

PUENTES DE MADERA CON TABLEROS TENSADOS

MARIO GIULIANO, Ingeniero Civil, Depto. Ingeniería Civil

Universidad de Concepción, Chile, ggiulian@udec.cl

PETER DECHENT, Dr. - Ingeniero Civil, Depto. Ingeniería Civil

Universidad de Concepción, Chile, pdechen@udec.cl

LUIS VALENZUELA, Dr. -Ingeniero Forestal, Facultad de Ciencias Forestales

Universidad de Concepción, Chile, lvalenzu@udec.cl

MARSELLA SALGADO, Ingeniero Civil, Depto. Ingeniería Civil

Universidad de Concepción, Chile, msalgad@hotmail.com

RESUMEN

Los tableros de madera postensada transversalmente consisten en tablonces dispuestos de canto en la dirección longitudinal del puente que se postensan en conjunto en la dirección transversal por medio de unas barras de acero de alta resistencia. El postensado se requiere para distribuir las cargas de las ruedas en dirección transversal, para desarrollar continuidad y transferencia de corte entre las láminas.

Este trabajo describe las características principales de los tableros postensados de madera, las variables que inciden en su diseño y como deben ser incorporadas en un modelo de análisis, con el fin de representar su comportamiento de la forma lo más real posible. Esta investigación se encuentra inmersa en un Proyecto de Transferencia de esta tecnología a Chile, patrocinado por el Ministerio de Obras Publicas de Chile.

1. INTRODUCCION

Los tableros de puentes de madera postensada transversalmente consisten en tablonces dispuestos de canto en la dirección longitudinal del puente, los que en conjunto son postensados en la dirección transversal por medio de unas barras de acero de alta resistencia (figura 1). El postensado se requiere para distribuir las cargas de las ruedas en dirección transversal, para desarrollar continuidad y transferencia de corte entre las láminas.



Figura 1: Puente de madera postensada transversalmente en EEUU (11m de largo).

A través del postensado transversal, el tablero actúa como una placa sólida de madera, cuya función estructural es repartir las cargas de las ruedas de los vehículos a los tablones vecinos, los que no se encuentran directamente cargados, colaborando a resistir parte de la carga. El tablero también cumple una función de protección, desde el punto de vista que se transforma en la subestructura que recibe la carpeta de rodado, protegiendo a la estructura de la humedad y sollicitación mecánica debida al tráfico.

El concepto de laminaciones postensadas fue desarrollado originalmente en Ontario, Canadá (1976), como una manera de rehabilitar puentes de tableros clavados, en los cuales las láminas se separaban debido a las sollicitaciones del tráfico y variaciones en el contenido de humedad. Posteriormente, esta innovación fue adquirida por EEUU, cuyos primeros puentes de madera postensados fueron construidos después de los '80. Desde aquel entonces se han utilizado con gran éxito fundamentalmente en la construcción de puentes vehiculares de caminos secundarios y rurales, como muestra la figura 1. Así, se materializó en 1991 una guía de especificaciones, publicada por la AASHTO, para el diseño de estos puentes de madera.

Este trabajo describe las características principales de los tableros postensados de madera, las variables que inciden en su análisis y como son incorporadas en el modelo que considera el puente como una placa ortotrópica, con el fin de representar su comportamiento de la forma lo más real posible. Se presenta la teoría de láminas planas de Reissner-Mindlin adaptada a materiales ortótropos, con el fin de poder modelar la madera y principalmente a los tableros pretensados que conforman la superestructura de los puentes. Además se presentan las prácticas de diseño dados por la "Guía de Especificaciones para el Diseño de Tableros de Madera Postensada" (AASHTO 1991) que se basan en asumir que la porción del tablero directamente debajo de una línea de cargas de las ruedas actúa como una viga apoyada entre los soportes.

Esta investigación se encuentra inmersa en un Proyecto de Transferencia de esta tecnología a Chile, patrocinado por el Ministerio de Obras Públicas de Chile. Debido a que estos tableros se caracterizan por los bajos costos de fabricación, facilidad de transporte y montaje, que los hacen particularmente atractivos para ser fabricados en caminos de bajo volumen de tránsito con luces entre unos 3 a 11 metros. La implementación de estos puentes puede llevar a la Madera a ser un material totalmente competitivo comparado con materiales tradicionales como acero u hormigón armado utilizados para construcciones viales, si se realiza un tratamiento adecuado, correctos métodos de construcción y metodologías de diseño adecuadas.

El aspecto más importante para el comportamiento y durabilidad de los tableros lo constituye el correcto proceso de construcción. Lo anterior fue demostrado por el USDA Forest Service que llevó a cabo un programa de 2 años de monitoreo a numerosos puentes. Dentro de los aspectos constructivos más importantes se tiene: secuencia de postensado, contenido de humedad de la madera y métodos de protección de la madera tanto constructivos como químicos.

La primera característica visible del funcionamiento de los tableros de puentes de madera postensados transversalmente, es que debido a este postensado transversal, el tablero actúa como una gran placa sólida de madera, donde los tablones están unidos entre sí por la compresión interlaminar generada del postensado, lo que genera la continuidad del tablero. La principal función del tablero como estructura, es de repartir las cargas a los tablones vecinos, los que no se encuentran directamente cargados, colaborando a resistir parte de la carga (figura 2), de este modo el tablero del puente distribuye las cargas de las ruedas en dirección transversal.

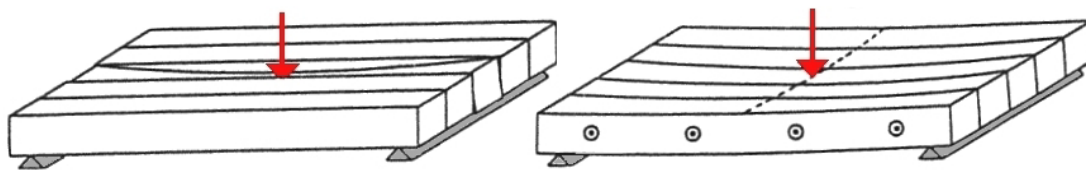


Figura 2: Formación de una placa sólida de madera debido al postensado transversal.

Cuando este tablero se somete a las cargas de un vehículo, este actúa como una placa ortotrópica con diferentes propiedades en las direcciones longitudinal y transversal. Cuando la carga de una rueda es colocada en algún punto del tablero, el tablero entero tiene deflexiones descendentes (excepto en puntos sobre los apoyos), resultando en desplazamientos en ambas direcciones transversal y longitudinal. Debido a este comportamiento, los momentos flectores son también desarrollados en las direcciones longitudinal y transversal. La magnitud de estos momentos depende principalmente de 5 variables: Magnitud de la carga, Luz del tablero, Ancho del tablero, Rigidez longitudinal del tablero, Rigidez transversal del tablero.

Cuando la carga de las ruedas de un vehículo son colocadas sobre las laminaciones del tablero, ocurren 2 acciones que deterioran el comportamiento de placa del tablero (figura 3). La primera acción que resulta de la flexión transversal, produce la tendencia de abrir y separar las laminaciones del tablero bajo el lugar cargado. La segunda acción se debe al corte transversal, la que crea una tendencia al deslizamiento vertical entre las laminaciones. En ambos casos, las acciones no ocurrirán si el tablero ha tenido un nivel de preesfuerzo de compresión suficiente entre las laminaciones. En el caso de la flexión transversal, el preesfuerzo de compresión balanceará directamente los efectos de tracción situados en la zona inferior del tablero. Para el corte, el deslizamiento vertical está prevenido por la fricción entre las laminaciones debido a la compresión interlaminar introducida por el postensado. Mantener un adecuado nivel de preesfuerzo de compresión corresponde al aspecto más importante de construcción para un buen funcionamiento de un puente postensado (Ritter,1990).

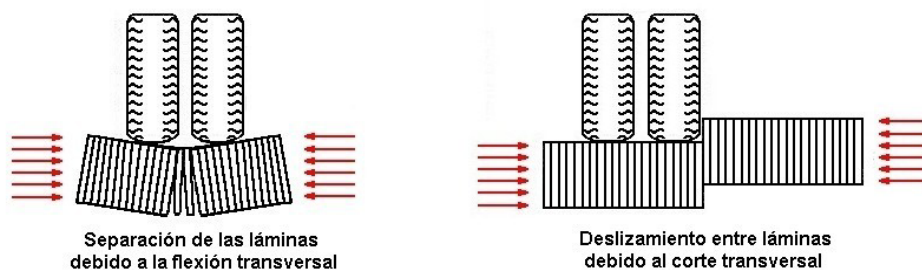


Figura 3: Acciones que deterioran el comportamiento de placa.

El comportamiento estructural de un tablero postensado en el tiempo, es una de las consideraciones más importantes que deben ser previstas para su correcto funcionamiento, puesto que la capacidad de carga del puente se verá disminuida por la respuesta de la madera sometida a compresión permanente y a variables ambientales, como son los cambios en el contenido de humedad y variaciones de temperatura. Esta disminución en la capacidad de carga del tablero se relaciona directamente con la pérdida de tensión en las barras, pues al disminuir la compresión interlaminar entre las láminas del tablero, el puente aminora su capacidad resistente.

2. COMPORTAMIENTO DE LOS TABLEROS

2.1. Respuesta de la madera en el tiempo bajo carga sostenida

Con el tiempo, el nivel de preesfuerzo colocado durante la instalación del tablero disminuirá por efecto del creep en la madera. Cuando una fuerza de compresión constante es colocada en la madera, ésta lentamente se comprimirá en el tiempo, fenómeno conocido como creep. Producto de la carga de compresión a la que queda sometida la madera por el tensado de las barras, esta padece creep acortando el ancho del puente con la consecuente disminución de la tensión del cable reduciendo de esta manera su efectividad.

Aunque el creep es una característica natural que afecta adversamente el nivel de postensado, investigaciones en Ontario han desarrollado un método eficiente para controlar este fenómeno. La pérdida de tensión en las barras puede ser controlada con el número de veces que el tablero es retensado. Lo anterior se refleja en el gráfico de la figura 4, que muestra la respuesta de la tensión en las barras de tensado en el tiempo, frente al número de veces en que estas son retensadas al 100% inicial.

Si un tablero es tensado sólo una vez durante la construcción, el 80% o más del tensado inicial se perderá por efecto del creep. Si el tablero es nuevamente tensado dentro de un periodo relativamente corto, la subsecuente pérdida de tensión será menor. Estudios han llegado a limitar la pérdida de tensión a un máximo de 60%, cuando el tablero es retensado una segunda vez dentro de un periodo de tiempo determinado.

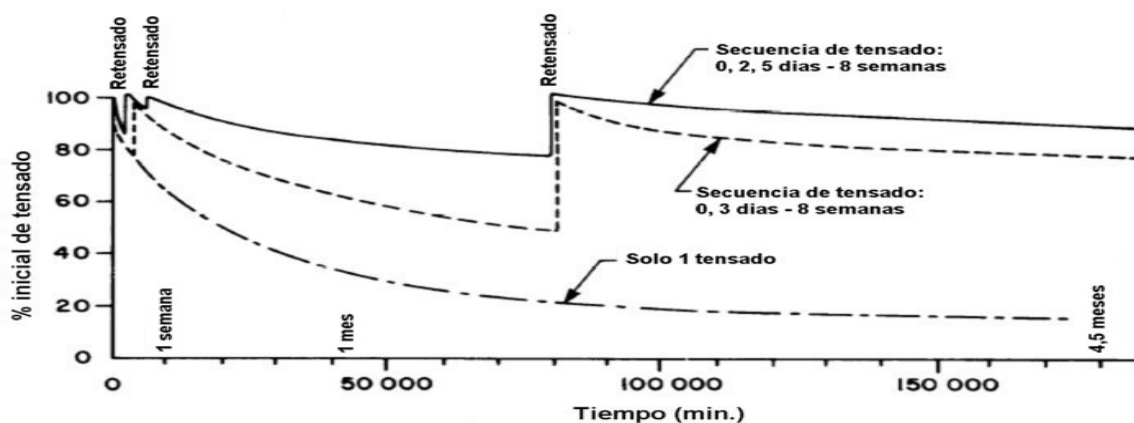


Figura 4: Pérdida de tensión en las barras de tensado debida al creep en la madera (Ritter, 1990).

2.2. Cambios en el contenido de humedad de la madera

El contenido de humedad en la madera durante la instalación y en servicio, es una de las primeras consideraciones para el diseño de estructuras de madera expuestas a la intemperie. Cambios en el contenido de humedad, pueden afectar a la resistencia, rigidez y estabilidad dimensional de la madera. Estos efectos son reconocidos en el diseño, por medio de factores de modificación.

En los puentes de madera postensados los cambios dimensionales influyen directamente sobre el funcionamiento del tablero. La estabilidad dimensional de la madera se ve afectada por cambios

en el contenido de humedad. Debajo del punto de saturación de la fibra (aproximadamente un 30%), la madera se expandirá al ganar humedad y contraerá al perderla.

Las variaciones en el contenido de humedad de los tableros postensados pueden tener *efectos globales* y *efectos localizados*. Los efectos globales se relacionan con la estructura entera y ocurren lentamente luego de la construcción, cuando el contenido de humedad de los tablonos del puente se mueve hacia un equilibrio con la humedad del ambiente. Efectos localizados afectan a las superficies expuestas del puente y ocurren más rápidamente, se refleja en superficies mojadas o a las fluctuaciones estacionales del contenido de humedad de equilibrio, estos efectos pueden ser reducidos o eliminados si la superficie del tablero se pavimenta con asfalto, preferiblemente en combinación con una membrana geotextil impermeable.

2.3. Comportamiento del tablero frente a variaciones de temperatura

Como es sabido, los tableros postensados utilizan madera y acero. El coeficiente de dilatación térmica de la madera es aproximadamente un tercio que del acero, por lo que es de esperar que ante esta diferencia de propiedad térmica, el esfuerzo de postensado cambie debido a fluctuaciones de temperatura. Registros en puentes postensados construidos en EEUU, indicaron que la tensión en las barras decrecía cuando las temperaturas bajaban. La magnitud de este decremento depende del rango de las temperaturas, duración de las bajas temperaturas y contenido de humedad de la madera. Las disminuciones de temperatura en el corto plazo, 24 horas o menos, han mostrado pequeños efectos en la fuerza de la barra, debido a que la conductividad térmica de la madera es muy baja. Este efecto de bajas temperaturas es completamente recuperable y la tensión en las barras retorna a su nivel original cuando se incrementa la temperatura.

3. PROPIEDADES MATERIALES DE LOS TABLEROS

La madera a diferencia de otros materiales, como por ejemplo, el hormigón, no puede ser modelada como un compuesto homogéneo e isótropo debido a sus características internas particulares que la diferencian de otros sólidos. La madera es un material complejo, con propiedades y características que no sólo dependen de su composición sino de su constitución (forma en que están orientados los diversos elementos que la forman). Por lo tanto, la madera es un material heterogéneo y anisótropo que tiene distintas propiedades en diferentes secciones y direcciones (Pineda 2001).

A pesar de lo anterior, la madera puede ser considerada como un sólido ortótropo, lo que permitirá modelar su comportamiento. La figura 5, muestra la simplificación de la madera a un sólido ortótropo.

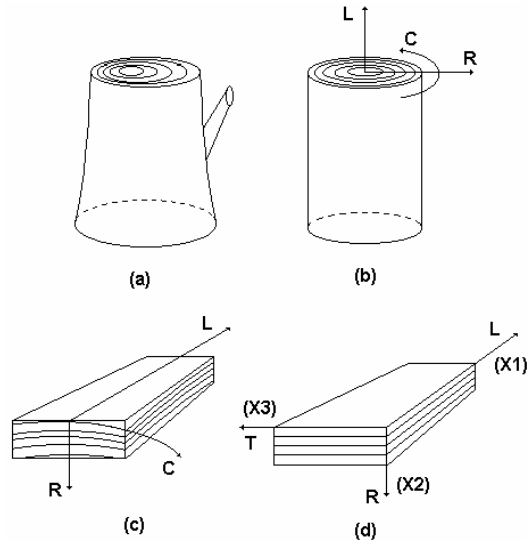


Figura 5: Reducción de un tronco a un sistema ortotrópico: (a) tronco con características naturales de crecimiento, (b) Modelo cilíndrico de un tronco, (c) madera aserrada en coordenadas cilíndricas, (d) Modelo ortotrópico que representa a la madera.

Para hacer posible esta suposición, se deben ignorar los posibles nudos de la madera, conicidad o excentricidades de crecimiento. La consideración de anillos de crecimiento planos, para considerar el material como ortotrópico en que los ejes geométricos (X_1 , X_2 , y X_3) que coinciden con los ejes ortotrópicos (Longitudinal, Radial y Tangencial, fig 5-d), es relativamente cierta para ciertas condiciones. Esta suposición siempre va a estar relacionada con un error, el cual será más o menos importante dependiendo de la ubicación original de la pieza en el tronco, ya que una sección cercana a la médula va a presentar anillos más curvos que en una ubicada en el extremo. Debido a lo anterior, para efectos de modelar el comportamiento de la madera, es factible considerarla simplificada a un sistema ortotrópico.

Los puentes postensados están compuestos de madera aserrada, y cada trozo junto con la dirección de las fibras longitudinales de la madera, están orientados longitudinalmente al puente (Figura 6) y tomando en cuenta que la orientación de los ejes coordenados en cada uno de estos puentes es la siguiente:

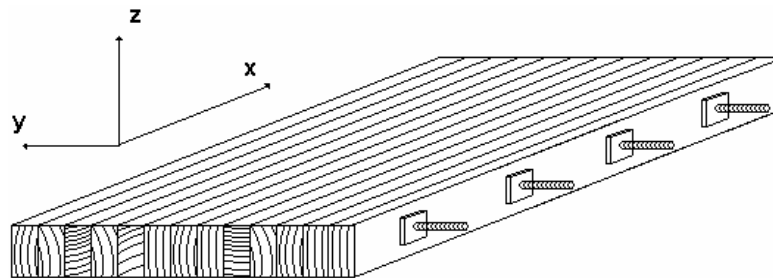


Figura 6: Orientación puente postensado.

Se puede decir que:

- El eje x coincide con la dirección longitudinal del puente y con el eje longitudinal (L) de la madera.
- El eje y coincide con la dirección transversal del puente y con el eje tangencial (T) o radial (R) de la madera, dependiendo de la orientación de cada trozo aserrado (madera floreada o cuarteada).
- El eje z coincide con la dirección perpendicular al puente y con el eje tangencial (T) o radial (R) de la madera, dependiendo de la orientación de cada trozo aserrado, al igual que en el caso anterior.

Por lo tanto, se puede escribir la relación tensión-deformación para un sólido ortotrópico mediante la expresión matricial presentada en la ecuación 1.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix} \quad (1)$$

De lo anterior, los módulos de elasticidad y corte necesarios para la modelación del puente son:

- E_x : módulo de elasticidad longitudinal
- E_y : módulo de elasticidad transversal
- G_{xy} : módulo de corte en el plano del puente (plano xy)
- G_{xz} : módulo de corte longitudinal fuera del plano (plano xz)
- G_{yz} : módulo de corte transversal fuera del plano (plano yz)
- ν_{xy} : módulo de Poisson xy
- ν_{yx} : módulo de Poisson yx

El valor de los módulos elásticos que representan el comportamiento del tablero, no son los dados para una piezas de madera, sino que dependen de la magnitud del pretensado que es aplicado a estas estructuras; por lo tanto, deben determinarse a partir de ensayos. Una excepción lo constituye el módulo de elasticidad longitudinal E_x , el cual no se ve afectado mayormente por el pretensado. Una buena forma de obtenerlo, es promediando los módulos elásticos de todos los trozos aserrados que conforman la cubierta (Ritter, 1990; Brokaw, 1992; Davalos, 1996).

Debido a que en Chile, no existen registros de ensayos tendientes a encontrar el valor de los diferentes componentes de las matrices constitutivas, se deben utilizar en el diseño datos derivados de ensayos realizados en Canadá y EE.UU., países en los cuales existe bastante información producto de constantes investigaciones en la materia. Estos datos deben ser utilizados momentáneamente para analizar y diseñar los primeros puentes postensados de madera, hasta la futura realización de ensayos con madera chilena.

4. PROPIEDADES DE LA PLACA ORTOTRÓPICA

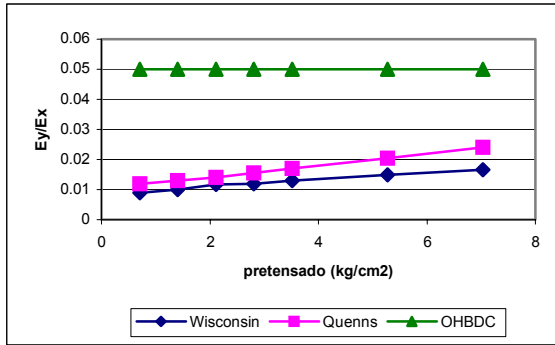
La teoría de láminas de Reissner-Mindlin es la utilizada en este trabajo, la que permite obtener una formulación de elementos finitos válida para láminas de pequeño y gran espesor. El elemento finito de lámina plana, puede considerarse como una simple superposición de un elemento de tensión plana y otro de flexión de placas. Así, cualquiera de los elementos de tensión plana y de placa de Reissner-Mindlin podrían combinarse para formar un elemento de lámina plana. Para el estado de placa, se utiliza el elemento de placa gruesa cuadrilátero de cuatro nodos con deformaciones de cortante lineales impuesta (CLLL), y para el estado de tensión plana (membrana) se utiliza el elemento cuadrilátero isoparamétrico de cuatro nodos (CSC) (Suarez, 2002).

Los modelos analíticos, basados en elementos finitos, utilizados en investigaciones en el extranjero para predecir el comportamiento de la cubierta postensada, necesarios para el estudio de la respuesta a cargas estáticas de este tipo de puentes, usualmente consideran el tablero de la estructura como una placa delgada, lo cual quiere decir, que no se considera en la deformación, el efecto producto de esfuerzos de corte; además, estos programas permiten analizar sólo placas delgadas, lo que no significa ningún impedimento mientras éstas posean una relación espesor dividido por ancho menor o igual a 0.10. Como se menciono anteriormente el programa de elementos finitos implementado es capaz de resolver placas de pequeño y gran espesor sin la presencia de dificultades de bloqueo de la solución para estas últimas debido al buen enfrentamiento de los problemas numéricos que surgen al implementar la teoría de lámina gruesa de Reissner-Mindlin; por ejemplo, se utilizaron campos de deformaciones de cortante transversal impuestas e integración reducida en su formulación (Oñate, 1992).

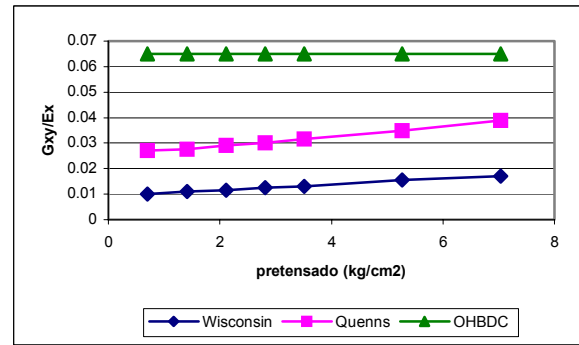
Producto de lo anterior, los módulos elásticos necesarios para una formulación de placa delgada, no incluyen a los módulos de corte longitudinal y transversal fuera del plano G_{xz} y G_{yz} , necesarios para utilizar el programa de elementos finitos de lámina gruesa, lo que significa que la obtención de información referente a ellos se dificulta, debido a que es escasa; por lo tanto, la mayor información encontrada producto de ensayos, tiene relación con los módulos de elasticidad longitudinal y transversal E_x y E_y , respectivamente, y con el módulo de corte en el plano G_{xy} .

Estudios realizados en E.E.U.U. acerca de la influencia en la respuestas de los tableros pretensados de madera que produce la variación en el valor de los módulos de Poisson, indican que estos últimos son despreciables, por lo tanto, su valor se considera nulo (Brokaw 1992; Dávalos 1996), además esta información fue corroborada en la investigación realizada por Suarez (2002). Debido a lo anterior, los módulos de Poisson, no serán considerados en el análisis.

A continuación se muestran dos gráficos (Figura 7) que dan a conocer diferentes valores del módulo de elasticidad transversal E_y y del módulo de corte en el plano G_{xy} para un rango de pretensado de servicio, los cuales provienen de pruebas de laboratorios realizadas por Queen's University en Canadá, University of Wisconsin en EE.UU. y datos entregados por el Código de Diseño de Puentes Carreteros de Ontario (OHBDC) en Canadá.



(a)



(b)

Figura 7: (a) Razón E_y/E_x a diferentes niveles de pretensado; (b) Razón G_{xy}/E_x a diferentes niveles de pretensado.

En Queen's University, Canadá, se concluyó que las relaciones obtenidas para el módulo de elasticidad transversal E_y y el módulo de corte en el plano G_{xy} , los cuales varían con el nivel del pretensado, son independientes del tipo de especie, al igual que los valores dados por el código OHBDC. Los ensayos se realizaron sobre tres especies diferentes de madera. Las pruebas realizadas por University of Wisconsin (EE.UU) utilizaron sólo la especie maderera abeto Douglas (Douglas-fir), y se indicó, que las relaciones derivadas de estos ensayos, podrían funcionar bien con otras especies. En Todos los casos, el módulo de elasticidad transversal y el módulo de corte en el plano, se incrementan con el nivel de pretensado utilizado.

Ensayos de torsión de placa provenientes de Virginia University en E.E.U.U., practicados a probetas de álamo amarillo (yellow-poplar) que simulaban el comportamiento de cubiertas postensadas, arrojaron valores tanto para el módulo de corte longitudinal fuera del plano G_{xz} , como para el módulo de corte en el plano G_{xy} (cuyos valores extremos ya fueron vistos). Producto de los resultados obtenidos, se pudo asumir, que el valor de estos dos módulos de corte G_{xz} y G_{xy} es prácticamente el mismo debido a su mínima variación, por lo tanto se considerarán de igual valor en los análisis futuros. A continuación se muestra gráficamente (figura 8) esta similitud en un amplio rango de pretensado.

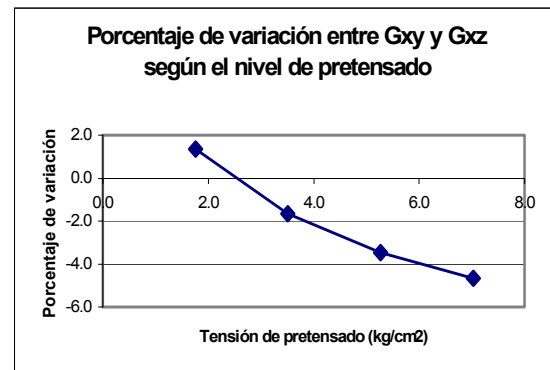
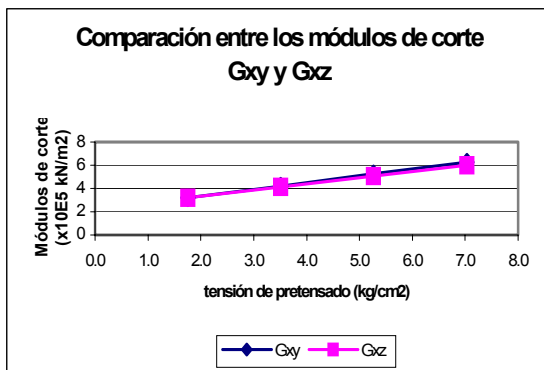


Figura 8: (a) Comparación entre los módulos de corte G_{xy} y G_{xz} . (b) Variación porcentual entre los módulos de corte G_{xy} y G_{xz} . Oliva (1990)

En cuanto al módulo de corte transversal fuera del plano G_{yz} , Ritter (1990) considera este modulo igual a $0.03E_x$ para un pretensado de servicio mínimo de 2.81 kg/cm^2 (40 lb/in^2). En ensayos

realizados por la University of Wisconsin en EE.U.U (Brokam, 1992) se concluyo que $G_{yz} = 9 \cdot F_p - 193$, donde F_p es el nivel de pretensado en psi.

5. DISEÑO DE LOS TABLEROS POSTENSADOS

El diseño y análisis de los puentes postensados de madera chilena, debiera utilizar en la formación de la matriz constitutiva del tablero, las constantes derivadas de ensayos de laboratorio realizadas con la correspondiente especie maderera con la cual se construirá. Mientras estos ensayos no sean realizados, se debe utilizar la información recopilada de estudios realizados con otro tipo de madera. Por lo tanto, se desarrollará un criterio que permita utilizar la información disponible, acerca de los diferentes módulos elásticos, de la mejor forma, para poder construir la matriz constitutiva que represente la relación tensión deformación para los cálculos de puentes pretensados utilizando madera chilena. El material que se utilizará para estos primeros análisis, será madera de Lenga. A continuación, se describirán los supuestos necesarios que serán adoptados con el fin de conformar el criterio necesario para el diseño de los tableros postensados con madera de Lenga.

El método de diseño de puentes postensados de madera propuesto por Ritter (1990) y AASTHO 1991, utiliza los valores de los módulos de elasticidad transversal E_y y de corte transversal G_{yz} , fijos para un variado número de especies de madera y para un nivel de postensado de servicio mínimo esperado de 2.81 kg/cm^2 (40 lb/in^2), esto es $0.013 \cdot E_x$ y $0.03 \cdot E_x$, respectivamente. Estas constantes son necesarias en conjunto con el módulo de elasticidad longitudinal del tablero E_x , para el desarrollo del cálculo según este procedimiento, es decir, no son requeridos el módulo de corte en el plano G_{xy} ni el módulo de corte longitudinal G_{xz} del tablero, debido a que los esfuerzos son calculados a través de una ecuación que representa la respuesta de un tablero real, por lo que es más razonable utilizar la modelación por medio de elementos finitos debido a la gran incertidumbre de la madera chilena. Los valores anteriormente dados, están limitados a las siguientes especies. Douglas Fir-Larch, Hem-Fir (North), Red Pine y Eastern White Pine (Ritter, 1990). La madera de Lenga, presenta propiedades mecánicas similares a dos de las especies mencionadas en el párrafo anterior, estas son: Douglas Fir-Larch y Hem-Fir, por lo cual, para la confección de la matriz constitutiva de los tableros postensados de Lenga, se adoptarán los valores dados para el módulo de elasticidad transversal E_y ($0.013 \cdot E_x$) y para el módulo de corte transversal G_{xz} ($0.03 \cdot E_x$) (Muñoz, 2002).

Para completar la matriz constitutiva, se debe definir los valores que adoptarán el módulo de corte longitudinal G_{xz} y el módulo de corte en el plano del tablero G_{xy} . De acuerdo a los resultados de ensayos (Brokaw, 1992; Davalos et al, 1996) estos módulos de corte poseen valores muy similares para un amplio rango de pretensado de servicio. Luego, se supondrá la igualdad de ellos. A diferencia de los antes ya establecidos (módulos de elasticidad transversal E_y y de corte transversal G_{yz}), no poseerán un valor fijo, es decir, se les asignará el valor máximo y mínimo de un rango de datos, el cual será obtenido de la figura 7 -b, para un tensado de servicio de 2.81 kg/cm^2 (40 lb/in^2). La razón de otorgar a estos módulos elásticos, los valores extremos del mencionado rango, se debe a que se buscará con cada uno de ellos, la condición más desfavorable para el análisis, de cada esfuerzo necesario para cumplir con los requisitos establecidos para el diseño de los tableros. Es decir, se utilizarán para el diseño, los máximos valores de cada esfuerzo, producto de utilizar en la matriz constitutiva del tablero, ya sea el máximo o mínimo valor del rango ya mencionado para los módulos G_{xz} y G_{xy} . Los valores extremos, según la figura

7-b son: $0.013 \cdot E_x$ y $0.065 \cdot E_x$. Esta gran variación de datos, pretende de cierta forma, cubrir la incertidumbre resultante del desconocimiento de los reales valores de las constantes elásticas derivadas de la Lengua.

Se utilizará un tensado igual a 2.81 kg/cm^2 para la determinación de los valores extremos de las constantes, por dos razones: es el valor mínimo para el postensado de servicio (Ritter, 1990), por lo que su valor no puede ser menor y porque al utilizar un valor mayor, el alcance de este rango disminuye al aumentar el postensado (ver figura 7-b).

El resumen de cada constante elástica, que se utilizará en los primeros análisis de los tableros postensados de madera, con el fin de conformar la matriz constitutiva de estos, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1: Valores de los módulos elásticos para el análisis de los tableros de Lengua.

Módulo	Valor Max ($\cdot E_x$)
E_y	0.013
$G_{xy} = G_{xz}$	0.013-0.065
G_{yz}	0.03

Otro punto importante en el diseño son las uniones de tope que presentan los tableros postensados, debido a que la longitud de éstos es superior a las dimensiones de la madera aserrada, por lo que cada tablón no alcanza a cubrir la longitud completa del puente. Una unión de tope se refiere a un lugar en la cubierta en donde dos componentes de madera aserrada se encuentran unidas a través de sus extremos.

De ensayos realizados en tableros con uniones de tope, se observó que el módulo de elasticidad longitudinal E_x se ve reducido en cierto porcentaje, dependiendo del patrón de uniones de tope utilizado, según lo siguiente (fórmula teórica propuesta por Jaeger y Bakht (Davalos, 1993)).

$$C_{bj} = \frac{j}{(j+1)} \quad (2)$$

donde j representa el número de láminas en un patrón completo que contiene una unión de tope. Por ejemplo, para la figura 9 el valor de j es de 4 y C_{bj} toma el valor de 0.75.

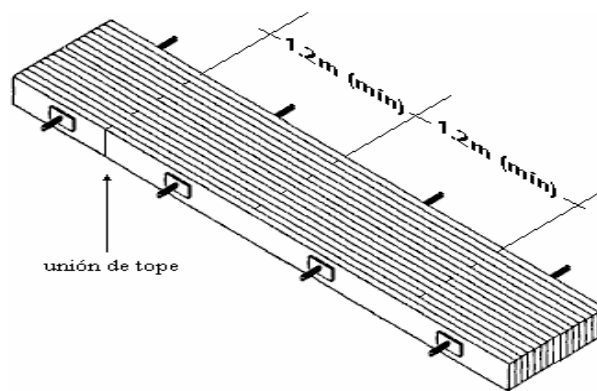


Figura 9: Restricciones de las uniones de tope.

La norma AASTHO 1992 restringe las uniones de tope, considerando que no puede existir más de una unión de tope en alguna de cuatro laminaciones adyacentes y su separación a lo largo del vano del puente no debe ser inferior a 120 centímetros (Figura 9). Se reduce el módulo de elasticidad E_x en un 25%.

Como ya se menciona los tableros de puentes de madera postensados son esencialmente largas placas de madera ortotrópica colocadas en 2 o más soportes lineales, sin embargo las prácticas de diseño de la AASTHO se basan en asumir que la porción del tablero directamente debajo de una línea de cargas de las ruedas actúa como una viga que abarca entre los soportes. Si bien la Guía de Especificaciones ha sido estructurada en base a los resultados obtenidos de las investigaciones en Ontario (Batchelor) y en los Estados Unidos (Dimakis, Oliva) sobre un limitado número de especies madereras (Douglas fir-larch, Hem-Fir (north), Red pine, Eastern White pine y Southern pine), puede ser utilizado en Chile para maderas que posean propiedades físicas y mecánicas similares a estas, aunque no se debe olvidar que para mejores resultados se requieren de mayores antecedentes del comportamiento de la madera chilena, puesto que las propiedades individuales de diferentes especies de madera pueden tener un fuerte impacto en la pérdida de postensado en el tiempo debido a variaciones en el contenido de humedad, y la fricción entre las laminaciones. Por lo que para diseñar estos puentes se debe utilizar momentáneamente la Guía de Especificaciones AASTHO 1991, pero los momentos M_y , M_{xy} , M_x ; cortes Q_x y Q_y y desplazamiento de diseño se deben obtener de un análisis mediante modelación de elemento finitos como el presentado en este trabajo. En la figura 10 se presenta los pasos a seguir en el diseño de estos puentes según la ASSTHO, 1991.

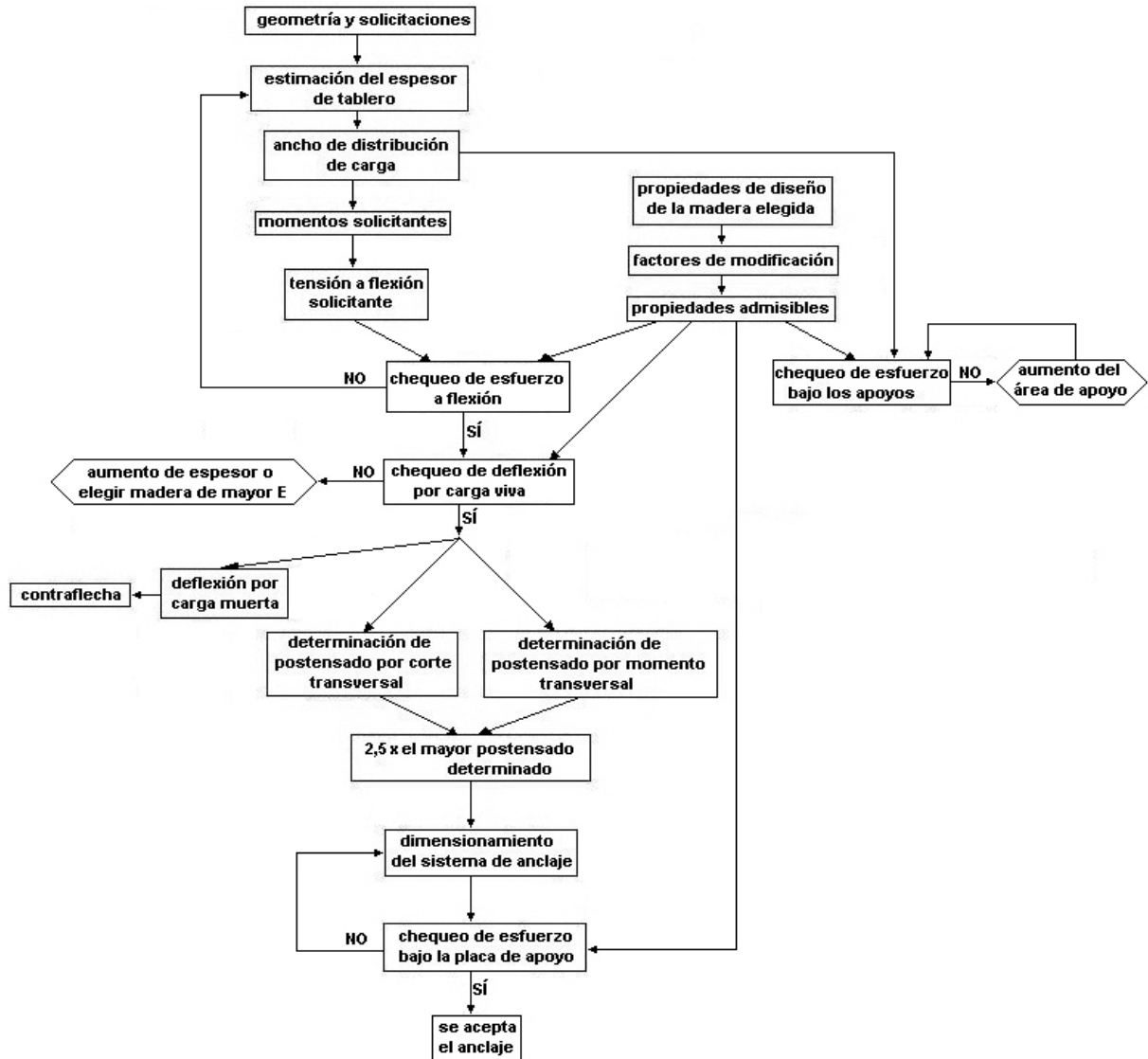


Figura 10: Procedimiento de diseño de los Puentes Postensados en Madera.

5.1. Ejemplo de cálculo de un Puente de Madera Postensada

Para realizar el análisis de un tablero de madera chilena, se considero la especie arbórea Lengua y se utilizan los valores extremos para cada constante elástica presentados en la tabla 1, con el fin de encontrar las condiciones más desfavorables para el cálculo. El puente a analizar, será el de mayor longitud posible que cumplirá con un ancho fijo de 4.5m (tránsito en una dirección) y un espesor fijo de 0.25m. Como se demuestra a continuación, la luz de cálculo máxima que cumple con lo anterior, será de 5m. (distancia entre los centros de ambos apoyos simples). Esta verificación se realiza utilizando el programa de elementos finitos descrito anteriormente.

Tal como se analizó, el módulo de elasticidad transversal E_y y el módulo de corte transversal G_{yz} , toman valores fijos en el análisis, esto es $0.013 \cdot E_x$ y $0.03 \cdot E_x$ respectivamente, mientras que los módulos de corte en el plano G_{xy} y longitudinal G_{xz} tendrán el mismo valor y adoptarán dos valores extremos $0.013 \cdot E_x$ y $0.065 \cdot E_x$, con lo cual se pretende encontrar el valor máximo de los esfuerzos en el tablero, los cuales serán utilizados para comprobar el adecuado desempeño de

cada estructura utilizando las dimensiones dadas. A diferencia del criterio adoptado para la obtención de los esfuerzos máximos, el desplazamiento máximo de la estructura que será comparado con el desplazamiento límite, se encontrará promediando los dos máximos desplazamientos obtenidos del análisis de cada tablero con los dos valores extremos de los módulos de corte G_{xy} y G_{xz} . Aunque la Guía de Especificaciones para Puentes Laminados-Tensados de madera (AASHTO, 1991) limita la máxima deflexión a $L/500$, donde L es la luz libre del puente, es común utilizar en este tipo de estructuras el límite de $L/360$ (Ritter, 1990; Wacker y Smith, 2001; Hilbrich et al, 1995), siendo este último valor el que se utilizará como restricción.

En la tabla 2 se presentan los factores de modificación y tensiones de diseño considerando madera Lengua de grado estructural n°1; construido en Coyahique; humedad de equilibrio, construcción y diseño de 14%; temperatura media de servicio de 9° C.

Tabla 2: Factores de modificación y tensiones de diseño para madera Lengua.

Factores de Modificación	F_f	F_{cz}	F_{cn}	E_x
Por contenido de humedad K _H	0.959	0.968	0.947	0.970
Por duración de la carga K _D	1.15	1.15	---	---
Por trabajo conjunto K _C	1.3	1.3	---	---
Por temperatura K _T	1.064	1.064	1.064	1.030
Por tratamiento químico K _Q	---	---	---	---
Por altura K _{HF}	0.836	---	---	---
Tensión de diseño (Kg/cm2)	280.61	26.70	51.37	128369

Se debe reducir el modulo de elasticidad E_x a un 75%, debido a las uniones de tope.

El tablero de madera, producto de la carga muerta, se comportó prácticamente como una viga simplemente apoyada en los extremos. Este tipo de carga, sólo provocó en la cubierta esfuerzos de flexión y de corte longitudinales (M_x y Q_x). El valor de estos esfuerzos (por unidad de longitud), incluido el desplazamiento máximo producto de la variación de los correspondientes módulos de corte se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 : Máximos esfuerzos y desplazamiento producto del peso propio del tablero para cada valor de los módulos de corte

$G_{xy}=G_{xz}$	M_x (kNm/m)	Q_x (kN/m)	Δ_z (cm)
$0.013 \cdot E_x$	11.83	9.29	0.29
$0.065 \cdot E_x$	11.83	9.29	0.26

Los esfuerzos en la cubierta se mantuvieron iguales a pesar de la variación de los módulos de corte, debido a la esbeltez del tablero y al comportamiento de viga isostática que adoptó éste, producto de la uniformidad de la carga en la superficie. De acuerdo a los criterios adoptados para considerar los esfuerzos (máximos) y desplazamiento (promedio) producto de la utilización de dos valores extremos para G_{xy} y G_{xz} , los valores a considerar son: M_x (kNm/m) =11.83; Q_x (kN/m) =9.29; Δ_z^m (cm)=0.28. Estos esfuerzos máximos producto de la carga muerta, deberán sumarse después a los esfuerzos máximos provocados por la carga viva para el cálculo de las tensiones máximas, las cuales deben ser inferiores a las correspondientes tensiones admisibles.

A continuación, se muestran los esfuerzos máximos, por unidad de longitud, generados por la carga viva producto de la variación en los módulos de corte y de las diferentes posiciones adoptadas por el camión AASTHO HS 20-44 dentro del tablero.

Tabla 4: Máximos esfuerzos y desplazamiento por carga viva producto de la variación de los módulo de corte G_{xy} y G_{xz} .

$G_{xy} = G_{xz}$	M_x (kNm/m)	M_y (kNm/m)	M_{xy} (kNm/m)	Q_x (kN/m)	Q_y (kN/m)	Δz (cm)
$0.013 \cdot E_x$	77.50	4.83	2.19	116.77	29.75	1.52
$0.065 \cdot E_x$	70.06	2.51	6.43	122.56	24.22	1.16

Cada uno de estos esfuerzos máximos junto con el desplazamiento vertical medio de la cubierta, extraídos de la tabla anterior, se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Máximos esfuerzos y desplazamientos por carga viva

M_x (kNm/m)	M_y (kNm/m)	M_{xy} (kNm/m)	Q_x (kN/m)	Q_y (kN/m)	Δ_z^m (cm)
77.50	4.83	6.43	122.56	29.75	1.34

De las tablas anteriores, se distingue el bajo aporte de la carga muerta, en cuanto a los esfuerzos longitudinales M_x y Q_x , al compararlos con los dados por la carga viva; además del nulo aporte a los esfuerzos transversales (M_y y Q_y). Los esfuerzos mostrados en la tabla 5, son bastante elevados si se comparan con los obtenidos de un diseño tradicional realizado con el método de cálculo dado por la guía de especificaciones de la norma AASHTO (1991), esto se debe principalmente a que son extraídos de la envolvente de máximos esfuerzos obtenidos producto de la variación de los dos módulos de corte ($G_{xy} = G_{xz}$), lo que demuestra la importancia de los ensayos en madera Chilena para realizar un correcto diseño.

Debido a que la longitud de la luz libre es igual a 5m, el desplazamiento máximo permitido para el tablero producto de la influencia de la carga viva es 1.39, mayor que el valor 1.34 cm (desplazamiento promedio entre los máximos obtenidos producto de la variación de módulos).

6. CONCLUSIONES

Es de fundamental importancia, conocer el valor de las constantes elásticas que conforman la matriz constitutiva de los tableros y que a la vez tengan relación con la especie de madera con la que serán construidos. Este conocimiento, eliminaría las incertidumbres generadas en el cálculo de estas estructuras, derivadas del uso de información en la modelación poco compatible con el real comportamiento de ellas. Por lo tanto, es imprescindible la realización de ensayos que permitan evaluar y cuantificar el efecto real de cada una de las constantes elásticas con el fin de obtener diseños de estas cubiertas más óptimos y seguros.

Es muy importante el estudio de los fenómenos tiempo-dependientes que ocurren en los tableros postensados, ya que de ellos depende el nivel de tensado entre las laminaciones de madera, que

en definitiva es el mecanismo que las mantiene unidas permitiendo el funcionamiento conjunto de ellas como una sola placa.

De estudios anexos a este se puede concluir que el trabajo de los tableros postensados es eficiente, cuando su flexión principal es en dirección longitudinal a las laminaciones de madera aserrada. De no ser así, se generan en tablero, esfuerzos transversales tanto de flexión como de corte excesivamente elevados, que afectan al cálculo de la tensión de postensado.

7. REFERENCIAS

- AASHTO (1991). Guide Specifications for the Design of Stress-Laminated Wood Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.
- Brokaw J. T. (1992). Test Methods To Determine Strength and Stiffness Properties for Stress-Laminated Timber Bridge Decks. Master of Science in Civil Engineering Thesis. College of Engineering of West Virginia University. EE.UU.
- Davalos, Julio F.; Sharma S. Sonti, West Virginia University, USA; Sattar Shaik, Tri-State Design and Development, Inc., USA; Russell C. Moody and Roland Hernandez, USDA Forest Service, Forest Product Laboratory, USA (1996). System Stiffness for Stress-Laminated Timber Bridge Decks. International Wood Engineering Conference '96.
- Oñate, Eugenio (1992). Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos. Centro internacional de métodos numéricos en ingeniería. UPC, Barcelona España.
- Muñoz Vergara, Jeimy (2002). Tableros de Puentes de Madera Postensados Transversalmente. Memoria de título. Departamento de ingeniería Civil Universidad de Concepción.
- Oliva, Michael G.; Dimakis, Al G.; Ritter, Michael A.; Tuomi, Roger L (1990). Stress-Laminated Wood Bridge Decks, Experimental and Analytical Evaluations. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-495.
- Pineda, Paola I. (2001). Elasticidad Ortotrópica de la madera. Universidad de Concepción, Facultad de ciencias forestales, Programa de postgrado.
- Ritter, Michael A. (1990). Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance. Structural Engineer United States Department of Agriculture Forest Service.
- Suarez Espinoza, Pablo (2002). Modelación Numérica de Puentes Postensados de madera. Memoria de título. Departamento de ingeniería Civil Universidad de Concepción.