



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 ING2557

**Modelo de Diseño
Esquemático Optimizado de
Edificaciones Prefabricadas
en Madera**

Introducción

Aumentar la **productividad** y **eficiencia** en la industria de la construcción



Desarrollar y buscar sistemas constructivos más **sustentables**



Fuente: E2Echile.com

Estos sistemas implican beneficios como: **disminución** de tiempos en obra, **menor** cantidad de **residuos** en terreno, aumento de la **calidad** y **seguridad**, etc. (Gann, 2010)



Fuente: LaTercera

Madera permite sistemas constructivos **prefabricados** e **industrializados**, siendo esto una de sus principales ventajas (Santana-Sosa & Fadai, 2019)

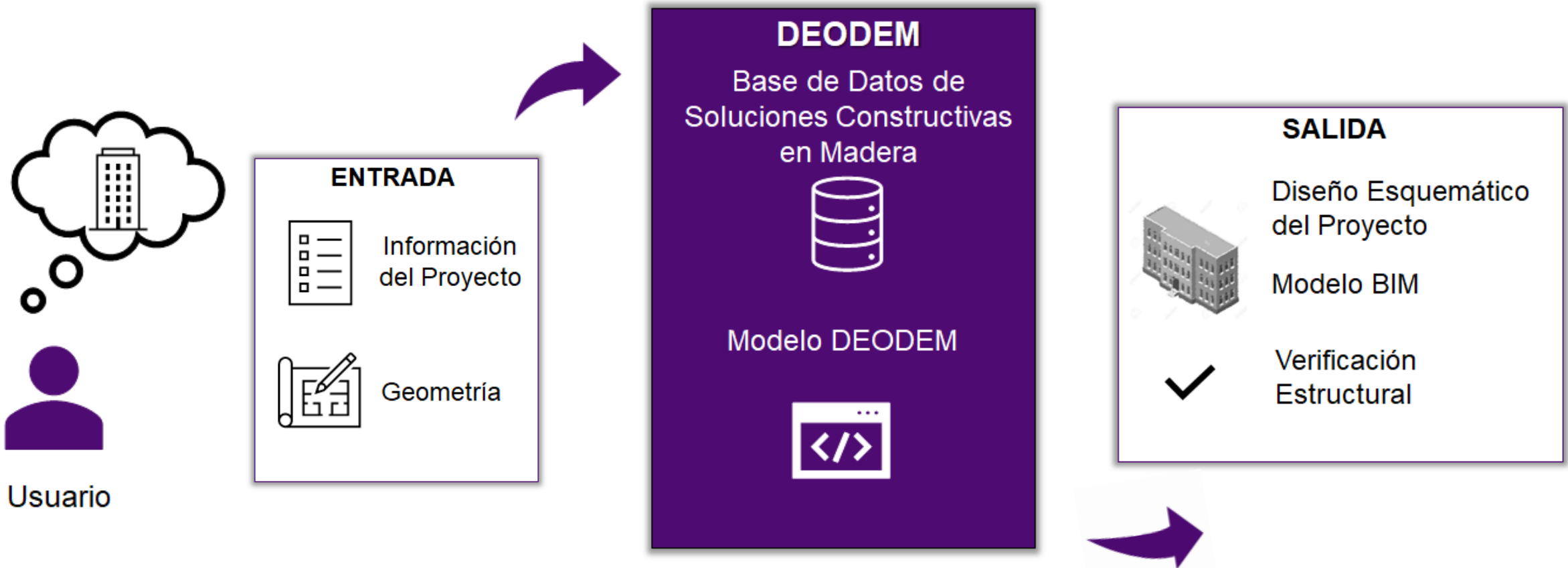


Fuente: maderas21.cl

Madera posee **baja huella ambiental** en varias etapas del ciclo de vida y su uso conlleva a beneficios como la **captura de carbono** (Bukauskas et al., 2019)

Alcance y Objetivo

Apoyar la toma de decisiones de actores dentro la industria de la construcción (arquitectos, ingenieros, constructores, etc.) que desean ejecutar un proyecto de edificación en madera



Metodología

1

Objetivos específicos

Identificar los datos relevantes asociados al proceso constructivo prefabricado y a las verificaciones estructurales para proyectos de edificación en madera que sean compatibles con flujos de trabajo BIM

2

Desarrollar un modelo de optimización integral que permita resolver el diseño estructural de una edificación en madera bajo el sistema constructivo prefabricado en paneles de entramado ligero



Objetivo General

Desarrollar un modelo de optimización para el diseño estructural e industrializado de edificios de marco plataforma como herramienta de ayuda a diseñadores

Actividades

Identificar un modelo estructural asociado el análisis gravitacional y sísmico de edificaciones en madera que sea apto para su implementación dentro del modelo de optimización

Definir el conjunto de parámetros relevantes asociados al proceso de industrialización y prefabricación de edificaciones en madera

Definir la estructura de datos del modelo BIM resultante del modelo de optimización (lamina de las SC con sus parámetros)

Identificar las variables y restricciones del problema de optimización

Modelar el problema de a partir de programación matemática

Definir el algoritmo de resolución del problema

Implementar computacionalmente el modelo

Validar los resultados del modelo de optimización

Método

Panel de expertos en diseño de edificaciones en madera y optimización

Participación del investigador en empresa prefabricadora

Desarrollo iterativo a través de entrevistas a empresas prefabricadoras

Proceso iterativo de búsqueda de métodos de resolución

Estudio de Benchmarking de distintos solvers de optimización

Aplicación de plantas arquitectónicas

Variables Estructurales Modelo DEODEM

Muros y Losas



Variables de diseño gravitacional para muros/losas

1. Pies Derechos/Vigas
 - Grado estructural
 - Escuadría
 - Distanciamiento

Variables de diseño a corte para muros

1. Tablero Arriostrante
 - Tipo de Tablero
 - Espesor
 - Cantidad de tableros
2. Clavos
 - Tipo de clavo
 - Espaciamiento entre clavos
3. Anclaje
 - Tipo de anclaje (HD o ATS)
 - Modelo de anclaje
4. Cantidad de Pies derechos de borde

Solución Constructiva de Muro (Interior/Perimetral/Divisorio)

RECOMENDACIONES PROPIEDADES DE LA MADERA				ESPECIFICACIÓN TABIQUE DE MADERA			
Estado	Terminación	Preservación NCh 819	Cantidad	Grado Estructural	Distanciamiento	U	Otros
Pino Radiata	Cepillado / Dimensionado (Segun informe de fuego)	Reservado CH < 20%	1	N/A 33x94 [mm]	@ 400 [mm]	C24	



Variables no definidas por las soluciones constructivas

Simplificaciones para el diseño

- Todos los muros dibujados en la plataforma son considerados como gravitacionales.
- Los muros que sean de corte utilizaran clavos 8d y están distanciados cada 50 mm, debido a su baja influencia en el costo de los mismos.
- Las losas no serán diseñadas a corte y para diseño gravitacional se utilizara el parámetro de luz admisible máxima.
- Las soluciones constructivas poseen definido su peso propio.

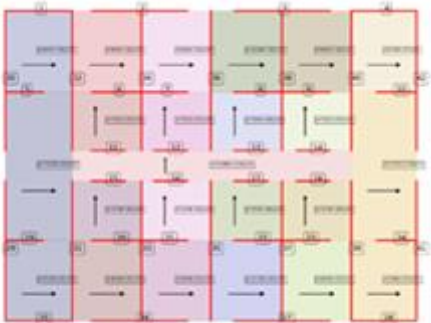
Variables a Definir por el modelo

- Determinar la Solución Constructiva de Muro y Losa.
- Definir los muros gravitacionales que son necesarios por corte.
- Determinar el anclaje y cantidad de pies derechos de borde para los muros de corte.

Modelo Estructural Gravitacional

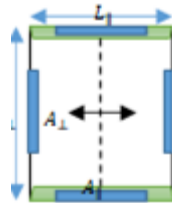
Pasos del Modelo

- 1 Se realiza una segmentación de losas en base a los muros gravitacionales



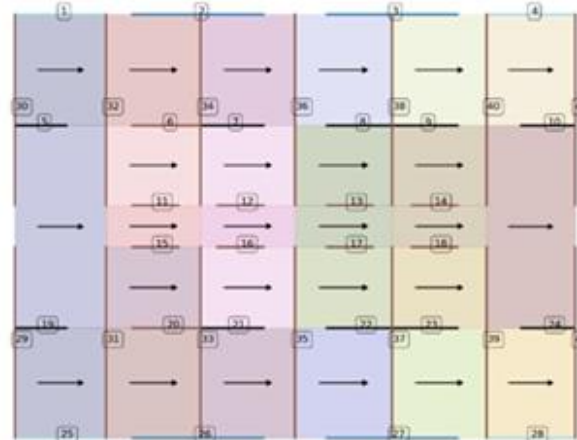
2

- 2 Se determina la luz máxima y áreas tributarias en muros según segmentación de losas



3

- 3 Se genera una panelización al unir los segmentos de losas según criterios constructivos



4

- 4 Se asigna una solución constructiva de entepiso o techo por piso

5

- 5 Se obtienen las cargas gravitacionales de los muros con los pesos propios de las soluciones de entepiso (o techo) y las áreas tributarias

Modelo Estructural Sísmico

Período Fundamental

- Rigidez muro

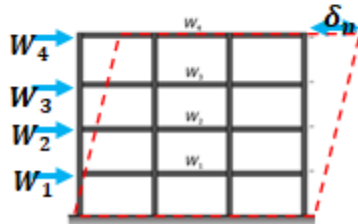
$$K_{eq} = \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{H^3}{EA_{ext}L^2} + \frac{H}{G_aL} \right)^{-1}$$

- Periodo Fundamental

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2\delta_n}{3g}}$$

δ_n : desplazamiento de techo

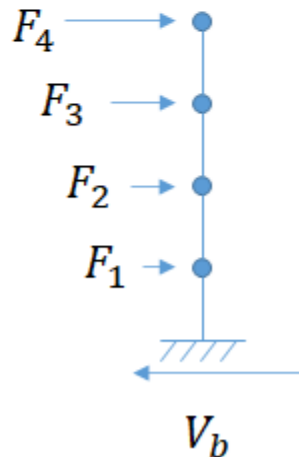
- Desplazamiento de techo

$$[\delta] = [K]^{-1}[F]$$


Análisis Sísmico

Análisis Estático NCh 433

- Zona Sísmica y Tipo de Suelo son inputs que son ingresados por el usuario en la plataforma.
- Determinación de Corte basal y distribución de fuerzas en la altura.



Análisis Estructural

- Rigidez muro

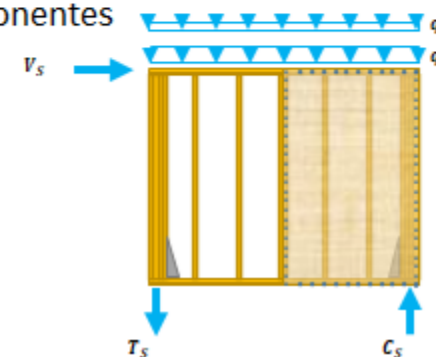
$$K_{eq} = \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{H^3}{EA_{ext}L^2} + \frac{H}{G_aL} + \frac{H^2}{L \cdot L'} \cdot \frac{1}{K_{Anclaje}} \right)^{-1}$$

SDPWS 2015

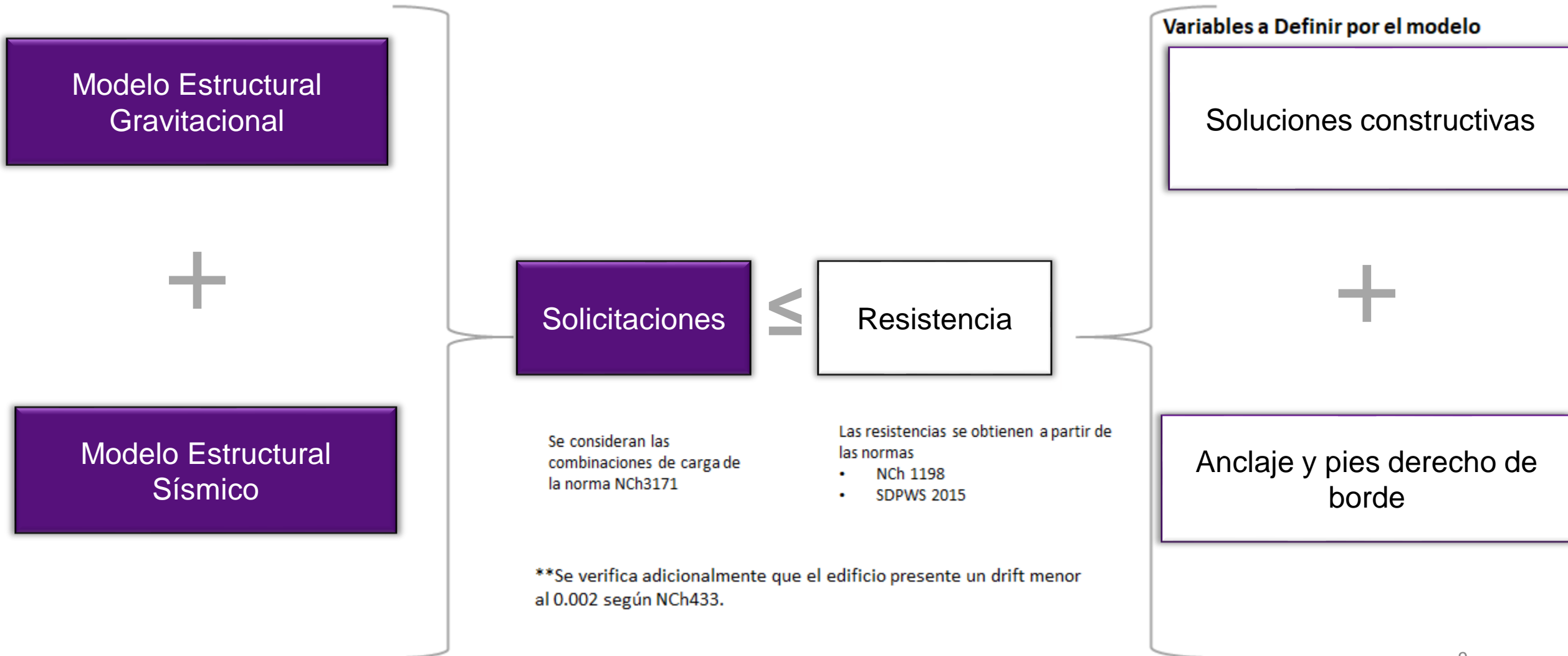
- Distribución de cortes proporcional a la rigidez

$$F_{i,j} = \frac{K_{i,j}}{K_i} F_i$$

- Desplazamiento del muro y esfuerzos de los componentes



Verificación Estructural



Modelo de Optimización: Esquema General, variables y parámetros relevantes de industrialización

Entrada

Diseño geométrico de la planta.

Configuración del proyecto.

Catálogo de soluciones constructivas y anclajes.

Algoritmo

Programación Entera No Lineal + Heurísticas

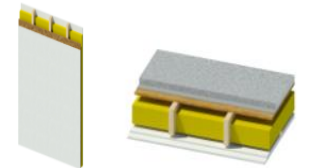


Resultados

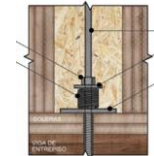
- Soluciones constructivas de muros y entresijos.
- Panelización de muros y losa.
- Asignación de paneles a mesas.
- Tipos de anclaje anti-volcamiento.

El modelo entrega información relevante para construir los paneles: soluciones constructivas, panelización y tipos de anclajes

Soluciones constructivas de muros y entresijos.



Tipo de anclaje anti-volcamiento.



Panelización (muros y losas) y asignación a mesas.

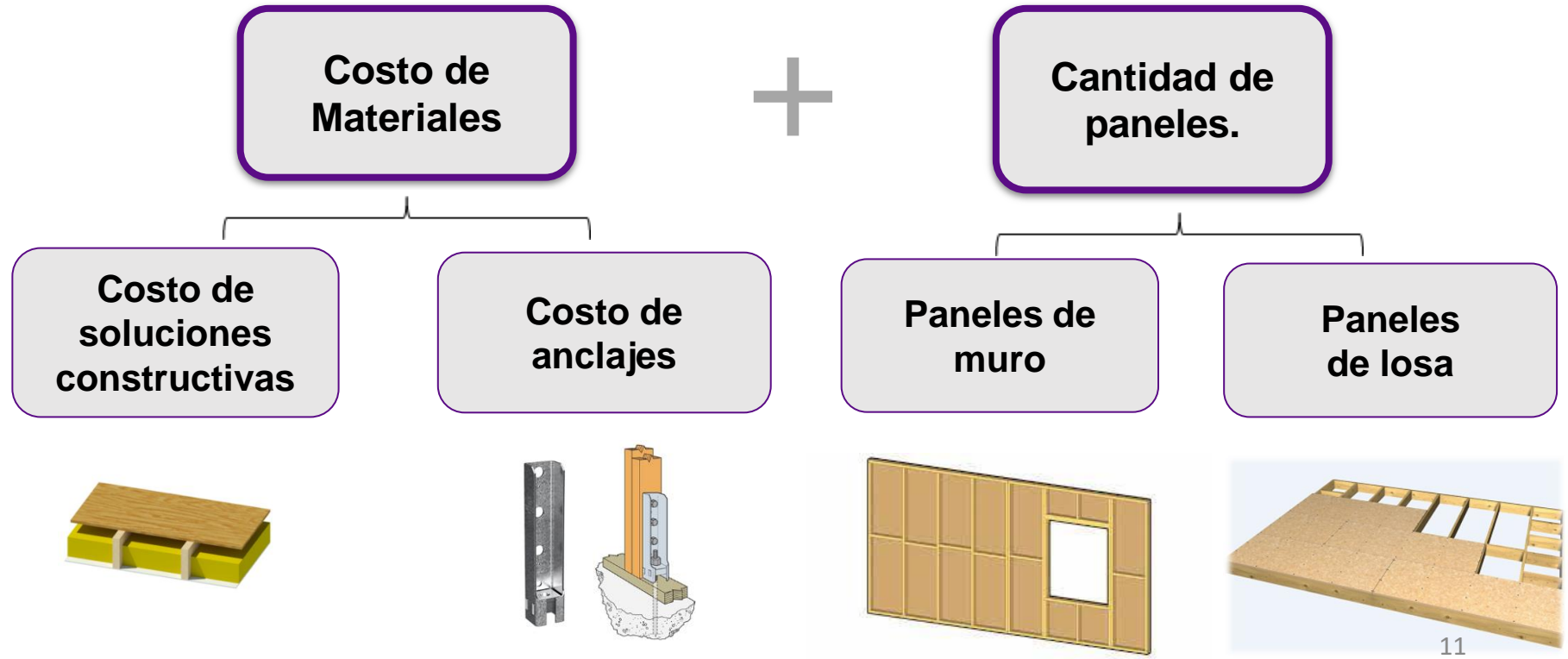


Función objetivo

Función minimizadora

=

$$\alpha \left(\sum_{\substack{i \in I, m \in M \\ p \in P_m, l \in L_m \\ s \in S_m}} l c_{\text{muro}}^s x_{\text{panel}}^{i,m,p,l,s} + \sum_{\substack{i \in I, m \in M \\ j \in J_m, a \in A}} c_{\text{anc}}^a y_{\text{anc}}^{i,m,j,a} \right) + (1 - \alpha) \left(\sum_{\substack{i \in I, m \in M \\ p \in P_m, l \in L_m \\ s \in S_m}} x_{\text{panel}}^{i,m,p,l,s} + \sum_{\substack{k \in K \\ r \in N_k}} x_{\text{panel losa}}^{k,r} \right)$$



Algoritmo de optimización

Enfoque exacto
(*Mixed Integer Non Linear
Programming*)



Enfoque aproximado

$$\text{mín } f(\mathbf{x}) \quad (1.1)$$

$$\text{s.a } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (1.2)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \mathbf{0} \quad (1.3)$$

$$\mathbf{x} \in \{0, 1\}^n \quad (1.4)$$

$$\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m \quad (1.5)$$

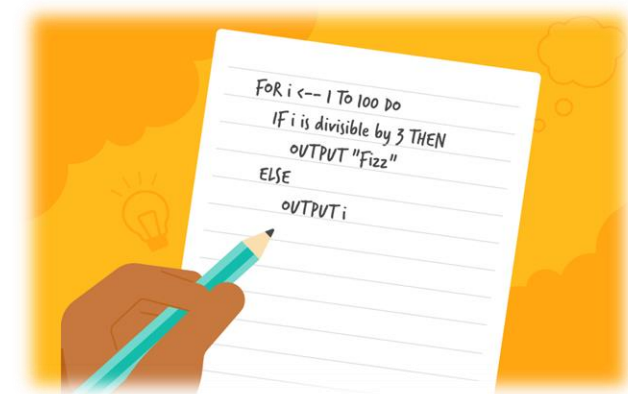
(1.1) Función objetivo lineal

(1.2) Restricciones combinatoriales
(lineales)

(1.3) Restricciones estructurales (no-
lineales)

(1.4)-(1.5) (\mathbf{x}, \mathbf{y}) son vectores que
representan variables binarias y continuas

Heurística que obtiene
soluciones iniciales
factibles y luego realiza
búsquedas locales para
mejorar la solución.



Caso de Estudio #1

Antecedentes:

- Edificio Modular tipo Hotel
- Suelo Tipo C
- Supuesto de 4 pisos
- Zona Sísmica 2

Resultados: Optimización y Modelo estructural

Resultados Estructurales del modelo

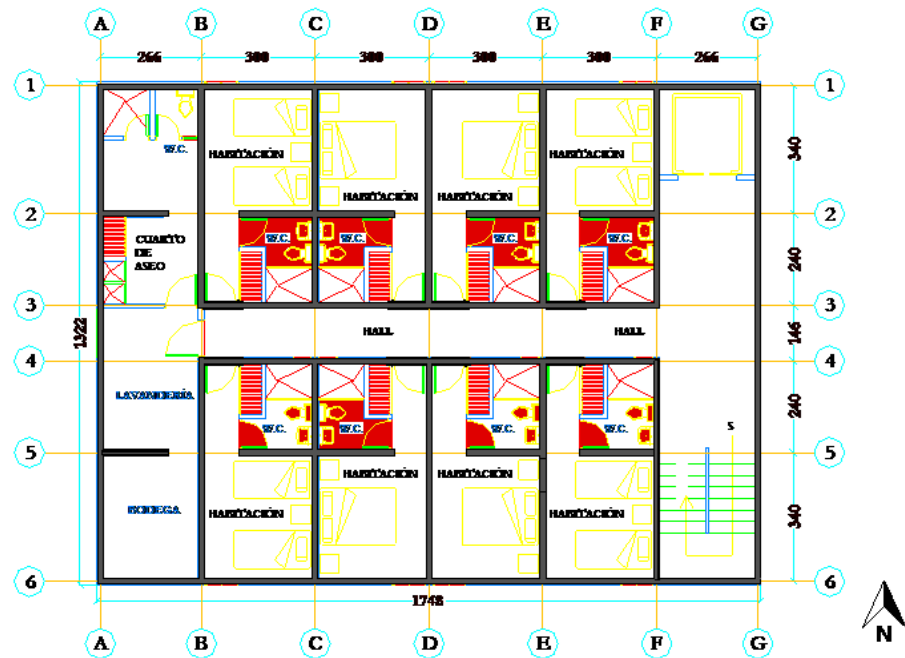


Figura 1: Planta Arquitectónica Hotel Modular: Caso Estudio #1



Figura 2: Resultados Elección de : 1) Solución constructiva de losa, panelización y dirección de envigado . 2) Muros de Corte 3)Anclajes

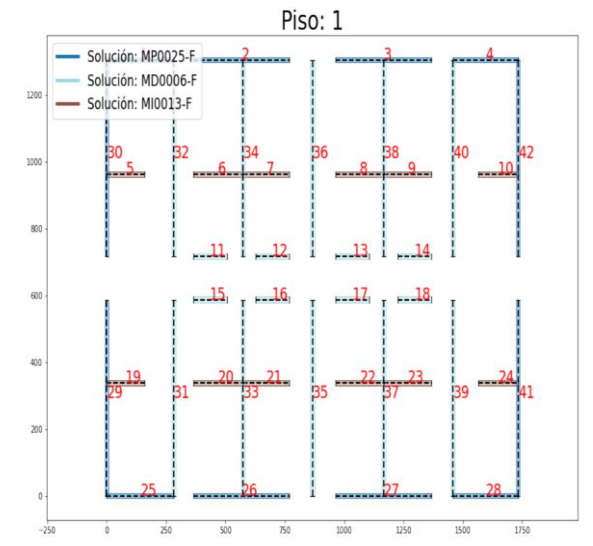


Figura 3: Resultado elección de solución constructiva de muros



Muros cumplen con las **verificaciones de resistencia** de la NCh1198 y SDPWS 2015.



El edificio presenta un **drift menor al 0.002** según lo requerido por la NCh 433.

Resultados: Información Paramétrica Modelo BIM

Parámetros de Tipo

Parámetros de Instancia



Información propia del elemento (Entidad Muro - Entrepiso) según el **tipo de solución constructiva** (resistencia al fuego, transmitancia térmica, etc.)

Asociados a la información propia del elemento (entidad) como **resultado del modelo** de optimización (prefabricación y verificación estructural)

Parámetros agrupados en un **Property Set** exportados al formato IFC, para cumplir con los flujos de trabajo BIM

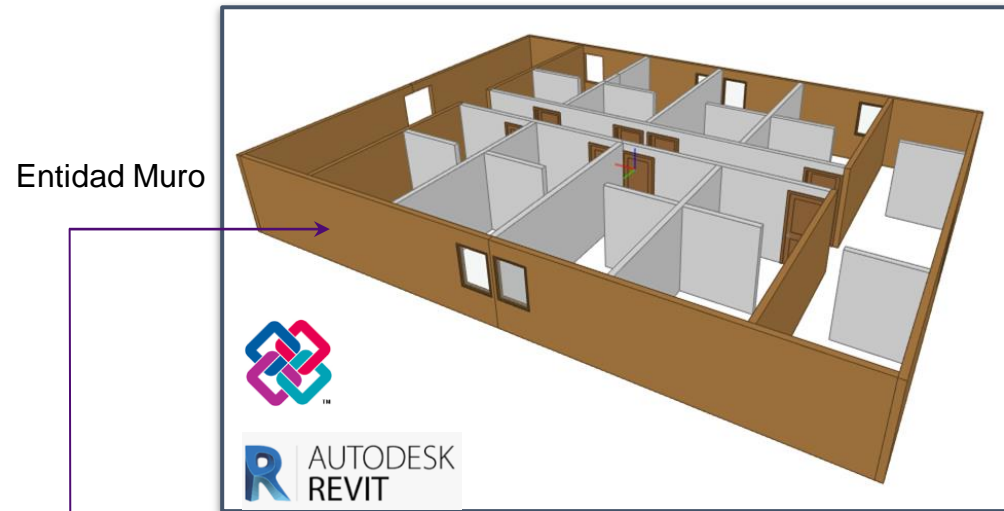


Figura 4: Resultado Modelo BIM en Visor IFC Caso Estudio #1

Tipo

Data	
Uso en recinto húmedo	<input checked="" type="checkbox"/>
Código de Solución (Diseña Madera)	MI0010
Distanciamiento pies derechos [mm]	400.000000
Escuadría pies derechos [mm]	33x94
Función de la solución	Muro Interior
Peso Lineal [kg/m]	121.000000
Sistema Constructivo	Marco Plataforma

Instancia

Data	
ID Panel Constructivo	M09
N° Mesa de armado	12.000000
Piso	2.000000
Altura Panel	2400.000000
Especificación Anclaje seg. ...	HDU 10

Conclusiones

- El modelo entrega un diseño esquemático preliminar de la edificación con información relevante para **apoyar la toma de decisiones**, por ejemplo, para hacer una **evaluación comercial del proyecto**.
- El modelo permite generar un **prediseño estructural** de una edificación seleccionando soluciones constructivas que **cumplen con las verificaciones de resistencia** según la NCh1198 y el SDPDWS 2015.
- El modelo selecciona de manera adecuada los muros de corte y sus respectivos anclajes, obteniendo un **drift del edificio menor al 0.002** definido en la NCh 433.
- El modelo BIM contiene **parámetros de información relevantes para el uso en prefabricación**, bajo el sistema de construcción off-site en base a paneles de entramado ligero.
- El modelo DEODEM posee el **potencial comercial** para ser implementado en una **plataforma web**, en la que distintos usuarios podrán ingresar sus proyectos y evaluar la factibilidad de ejecutarlos con este sistema, **cumpliendo con las normativas actuales nacionales**.



(En desarrollo)

Referencias

- Gann, D. (2010). Construction as a manufacturing process. Similarities and differences between industrialized housing and car production in Japan Construction as a manufacturing process ? Similarities and differences between industrialized housing and car production in J, 6193. <https://doi.org/10.1080/014461996373304>
- Santana-Sosa, A., & Fadai, A. (2019). A holistic approach for industrializing timber construction. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 323 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012015>
- Bukauskas, A., Mayencourt, P., Shepherd, P., Sharma, B., Mueller, C., Walker, P., & Bregulla, J. (2019). Whole timber construction : A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 213, 748–769. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.043>
- Guindos P. CONCEPTOS AVANZADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL CON MADERA. Parte II: CLT, Modelación Numérica, Diseño Anti-incendios y Ayudas al Cálculo. Santiago, Chile: Ediciones UC; 2019