VERIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE MADERA DE UN SINGULAR PROYECTO DE VIVIENDA SOCIO-AMBIENTAL

J. L. GÓMEZ, K. KLEIN

Miembro ALCONPAT ARGENTINA, Profesor Consulto FAUD UNC, Córdoba, Argentina

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el análisis estructural de un sistema constructivo por vía seca para viviendas económicas compuesto por estructura de madera y de envases plásticos descartables comprimidos. El proyecto persigue un rol social además de contribuir a cuidar el medio ambiente y ha sido diseñado a partir de pequeños elementos de madera accesible en el mercado generando módulos apropiados para construir en taller y trasladar sin dificultad al lugar de emplazamiento. Los módulos se completan en sus caras internas y externas con una malla resistente a tracción en sentido diagonal. En cada dirección se diseñan cuatro planos verticales resistentes a fuerzas laterales, colocando diagonales de acero conformando cruces de San Andrés. La verificación estructural se realizó siguiendo los lineamientos de la norma brasilera NBR 7190, en estado límite último.

Palabras clave: Análisis estructural; Madera; Vivienda-socioeconómica

ABSTRACT

The present work develops the structural analysis of a constructive system by dry way for economic houses composed of wooden structure and plastic disposable compressed containers. The project pursues a social role in addition to helping to care for the environment and has been designed from small wooden elements accessible in the market generating appropriate modules to build in the workshop and move without difficulty to the site. The modules are completed on their internal and external faces with a tensile-resistant mesh diagonally. In each direction four vertical planes resistant to lateral forces are designed, placing steel diagonals forming San Andrés crosses. The structural verification was carried out following the guidelines of the Brazilian standard NBR 7190, in the ultimate limit state.

Keywords: Structural analysis; Wood; Economic houses.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo refleja el análisis particular de la estructura de un sistema constructivo realizado a partir de módulos contruidos mediante entramados de madera de pequeñas secciones de fácil disponibilidad en el mercado local y rellenas a partir del reciclado de botellas de Pet.

Fig-1 Fotos Proceso Constructivo

1.1 Descripción de la estructura de madera

1. La estructura del está conformada por vigas de madera de 2" x 6" de Pino Ellioti están separadas cada 60cm arriostradas por un machihembrado de 1" y apoyada en planos verticales constituidos por piezas compuestas solidarizadas continuamente que se forman con 4 varillas de 1" x 1" de sección, y una tabla central de 2" x 5". Los elementos horizontales de arriostramiento también son de 1" x 1" separados cada 50cm.
2. Con dos planos verticales se conforma un módulo de 18cm de espesor y 61 de ancho y 2,50m de alto (que puede ser variable) que se rellenan interiormente con Pet comprimido que no se considera como elemento estructural y solo colaboran al arriostramiento de madera horizontal a evitar el pandeo en el plano del muro. Los módulos ensamblados entre si constituyen el muro de cerramiento conteniendo los elementos resistentes verticales de sección compuesta descritos anteriormente.
3. Los módulos se completan en sus caras internas y externos con una malla resistente a tracción.
4. En cada dirección se diseñan cuatro planos resistentes colocando diagonales de acero que junto con las columnas conforman cruces de San Andrés. La solera perimetral de 2" x 5" colocada en todo el perímetro a nivel de techo con su capacidad a resistencia flexional cumple la función de dintel en la zona de aberturas. Ver Figura 2

Estructura de fundación prevista para este sistema constructivo estará conformada por zapatas corridas de hormigón armado espesor mínimo 20cm y ancho de acuerdo con la tensión admisible del suelo con un mínimo 30cm.

Fig. 2 Planta y Vistas de Proyecto de Arquitectura

2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Si bien se trata de un prototipo de vivienda que podrá ser reproducido en diferentes localizaciones la verificación estructural se ha realizado suponiendo su implantación en la Ciudad de Córdoba Capital, Argentina. Para realizarla se han tenido en cuenta las reglamentaciones nacionales vigentes y la norma Brasileira NBR 7190 específicamente para la verificación en madera ya que esta trabaja teniendo en cuenta los lineamientos actuales de estados límites últimos a diferencia del Reglamento nacional CIRSOC 601 que está basado en tensiones admisibles pero que permite la posibilidad de trabajar con reglamentos debidamente aprobados en otros países.

3. ANÁLISIS DE CARGAS

3.1 Cargas Gravitatorias

3.1.1 Análisis de carga de techo

Chapa acanalada	6,0 kg/m ²
Clavaderas	3,0 kg/m ²
Machimbre ¾.....	13,0 kg/m ²
Influencia vigas madera	15,0 kg/m ²
CARGA PERMANENTE.....	37,0 Kg/m²
CARGA VARIABLE.....	30Kg/m²

Las Cargas de servicio se obtienen $q = q_D + q_L$

Carga Cubierta total

$$q = 37,0 + 30 = \mathbf{67 \text{ kg/m}^2} \quad (1)$$

Carga sobre viga para calcular deformación $q = (q_D + 0,5 q_L) \times \text{separación entre cabios}$

$$q = 52 \text{ kg/m}^2 \times 0,60 = \mathbf{31,2 \text{ Kg/m}} \quad (2)$$

De acuerdo con la normativa brasilera se estiman las cargas últimas para la siguiente combinación:

$$q_u = 1,3 D + 1,4 L$$

Carga Cubierta total mayorada

$$q_u = 1,3 \times 37,0 + 1,4 \times 30 = \mathbf{90,1 \text{ kg/m}^2} \quad (3)$$

Carga sobre viga $q_u = q_u \text{ cubierta} \times \text{separación entre cabios}$

$$q_u = 90,91 \text{ kg/m}^2 \times 0,60 = \mathbf{54 \text{ Kg/m}} \quad (4)$$

3.2 Cargas de Viento

Ubicación: Córdoba - Pcia. de Córdoba

Velocidad de referencia $\beta = 25 \text{ m/s}$

Coefficiente de velocidad probable $C_p = 1,65$

Rugosidad Tipo II

Presión dinámica básica

$$q_0 = 0,000613 V_0^2 = 1,043 \text{ kN/m}^2 = 104,3 \text{ kg/m}^2 \quad (5)$$

Velocidad básica de diseño

$$V_0 = C_p \cdot \beta = 41,25 \text{ m/s} \quad (6)$$

Dimensiones generales del proyecto (ver Fig.3)

Fig- 3 Axonométrica de la Geometría del Proyecto

3.2.1 Determinación de los factores de direccionalidad de viento

$$\frac{h}{V_o} = \frac{3,25}{41,25} = 0,078 \quad (7)$$

$$\frac{a}{h} = \frac{12,36}{3,25} = 3,8 \quad (8)$$

Cd = 0.85 viento transversal

$$\frac{b}{h} = \frac{4.56}{3.25} = 1.4 \quad (9)$$

Cd = 0.89 viento longitudinal

3.2.2 Coeficiente de exposición para la presión dinámica

para $z < 10\text{m}$, rugosidad II **Cz = 0,673**

3.2.3 Determinación de Presión dinámica de cálculo $q_z = q_o \cdot C_z \cdot C_d$

$$104,3\text{kg/m}^2 \cdot 0,673 \cdot 0,85 = 54,59\text{kg/m}^2 \quad \text{viento transversal} \quad (10)$$

$$104,3\text{kg/m}^2 \cdot 0,673 \cdot 0,89 = 66,33\text{kg/m}^2 \quad \text{viento longitudinal} \quad (11)$$

3.2.4 Determinación de los Coeficientes de form

Viento normal a la cara mayor

$$\lambda_a = \frac{h}{a} = \frac{3,25}{12,36} = 0.26 \quad (12)$$

$$\lambda_b = \frac{h}{b} = \frac{3,25}{4,56} = 0.71 \quad (13)$$

$$\lambda a \leq 0.5 \rightarrow 0.26 \rightarrow \text{en funcion de } \lambda b = 1.34 \rightarrow \gamma_0 = 1.0$$

- Viento normal a la cara menor $\Rightarrow$

Para la cara menor en función de $\lambda a \frac{h}{a} = 0.26 \gamma_0 = 0.98$

3.4.5 Coeficientes presión exterior (Ce)

- En Cerramientos

Barlovento **Ce = 0,80**

$$\text{Sotavento } Ce = -(1,30 \times 1,00 - 0,80) \text{ Ce} = \mathbf{-0,50} \quad (14)$$

- En techo

Calcular el cerramiento de cubierta plana única

$$f = 0.50$$

$$\frac{h}{2} = \frac{3.25}{2} = 1,62 \quad (15)$$

$$f < \frac{h}{2} \quad \alpha = 6,48^\circ \quad \text{Ce} = \mathbf{-0,42}$$

3.4.6 Coeficiente presión interior

$$\text{Superficie Total} = 3,25 \times 12,36 = 40,17 \text{ m}^2 \text{ cara a barlovento} \quad (16)$$

Superficie de Aberturas = 5,36m²

Permeabilidad

$$\frac{5,36}{40,17} = 0,133 \rightarrow 13,3\% \quad (17)$$

- Coeficiente de presión interior para techo

$$\text{-Cerrada } Ci = 0,60 \times (1,8 - 1,3\gamma) \quad (18)$$

$$+0,60 \times (1,80 - 1,30 \times 1,00) \text{ Ci} = \mathbf{+0,30}$$

Para permeabilidad = 13,3% **Ci=0,52**

$$\text{-todas las caras interiores} = -0,60 \times (1,30 \times 1,00 - 0,80) \text{ Ci} = \mathbf{-0,30} \quad (19)$$

- Coeficiente de presión interior para cerramientos verticales

-abierto sobre las caras interiores $\mu \leq 5\% = \text{Ci} = \mathbf{+0,80}$

$$\text{-abierto sobre las caras interiores } \mu > 35\% \quad -0,60 \times (1,30 \times 1,00 - 0,80) \text{ Ci} = \mathbf{-0,30} \quad (20)$$

Ci=-0,26+0,30 para permeabilidad de 13,3% **Ci=0,52**

Fig. 4 Síntesis de Coeficientes Ce – Ci y Determinación de Presiones de Viento

Combinación de cargas permanentes y viento

$$q = q_D + q_W$$

- Carga Cubierta

$$q = 37,0 - 51,31 \text{ kg/m}^2 / \cos \alpha \quad q = -14,6 \text{ kg/m}^2 \quad (21)$$

Cargas Sísmicas

- Cálculo del peso de la construcción

$$\text{Techo: } 59,52 \text{ m}^2 \times 52 \text{ Kg/m}^2 \text{ (37 kg/m}^2 + \text{Peso Propio de Vigas)} = 3095 \text{ Kg}$$

$$\text{Muros } 98,02 \text{ m}^2 \times 100 \text{ Kg/m}^2 + 20,44 \text{ m}^2 \times 20 \text{ Kg/m}^2 = 10211 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso total } \mathbf{13306 \text{ Kg}}$$

- **Coefficiente sísmico**, zona 1 : $C = 0,0675 = \mathbf{0,07}$ (Respuesta elástica) (22)

- **Corte basal** $V_0 = C \times Q = 0,07 \times 13306 = \mathbf{931,42 \text{ Kg}}$. (Cargas últimas) (23)

4. VERIFICACIONES SECCIONALES

Verificación a Flexión de Viga de madera 2"x 6"

4.1.1 Determinación de las Máximas Solicitaciones

Carga más desfavorable por metro lineal corresponde a la combinación $q_D + q_L$ $q_u = 54 \text{ Kg/m}$

Luz de cálculo $l_v = 4,38 \text{ m}$

- Cálculo de Reacciones

$$R = \frac{q \times l}{2} = \frac{54 \times 4,38}{2} = \mathbf{118,26 \text{ Kg}} \quad (24)$$

- Cálculo de Momento Flector Máximo

$$M = q \times l^2 / 8 \quad (25)$$

$$M = 129,63 \text{ Kgm} \quad \mathbf{12963 \text{ Kgcm}}$$

4.1.2 Características Mecánicas de los Materiales

En el laboratorio del Taller de Investigación de Diseño Estructural de la Facultad de Arquitectura de la UNC se determinaron las características físico-mecánicas del Pino Ellioti resultando:

MADERA: Resistencia característica $f_{cok} = 215 \text{ kg/cm}^2$

$$\text{Resistencia de cálculo: } f_{cod} = k_{mod} \times \frac{f_{cok}}{1,4} = 58,97 \text{ kg/cm}^2 \quad (26)$$

$$K_{mod} = k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} = 0,6 \times 0,8 \times 0,8 = 0,384$$

$$\text{Módulo de elasticidad: } 128770 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Módulo de elasticidad efectivo: } K_{mod} \times E_m = 49447,7 \text{ kg/cm}^2 \quad (27)$$

4.1.3 Características Geométricas de la Sección

Las mismas se encuentran resumidas en la siguiente figura:

Fig. 5 Sección Viga 2"x6"

4.1.4 Verificación de Resistencia

La tensión de trabajo en la sección será

$$\sigma_{\tau} = \frac{12963}{250,88} = 51,67 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \leq f_{cod} = 58,97 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \textbf{Verifica} \quad (28)$$

Si bien las cargas de viento son inferiores habrá que evaluar los anclajes del techo en planos verticales para la mayor succión posible en la techumbre.

4.1.5 Verificación de Deformaciones

Deformación con carga sin mayorar y 0,5 de sobrecarga de uso

$$f = \frac{5}{384} \times \frac{31,2 \times 4,38 \times 438^3}{49447 \times 1823,86} = 1,66 \leq 2,19 = \frac{\lambda}{200} \quad \textbf{Verifica} \quad (29)$$

4.2 Verificación Plano Resistente Vertical conformados por elementos yuxtapuestos solidarizados continuamente

4.2.1 Determinación de las Máximas Solicitaciones

En el caso de los planos resistentes para su verificación se determinarán las acciones provocadas por el sismo que se corresponde con el estado de cargas más desfavorable, recordando que el valor de V_0 es de **931,42 Kg**.

- Determinación de las acciones en la dirección perpendicular a la cara mayor
En esta dirección tenemos cuatro planos resistentes a cargas laterales que están conformados por columnas de maderas de sección compuesta y diagonales de planchuelas en las dos caras de 1" por 1/8" de espesor conformando cruces de San Andrés.
Como son cuatro planos iguales en esa dirección el esfuerzo de corte será 232,8 Kg.
Descomponiendo el esfuerzo de corte horizontal en una dirección vertical de **121,5 Kg** que **comprime la columna** de madera de sección compuesta y una dirección inclinada de **168,0 Kg** que **tracciona las diagonales** de acero en cada cara del plano.

4.2.2 Características Mecánicas de los Materiales

ACERO: A240 fek = 2400 Kg/cm²

MADERA: Resistencia característica $f_{cok} = 215 \text{ kg/cm}^2$ (pino elliotti)

Resistencia de cálculo: $f_{cod} = 58,97 \text{ kg/cm}^2$

Módulo de elasticidad: 128770 kg/cm²

Módulo de elasticidad efectivo: $K_{mod} * E_m = 49447,7 \text{ kg/cm}^2$

4.2.3 Características Geométricas de la Sección

Recordemos que las columnas se forman con 4 varillas de 1" x 1" de sección, y una tabla central de 2" x 5" por lo que se deberán conocer los siguientes datos correspondientes a la sección compuesta:

- Momento de inercia, coordenada en el plano perpendicular al ej x de la pieza

$$I_x = \frac{5 \cdot 13^3}{12} + 4 \left[\frac{2,5 \cdot 2,5^3}{12} + 2,5 \cdot 2,5 \cdot 7,75^2 \right] \quad (30)$$

$$I_x = 2429,99 \text{ cm}^4$$

- Momento de inercia, coordinada en el plano perpendicular al eje y de la pieza

$$I_y = \frac{5 \cdot 13^3}{12} + 4 \left[\frac{2,5 \cdot 2,5^3}{12} + 2,5 \cdot 2,5 \cdot 1,25^2 \right] \quad (31)$$

$$I_y = 187,49 \text{ cm}^4$$

Todas las características geométricas se encuentran resumidas en la siguiente figura:

Fig. 6 Montante Sección Compuesta

4.2.4 Verificación a Tracción Diagonal de Acero 1" espesor 1/8"

$$168 \text{ Kg} / 0,806 \text{ cm}^2 = 208,4 \text{ Kg/cm}^2 < f_{ek} = 2400 \text{ Kg/cm}^2 \text{ Verifica} \quad (32)$$

4.2.5 Verificación a Compresión Montante de Sección Compuesta de Madera

$$\text{Madera } (121,50 + 118,26) \text{ Kg} / 90 \text{ cm}^2 = 2,7 \text{ Kg/cm}^2 < f_{cod} = 58,97 \text{ Kg/cm}^2 \text{ Verifica} \quad (33)$$

En esta verificación se ha sumado la compresión por cargas gravitatorias más la debida a la acción sísmica, como se puede ver verifica sobradamente.

4.2.6 Verificación a Flexo-Compresión Montante de Sección Compuesta de Madera

Datos Solicitaciones

N = 141,5 kg

Momentos producidos por exentricidad **en x**

Exentricidad 3.07cm

M=141,5 x 3,07=434,40kgcm

Momentos producidos por exentricidad **en y**

Exentricidad 0.18 cm

M=141,5x0.18=25,47kgcm

- Momento de inercia efectivo

$$I_{ef} = 0,70 \cdot 2429,99 = 1700.99 \text{ cm}^4 \quad (34)$$

- Índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{Lo}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{250}{\sqrt{\frac{1700,99}{90}}} = \frac{250}{4,347} = 57,5 \quad (35)$$

- Índice de esbeltez relativa

$$\lambda_{rel,x} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_{cok}}{E 0,05}} = \frac{57,5}{3,1416} \sqrt{\frac{215}{0,7*71312}} = 1,20 \quad (36)$$

- Coeficiente de rigidez coordinada en el plano perpendicular al eje de la pieza

$$Kx = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,x} - 0,3) + (\lambda_{rel,x})^2 \right] \quad (37)$$

$$Kx = 0,5[1 + 0,2(1,2 - 0,3) + (1,2)^2] = 1,31$$

- Coeficiente de rigidez, compresión coordinada en el plano perpendicular al eje de la pieza

$$K_{cx} = \frac{1}{k_x + \sqrt{(K_x)^2 - (\lambda_{rel,x})^2}} \quad (38)$$

$$K_{cx} = \frac{1}{1,31 + \sqrt{(1,31)^2 - (1,2)^2}} = 0,5449$$

- Determinación de la tensión de compresión

$$\tau_{cod} = \frac{141,5}{90} = 1,57 \frac{Kg}{cm^2} \quad (39)$$

- Determinación de la tensión por Flexión

$$\tau_{Mxd} = \frac{434,40}{188,99} = 2,30 \frac{Kg}{cm^2} \quad (40)$$

- Interacción Compresión-Flexión

$$\frac{\tau_{cod}}{K_{cx} * f_{cod}} + \frac{\tau_{Mxd}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (41)$$

$$\frac{1,57}{0,5449*58,97} + \frac{2,30}{58,97} \leq 1$$

$$0,087 \leq 1 \text{ Verifica}$$

- Momento de inercia efectivo

$$I_{efy} = 0,70 * 187,49 = 131,24 cm^4 \quad (42)$$

- Índice de esbeltez

$$\lambda_y = \frac{Lo}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{55}{\sqrt{\frac{131,24}{90}}} = 45,56 \quad (43)$$

- Índice de esbeltez relativa

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{cok}}{E 0,05}} = \frac{45,56}{3,1416} \sqrt{\frac{215}{0,7*71312}} = 0,95 \quad (44)$$

- Coeficiente de rigidez coordinada en el plano perpendicular al eje de la pieza

$$Ky = 0,5 \left[1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + (\lambda_{rel,y})^2 \right] \quad (45)$$

$$Ky = 0,5[1 + 0,2(0,95 - 0,3) + (0,95)^2] = 1,016$$

- Coeficiente de rigidez, compresión coordinada en el plano perpendicular al eje de la pieza

$$K_{cy} = \frac{1}{k_y + \sqrt{(K_y)^2 - (\lambda_{rel,y})^2}} \quad (46)$$

$$K_{cy} = \frac{1}{1,016 + \sqrt{(1,016)^2 - (0,95)^2}} = 0,7266$$

- Determinación tensión de Compresión

$$\tau_{cod} = \frac{141,5}{90} = 1,57 \frac{Kg}{cm^2} \quad (47)$$

- Determinación tensión por Flexión

$$\tau_{Myd} = \frac{25,47}{52,49} = 0,485 \frac{Kg}{cm^2} \quad (48)$$

- Interacción Compresión- Flexión

$$\frac{\tau_{cod}}{K_{cy} \cdot f_{cod}} + \frac{\tau_{Myd}}{f_{cod}} \leq 1 \quad (49)$$

$$\frac{1,57}{0,7266 * 58,97} + \frac{0,485}{58,97} \leq 1$$

0,045 ≤ 1 Verifica

5. CONCLUSIONES

Hoy la sustentabilidad es una temática que interpela a la arquitectura y a sus normas constructivas, por lo que se hace relevante pensar y proponer nuevas tipologías de infraestructura habitacional que generen una contribución al medio ambiente a partir de la reducción del consumo de energía y el reciclado de materiales de descarte. El presente trabajo reafirma la convicción de participar desde nuestra especialidad en dicho sentido, para avanzar en este modelo de construcción socio-ambiental que posibilitará el acceso de las familias a la casa propia a través del esfuerzo mancomunado.

La singularidad de esta estructura se debe al uso de elementos de madera de pequeñas dimensiones, muy accesibles en el mercado, económicas, con un sistema de construcción de módulos apropiado para construir en taller y trasladar sin dificultad al lugar de emplazamiento de la vivienda para su montaje. Los ideólogos de este sistema quisieron darle una función social, que brinde oportunidades de trabajo y crecimiento a personas en situación de riesgo, además de contribuir a cuidado de la huella ecológica.

6. REFERENCIAS

- Associação brasileira de normas técnicas (1997) *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*, Río de Janeiro, Brasil: ABNT, 50 p.
- Gómez, J. L., (2000) “*Estructuras de madera*”, Córdoba, Argentina: Ingreso, 146 p.
- Argüelles Alvarez, R., Martitegui, F. Arriaga (1996), “*Estructuras de madera, Diseño y cálculo*”, Madrid, España: Graficas Palermo, 663 p.