

LA MADERA LAMINADA DE PINO CARIBE DENTRO DEL PROCESO DE DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA CONSTRUCCIÓN. CASO DE ESTUDIO: ARCOS BI Y TRIARTICULADOS

THE GLUED LAMINATED TIMBER (GLULAM) OF CARIBBEAN PINE WITHIN THE PROCESS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION. CASE OF STUDY: BI AND THREE-HINGED ARCHES

RAFAEL GERARDO PÁEZ

Arquitecto, (Universidad Veracruzana, México, 1992). Magíster Scientarium en Desarrollo Tecnológico de la Construcción (IDEC-FAU-UCV, 2002). Doctor en Arquitectura (2013, Facultad de Arquitectura y Urbanismo-UCV). Investigador A-1 del PEI-ONCTI (2014). Profesor Instituto de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía-campus Maracay, UCV. arkitectoniko@gmail.com

RESUMEN

Los bosques de Uverito, con aproximadamente 560 mil hectáreas, ubicados en el oriente venezolano, son la mayor reserva de pino Caribe en América. Este artículo se enmarca en el campo del desarrollo tecnológico sustentable de la construcción, mediante análisis de antecedentes, conocimientos geométricos-espaciales y estructurales, para aprovechar esta especie maderable. La metodología empleada permite un estudio comparativo de experiencias internacionales de aplicaciones de configuración curvilínea. Los resultados obtenidos logran definir una propuesta de sistemas estáticos de arcos bi y triarticulados con madera laminada, estructura a flexocompresión para cubrir grandes luces en un rango aproximado a los cincuenta metros sin apoyos intermedios.

Descriptores

Arcos bi y triarticulados, conocimientos geométricos-espaciales, desarrollo tecnológico sustentable, madera laminada, pino Caribe.

ABSTRACT

Uverito forests, with about 560 thousand hectares, located in eastern Venezuela, are the largest reservoir of Caribbean pine in America. This article falls within the field of sustainable construction technology development through background analysis, geometric-spatial and structural knowledge to take this timber species. The methodology allows for a comparative study of international experiences curvilinear configuration applications. The results fail to define a given static arc systems and bi triarticulados with laminated wood structure flexocompresión lights to large cover approximately fifty meters without intermediate supports range.

Descriptors:

Sustainable technology development, geometric-spatial knowledge, bi and three-hinged arch, Caribe pinewood, glued laminated timber.



LA MADERA LAMINADA DE PINO CARIBE DENTRO DEL PROCESO DE DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA CONSTRUCCIÓN. CASO DE ESTUDIO: ARCOS BI Y TRIARTICULADOS

“Después de la columna las predilecciones del Arte han sido para el arco: ese arco que nunca duerme según reza el proverbio árabe”.

Eduardo Torroja

Desde hace siglos los artesanos encolaron y unieron piezas de madera para producir muebles, partes de barcos, instrumentos musicales y artículos deportivos. Mas no fue sino hasta comienzos del siglo XX cuando se utilizó por primera vez el glulam (*glued laminated timber* o madera laminada) para resolver elementos estructurales de grandes secciones para edificios. Esa experiencia sentó las bases tecnológicas para fabricar componentes constructivos que resisten condiciones de equilibrio estable a las que no pueden someterse con facilidad el acero, el concreto armado, el aluminio y la madera maciza.

Se demostró así que salvar distancias de 40, 60, 100 metros o más también es posible uniendo pequeñas láminas de madera con adhesivos estructurales de altas condiciones físicas y mecánicas, para generar un producto forestal derivado que responde con mayor eficiencia a los esfuerzos y solicitaciones de las edificaciones. Además de que, con esa tecnología, se obtienen formas curvas que son difíciles de lograr con la madera maciza.

Venezuela ha quedado rezagada de los grandes avances en esta técnica constructiva. Para 2013 no existía en todo el país alguna construcción relevante en ejecución que

empleara. No existe en el país alguna construcción relevante en ejecución que emplee la madera laminada con miembros curvilíneos para salvar grandes luces sin apoyos intermedios en su propuesta estructural.

El *Pinus caribaea* Morelet, variedad *hondurensis*¹, en lo sucesivo pino Caribe, con más de 560 mil hectáreas sembradas en los bosques de la Orinoquia venezolana (ubicados en la parte sur de los estados Monagas y Anzoátegui) constituye la principal reserva forestal en América y el mundo de esta especie.

Este artículo se enmarca en el campo del aprovechamiento de los recursos forestales para aplicaciones e innovaciones constructivas y define, mediante análisis del conocimiento geométrico-espacial y la configuración de sistemas estáticos curvilíneos, fabricados con madera laminada de pino Caribe; una propuesta de componentes estructurales para simplificar las labores de producción, transporte, preensamblado, montaje, aprovechamiento, deconstrucción y transformabilidad que justifique los principios de desarrollo tecnológico sustentable.

Se estudia el caso particular de los arcos bi y triarticulados (estructuras a flexocompresión) con un predimensionamiento aproximado del peralte de su sección transversal $H=L/50$ (siendo L la distancia horizontal entre sus apoyos), con el cual, en experiencias internacionales, se ha logrado cubrir distancias medianas y grandes dentro de un rango de 50-120 metros sin requerir de apoyos intermedios al piso.

Como objetivo general se plantea definir

1 La clasificación realizada por John Francis discrimina tres variedades diferentes del *Pinus Caribaea* Morelet, que son: *hondurensis* (h), *bahamensis* (b) y *caribaea* (c). Los datos referenciales de Hábitat, Ciclo vital, Usos y Genética del pino Caribe se hallan recopilados en el libro de Francis (1992).

una propuesta geométrico-espacial para un elemento estructural constructivo basados en la aplicación de la madera laminada de pino Caribe mediante la utilización de los arcos bi y triarticulados, para cubrir grandes distancias dentro de un rango de 50-120 metros sin apoyos intermedios.

LA MADERA LAMINADA CON CALIDAD ESTRUCTURAL DE PINO CARIBE PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS EDIFICATORIOS

El empleo de la madera laminada en procedimientos edificatorios (también se designa como madera laminada con calidad estructural) está fundamentada en un principio que demuestra y establece que varias piezas débiles y pequeñas –procedentes, en muchos de los casos, del desperdicio de los procedimientos para la obtención de cortes comercializables de madera maciza– al unirse forman una porción más grande y resistente.

Los elementos estructurales basados en la implantación de arcos, con base en esta tecnología, no pueden ser concebidos como componentes monolíticos, lo cual entraría en contraposición con el principio de la madera laminada como tal.

Es posible proponer la conformación de un elemento curvo, seccionado y preensambla-

do con lo que se facilitarían las labores posteriores de manejo, transporte y montaje de los componentes estructurales de madera laminada en el sitio de obra, además de favorecer las tareas de deconstrucción y reutilización de las secciones del arco, sin que se produzcan desperdicios con lo cual se estaría en presencia de un sistema constructivo acorde con los postulados de desarrollo sustentable de los procesos de construcción.

Al requerir salvar grandes distancias entre los apoyos de una estructura sin emplear soportes intermedios que permitan disminuir las luces, los materiales más comunes –dentro de los procesos de la manufactura de la construcción en Venezuela– son: el acero (foto 1), el concreto armado (foto 2) el plástico y el aluminio, resultando estos excesivamente costosos para su aplicación, debido a los valores que adquieren los dimensionamientos de la sección transversal. A su vez estos productos, para su obtención, por ser altamente industrializados, emplean excesivas cantidades de energía primaria la cual es vertida a la naturaleza contaminando el medio ambiente.

El problema que se plantea consiste en la necesidad de proponer un análisis basado en la aplicación geométrico-espacial y estructural de arcos bi y triarticulados, para cubrir distancias de ± 50 metros, fabricados con la madera laminada estructural del pino Caribe.

Foto 1. Vigas de acero de gran peralte para la construcción del Tren Puerto Cabello-La Encrucijada.



Fuente: <http://www.skyscrapercity.com/>

Foto 2. Arcos de concreto armado del Viaducto N° 2 de la Autopista Caracas-La Guaira.



Fuente: El Universal, Caracas.

ESTADO DEL ARTE DE LA MADERA LAMINADA

La técnica mediante la cual se aserraban y cepillaban pequeñas piezas de madera para posteriormente unir las y formar elementos de mayor sección es practicada desde hace muchos siglos. La unión se realizaba con tarugos de la misma madera en forma de taquetes semicónicos. Posteriormente surgieron los clavos metálicos y más tarde los tornillos “tirafondos”, los cuales permitieron que las uniones mejoraran, alcanzando su auge a partir de la aparición de la caseína. Sin embargo, de acuerdo con Heinrich Schmitt (1978), no fue sino hasta 1909, en Suiza, cuando “...el carpintero Heltzer de Weimar (1846-1911) tuvo la idea de encolar las tablas corrientes con el fin de obtener unas grandes secciones macizas y emplearlas luego como estructuras de carga. Con su trabajo Heltzer facilitó las bases para la producción de elementos encolados de madera”² (Schmitt, 1978: 458).

Mientras tanto la madera laminada era utilizada cada vez más, de manera espontánea, en los países de Europa. “El primer país donde este producto tuvo un espectacular desarrollo fue Suiza. En 1920 existían más de 200 edificios con viga o arcos de tipo Hetzer” (Rhude, 1996:1).

De acuerdo con Pérez Galaz, “en Estados Unidos, la primera estructura fue erigida en el año 1934, y fue un edificio para el Laboratorio de Productos Forestales en Madison, Wisconsin, constituido en su parte estructural por marcos triarticulados.” (Pérez Galaz, 1992:3). Más tarde, en los años de la Segunda Guerra Mundial, entre otras muchas consecuencias, surgió la importancia de la cual empezó a gozar la madera laminada. Por una parte, la guerra

agudizó la desaparición de los recursos forestales que abastecían de especies maderables a los países beligerantes y, por otra, la carrera armamentista logró que los ejércitos de Hitler desarrollaran “...una nueva arma, la mina magnética, la cual originó a su vez el barreminas de casco de madera, desarrollado por los americanos. Su quilla, cuadernas y gran parte de otros elementos estructurales se hacían de encina laminada. En vista de las severas condiciones de exposición a que estaban sometidas las juntas encoladas durante su servicio en el océano, fue necesario emplear colas a prueba de agua” (Pérez Galaz, 1992:4).

La madera laminada en el mundo

La aplicación de la madera laminada estructural en la construcción a partir de la Segunda Guerra Mundial hasta nuestros días recoge un sinnúmero de importantes edificaciones construidas a través de diversas investigaciones sobre la innovación tecnológica del aprovechamiento de los productos resultantes de los procesos mecánicos de obtención de maderas macizas de uso estructural. Especialmente de las provenientes de coníferas más que de las latifoliadas (Pérez Galaz, 1992:17).

Las piezas de madera laminada quedan agrupadas en las siguientes categorías: la que puede ser encolada, atornillada o simplemente clavada e incluyen también las innovaciones tecnológicas del parallam® o PSL (*parallel strand lumber*), producto patentado por la empresa canadiense MacMillan Bloedel, que está compuesto por tiras logradas del corte de chapas de madera orientadas en la dirección longitudinal, encoladas y prensadas y el intrallam o LSL

2 “La madera laminada encolada nació al principio de este siglo cuando Karl Friedrich Otto Hetzer (1846-1911) de Weimar (Alemania) obtuvo su primera patente para este método de construcción. La patente suiza de 1901 se refería a vigas rectas compuestas de varias láminas unidas entre sí con adhesivo. Las primeras aplicaciones de este sistema datan del año 1890 en la construcción del edificio del Reichstag en Berlín donde se emplearon vigas de 10 metros de longitud. En 1906 Hetzer patentó en Alemania la construcción de piezas curvas de madera laminada, iniciando el desarrollo de los arcos de madera laminada” (Rhude, 1996).

(*Laminated Strand Lumber*) que son tableros conformados por virutas de madera encoladas con un adhesivo hidrófugo.

Experiencia venezolana

En Venezuela no existen aplicaciones relevantes de los conocimientos de fabricación de madera laminada estructural, ya que no hay un empresariado seriamente interesado en su fabricación, ni un mercado capaz de absorber en estos momentos dichos productos. Esto aunado a la presencia de un Estado indiferente ante el reto de desarrollar las tecnologías de punta en lo que respecta a los procesos de extracción, transformación y manufactura de elementos maderables, mediante el aprovechamiento del recurso procedente de la explotación de los bosques.

No se puede hablar en Venezuela de una industria forestal de tipo extractivo para suplir de materia prima a las empresas de construcción con estructuras de madera laminada. No se conocen ejemplos demostrativos del dominio de una tecnología nacional que dé respuesta a las exigencias espaciales que hoy día amerita la población. De cualquier manera, algunas prácticas se han realizado de forma aislada y se corresponden con el recuento que se hace a continuación.

La primera experiencia se remonta al año 1963 cuando Van der Slooten fabricó las vigas para la sede del Laboratorio Nacional de Productos Forestales LNPF-Mérida, dependencia adscrita a la Universidad de Los Andes. Owen y Contreras, en 1999, señalaban que: "Para el año 1970, una empresa de madera laminada inició su fase de producción en Valencia, estado Carabobo, aplicando la técnica de madera laminada, utilizando la caseína como pegamento base, encontrando un pronto fracaso" (Owen y Contreras, 1999).

La urbanización San José en el estado Mérida aplicó cubiertas de madera laminada que al día de hoy han tenido que ir siendo sustituidas debido a que los elementos han perdido su

adherencia original. Igualmente, también en el estado Mérida, el hotel Páramo La Culata posee sus techumbres con vigas de madera laminada, experiencia en la que interviene el Laboratorio Nacional de Productos Forestales;..." (Owen y Contreras, 1999).

Un elemento tipo parallam de madera laminada estructural fue realizado con tiras de leño juvenil del pino Caribe por los investigadores Owen y Contreras (1997). Las condiciones físicas y mecánicas del componente fabricado resultaron superiores a las establecidas en el Manual de Normas Canadienses y en las Tablas de Esfuerzos para Maderas Latifoliadas del Instituto Forestal Latinoamericano.

En 1997 el Prof. Jesús Conejos diseñó y fabricó en el Laboratorio Nacional de Productos Forestales (Mérida) arcos laminados con pino Caribe, preservados con sales de CCA y adheridos con cola blanca, los cuales fueron empleados en la restauración de la cúpula del Teatro Municipal de Caracas (Barrios, Sosa y Contreras, 2007).

En diciembre de 1999 la empresa universitaria Estran del IDEC, Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Central de Venezuela, implantó un modelo de cubierta tensil para un local comercial, ubicado en un centro comercial de Caracas, con una estructura de arcos biarticulados (foto 3) con laminados de madera de zapatero (*Hyeronima alchorneoides*), los cuales fueron fabricados en la sede de la Estación Experimental Jaime Henao Jaramillo, en El Laurel, municipio Guaicaipuro, estado Miranda.

Evolución de los adhesivos

El avance tecnológico en la fabricación de componentes estructurales con madera laminada ha sido una consecuencia directa de la evolución en la obtención de los adhesivos la cual resultó lenta al principio.

Para el año 1900 se obtuvo la caseína, un adhesivo elaborado con base en el procesamiento de productos lácteos. Es económico, resistente al agua y duradero pero hoy día está

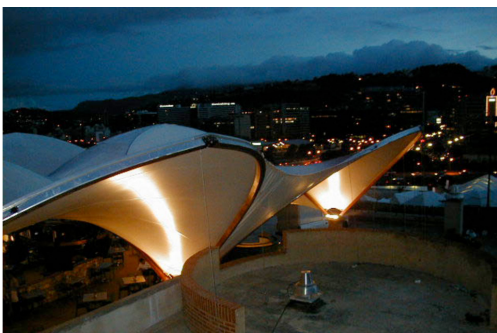
en desuso debido a que se inició la utilización de la cola de resina sintética, “cola blanca” o PVA (acetato de polivinilo), introducida en 1912. Ésta, debido a su hidrosolubilidad, posee un uso limitado para ambientes expuestos a las condiciones atmosféricas pero logra dar como resultado un laminado económico, llegando a emplearse para construcciones protegidas.

Para piezas de madera laminada sometidas a ambientes húmedos se aplicó, a partir de 1930, la cola sintética de urea formaldehído, la cual no funciona para climas extremos entre lo muy cálido y lo húmedo.

Con la evolución de la tecnología de los adhesivos se creó una cola sintética de formaldehído de resorcina, en el año 1943, con presentación en dos partes: una base y un catalizador, que al unirse da lugar a su proceso de fraguado pero crea porciones de desperdicio. Este adhesivo era de aplicación en caliente (aproximadamente 50-80°C) y requería de hornos tan grandes como los elementos laminados que se fabricaban, lo cual encarecía el proceso.

Por último, el fenol formaldehído rompe con esta limitante pudiendo aplicarse en frío, hasta aproximadamente 30°C, o en caliente para temperaturas entre 50-80°C, dependiendo de la especie maderable. Una de las ventajas de su utilización fue mencionada por Schmitt en 1978: “El encolado a temperaturas entre 80-130°C, reduce los tiempos de endurecimiento o de prensado de 20 a 2 horas” (Schmitt, 1978:459).

Foto 3. Arcos con laminados de madera fabricados por Estran (IDEC, FAU-UCV).



La fase de encolado constituye una de las etapas que presenta mayor dificultad para la producción de la madera laminada. Aplicando la madera laminada en elementos estructurales para fines edificatorios se presenta el riesgo ante el uso de los adhesivos o colas que al ser resistentes ante los efectos de la humedad causan un deterioro irreversible para los restantes elementos de la naturaleza ante los cuales quedarán expuestos.

Además del proceso en sí de la industrialización de las colas, los residuos que el adhesivo produce son eventos altamente contaminantes que no permiten que la producción de la madera laminada, en los países donde ésta se ha desarrollado, pueda ser más compatible con las medidas de conservación y mejoramiento medio-ambiental. Ambos factores constituyen obstáculos ante los cuales pueden quedar expuestos los fabricantes de madera laminada.

En Venezuela hay un escaso desarrollo de la industria de adhesivos con aplicaciones en la manufactura de madera laminada encolada para usos estructurales principalmente debido a la falta de un mercado que demande estos productos, además de que se requiere para su elaboración de materia prima, maquinarias y tecnologías importadas y una mano de obra altamente especializada.

La industria nacional de adhesivos, para pegar piezas de madera, elabora la “cola blanca” (designación química de homopolímero de vinil acetato). Dos grupos industriales abastecen el mercado con esta modalidad: Menequím C.A. con la marca comercial Enchapeg D50®, y el grupo empresarial Hércules, C.A., que elabora un producto similar, el adhesivo Cola blanca Blan-col 330®.

La industria venezolana elabora algunos productos que pueden aplicarse en la manufactura de madera laminada estructural, pero que a falta de demanda son empleados para otros procesos destacando los fabricados por la empresa Resimón, C.A., ubicada en Valencia estado Carabobo, con los siguientes adhesi-

vos: el producto Resifén®. la familia química de las resinas fenólicas, empleado principalmente para suplir la industria de fabricantes de láminas aglomeradas de fibras de madera, y el producto Resamín®, de la familia química de la resina de urea-formaldehído en solución acuosa, que se utiliza para tableros de maderas aglomerada y contraenchapada.

Los preservantes

Es imprescindible para generar un buen elemento laminado, sobre todo si es de coníferas, que la madera esté seca (en un promedio de 4% de contenido de humedad relativa) y preservada. Éste último proceso es quizás el más contaminante de los que se conocen en los restantes eventos de producción de la madera laminada. Comparada con producciones de otros elementos constructivos como el acero, el aluminio, el asfalto y el concreto armado, aun cuando no arroja partículas sólidas a la atmósfera, su nivel de riesgo es bastante alto dentro de las fases de elaboración de los componentes estructurales laminados.

A mediados del siglo XX se determinó la importancia de crear un producto forestal derivado completamente inmune a los ataques de termitas. Fue así como en paralelo la industria químico-farmacéutica, para la elaboración de pesticidas, desarrolló para la industria de transformaciones madereras, el pentaclorofenol, una combinación de agentes químicos en forma de cristales que por más de 50 años protegía la madera de tales insectos que atacan principalmente a las maderas blandas, especialmente a las coníferas, creando colonias que llegan a multiplicarse de forma rápida y que ocasionan un grave deterioro de las condiciones físico-mecánicas de la madera.

El pentaclorofenol fue retirado del mercado. A pesar de sus bondades como preservante era uno de los productos más peligrosos que la humanidad haya conocido. Los procesos de elaboración para disolver los cristales sólidos en un líquido, en el cual pudieran sumergir-

se durante un tiempo determinado las secciones de madera, implicaban pasos tan peligrosos como hervir el thinner a fuego lento y dejarlo enfriar hasta la homogenización con otros componentes no menos peligrosos como la bencina y el diesel. Como consecuencia: el producto resultó cancerígeno; obligando a autoridades sanitarias y ambientales a legislar en contra de su utilización.

Posteriormente, en las últimas décadas, se genera otro producto—las sales de CCA (cobrocromo-arsénico)—cuyas consecuencias adversas a la conservación del medio ambiente no tardarán en demostrarse. Estas han pasado a ser el producto preservante para especies maderables, reconocido por los institutos internacionales encargados de verificar y acreditar la calidad de las construcciones con madera. No está lejos el momento en que acepten su lamentable error. Esa combinación de sustancias químicas posee una cualidad innata: la de proteger contra insectos voraces y, simultáneamente, de ataques fúngicos que deterioran la madera. Es cierto que el arsénico está presente, pero en cantidades muy reducidas y su aplicación ya no se hace por inmersión sino por procesos de evaporaciones gaseosas para que el producto quede depositado en los niveles celulares de la madera. Las materias primas para su elaboración no sólo son peligrosas sino que contribuyen a la dependencia económica, principalmente respecto a países de Europa y Norteamérica encargados de producir este dañino veneno. Exigiendo, además, que a sus mercados de consumo no ingresen elementos maderables que no estén acordes con la normativa—creada por ellos mismos—que exige la preservación con estos métodos.

Ventajas y desventajas en el uso de la madera laminada

Cuando se utiliza la madera laminada se encuentran las siguientes ventajas:

- aprovechamiento del desperdicio resultante del proceso de producción de la made-

ra –según Owen y Contreras es más del 30% en el caso de las coníferas y en el caso del pino Caribe venezolano este porcentaje resulta incrementado en 5% (Owen y Contreras, 1997)– con lo que se puede establecer la compatibilidad de este sistema con los procesos de desarrollo sustentable de la manufactura de la construcción;

- obtención de formas curvas imposibles de obtener cuando se emplea madera maciza, lo cual le da un alto valor estético. Esbeltez de los elementos y por ende una significativa disminución de las cargas y su consecuente ahorro en fundaciones;
- finalmente, ante la propuesta de fabricar laminados de pino Caribe, se plantea el aprovechamiento de un recurso natural renovable que ya existe en Venezuela (aproximadamente de 560 mil hectáreas de bosques y un volumen aproximado de madera comercial de 12 millones de m³).

Cuando se planea trabajar construcciones con madera laminada estructural se presentan dificultades por la manera acertada de combinarla con conectores metálicos entre si misma y con las fundaciones de concreto armado. En ello inciden, particularmente en Venezuela, diversos factores como: la escasez de mano de obra realmente preparada para los eventos de supervisión y clasificación de la materia prima que se empleará; problemas de espacio para la generación de los elementos estructurales de tamaño no convencional para lo cual se requieren de grandes parques industriales para su elaboración; dificultades de transporte terrestre y de vías de circulación vehicular amplias y en buenas condiciones por las que puedan ser conducidos, una vez terminados, los componentes laminados a los sitios de montaje.

El pino Caribe. Su explotación

En Venezuela el Ing. J. J. Cabrera Malo (foto 4) planteó, en 1961, la siembra de árboles de

la especie de pino Caribe como solución al problema de erosión en la Mesa de Guanipa. El 6 de junio de 1966, tras conseguir apoyo político y financiero, comenzaron a ser cultivadas plantaciones experimentales en Cachipo, estado Monagas, bajo el fomento de la Dirección de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Agricultura y Cría.

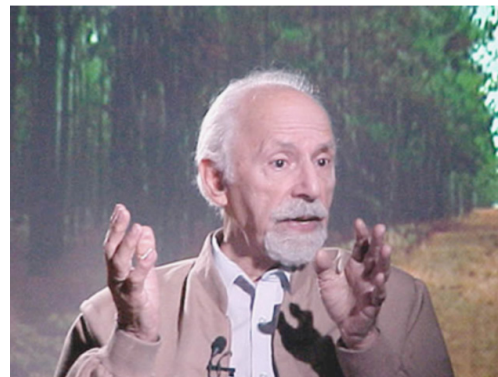
En sus inicios los bosques de la Orinoquia se plantaron para su empleo como materia prima en la industria de extracción de pulpa, hasta hoy tal cometido ha sido imposible de alcanzar.

La Compañía Nacional de Reforestación (CONARE) fue creada el 23 de agosto de 1975 y el 26 de febrero de 1988 se fusiona con la Corporación Venezolana de Guayana (CVG) fecha en que nace CVG- PROFORCA encargada de administrar los bosques de pino Caribe.

El 6 de marzo de 2012, en la Gaceta Oficial N° 39.877, se publicó el decreto presidencial N° 8.824 que dictaminó el surgimiento de la Empresa de Propiedad Social Maderas del Orinoco C.A. (Maderas del Orinoco C.A.), que estaría adscrita al Ministerio del Poder Popular para las Industrias.

Hasta el año 2013 no se conocen planes de explotación del pino Caribe venezolano para suplir a la industria de la construcción de la materia prima que pueda ser empleada para la fabricación de arcos bi y triarticulados con madera laminada.

Foto 4. Ing. José Joaquín Cabrera Malo (1921-).



Fuente: www.azulambientalistas.org/

Las empresas que administran las concesiones más importantes de los bosques de Uverito son: la empresa Kondor C.A., ubicada en la ciudad de Puerto Ordaz, en el estado Bolívar, que explota una concesión de la Corporación Venezolana de Guayana y su filial Productos Forestales de Oriente (CVG-PROFORCA), para utilizar las maderas del pino caribe de la plantación de Uverito, con manejo sostenible en aras de preservar la flora y la fauna a través de santuarios ecológicos. La empresa Kondor C.A. creó la firma comercial Asesorías Técnicas en Madera-ASETECMA, encargada de la fabricación de elementos de madera laminada de pino Caribe de secciones pequeñas para viviendas de bajo costo. Para ello propusieron un sistema de cerchas de 70 mm x 140 mm, conectados con piezas metálicas, lo cual genera la estructura para un estilo de viviendas que ellos denominaron “*casa estilo americano*”.

La Empresa Forestal Soledad, ubicada en la zona industrial Soledad del estado Anzoátegui, también posee una concesión para aprovechar los árboles de pino Caribe de Uverito, produciendo madera maciza en tres presentaciones: listón, tablón y tablas. También realizan uno de los procesos mecánicos de la madera para obtener tableros de madera de alta densidad conocidos como *hardboard* el cual se encuentra en el mercado con el nombre comercial de Chapaforte®.

Otra de las empresas que tuvo derecho de explotar y administrar determinadas cantidades de maderas blandas para surtir la industria papelera fue la Corporación Forestal Imataca, hoy Manpa, C.A., hasta 2001, año en el cual vendieron toda su división forestal que había alcanzado para 1976 unas 74 mil hectáreas de bosques de pino Caribe (Manpa, 2013).

Según declaró el presidente de Proforca, Wilfredo Franco, en el año 2000, el grupo Terranova, de capital suizo-chileno, tenía en avance la instalación de un aserradero con capacidad de 150 mil m³ de madera aserrada, así como la conformación de una planta industrial para

producir tableros de fibras de mediana densidad (MDF) y de alta densidad *harboard*, aspirando a comenzar su actividad en pleno para junio de dicho año. Por otra parte el grupo Trillium comenzaría a absorber 1,3 millones de metros cúbicos de madera por año de la producción de Proforca. Ambas inversiones –para la fecha– sumaban más de 250 millones de dólares (Franco, 2000).

En la última década Proforca ha planteado el desarrollo de cinco proyectos: Pulpaca empresa para obtención de pulpa de papel; Prodefor III que consiste en un programa de procesamiento forestal para incrementar el crecimiento de los bosques en un número de 100 mil hectáreas en un período de 5 años; una planta de tableros de fibras orientadas; una planta para el procesamiento bioenergético de pequeñas partículas madereras para obtención de combustible (*pellets*) y, finalmente, intentando satisfacer las necesidades sociales de las comunidades, una propuesta de construcción de 50 mil viviendas con madera.

Para abril de 2013 el consorcio de origen chileno Masisa® centra su actividad inversionista en Venezuela donde posee su mayor cantidad de bosques (unas 86 mil hectáreas). Esta firma mantiene presencia en los bosques desde 2002, año para el cual inició sus operaciones de la mano de la forestal Terranova. La empresa Masisa® es propietaria de una planta industrial donde fabrican tableros de MDP (*Medium Density Particle*), PB (*Particle Board*), MDF (*Medium Density Fiberboard*), además de cortes comerciales y machihembrado, todos ellos empleando como materia prima el pino Caribe, y supliendo al mercado venezolano mediante una red de 45 locales propios identificados como Placacentros®.

Los bosques de Uverito han mermado su crecimiento. De un ritmo de “...23 mil hectáreas por año, siendo la cosecha óptima de 2,3 millones de metros cúbicos” (Franco, 2000) han disminuido a 17.352 hectáreas para el año 2008. En sus inicios Proforca comenzó con una

explotación de 35 mil m³ anuales. En 1998 subió a 350 mil y en 1999, pese a la crisis, extrajo 700 mil m³. El alza de la demanda se debió a que la producción de pino Caribe cubría para ese entonces 50% de la demanda nacional.

Aplicabilidad de la tecnología sustentable

Se ha visto en la mayoría de los países que la actividad de la construcción y demolición de edificaciones e infraestructuras representan un problema desde el punto de vista del impacto ambiental, por la enorme cantidad de residuos sólidos que produce. Se estima que “60% de los residuos sólidos se producen en la construcción y deconstrucción de los edificios: 1,3 Tm por persona/año”³ (Casanovas, 2009:1).

Es importante recalcar que en el proceso de fabricación de los elementos laminados se presentan fases altamente contaminantes, como son las de encolado y fraguado y la de preservación de las piezas de madera.

Por otra parte, la energía primaria contenida en los materiales de construcción tradicionales (concreto, acero, PVC y aluminio, cuadro 1), es muy superior a la que se libera al momento de convertir la madera rolliza en madera aserrada (Nevado, 1999:22). Por años se ha pre-

senciado la modificación del medio natural con edificaciones que poseen cortos períodos de vida útil y que luego al ser demolidos se convierten en chatarra y escombros por los cuales nadie se hace responsable.

¿Puede el pino Caribe venezolano convertirse en la materia prima para construir estructuras de arcos bi y triarticulados?

La madera laminada estructural posee importantes ventajas para el aprovechamiento de los residuos vegetales de las especies maderables. Sin embargo, en el caso del pino Caribe venezolano, las autoridades encargadas de la siembra y mantenimiento de los bosques de la Orinoquia no han logrado una aplicación que pudiera ser de provecho para la economía del país, desarrollando productos que abastezcan el mercado de insumos para la construcción y que, además, sean elaborados con tecnología de punta.

Para que la madera del pino Caribe sea considerada como un material de construcción es menester considerar los principios estructurales y geométrico-espaciales que determinan la aplicabilidad de este recurso forestal con base en una tecnología sustentable. A continuación se desarrolla un análisis de estos conocimientos.

Los elementos estructurales curvilíneos con madera laminada como aplicaciones de una tecnología sustentable

Con madera laminada se logran fabricar elementos estructurales de formas infinitas, sin mayores limitantes, debido a que la unión de las piezas de madera encoladas permite desarrollar piezas con cualquier tipo de curvatura simple o doble y distintas concavi-

Cuadro 1. Energía contenida de algunos materiales que se emplean en la construcción

Madera maciza estructural	3,0 MJ/Kg
Cemento	7,2 MJ/Kg
Acero	43,0 MJ/Kg
PVC	80,0 MJ/Kg
Aluminio	160,0 MJ/Kg

Fuente: Rodríguez y Becker, 2004:22.

3 Casanovas establece que los datos mencionados por él en referencia a la cuantía de residuos sólidos procedentes de la construcción y demolición de edificaciones deben ser considerados como valores con validez internacional a pesar de “...que en diferentes países, con diferentes normativas, con materiales y sistemas constructivos muy diversos, los consumos y los impactos no son los mismos. En todo caso, hay un cierto consenso respecto a algunos datos que son realmente preocupantes” (Casanovas, 2009).

dades. La aplicabilidad geométrica de los elementos estructurales curvilíneos con madera laminada pueden conceptualizarse como un arco que responde en su configuración formal a los diagramas de momento flector máximo que producen las vigas rectas. Esta relación ya había sido resuelta por los fabricantes de estructuras con acero.

Los sistemas estáticos curvilíneos, que trabajan sometidos a esfuerzos de flexocompresión tienen mejor respuesta ante un predimensionamiento estructural al compararse con aquellos conformados por sistemas ortogonales (viga y columna). Este es el caso de los arcos: su analogía con los diagramas de momento flector máximo, que se producen –sólo por citar dos ejemplos usuales– en las vigas rectas con carga uniformemente repartida (w) simplemente apoyada en los extremos de una longitud (L):

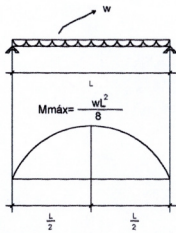

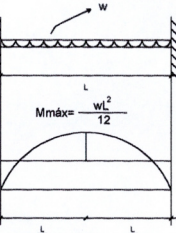

$$M_{flex} = \frac{wL^2}{8},$$

y esa misma viga, esta vez empotrada en ambos extremos responde a la siguiente ecuación:

$$M_{máx} = \frac{wL^2}{12},$$

En ambos casos los diagramas de momentos son parábolas (ver cuadro 2) que al ser considerados para configurar un sistema estático curvilíneo le conceden a los arcos su enorme capacidad de resistencia para salvar grandes distancias sin apoyos intermedios; además, con un peralte muy por debajo de los que requieren los elementos rectos horizontales, lo cual incide en una reducción del peso total de la estructura y en un ahorro en el costo total de la construcción (Páez: 2002).

Cuadro 2. Analogía entre algunos Diagramas de Momentos en vigas rectas de concreto armado y representación análoga de ejemplos constructivos de estructuras curvilíneas con acero

Tipos de vigas	Diagramas de Momentos	Ejemplos constructivos
Horizontal simplemente apoyada	 <p data-bbox="776 1417 1063 1470">Fuente: elaboración propia con base en Parker, 1982: 56.</p>	 <p data-bbox="1112 1375 1453 1543">Puente de Mérida (construido en acero y concreto armado por Calatrava, 1988-1992). Fuente: Extraída con fines didácticos de http://www.viajeuniversal.com/portugal/blogs/blogsalopez1.htm</p>
Horizontal empotrada	 <p data-bbox="776 1816 1063 1869">Fuente: elaboración propia con base en Parker, 1982: 57.</p>	 <p data-bbox="1112 1743 1453 1848">Puente de Bayonne. Construido en acero por Ammann & Cass, en 1931. Fuente: Extraída con fines didácticos de http://upload.wikimedia.org/</p>

Fuente: elaboración propia.

Los sistemas curvilíneos con madera laminada obedecen de un modo eficiente en su lógica formal a las deformaciones que se presentan en las vigas rectas de concreto armado y de acero. Obsérvese que una viga simplemente apoyada con un voladizo a partir de uno de sus extremos y con carga uniformemente repartida, presenta deformaciones que pueden ser aplicadas a una estructura con madera laminada conservando ésta las condiciones de equilibrio estable. Esto es: lo que en el concreto armado, el acero, el aluminio y otros materiales representa una deformación por someter al elemento a sus estados límites, con la madera laminada puede convertirse, bajo las mismas condiciones formales, en una respuesta interesante de equilibrio estable.

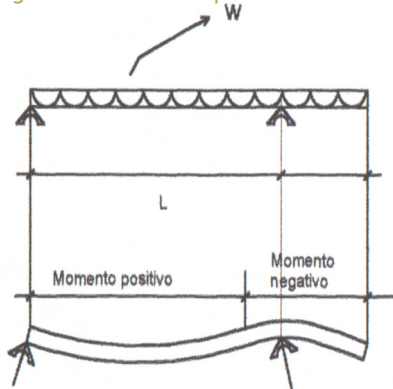
Una configuración formal análoga que responde a la representación de las deformaciones a las cuales es sometida una viga recta horizontal cuando se le aplica una carga uniformemente repartida (w), simplemente apoyada y con un voladizo en uno de sus extremos

(figura 1). Como ejemplo se señala la pasarela construida con madera laminada sobre el canal Rhin (foto 5).

Los arcos con madera laminada estructural para solucionar espacios llegan a cumplir con todas las posibilidades de formas geométricas, modos de sustentación⁴, o por la función que cumplen y el material con el cual son fabricados. Las formas que se pueden obtener a partir de la aplicación de la madera laminada en la construcción sólo tienen como límite la imaginación del proyectista, tal es el caso, a manera de ejemplo, el diseño de la cubierta del balneario de aguas termales de Bad Neuenahr, Alemania, 1993 (foto 6).

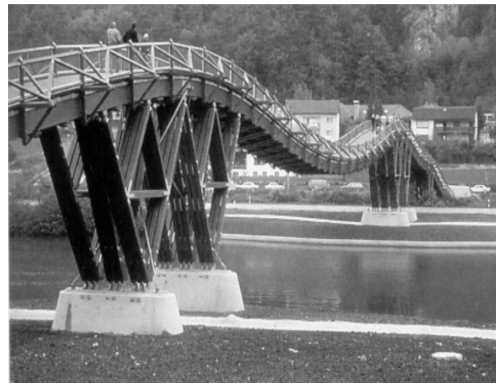
En los datos que más adelante refleja el cuadro 3 obsérvese la ventaja que adquieren los arcos respecto a la predeterminación del peralte (H) cuando pasan de una articulación –en cada uno de los apoyos– a adquirir una articulación más que se ubica al centro de la longitud de la curva que este desarrolla, para convertirse de un arco biarticulado a triarticulado.

Figura 1. Deformaciones de una viga recta horizontal, simplemente apoyada con un voladizo en uno de sus extremos cuando se le aplica una carga uniformemente repartida.



Fuente: elaboración propia con base en Parker, 1982: 54.

Foto 5. Pasarela con madera laminada sobre el canal Rhin.



Fuente: extraída con fines didácticos de Rodríguez, 1999: 213.

Foto 6. Cubierta del balneario de aguas termales de Bad Neuenahr, Alemania.



Fuente: extraída con fines didácticos de Canadian Wood Council, 1995.

4 Fernández Casado, en 1955, estableció los siguientes *modos de sustentación*: arcos empotrados, de una articulación, de dos articulaciones, de tres articulaciones, empotrados elásticamente y atirantados. Seguramente el autor no pensó entonces en aumentar su clasificación con base en las múltiples posibilidades de construir arcos que se presentan con madera laminada, donde los elementos pueden ser seccionados y reutilizados para otros modos de sustentación que él obvió como son: los arcos en voladizo, los multisoportados y los multitensionados.

Foto 7. Arcos romanos generándose una arquitectura de proporción 1:1.



Fuente: Enciclopedia Las 100 Maravillas.

Foto 8. Arco ojival de la Catedral de Milán.



Fuente: <http://33m.lista.cl/posts/info/14524756/El-arte-gotico.html>.

Esta ventaja, entre otras que ya se han mencionado, es consecuencia directa de que cuando los esfuerzos de flexocompresión actúan sobre una estructura de madera laminada —en el caso específico de los arcos biarticulados— existe un grado de libertad en cada uno de sus apoyos, mientras que al seccionarse el elemento curvilíneo en dos o más partes, para hacerlo triarticulado, se obtiene otro grado de libertad adicional, en el punto de la clave.

Al aplicar un arco semicircular la altura desde el origen de la curva hasta la clave es la mitad de la longitud recta entre los apoyos es decir: equivale al radio de la circunferencia que lo genera. Mediante esta proporción fueron concebidos los arcos romanos (foto 7), formándose una arquitectura de proporción 1:1 en la cual todos los arcos de un mismo nivel o arcada eran del mismo diámetro. Mientras que si se emplean arcos de parábolas (acotadas dentro de ciertos parámetros finitos) la misma altura podría ir en aumento. Este fue el caso del gótico, donde los arcos permitieron desarrollar una arquitectura en proporción 1:2 y 1:3 base-altura (foto 8) por medio de arcos de parábolas, ojivas y catenarias.

Los arcos de los períodos góticos y romanos contaban con esta limitante: las dificultades propias de los materiales no permitían salvar grandes distancias entre los apoyos. Surgiendo así los arcos carpaneles con perfiles de semióvalos pero con una sustentación particular: los apoyos, constituidos por arcos semicirculares, eran los que daban sustento y transmitían los esfuerzos al piso a este elemento estructural a través de toda la longitud de curva.

Las innovaciones tecnológicas lograron incorporar el acero a las construcciones a partir del siglo XIX. Fue así como los arcos de semicírculos romanos, las ojivas del gótico y los arcos carpaneles debieron quedar como un hecho histórico para cederle el paso a los arcos con perfil de semielipse exacta o aproximada, como arcos de semióvalos de tres, cinco o más centros, y las parábolas y catenarias que permitieran disminuir gradualmente las alturas desde el nivel

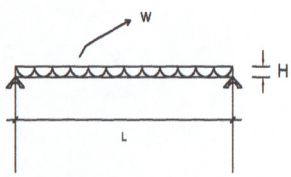

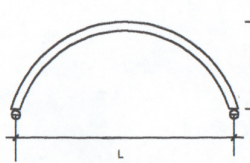

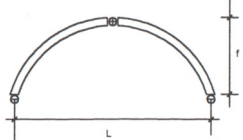

de piso terminado hasta el punto más alto de la curva reduciendo también las longitudes de curvas, las secciones transversales de los arcos, los volúmenes de material y los costos aplicados en su fabricación. Se presenta entonces como un reto salvar grandes distancias con un elemento estructural curvilíneo sin apoyos intermedios. De este modo los arcos se han ido configurando como elementos geométricos y como componentes estructurales unidimensionales; donde la longitud de curva es mucho mayor que la base y el peralte de su sección transversal. Toda vez que se ubican en el hiperespacio (ejes coordenados x, y, z) constituyendo un todo tridimensional que, según el tipo de curva empleada, puede generar un semielipsoide, un paraboloides, una semiesfera o un ovoide.

Pérez Galaz (1992) y Argüelles, Arriaga y Martínez (2000) establecieron peraltes (H) de la sección transversal registrando los valores comparativos entre un elemento rectilíneo horizontal simplemente apoyado y curvilíneo fabricados con madera laminada encolada. Pero, además, fijan la diferencia entre un modo de sustentación biarticulado y otro triarticulado (cuadro 3). Los peraltes con madera laminada, sobre todo cuando se aprovechan una de sus múltiples ventajas como lo es la de generar sistemas estáticos curvilíneos, son mucho menores que los que se requieren al emplear elementos rectilíneos con cualquier otro tipo de material constructivo que se conozca.

¿Por qué proponer sistemas estáticos basados en la implantación de arcos con perfil de parábolas, catenarias y semielipses?

Al intentar salvar cualquier longitud L sin apoyos intermedios se presentan, entre otras dificultades de orden técnico, dificultades de tipo logístico. Según el componente curvilíneo seleccionado: parábola, carpanel, elipse, semicírculo y otros, éste arrojará una longitud de curva mayor a la distancia entre los apoyos lo que lleva a pensar, tratándose de arcos fabricados con madera laminada, en la necesidad

Cuadro 3. Parámetros geométricos y predimensionamientos estructurales de arcos curvilíneos con madera laminada y su comparación con respecto a una viga recta

Geometría de los Sistemas estáticos	Características	Distancias entre apoyos (metros)	Peralte de la sección transversal (H)	Ejemplo emblemático de alguna estructura construida con madera laminada donde se haya aplicado el sistema estructural	
<p>Viga recta horizontal simplemente apoyada con carga uniformemente repartida</p>		<p>Sección transversal uniforme. Relación $H/b=1/8$</p>	<p>Usuales: 10 m - 30 m Máxima: 60 m</p>	$H \approx \frac{L}{17}$	 <p>Pasarela sobre un paso de ferrocarril. Mellansel, Sverige. 1993. Fuente: Nevado, 1999: 210.</p>
<p>Arco bi-articulado una articulación y un grado de libertad por cada apoyo</p>		<p>Sección transversal uniforme. Relación $H/b=1/8$ Pendiente apropiada en grados: $f = 0,135 L$</p>	<p>Usuales: 20 m - 60 m Máxima: 100 m</p>	$H \approx \frac{L}{50}$	 <p>Pabellón de tenis. Teufenthal. Suiza. 1982 Fuente: Nevado, 1999: 109.</p>
<p>Arco tri-articulado se adiciona una articulación y un grado de libertad en la cresta de la curva</p>		<p>Sección transversal uniforme. Relación $H/b=1/8$ Pendiente apropiada en grados: $f = 0,135 L$</p>	<p>Usuales: 20 m - 100 m Máxima: 125 m</p>	$H \approx \frac{L}{50}$	 <p>Pabellón de exposiciones. Avignon, Francia, 1978. Fuente: Nevado, 1999: 181.</p>

En Venezuela –hasta donde se conoce– no existen estudios concluyentes acerca de los predimensionamientos con madera laminada estructural de pino Caribe, por lo que los datos que arroja el cuadro no deben ser tomados como una referencia concluyente. Se determina H como el peralte total y b como la base de la sección transversal del elemento analizado.

Fuente: elaboración propia con datos de Pérez Galaz (1992: 120, 122); Argüelles, Arriaga y Martínez (2000: 171); Nevado, (1999).

de seccionar el elemento tantas veces como se requiera, facilitando así las tareas de fabricación, transporte, preensamblado, montaje y –si fuese necesario– también las de deconstrucción, reutilización y aplicación en nuevos sistemas curvos para generación de espacios

completamente diferentes a los que fueron desarrollados con antelación.

La justificación estructural de estas tipologías geométricas de curvas radica en el hecho de que los arcos de semielipses al igual que los arcos de parábolas, ambos acotados dentro de paráme-

tros finitos para aprovechar las porciones curvas que son cóncavas hacia abajo, poseen una característica singular: generan una configuración formal permitiendo obtener soluciones exactas y soluciones aproximadas que responden a los fundamentos geométricos que las determinan.

Los predimensionamientos de elementos estructurales con madera laminada establecen un criterio para la escogencia del caso de estudio del arco bi o triarticulado que aquí se analiza. Para ello se presentan en el cuadro 3 los parámetros estructurales y geométricos de algunos elementos curvilíneos comparándolos con respecto a los resultados de una viga recta.

Los arcos de tres centros constituyen la obtención geométrico-espacial de un modo visualmente aproximado al trazado de una semielipse, parábola o catenaria. Para su representación aproximada se dan las siguientes acepciones: un óvalo con la porción cóncava hacia abajo, constituido por la unión de tres curvas semicirculares, o arco de tres centros, trazado con escuadras y compás que posee su eje mayor coincidiendo con las abcisas y el semieje menor está sobre el vertical; siendo éste el caso de estudio que aquí está analizándose (figura 2). Esta es una representación de solución aproximada del arco que justifica una propuesta geométrica realizada para salvar grandes luces con arcos fabricados con madera laminada.

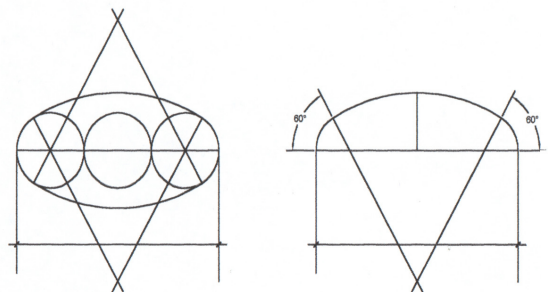
Mas, no debe dejar de mencionarse la existencia de otro caso (figura 3) que es una representación aproximada de un arco de parábola o catenaria que posee el eje menor sobre la horizontal y el semieje mayor coincide con el vertical o altura desde el nivel de piso terminado hasta la clave. Este último caso visualmente también se asemeja a una parábola o a una catenaria.

Los arcos de tres centros permiten cumplir con la premisa de seccionar el elemento estructural curvilíneo fabricado con madera laminada. Facilita, a su vez, la mayoración de los apoyos y esas particiones no generan la pérdida de la continuidad de la longitud de curva. Ello se debe a que los extremos de la curva central, son reci-

dos por los extremos de las porciones de curvas semicirculares de cada uno de los apoyos constituyéndose en puntos comunes de tangencia.

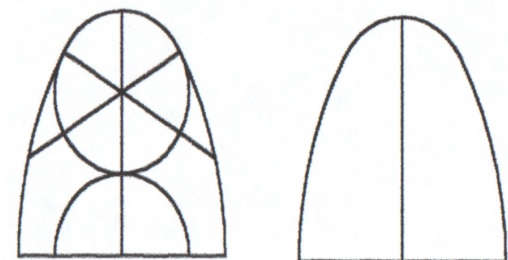
La distancia entre los apoyos, dada por $L =$ Eje mayor (a) y la altura del semieje menor (b) de un arco de tres, cinco, siete o más centros, permite determinar los parámetros geométricos que determinan la obtención gráfica de la curva (figura 4). En ambos casos se producen tres porciones de arcos trazados con compás. No obstante, en el caso de la izquierda, todavía la porción de curva central es seccionada en dos simétricamente en los casos en que los arcos sean triarticulados. Siendo este uno de los principales justificativos de la facilidad de emplear estos componentes curvos para alcanzar distancias entre los apoyos (L), sin que se eleven de un modo desproporcionado la altura desde el nivel de piso terminado hasta la clave. Mientras más centros permitan obtener

Figura 2. Arco de tres centros con la distancia de los apoyos sobre el eje mayor horizontal.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Arco de tres centros donde el eje menor está dado por la distancia entre los apoyos y el semieje mayor es la altura desde el nivel de piso terminado hasta la clave o cresta de la curva.



Fuente: elaboración propia.

un arco, trazado con escuadras y compás, mayor será su semejanza con una semielipse que matemáticamente no posea ningún margen de error.

Arcos biarticulados con madera laminada

Las edificaciones con sistemas estructurales curvilíneos de madera laminada que salvan las más grandes luces han sido resueltas con arcos biarticulados. Seguidamente se describen dos de las más importantes.

Pabellón Olímpico de Hamar

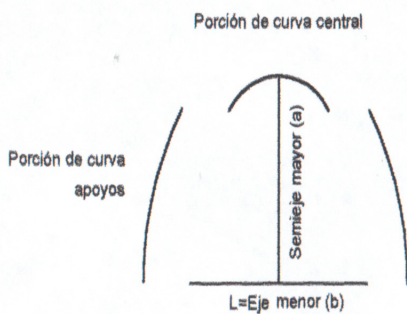
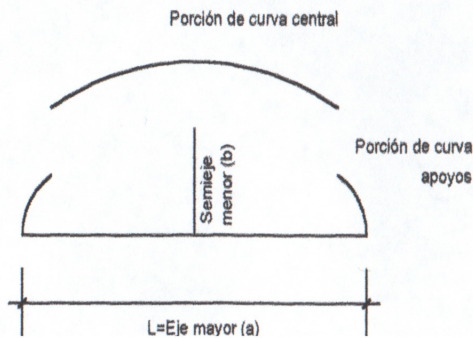
Como ejemplo emblemático de una edificación solucionada con arcos biarticulados con madera laminada está el Pabellón Olímpico de Hamar, Noruega, conocido como "El

barco vikingo" (fotos 9 y 10), construido en 1992 con madera laminada estructural. Nevado, en 1999, la describe así: "Esta impresionante cubierta (260 m de espina dorsal, y 96,4 m de luz transversal máxima con una altura de 35 m). ...[los cuales constituyen] una sucesión paralela de arcos biarticulados («Cuadernas») a intervalos de 12 m, y luz libre mínima de 30 m" (Nevado, 1999:68).

Pabellón de La Utopía

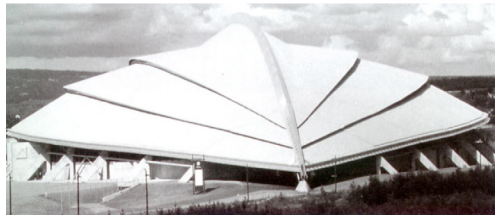
Otra edificación solucionada con arcos biarticulados de madera laminada es el *Pabellón de La Utopía* (fotos 11, 12 y 13) construido en 17 meses para la Exposición Universal de Lisboa de 1998 por la oficina de arquitectura Regino Cruz Arquitectos Consultores en asociación

Figura 4. Porciones de curvas que conforman a un arco de semióvalo en sus dos modalidades: eje mayor en posición horizontal con semieje menor en vertical y eje menor horizontal con semieje mayor vertical.



Fuente: elaboración propia.

Foto 9. Pabellón Olímpico de Hamar, Noruega, construido, con madera laminada estructural, en 1992. .



Fuente: extraída con fines didácticos de Rodríguez, 1999: 69.

Foto 10. Detalle de la estructura del techo del Pabellón Olímpico de Hamar.



Fuente: extraída con fines didácticos de Rodríguez, 1999: 68.

4 Los datos de la construcción del Pabellón de La Utopía han sido extraídos con fines didácticos de www.aitim.es/uploads/.../archivo_3236_11581.pdf

con el gabinete internacional SOM_Skidmore, Owings y Merrill⁵.

La forma del Pabellón está inspirada en un molusco marino de la época Jurásica, aunque para el espectador resulta la imagen de una nave espacial. Es así que la planta del Pabellón tiene forma de óvalo con un eje menor de 125 m y eje mayor de 225 m (AITIM, 1998). Las luces que salvan el sistema de armaduras que sostienen la estructura del sistema de cubierta varían desde los 60 hasta 120 m. Los arcos adquieren la configuración de curvas de tres centros (semióvalos).

Arcos triarticulados con madera laminada

Los siguientes ejemplos internacionales determinan la pertinencia del uso y aplicación de sistemas estructurales configurados con arcos triarticulados con madera laminada:

Puente Europa

El puente Europa, localizado en St. Georgen-Austria es un puente de madera con 85 m de recorrido total construido con arcos de configuración parabólica triarticulados de madera

laminada estructural que salvan una luz de 45 m (fotos 14, 15 y 16).

¿Pueden realmente los arcos triarticulados con madera laminada estructural cubrir luces de 30, 50, 100 o más metros? El puente Europa es una clara demostración de que los arcos bi y triarticulados logran, además de salvar grandes luces, pueden soportar grandes cargas.

Gimnasio del Colegio Padre Hurtado

Un ejemplo más reciente de la aplicación de estructuras con arcos triarticulados es la cubierta del gimnasio del Colegio Padre Hurtado (figuras 17 y 18) en Santiago de Chile, proyectado en 2004 por un equipo de arquitectos dirigidos por Teodoro Fernández y Sebastián Hernández. La cubierta está resuelta para salvar una luz de 36 m mediante un sistema de vigas triarticuladas con madera laminada que generan un sistema de cerchas en los arranques (Basulto, 2008). En la escogencia de este sistema estructural privaron requerimientos de elegancia, economía y rápido montaje además de la considerable reducción de cargas ante otras alternativas de materiales que pudiesen haberse empleado.

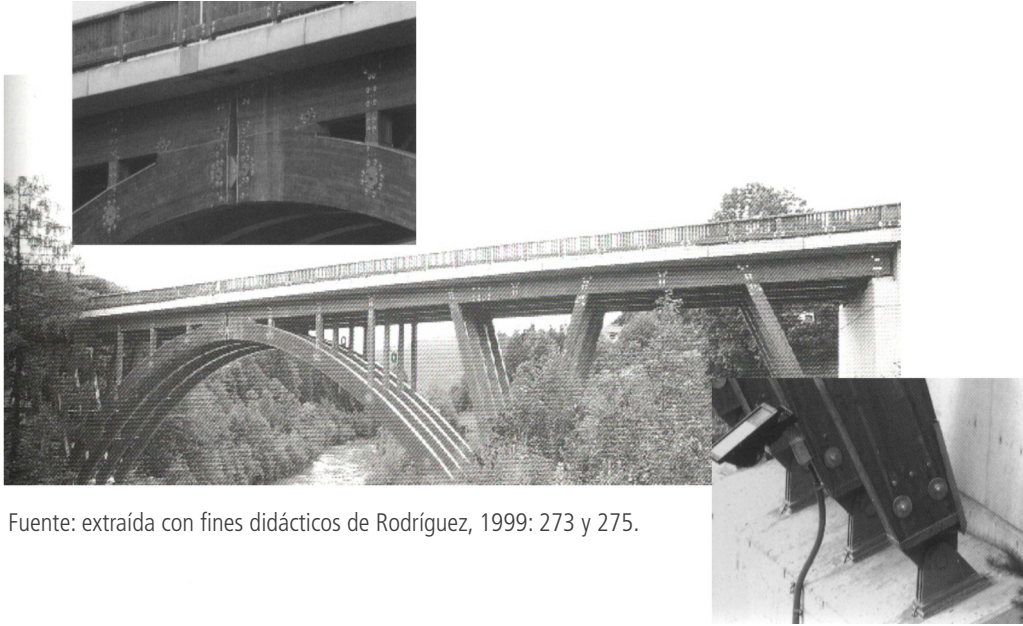
Fotos 11, 12 y 13. *Pabellón La Utopía, Expo-Lisboa, 1998.*



Fuente: Fuentes: http://diariodigital.sapo.pt/news.asp?id_news=626638; http://www.aitim.es/uploads/articulos/archivo_3236_11581.pdf y Nevado, 1999:185.



Fotos, 14, 15 y 16. Puente Europa en St Georgen, Austria, construido con madera laminada estructural, en 1993.



Fuente: extraída con fines didácticos de Rodríguez, 1999: 273 y 275.

Fotos 17 y 18. Gimnasio del Colegio Padre Hurtado en Santiago de Chile (2005).



Fuente: extraída con fines didácticos de Basulto, 2008.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En Venezuela el pino Caribe constituye un recurso forestal disponible para convertirse en una de las principales materias primas para la construcción de arcos bi y triarticulados con madera laminada.

Para 2013 no existía en todo el país construcciones en ejecución que empleara la madera laminada con arcos bi o triarticulados para salvar grandes luces sin apoyos intermedios.

Es quizás éste uno de los momentos que permitiría romper con la dependencia de los insumos extranjeros y se está en la oportu-

nidad de construir en el país estructuras de madera bien calculadas, aplicando de forma acertada ese producto maderero para aprovechar sus cualidades y defectos, al responder a las distintas solicitaciones de esfuerzos que pueda soportar.

Es necesario realizar estudios y planificar el aprovechamiento de la madera de pino Caribe venezolano, generando aplicaciones incrementales de innovación tecnológica de la construcción basadas en soluciones geométricas, espaciales y estructurales con sistemas estructurales de arcos bi y triarticulados para salvar luces en el rango de 30 m-100 m sin apoyos intermedios.

Las concesiones establecidas para los consorcios comerciales madereros por el Estado venezolano no representan un aliciente para crear en el país una cultura de construcción con madera que tanta falta hace. Por lo tanto se recomienda promover al pino Caribe de la Orinoquia entre consorcios internacionales para que traigan sus capitales, inviertan en la explotación y producción de madera de pino Caribe para producir elementos constructivos con madera laminada.

La definición de una propuesta geométrica de un elemento estructural con madera laminada basada en la implantación de arcos bi y triarticulados facilita las tareas de fabricación, preensamblado, montaje, deconstrucción,

reutilización y por ende la transformabilidad de los componentes. Lo que en un momento dado es empleado para un determinado fin dentro de un todo estructural puede, bajo condiciones diferentes de órdenes de magnitud y establecimiento de nuevas funciones, debe ser reconvertido sin que para ello se generen desperdicios ni desechos.

Por último, los arcos bi y triarticulados que aquí han sido analizados permiten desarrollar componentes constructivos configurados geoméricamente en dos soluciones: una aproximada que son arcos de semióvalos con tres o más centros; y una solución exacta que es una curva elíptica o de parábola, sin ningún margen de error en su obtención geométrica. Ambos conjuntos proporcionan longitudes de curvas que pueden ser seccionadas, sin que se pierda por ello la continuidad obtenida en los puntos de la curva. Esto permite la implantación de elementos constructivos, que facilitarían las labores de fabricación, transporte, montaje en obra, deconstrucción y reciclaje. Estableciendo así los principios de transformabilidad geométrica de la estructura portante. Lo que hoy puede ser un espacio determinado, en el futuro puede ser deconstruido sin provocar escombros ni desperdicios, para reconvertirlo en otro diferente, sin sacrificar sus condiciones de equilibrio estable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITIM-Asociación de Investigación de las Industrias de la Madera. AITIM. (1998). El pabellón de la Utopía Exposición Universal 1998 de Lisboa. *Boletín de información técnica No 192*. Extraído el 28 de febrero de 2014 de www.aitim.es/uploads/..../archivo_3236_11581.pdf.
- Argüelles, R.; Arriaga, F. y Martínez, J. (2000). *Estructuras de madera.: diseño y cálculo*. Madrid: AITIM.
- Barrios, E., Sosa, M., y Contreras, W. (2007). La experiencia venezolana en la fabricación de vigas laminadas encoladas. *Tecnología y Construcción*, 23(2), pp. 75-88.
- Basulto, D. (2008). Gimnasio Colegio Padre Hurtado – Teodoro Fernández. 31 Mayo 2008. Plataforma Arquitectura. *Boletín de información Técnica No 198*. Extraído el 25 de enero de 2014 de <http://www.plataformaarquitectura.cl/?p=7618>>http://www.aitim.es/uploads/articulos/archivo_3542_13160.pdf.



- Canadian Wood Council (1995). *Wood Reference Handbook*. Ottawa: CWC.
- Casanovas, X. (2009). La construcción sostenible: una mirada estratégica. Extraído el 13 de noviembre de 2014 de <http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/11004/1/ponencia-marco-sostenibilidad.pdf>
- Fernández, C. (1955). *Cálculo de arcos*. Madrid: Dossat.
- Francis, J. (1992). www.fs.fed.us/global/iitf/Pinuscaribaea.pdf . Extraído el 20 de enero de 2014.
- Franco, W. (2000). Terranova y Trilium invierten \$ 250 millones. El Universal, 20 de febrero de 2000.
- Holtza, S.A., (1991). *Construcciones en Madera Laminada: Hojas de Trabajo*. Álava: Holtza.
- MANPA-Manufacturas de Papel (2013). Historia. Extraído el 17 de enero de 2014 de http://www.manpa.com.ve/espanol/secciones/nosotros/1111/nosotrospag_his.html
- Navado, M. (1999). *Diseño Estructural en Madera*. Madrid: Asociación de Investigación Técnica de la Industria de la Madera y el Corcho. AITIM.
- Owen de Contreras, M. y Contreras, W. (1997). Elaboración de un elemento estructural laminado tipo Parallam, con tiras de madera Juvenil de Pinus Caribaea Var. Hondurensis y Adhesivo Fenol Formaldehído. *Revista Forestal Venezolana*. 41(2), 129-136.
- Owen de Contreras, M. y Contreras, W. (1999). Análisis sobre la evolución de la madera laminada a través de su historia y su trascendencia para Venezuela en el siglo XX." Mimeo, Venezuela.
- Páez, R. (2002). *Fundamentos geométricos del arco semielipsoidal*. Trabajo de grado para obtener el Título de Magíster Scientarium en Desarrollo Tecnológico de la Construcción. IDEC-FAU-UCV. Caracas.
- Parker, H. (1982). *Diseño Simplificado de Armaduras de Techo para Arquitectos y Constructores*. Biblioteca Simplificada de la Construcción; Tomo 2; LIMUSA. México.
- Pérez Galaz, V. (1992). *Manual de Madera Laminada*. Instituto Forestal División Industrias, Manual No. 11, 2a edición. Chile.
- Rhude, A. (1996). Structural glued laminated timber: History of its origins and early development: http://www.aitim.es/uploads/articulos/archivo_3542_13160.pdf.