

Estado del Arte de la Ingeniería de la Madera: cálculo y construcción.

Por Kifle G. Gebremedhin,

*Associate Professor
Agricultural and Biological Engineering Dept.
Universidad de Cornell, Ithaca, N.Y. 14853*



El profesor Gebremedhin
conversando con Fernando Peraza,
subdirector de AITIM

SUMARIO

Este artículo resume el estado del arte de la tecnología de los productos de la madera en aplicaciones estructurales que en la actualidad se encuentran en el mercado. Estas nuevas generaciones de productos de la madera conocidos como madera compuesta estructural incluyen el tablero laminado (LVL, **Laminated Veneer Lumber**), madera reconstituida (PSL, **Parallel Strand Lumber**), y viguetas prefabricadas con sección en I que constituye un producto especializado de los recientes materiales de ingeniería.

La tendencia actual en el cálculo de estructuras de madera es la introducción sistemática de los procedimientos basados en métodos probabilísticos. Las normativas en general y la norma norteamericana **National Design Specification for Wood Construction** están tendiendo al método de cálculo en estados límites en el que el criterio de seguridad se deriva de la distribución estadística de resistencias y acciones.

A través del comité de la Madera de la **American Society of Civil Engineers** (ASCE), la industria de la madera está ayudando al sector de la enseñanza a contribuir a aliviar la escasez de ingenieros y arquitectos educados en la ingeniería de la madera preparando material educativo y organizando sesiones de trabajo.

Se incluye una descripción de estructuras de madera y productos derivados seleccionados de construcciones y estructuras especiales con objeto de subrayar los campos de aplicaciones de la madera como material resistente, moderno y duradero.

Los métodos de cálculo y construcción tradicionales que están ligados en exceso a elevados factores de seguridad están abriendo camino a nuevos métodos de cálculo que utilizan evaluaciones realistas del comportamiento en servicio de las estructuras y una nueva generación de materiales compuestos fabricados con fibras de madera se encuentran disponibles en el mercado actual. La formación en el cálculo de estructuras de madera, no resulta sin embargo, proporcional al uso actual o potencial de la madera en la construcción residencial. Es por tanto necesario un incremento y mejora de la enseñanza de los ingenieros y arquitectos en la ingeniería de la madera para permitir la expansión del uso de la madera.

El objetivo de este artículo es intentar resumir el estado del arte en: (1) Ingeniería de estructuras de la madera, (2) Métodos de cálculo de construcciones de madera, (3) educación en la ingeniería de la madera y (4) mercado de la madera y los productos derivados en los EEUU. Obviamente, el artículo no puede cubrir todo lo que existe en esas áreas, pero se espera aportar una perspectiva general.

INGENIERIA DE LOS PRODUCTOS DE LA MADERA

Los productos tradicionales de la madera, madera aserrada y tablero contrachapado, han servido eficazmente a la edificación. La fabricación de estos productos de primera necesidad ha sido menos provechosa durante los últimos años (Moody y Ritter, 1990). Este factor económico y la naturaleza cambiante de los recursos madereros y una demanda de productos que reúnan unos requisitos para un uso final específico han conducido a algunos cambios en el tipo de productos estructurales de madera, que ahora pueden encontrarse en el mercado. (Moody y Ritter, 1990). Entre los productos de la madera en crecimiento como madera compuesta estructural (Structural Composite Lumber, SCL) incluye el tablero laminado (Laminated Veneer Lumber o LVL, nombre por el que es conocido) y la madera de virutas paralelas (Parallel Strand Lumber, PSL). El proceso de fabricación de estos productos permite reducir la variabilidad de sus propiedades mecánicas y mejorar así la fiabilidad.

El material LVL se fabrica a partir de chapas de madera encoladas dispuestas con la fibra en dirección paralela a la longitud de la pieza. Las chapas son clasificadas cuidadosamente y los empalmes se disponen al tresbolillo y se utiliza un proceso de prensado en continuo, dando lugar a un producto con 61 o 120 cm (2 ó 4 pies) de anchura y longitudes limitadas únicamente por razones de transporte, de hasta 24,4 m (80 pies) (Moody y Ritter, 1990). La madera de virutas paralelas (Parallel strand Lumber, PSL) utiliza virutas de madera o trozos de chapa encolados bajo altas presiones y temperaturas. Las propiedades del producto pueden conocerse a través de la información de las propiedades de la madera.

Un tercer producto de madera estructural compuesta consiste en un compuesto laminado utilizando dos capas de chapas encoladas sobre un tablero de partículas u otro tipo de alma. La madera estructural compuesta constituye un segmento creciente de la industria de los productos derivados de la madera con uso estructural y se prevé que su desarrollo continuará creciendo (Moody y Ritter, 1990). Una de las áreas de mayor desarrollo la constituirá la fabricación de otros productos estructurales de madera, tales como las alas de las viguetas prefabricadas con sección en I.

Las viguetas prefabricadas de madera y tablero con sección en I constituyen productos especializados de la ingeniería moderna, fabricados con maquinaria específicamente diseñada al efecto (Soderquist, 1990). Estas piezas son elementos constructivos eficaces, versátiles y muy extendidos.

INTRODUCCION.

Como material estructural, la madera y sus productos derivados tienen diversas ventajas comparados con los materiales habituales en la construcción. Algunas de estas ventajas de la madera se exponen brevemente más adelante. Una exposición más detallada de esto puede encontrarse en la publicación de Dolby et al. (1988). (a) La madera es un material ligero, lo que significa que las edificaciones no requieren cimentaciones tan importantes como las de los edificios construidos con materiales más pesados. Esto resulta especialmente ventajoso en estructuras de baja capacidad portante. (b) La madera es más resistente hablando en términos de la relación resistencia-peso propio. (c) La madera es durable si está correctamente diseñada, construida, protegida y con el adecuado mantenimiento. Existen estructuras de madera que tienen varios cientos de años de antigüedad. Los tratamientos de protección de la madera permiten su uso en situaciones expuestas incrementando la vida de servicio de la estructura.

(d) La madera es confortable tanto en condiciones de clima frío como calurosos. Tiene un relativamente alto calor específico y baja conductividad térmica, consiguiendo así suficiente aislamiento térmico. (e) La madera tiene apariencia extremadamente atractiva y natural. (f) La madera precisa herramientas sencillas para su trabajo y unión; y relativamente fáciles de adquirir. (g) La madera se acomoda fácilmente a los movimientos debidos a los asentamientos diferenciales de cimentación no esperados, sin daños graves en la estructura. La madera soporta esfuerzos de impacto sufriendo únicamente aplastamientos locales. (h) La madera no supone un riesgo de incendio como suele pensarse. Entra en combustión de una forma controlada sin producirse un colapso repentino inesperado. La velocidad de penetración de la llama o carbonización está poco influenciada por la severidad del incendio y la capacidad de resistencia de la madera se reduce gradualmente (Dolby, et al. 1988). (i) La madera es económica. Si se considera su utilidad y versatilidad, la madera resulta altamente competitiva en términos económicos. Los costos de transporte y de manipulación son bajos y los de mantenimiento también si se usa correctamente. Las numerosas virtudes de la madera conducen a soluciones prácticas y económicas para el usuario. La tecnología de la madera se desarrolló durante el pasado medio siglo y actualmente está creciendo constantemente (Hoyle y Woeste, 1989). Hoy, los factores de costo han motivado el uso de una tecnología sofisticada en los productos de la madera con uso estructural y en su cálculo. Además, las necesidades de viviendas y otras aplicaciones están conduciendo a que la tecnología de la construcción constituya un objetivo político (Hoyle y Woeste, 1989).

dos en los forjados de piso y estructura de cubierta de diversos tipos de edificación, desde viviendas **unifamiliares** o colectivas, hasta oficinas y otras construcciones de uso no residencial. Las dimensiones de fabricación comprenden cantos de viga de 23 a 81 cm (9 a 32 pulgadas) **con** numerosas combinaciones de alas y alma La longitud de fabricación alcanza los **24,4 m** (80 pies).

Las viguetas en l basan su eficacia en el **diseño geométrico** de la sección transversal, concentrando la madera en las zonas externas de la sección, permitiendo a la pieza alcanzar gran resistencia y rigidez con bajo consumo de **material**. Se utilizan materiales de calidad para incrementar el efecto de la geometría. Por lo general, las alas se fabrican con madera aserrada de elevada calidad clasificada mecánicamente (**Machine Stress Rated, MSR**) o tablero laminado (**Laminated Veneer Lumber, LVL**). Para el alma se ha venido utilizando el tablero contrachapado **estructural**. Sin embargo, recientemente se prefiere emplear tablero de virutas orientadas (**Oriented Strand Board, OSB**). Esto permite incrementar la **resistencia** y fiabilidad, con un **costo de material** menor (Soderquist, 1990). La mayor **parte** de la madera laminada encolada se fabrica a **partir** de madera aserrada clasificada visualmente. No obstante, la utilización de madera aserrada clasificada **mecánicamente** (MSR) y de tablero laminado (LVL) está **imponiéndose** y probablemente continuará incrementándose. Su gran ventaja radica en el más exacto conocimiento de su resistencia y rigidez debido a los coeficientes de variación inferiores de sus propiedades. En la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera se están desarrollando procedimientos mejorados de clasificación que **probablemente** serán adoptados por los fabricantes de madera laminada encolada y otros productos de madera estructural (Moody y Ritter, 1990).

Otro de los nuevos caminos en la **aplicación** de los materiales derivados de la madera se encuentran en los nuevos sistemas constructivos de puentes. A comienzos de 1989, el Congreso de los Estados Unidos fundó la Iniciativa Nacional de la Madera. Los objetivos de la Iniciativa son: (1) diversificación y **estimulación** de la economía rural mediante la mejora de la red de transporte rural y la expansión del mercado de productos de la madera, y (2) la **divulgación** de las adecuaciones de la **madera como material para la construcción de puentes**. (Crist, 1990). Esta Iniciativa hace hincapié en la utilización de los materiales locales, los cuales para la mayoría de las regiones y particularmente en las zonas del Noroeste y Medio-oeste, son especies frondosas (Moody, et. al. 1990).

De **estudios** realizados (Crist, 1990) se desprende que cerca del 40% de los 575.000 puentes de autopista **existentes** en los Estados Unidos se encuentran funcionalmente **obsoletos** o deficientes desde el punto de vista estructural, y por tanto requieren **importantes trabajos** de reparación o sustitución completa para el **cumplimiento** de la normativa de cálculo vigente. Muchos de estos puentes tienen luces inferiores a **15,2 m** (**50 pies**) y están situados en carreteras rurales o de segundo orden y **resultan** adecuados para la construcción en madera (Williamson, 1990). Admitiendo que la madera es la mejor alternativa para el 10 a 20% de los puentes de autopista que necesitan **rehabilitación** o **sustitución**, el mercado potencial que se abre para estos productos de madera tratados podría exceder los **1000 millones** de pies **tablares** (**2.360.000 m³**) (Williamson, 1990). Esto **representa** un mercado nuevo para la madera. (Un pie tablar es la unidad de volumen de madera definido como el correspondiente a 1 pulgada de grueso por 1 **pie** de anchura y por 1 pie de largo).



Estructura de madera en contacto con el agua. Embarcadero en el lago de Washington.

53

MÉTODOS DE CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE MADERA

Uno de los más recientes avances en el cálculo estructural es la sistemática introducción de los métodos de cálculo probabilísticos. Estos, suponen una representación de las propiedades del material y de las condiciones de carga más ajustada a la realidad, así como la evaluación del comportamiento en servicio, lo que se traduce en una mejora potencial de la seguridad estructural y economía de la construcción. Aunque los **métodos** de cálculo probabilísticos pueden **resultar** especialmente beneficiosos para las estructuras de madera, debido a la variabilidad de las propiedades del material, no se ha producido su aplicación a la madera. Los **métodos** de cálculo utilizados en las estructuras de madera, son todavía, deterministas.

El **Comité** de la Madera de la American **Society of Civil Engineers** (ASCE) ha preparado recientemente un informe sobre una norma basada en el **método probabilístico** para estados límites **últimos** de resistencia en la cual una sola pieza gobierna el cálculo (ASCE, 1988). En el informe **no se incluyen** los estados límites **de servicio** que se encuentran en la **construcción** ligera entramada, porque la resistencia y rigidez de una construcción depende de la interacción entre componentes y no hay suficiente información sobre la distribución estadística del comportamiento de los sistemas estructurales de madera.

La industria de la madera ha apostado 1,6 millones de dólares en un contrato con la Engineering Data Management, Inc. (EDM), para el desarrollo de especificaciones para el cálculo

probabilístico de acciones y resistencias para las estructuras de madera con fecha prevista para la terminación del proyecto para 1991 (Poilock, 1989). El National Forest Products Association (NFPA) pretende la modernización (cálculo unificado de piezas con cargas modificadas) de la National Design Specification (NDS) para construcción con madera. La utilización de probetas de pequeñas dimensiones y libres de defectos como base para el método portensiones admisibles está siendo lentamente abandonado en favor del procedimiento de ensayo de madera clasificada, que resulta más ajustado a la realidad. En el informe de B. Madsen y A.H. Buchanan, 1986, se propone ensayar un número representativo de piezas de tamaño real (o tamaño estructural) de madera hasta un determinado nivel de carga, con el que se rompen entre el 10 v el 15% de la muestra, permitiendo establecer de una forma económica la forma de la cola inferior de la distribución estadística de resistencia. La mayoría de las especies comerciales canadienses, calidades y tamaños han sido ensayadas de acuerdo con este procedimiento. Las normas de cálculo están evolucionando hacia planteamientos basados en los estados límites, en los cuales la seguridad se evalúa a partir de las distribuciones de resistencia y cargas. Estos cambios tendrán un impacto importante en la industria de los productos forestales y en la ingeniería de los productos de la madera (ASCE, 1988).

LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERIA DE LA MADERA

La enseñanza de la construcción y estructuras se ha basado en la premisa de que el hormigón y el acero son los principales materiales estructurales y la madera y la obra de fábrica son secundarios.

Sin embargo, contrariamente a algunas opiniones generalizadas, si está adecuadamente diseñada, la madera tiene la misma durabilidad generalmente es más económica que los otros materiales. (Soltis, 1990). Un problema derivado del incremento del uso de la madera en las estructuras es la escasez de ingenieros y arquitectos cualificados y educados en la ingeniería de la madera. Muchas de las

propiedades particulares de la madera no son bien entendidas por los arquitectos e ingenieros educados en la construcción con acero y hormigón. Esto es debido a que la madera es un material anisótropo con elevada variabilidad y dependencia del tiempo en su propiedades.

En los Estados Unidos hay escasez de cursos sobre cálculo de estructuras de madera en colegios y universidades. Un informe del año 1984 (Wadlin, 1984) mostraba que cerca del 75% de los programas necesarios en el grado "bacheior" en ingeniería civil incluían un curso sobre cálculo de estructuras de acero y hormigón, pero únicamente un 13% incluían un curso de ingeniería de la madera. Moody y Freas (1987) trataron del presente de la educación de los postgraduados en la construcción con madera. Sugerían el incremento del tiempo dedicado al cálculo de estructuras de madera, bien combinándola con un curso de estructuras de acero o bien desarrollando un proyecto de estructura de madera para estudiantes graduados. Uno de los problemas percibidos por la facultad de ingeniería es la escasez de información técnica para el estudiante. Recientemente se han publicado varios libros de texto de calidad (Breyer, 1988; Faherty y Williamson, 1989; Hoyle y Woeste, 1989; Stalnacker y Harris, 1989), así como diversas normativas o especificaciones (AISC, 1985; NFPA, 1987) y literatura de materiales de construcción.

El Comité de la Madera de la American Society of Civil Engineers creó un subcomité denominado "Subcomité para la Educación de la Ingeniería de la Madera" en 1989. Uno de los principales cometidos de este Subcomité ha sido el desarrollo de los recursos materiales educativos que promovieran la eficacia de la educación en los aspectos académicos y de práctica profesional. El Subcomité, en colaboración con las principales asociaciones comerciales de productos de la madera, ha desarrollado un Paquete de Herramientas de Enseñanza en el Diseño de Construcciones de Madera". Este documento contiene una gran variedad de ayudas para la enseñanza (listado de libros de texto y manuales de estructuras de madera, programas tipo de cursos, ejemplos de programas de cálculo por ordenador para cálculo de estructuras de madera, paquetes de diapositivas con textos descriptivos, guía de la información de cálculo, etc). Está dirigido a ayudara los proiesores veteranos y nuevos de cursos de calculo de estructuras de madera, con objeto de ofrecer un curso de maderas que despierte el interés de los estudiantes hacia la madera como un material de gran importancia. E paquete de Herramientas ha sido distribuido en unos 200 departamentos de universidad, hasta la fecha (ASCE, 1990).

La industria de la madera y el National Forest Products Laboratory (NFPL) han estado también implicados en esta labor de ayuda en interés de la ingeniería de la madera. La industria de la madera está en la actualidad desarrollando un manual basado en el cálculo con coeficientes parciales de seguridad de acciones y resistencias (Load and Resistance Factor Design, LRFD) que es paralelo a los manuales similares en acero y hormigón. Los ingenieros educados en ingeniería de la madera pueden diseñar estructuras de

54



Tableros de virutas orientadas. OSB.



Tablero laminado.

Edificación residencial

La madera es el principal material utilizado en la construcción de viviendas. Se estima que el 95% de las viviendas en los Estados Unidos son construidas con madera y productos derivados. Según los datos de un censo (U.S. Department of Commerce, 1989), de la construcción de nueva planta en 1987, la edificación residencial suponía cerca de la mitad (171 mil millones de dólares USA) del total de la construcción (349 mil millones de dólares USA). Las estructuras entramadas de la edificación de viviendas constituye el campo de aplicación principal de la madera maciza cepillada, montantes de 2 x 4 pulgadas, soleras y durmientes, pares de 2 x 6 y 2 x 8 pulgadas, y viguetas de piso de 2 x 10 y 2 x 12 pulgadas. Recientemente, existe una tendencia en alza en el uso de piezas de madera laminada encolada en la construcción residencial. La madera puede dejarse vista en las zonas vivideras u oculta en aplicaciones tales como cargaderos en huecos de puertas de garaje donde la resistencia y rigidez son las prioridades. La madera laminada utilizada en la construcción residencial suele venderse por almacenadas que tienen en dock una gama de vigas con diferentes escuadries. Estas, se cortan a la longitud requerida por las necesidades particulares.

madera seguras.

El USDA Forest Service, Forest Products Laboratory ha estado desarrollando materiales educativos basados en una serie de trabajos. Hasta la fecha, se han publicado cuatro volúmenes y cada uno está dividido en módulos por materias diferentes de forma independiente. Cada módulo tiene una finalidad independiente y material técnico incluyendo conjuntos de problemas y cuestionarios de auto-evaluación. Los cuatro módulos son: Volumen I: Madera, su estructura y propiedades (1982), centrado en las propiedades físico-mecánicas de la madera; Volumen II: La madera como material estructural (1982), dirigido al uso de la madera en estructuras; Volumen III: Encolado de la madera y otros materiales estructurales (1983), enfocado a las adecuaciones del encolado de los diversos productos derivados de la madera; y volumen IV: Conceptos del cálculo de estructuras de madera (1986), directamente aplicable al cálculo de estructuras. Este último volumen abarca el cálculo de vigas (de madera maciza, laminada y mixtas), columnas, uniones, cerchas, diafragmas y piezas curvas incluyendo arcos y cúpulas (Soltis, 1990).

PANORAMICA DE LA CONSTRUCCION EN MADERA

La madera y los productos derivados se han utilizado tradicionalmente en las construcciones residenciales y agrícolas. En los años recientes la industria de la madera ha extendido el uso de la madera más allá de la construcción residencial. En la actualidad, la madera y los productos derivados se usan en un amplio campo de aplicaciones. Algunas de ellas, incluyen: edificaciones comerciales, almacenes industriales, edificios de oficinas de varios pisos, edificaciones de uso religioso, centros públicos para usos especiales, cúpulas, puentes, postes de tendido eléctrico, armazones de soporte para ensayo instrumentación de aviones y montañas rusas. Si se diseña adecuadamente, la madera resulta de igual duración y generalmente más económica que los otros materiales estructurales. (Soltis, 1990). Frecuentemente la madera aparece combinada con otros materiales de construcción tales como el acero, hormigón y muros de fábrica en un sistema estructural mixto que permite sacar ventaja de las adecuaciones de cada material.

En el apartado siguiente, se incluyen algunos ejemplos de estructuras de edificaciones y otras construcciones especiales que muestran el campo de aplicaciones, realmente extenso, que tiene la madera y los productos derivados.

Las descripciones de algunas de estas estructuras han sido obtenidos de "Teaching Tool Package" (ASCE, 1990) comentado anteriormente, y otras se han obtenido del American Institute of Timber Construction (AITC).



Gebremedhin,
Fernando Peraza,
Francisco Arriaga y
José Antonio
Rodríguez Barreal en
la Cátedra de
Conservación.

madera con vuelosolen los extremos. El sistema estructural de forjado utiliza un entablado machiembreado sobre el que se dispone un tablero para crear un diafragma que aporte rigidez ante las cargas de origen sísmico.

Iglesias:

La construcción de Iglesias fue uno de los primeros usos de la madera laminada encolada (vigas peraltadas, a dos aguas y curvas, columnas, arcos). Todavía hoy es empleada con gran profusión en edificaciones religiosas en la que los aspectos estructurales se combinan con criterios estéticos para crear una variedad de estilos abarcando desde diseños tradicionales hasta modernos.

Cúpulas

Otra de las aplicaciones actuales de la madera laminada es la construcción de edificios de uso recreativo donde la estética juega un papel importante. En ambientes húmedos tales como los de las piscinas cubiertas, se recomienda un tratamiento protector de la madera laminada para asegurar la vida de servicio de la estructura. Algunas de estas estructuras para usos recreativos están resueltas en forma de cúpula. La última y de mayor tamaño es la cúpula de Tacoma, Washington, que fue terminada en abril de 1983. La cúpula tiene una luz de 161,5 m (530 pies) en su diámetro, y una altura de 33,5 m (110 pies), en la clave. Este recinto permite alojar sentada a 25.000 personas.

El costo de la estructura de madera de la cúpula resultó cerca de 15% inferior al de una estructura neumática y un 30% más económica que un cúpula de hormigón suspendida. Otro ejemplo en esta categoría es la cúpula reticulada de madera laminada encolada, del edificio Special Events Center en la Universidad de Utah en la ciudad de Salt Lake. con capacidad para 15.000 personas sentadas. En esta cúpula la estructura de cubierta está formada por piezas de madera laminada encolada de gran luz. La cubierta salva una luz de 107 m (350 pies) aproximadamente. El centro ha servido como lugar de celebración de los campeonatos de la NCAA National Basketball Championships.

Estadios

Como ejemplo de utilización del tablero laminado encolado (LVL) se encuentra la cubierta del estadio de la Universidad de Idaho en Moscow, Idaho. Los elementos de grandes dimensiones Trus Dek (marca comercial) consisten en una estructura mixta de cordones de LVL y un alma de tubo hueco de acero en forma de celosía triangular. El canto de la pieza, distancia entre cordones superior e inferior es de 2,1 m (7 pies). Los cordones tienen un grueso de 38 mm (2 pulgadas). Ambos materiales se conectan entre sí para crear un sistema de bóveda con arcos biarticulados cubriendo una luz de 122 m (400 pies). El levantamiento de todos los arcos para completar la cubierta se realizó en sólo 24 días de trabajo.

Postes para tendidos eléctricos

La madera laminada encolada también es utilizada en aplicaciones no relacionadas con la construcción como las estructuras de postes de transmisión eléctrica. Estas aplicaciones se basan en las ventajas de las excelentes propiedades dieléctricas de la madera, que a menudo permiten reducir las especificaciones de distancias mínimas. La madera laminada en este uso requiere un tratamiento protector.

Edificaciónes agrícolas

Las construcciones agrícolas constituyen otra de las áreas en las que la madera y sus productos derivados son utilizados de forma extensiva. Se puede estimar, con criterio conservador, que el 90% de las edificaciones agrícolas, postes, cercas, correas, entramados de paredes, pares, montantes, durmientes, cargaderos, etc., son principalmente de madera maciza cepillada. Los pilares de fachada son normalmente de madera maciza o madera laminada clavada. También se emplean a veces rollizos como pilares de fachada. Los pilares de madera maciza tienen como secciones más corrientes 4x6, 6x6, 6x8, 6x10 y 8x8 pulgadas. La sección de 6x6 es la más frecuente.

Los pilares de madera laminada clavada se fabrican a partir de piezas fácilmente adquiribles en madera maciza con gruesos nominales de 2 pulgadas y anchos de 4 a 6 pulgadas. (Es decir, se obtienen secciones formadas por 3 piezas de 2x4 ó 3 de 2x6 ó 3 de 2x8 pulgadas). La parte de la columna que queda empotrada en el suelo (calculada para el supuesto de una pieza empotrada en el suelo con cargas verticales y horizontales) debe estar tratada en autoclave con un protector de la madera adecuado para piezas en contacto con el terreno. Una de las ventajas de utilizar columnas de madera laminada clavada es que el material tratado químicamente para estar en contacto con el suelo puede reducirse a las piezas que forman el arranque del pilar, mientras que en pilares de madera maciza el tratamiento debe afectar a toda su altura. La zona de empalme entre la madera tratada y la no tratada es el eslabón más débil en los pilares de madera laminada clavada; y así, se recurre al refuerzo con placas de acero galvanizado de 2 mm de espesor. Se han realizado ensayos de flexión para diversos sistemas de unión. Los resultados de estos ensayos se recogen en Woeste et al (1988)

Edificios comerciales

Un ejemplo de edificación comercial es el Hotel Marriott de 146 habitaciones construido con entramado de madera en Washington, D.C. Este complejo fue construido en 1989 como un prototipo para otras construcciones similares a construir durante la década de los 90. La construcción tiene una superficie total de unos 7.430 m² (80.000 pies cuadrados). Se utilizaron piezas de madera maciza para los montantes, durmientes, dinteles y balconadas. Además incluye piezas de madera maciza cepillada, madera laminada encolada en las vigas de cargadero, cercas industrializadas con uniones con placas dentadas y viguetas con sección en I.

Otro ejemplo de utilización de sistemas entramados de madera es un edificio de oficinas de cinco plantas con una estructura de pórticos de acero sobre los que apoyan vigas de

Puentes

Otra interesante aplicación de la madera laminada encolada es la construcción de puentes. Los avances tecnológicos dirigidos a la mejora de la madera como material estructural, combinados con el desarrollo de sistemas innovadores de construcción de puentes que utilizan componentes de madera conducen a sistemas **competitivos** económicamente. De estudios económicos recientes se deduce que los puentes de madera pueden resultar competitivos frente al acero, hormigón pretensado y estructuras mixtas de acero y hormigón en el rango de luces comprendidas entre 6,1 a 18,3 m (20 a 60 pies). (Williamson, 1990).

Las investigaciones sobre la utilización de secciones en T o en cajón demuestran que esta **competitividad** pueden extenderse a luces mayores. Las secciones en T combinan las ventajas de los tableros de puente postensados con las vigas de madera laminada encolada con el fin de cubrir luces mayores, de hasta 23 m (75 pies). (GangaRao, 1990). La madera postensada del tablero consiste en un grupo de tablones de madera sometidos a compresión transversal entre sí mediante barras de acero de alta resistencia formando un tablero postensado. (GangaRao, 1990). Las vigas pueden ser de madera laminada encolada o de tablero laminado (LVL).

La sección en cajón es una modificación de la sección en T, postensada. En este caso se añade una segunda capa de madera en la zona inferior de la viga de madera laminada encolada, formando una sección en cajón que **refuerza** la sección en T. El aumento de la rigidez permite el aumento de la luz hasta 36,6 m (120 pies) **aproximadamente** o la disminución del canto de la viga. (GangaRao y Latheef, 1990).

Uno de los puentes de madera laminada encolada en autopista más documentados es el Keystone Wye, situado cerca de Mount Rushmore en South Dakota, construido en 1968. Este puente tiene tres niveles y consiste en un arco triarticulado de madera laminada encolada formando la estructura principal que soporta el nivel superior y con una viga recta de madera laminada para **sujeción** del nivel intermedio. La luz de la viga recta es de 51,8 m (170 pies) aproximadamente; y la luz de los arcos triarticulados es de 49,4 m (162 pies), con una longitud total de 88,4 m (290 pies) incluyendo los tramos de entrada.

En una inspección detallada realizada 20 años después de su construcción se comprobó que **sólo requería un mantenimiento mínimo** de las piezas de madera laminada y no habla problemas estructurales en ellas. (Jundt, 1989). El informe de la inspección demostraba que la estructura ha cumplido sobradamente todas las **expectativas** de funcionalidad, forma y estética.

Armaduras especiales

La mayor y más inusual estructura de madera laminada construida es la armadura de soporte de aviones de la Base Aérea de Kirtland de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos de América en Nuevo México. Se emplearon seis millones de pies tableros de madera laminada encolada (14.158 m³) para construir este entramado destinado a ensayos **antimagnéticos**. Sirve como soporte de grandes aviones como el C5-A o el 747 mientras que son sometidos a fuerzas electromagnéticas para ensayar los sofisticados sistemas electrónicos de guía que llevan.



Viguetas de forjado.
Construcción mixta de tablero y LVL.



Madera reconstituida.
(Parallam)

Incluso los pernios de unión de esta estructura **están** realizados con madera microlaminada debido a los requerimientos **antimagnéticos** de **este tipo** de ensayos que **excluyen** el uso del metal.

Montañas rusas

Otra de las **construcciones** entramadas de madera de características especiales es la **Montaña Rusa Gigante** de Texas en **Six Flags, Arlington**, Texas, construida en 1989. Esta **montaña rusa**, de casi una milla de longitud, contiene aproximadamente 1 **millón** de pies **tablares** (2.360 m³) de madera tratada en autoclave.

AGRADECIMIENTOS

Este **artículo** fue escrito durante la estancia **sabática** del autor en la Universidad **Politécnica** de Madrid, **Escuela Técnica Superior** de Ingenieros de Montes, (Departamento de **Construcción** y **Vías Rurales-Unidad Docente de Cálculo de Estructuras**).

La investigación fue financiada en parte por una ayuda de la Dirección General de Investigación **Científica** y Técnica (Ministerio de Educación y Ciencia).

Kifle
G.Gebremedhin
en AITIM.

