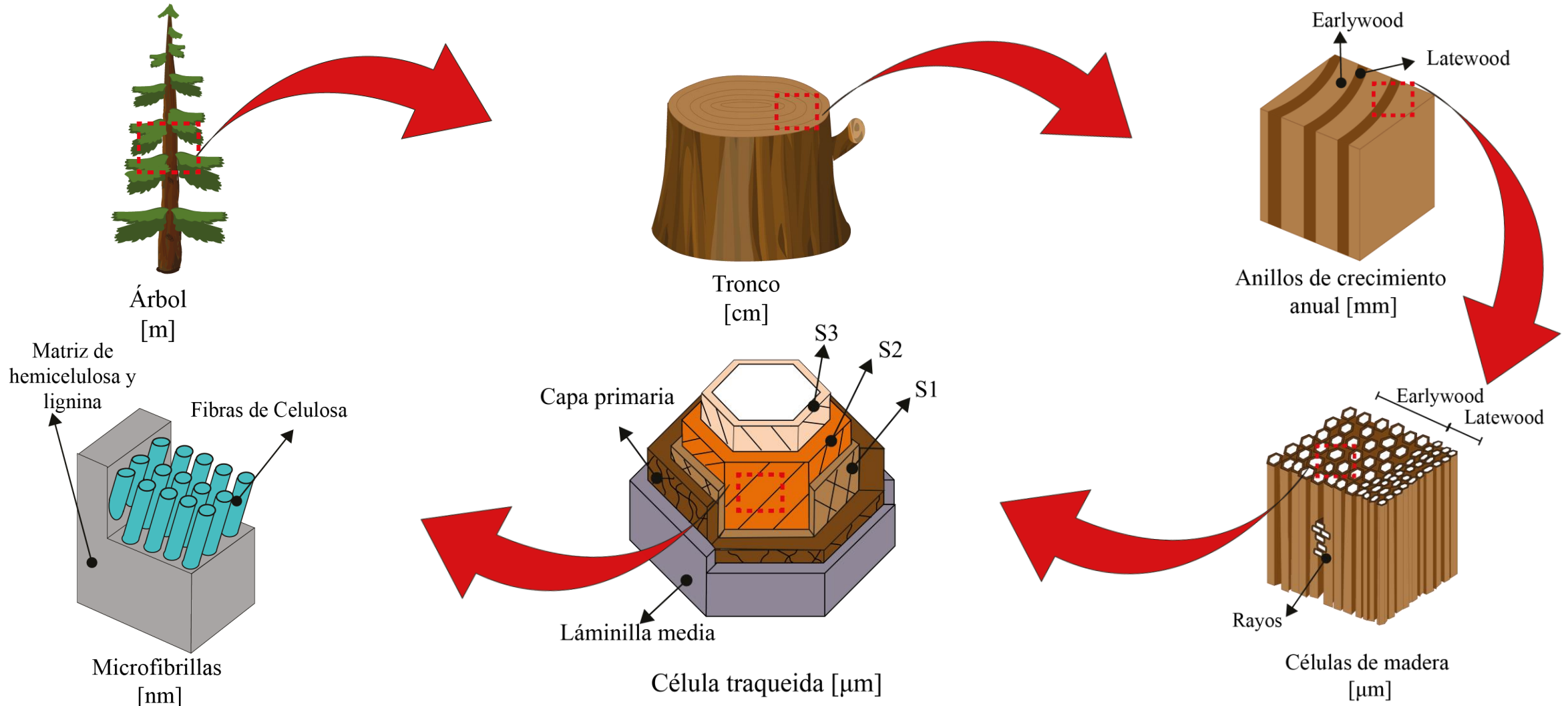
Término de acoplamiento termo-mecánico

$$\bar{\boldsymbol{\alpha}} = \frac{1}{|Q|} {}^4\bar{\mathcal{C}}^{-1} : \int_Q {}^4\mathcal{C}(\vec{y}) : (\boldsymbol{\alpha}(\vec{y}) - \vec{\nabla}_y \vec{b}_1(\vec{y})) dQ \quad (8)$$

Problema térmico

$$\bar{\mathbf{K}} = \frac{1}{|Q|} \int_Q \mathbf{K}(\vec{y}) : (\vec{\nabla}_y \vec{m}_1(\vec{y}) + \mathbf{I}) dQ \quad (9)$$

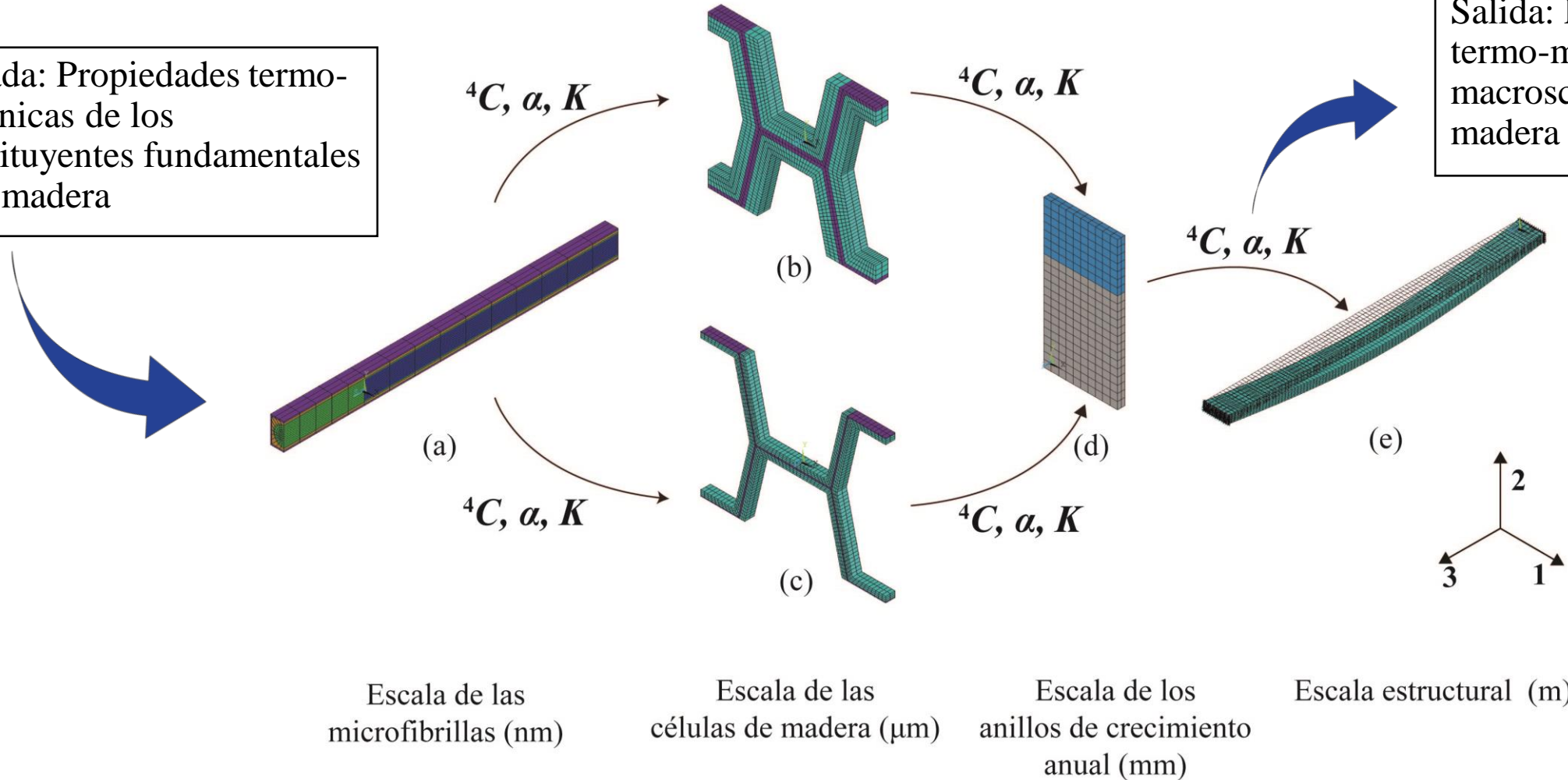
Estructura jerárquica de la madera



Modelo multi-escala de la madera

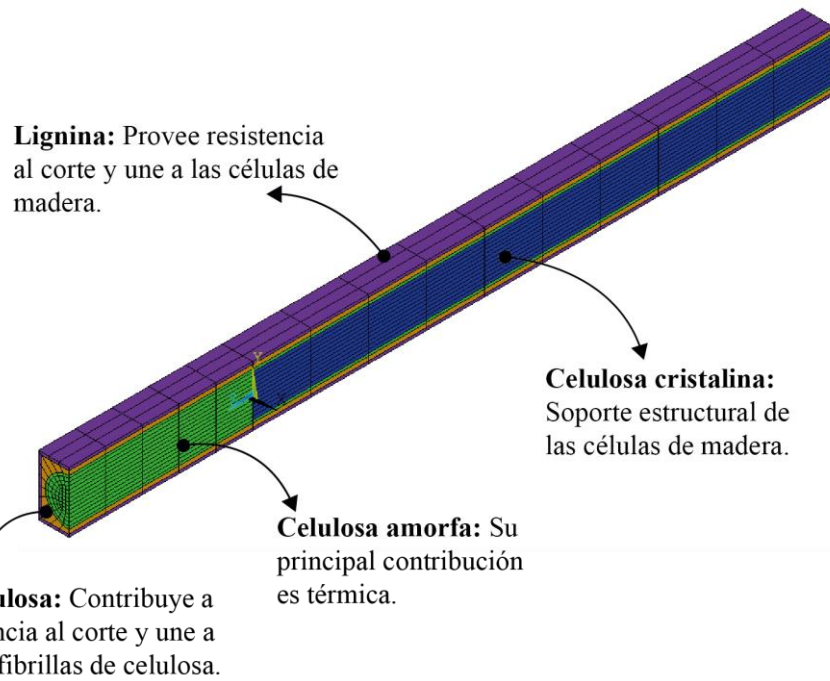
Entrada: Propiedades termo-mecánicas de los constituyentes fundamentales de la madera

Salida: Propiedades termo-mecánicas macroscópicas de la madera



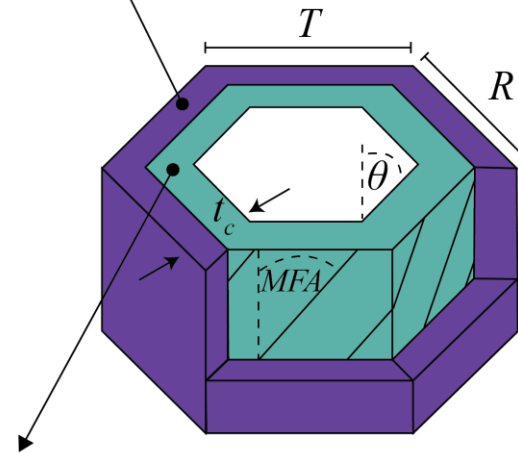
Modelo multi-escala de la madera

Escala de las microfibrillas [nm]



Escala de las células de madera [μm]

Lámina media y capa primaria: compuestas principalmente de lignina.

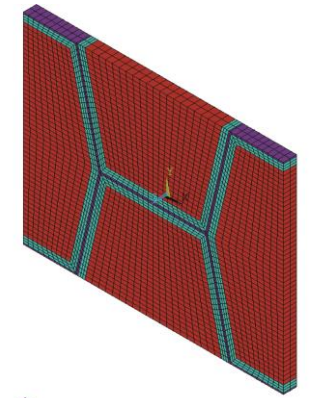
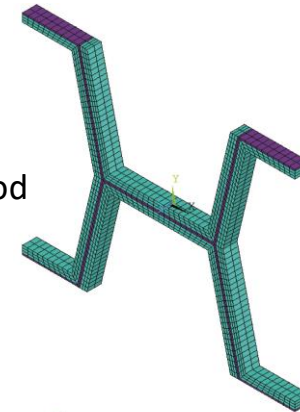


Capa S: propiedades termo-mecánicas de la escala de las microfibrillas.

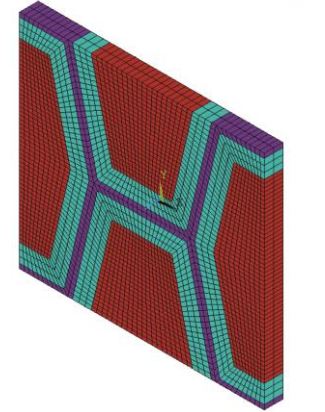
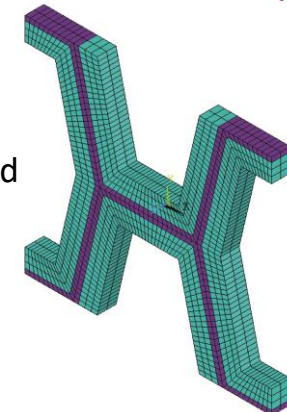
Análisis mecánico

Análisis térmico

Células Earlywood

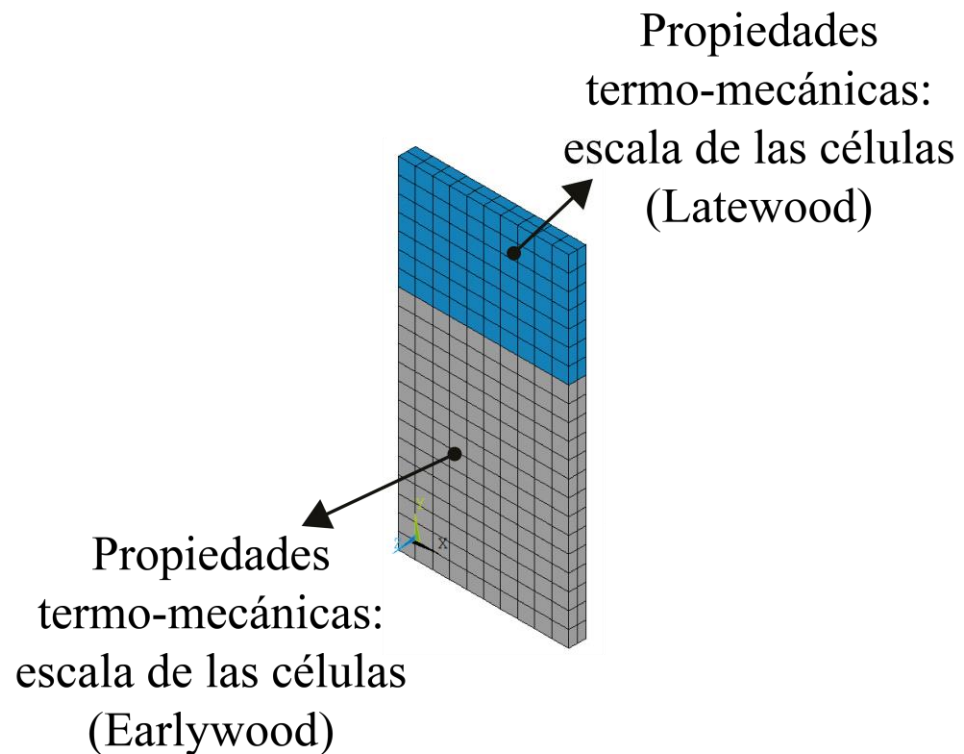


Células Latewood



Modelo multi-escala de la madera

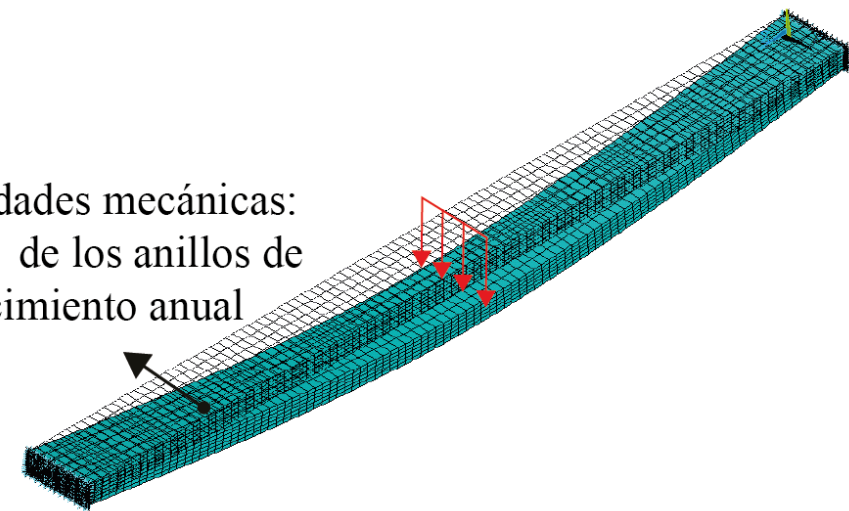
Escala de los anillos de crecimiento anual [mm]



Escala estructural [m]

- Viga de 41.8 x 139 x 3000 [mm]
- Carga homogénea en la sección central de la viga.
- Apoyos simples en ambos extremos de la viga.

Propiedades mecánicas:
Escala de los anillos de
crecimiento anual



Parámetros geométricos del modelo multi-escala

Se utiliza

Los parámetros geométricos del modelo multi-escala son difíciles de determinar.

- Los parámetros geométricos de las distintas escalas espaciales son escasos en la literatura y presentan gran variabilidad.

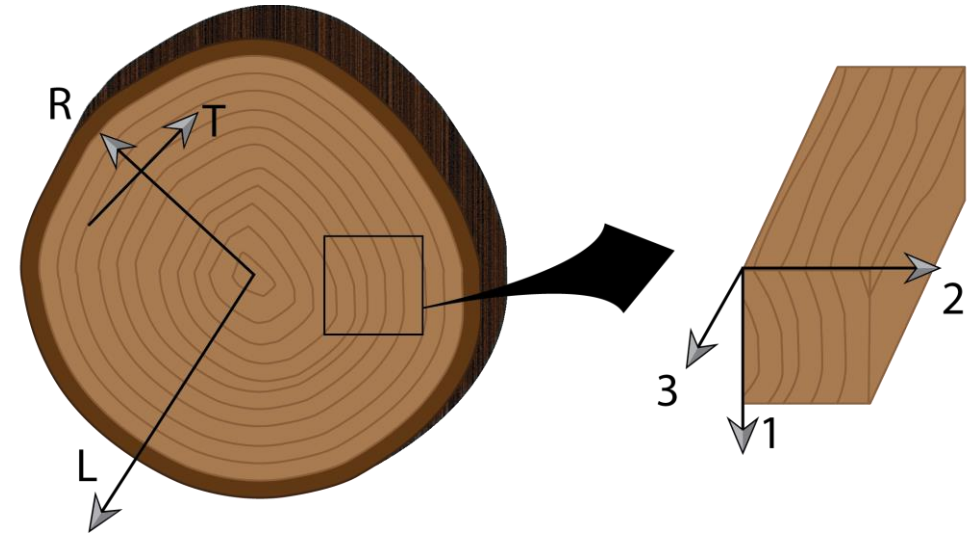
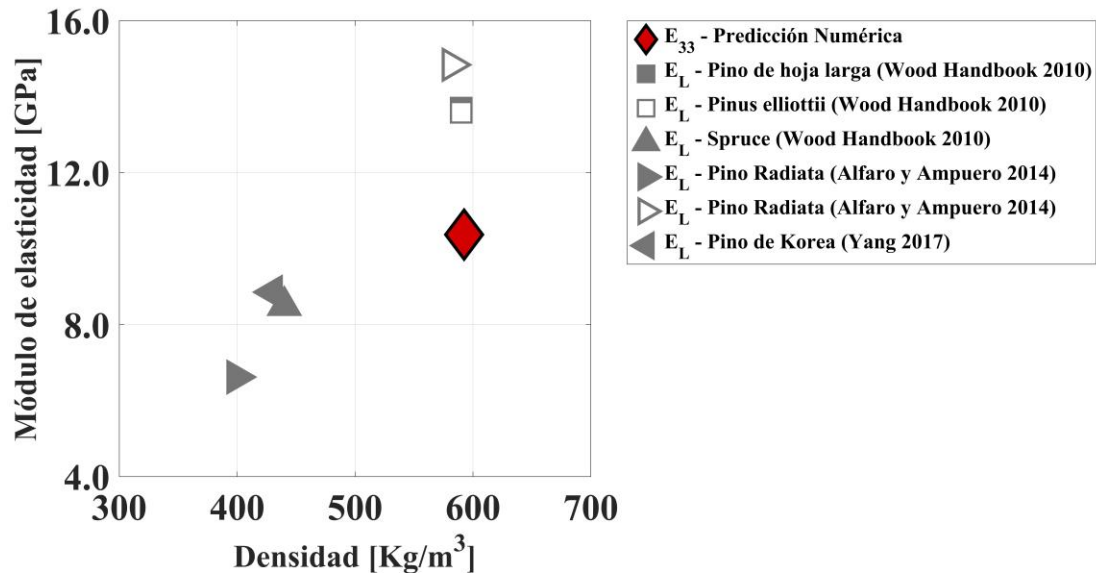
Estudio previo [4]

- Los parámetros geométricos de la madera son determinados mediante una estrategia de calibración, utilizando datos experimentales.
- En el estudio se utiliza una estrategia multi-escala basada en la homogeneización computacional.
- La calibración busca encontrar un conjunto de parámetros numéricos que logren reproducir los resultados encontrados experimentalmente. El objetivo era modelar una viga de pino radiata de densidad 440.73 [kg/m³] y un módulo de elasticidad a flexión de 8.395 [Gpa].



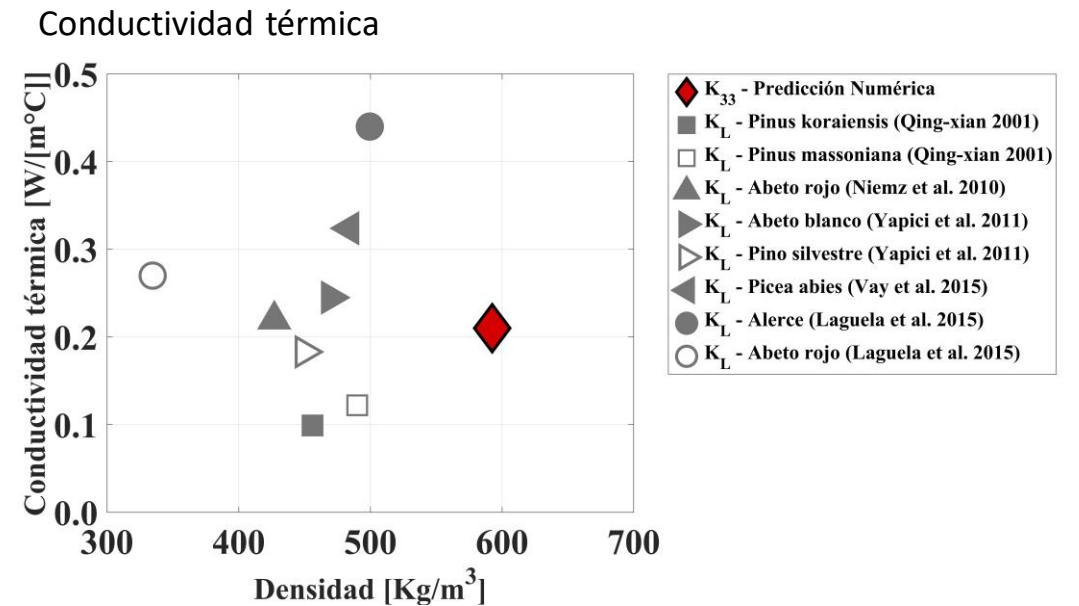
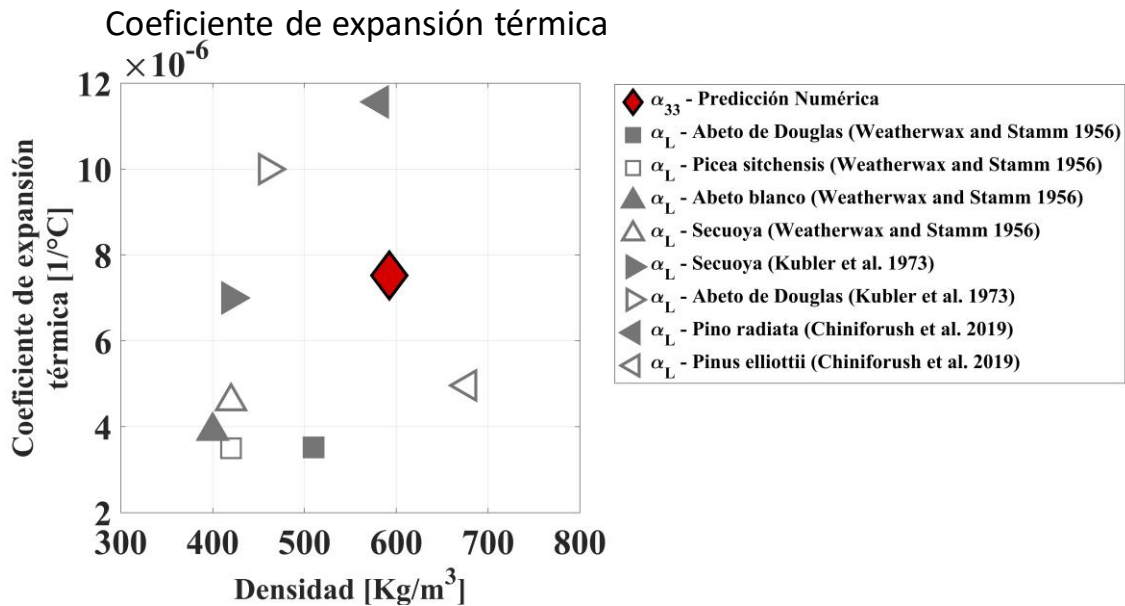
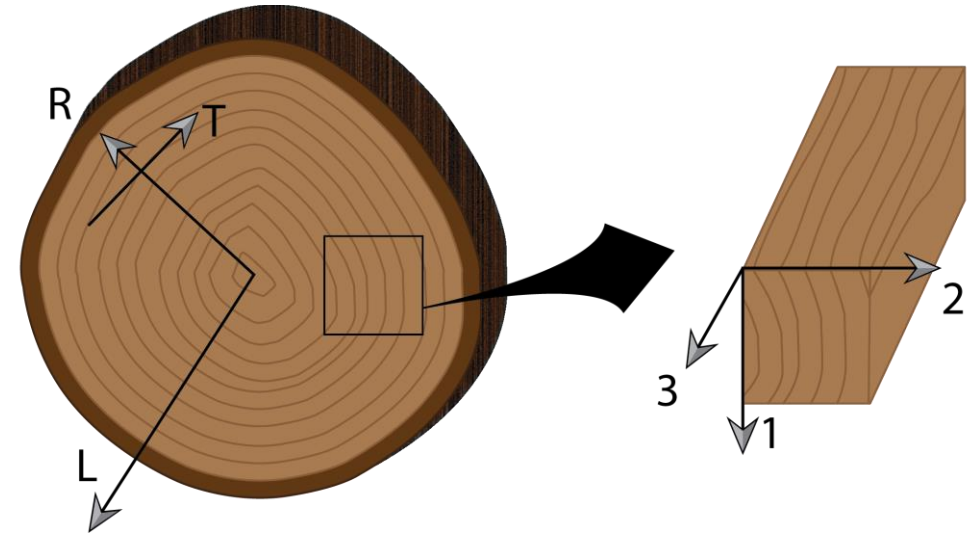
Resultados

Módulo de elasticidad



E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	E_{33} [GPa]	u_{12}	u_{23}	u_{13}	G_{12} [GPa]	G_{23} [GPa]	G_{13} [GPa]
0.118	0.284	10.448	0.145	0.011	0.005	0.004	0.212	0.205

Resultados



Conclusiones

En este proyecto se estudian las propiedades termo-mecánicas del pino radiata. Para ello se utiliza un modelo multi-escala basado en la homogeneización asintótica, donde se consideran las características morfológicas, mecánicas y térmicas más relevantes de la madera. A partir del modelo, las propiedades termo-mecánicas del pino radiata son previstas numéricamente.

- Las predicciones numéricas resultaron ser comparables con los datos experimentales reportados en la literatura, mostrando que la homogeneización asintótica es una poderosa herramienta para estudiar las propiedades termo-mecánicas del pino radiata.
- El modelo multi-escala propuesto tiene un alto potencial para el estudio de las propiedades termo-mecánicas de otras especies de maderas blandas, pues todas comparten una microestructura similar.
- Una de las ventajas de utilizar esta estrategia es que se pueden obtener las propiedades de la madera en sus tres direcciones. Este aspecto es novedoso, considerando que en la literatura comúnmente no se reportan a pesar de que es un material claramente anisotrópico.

Bibliografía

- [1] MATLAB, MATLAB version 9.3.0.713579 (R2017b), The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, <https://www.mathworks.com> (2017).
- [2] ANSYS, Parametric Design Language Guide. Release 18.1., ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 15317, <http://www.ansys.com> (2017).
- [3] E. Bosco, R. Claessens, A. S. Suiker, Multi-scale prediction of chemomechanical properties of concrete materials through asymptotic homogenization, *Cement and Concrete Research* 128 (2020) 105929. periodic structures, Elsevier, 1978.
- [4] Saavedra Flores, E.I., Ajaj, R. M., Dayyani, I., Chandra, Y., & Das, R. (2016). Multi-scale model updating for the mechanical properties of cross-laminated timber. *Computers & Structures*, 177, 83-90.
- [5] Ross, R. J. (2010). *Wood handbook: wood as an engineering material*. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. 1 v., 190.
- [6] M. Alfaro, R. Ampuero, Determinación de tensiones admisibles para el diseño estructural de paneles de madera contralaminada elaborados con pino radiata crecido en Chile. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil en Obras Civiles (Profesor guía: E.I. Saavedra Flores), Universidad de Santiago de Chile (2014).
- [7] Yang, N., & Zhang, L. (2018). Investigation of elastic constants and ultimate strengths of Korean pine from compression and tension tests. *Journal of wood science*, 64(2), 85-96.
- [8] Weatherwax, R. C., & Stamm, A. J. (1956). The coefficients of thermal expansion of wood and wood products.
- [9] Kubler, H., Liang, L., & Chang, L. S. (1973). Thermal expansion of moist wood. *Wood and Fiber Science*, 5(3), 257-267.
- [10] Chiniforush, A. A., Akbarnezhad, A., Valipour, H., & Malekmohammadi, S. (2019). Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 207, 70-83.
- [11] Qing-Xian, Y. (2001). Theoretical expressions of thermal conductivity of wood. *Journal of Forestry Research*, 12(1), 43-46.
- [12] Niemz, P. E. T. E. R., Sonderegger, W., & Hering, S. (2010). Thermal conductivity of Norway spruce and European beech in the anatomical directions. *Annals of Warsaw University of Life Sciences–SGGW, Forestry and Wood Technology*, 72(72), 66-72.
- [13] Yapici, F. I., Ozcifci, A., Esen, R., & Kurt, S. (2011). The effect of grain angle and species on thermal conductivity of some selected wood species. *BioResources*, 6(3), 2757-2762.
- [14] Vay, O., De Borst, K., Hansmann, C., Teischinger, A., & Müller, U. (2015). Thermal conductivity of wood at angles to the principal anatomical directions. *Wood science and technology*, 49(3), 577-589.
- [15] Lagüela, S., Bison, P., Peron, F., & Romagnoni, P. (2015). Thermal conductivity measurements on wood materials with transient plane source technique. *Thermochimica Acta*, 600, 45-51.



EQUIPO ING2500

**Análisis termo-mecánico de
la madera por medio de un
enfoque de homogeneización
asintótica**