ESTRUCTURAS RECIPROCAS – redes y tramas en la geometría de techos

ARESTA, Marco; SCIALPI, Giulia
Laboratorio de Matemática y Diseño; Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo;
Universidad de Buenos Aires
Tecnología en Relación
ecohacer@gmail.com

RESUMEN

Se llaman Estructuras Recíprocas a una trama tridimensional basada en el mutuo soporte de sus elementos constitutivos conformando así un circuito de fuerzas cerrado. Cada elemento estructural a su vez se apoya y sirve de apoyo al otro. La estabilidad de la estructura depende del equilibrio entre las fuerzas de tracción y compresión para que simultáneamente se anulen en los nudos o puntos de unión de los elementos constitutivos.
Estas estructuras son basadas en geometrías que encontramos en la Naturaleza, tanto en el sistema biológico de un ser vivo como en estructuras físicas de animales, plantas y minerales. Estas pueden ser encaradas como redes complejas que actúan de manera altruista como un todo plural.
El Diseño, de este modo, se asume como traductor en el proceso de estudio de las leyes geométricas y matemáticas de la Naturaleza y su posterior aplicación al ejercicio de la profesión.
Para tal investigación se despliegan vertientes de estudio en red, mezcladas por su natural e intrínseca conexión. Estas vertientes se traducen en el estudio de: los elementos geométricos y las proporciones matemáticas, los principios estructurales, los dispositivos proyectuales y los sistemas constructivos de las Estructuras Recíprocas.
La construcción de Estructuras Reciprocas analizada en esta ponencia retrata un proceso fenomenológico de elaboración, donde la metodología de prueba y error por experimentación a partir de maquetas fue crucial.
Por compromiso conceptual y coherencia teórica con la etapa de proyecto se eligen geometrías regulares. Para cada maqueta de estudio previamente elaborada fue importante el análisis posterior, expresado en esta ponencia. Esto posibilitó identificar y ajustar la metodología aplicada. La metodología tiende, por un lado al devenir de la forma conservando las coherencias simétricas, exigencias estructurales y los procesos de organización de la Naturaleza biológica; y por otro lado a compromisos de orden técnica y tecnológica para su montado en escala real.

INTRODUCCIÓN

El sistema estructural recíproco confirma una de las leyes físicas presentes en la Naturaleza, cuando sin apoyos verticales o sin sistemas de pórticos, las estructuras se mantienen con la máxima eficiencia. Este tipo de estructuras se manifiesta casi de forma intuitiva cuando un ser humano pretende sujetar una serie de palos coincidentes en uno solo nudo. Esta misma intuición ha servido para que a lo largo de la historia el ser humano, a partir de tecnología simple y de acorde a los materiales disponibles en su entorno, haya podido generar sus refugios en función de las condiciones propias del lugar. Tal vez el ejemplo más conocido de esta forma intuitiva y básica de conformar un techo a partir de elementos individuales constitutivos, son las Tipis, construcciones de plantas ovaladas y geometría cónica, realizadas por tribus indígenas de Norteamérica.

Pero los primeros registros de estructuras reciprocas las encontramos en China en el siglo 12 d.C. en techos de madera dispuestos como mandalas. Hoy en día esas estructuras las encontramos desarrolladas en la arquitectura de Japón. Ya en Europa estas mismas estructuras surgirán un siglo después, en el siglo 13, por la mano del arquitecto Villard de Honnencourt y posteriormente por Leonardo Da Vinci en su libro de bocetos. En la actualidad distintas universidades estudian el tema a nivel académico al mismo tiempo que un extenso numero de constructores, arquitectos y curiosos arman sus estructuras reciprocas.

ELEMENTOS GEOMÉTRICOS

Los elementos geométricos de las estructuras reciprocas determinan la morfología del techo y son el punto de partida en la investigación exploratoria.

Como elementos básicos constitutivos de una estructura reciproca tenemos: el polígono regular exterior circunscrito en el circulo exterior, el circulo interior que circunscribe el polígono regular interior, los vértices o nudos y los elementos estructurales.

Imagen 1. Techo reciproco octogonal regular de la vivienda T&E, Foyel, Rio Negro

Teniendo en cuenta el numero de elementos estructurales (vigas) y sus dimensiones y espesores, tal como los radios del polígono interior y exterior, así como la pendiente que deriva de estas variables, el proyectista tiene una

A parte de estas variables aplicadas a una estructura simple, se suma la variable de las estructuras complexas de múltiples polígonos donde amplia la posibilidad de cubrir una mayor área sin apoyos, aunque se suma también la complexidad a la hora de construir.

En termos básicos la geometría de una estructura reciproca obedece a la conformación tridimensional de un polígono en el plano. Al numero de lados del polígono corresponde el numero de elementos estructurales. Una estructura con un infinito numero de elementos estructurales correspondería a un polígono de infinitos lados, o sea a un circulo. Así siendo para tener una estructura reciproca necesitamos de tener por lo menos tres elementos estructurales, que es el mínimo de lados que conforman un polígono.

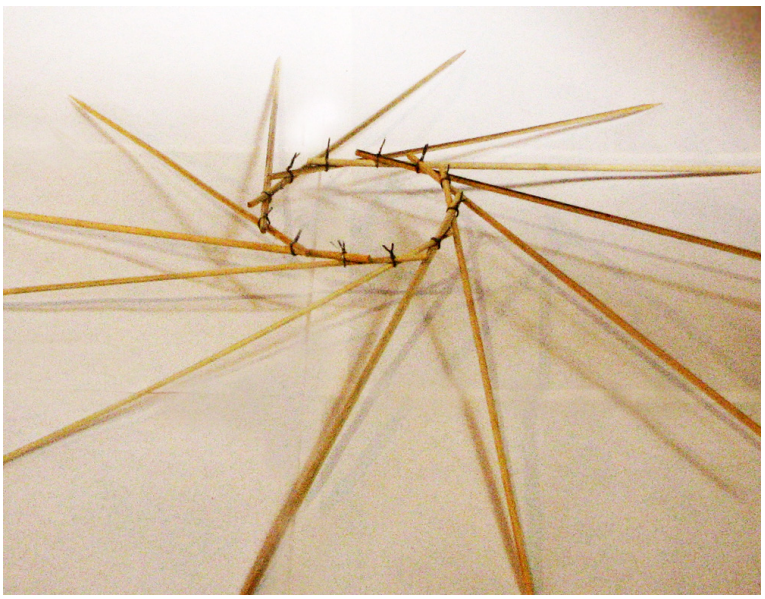

Imagen 2. Maqueta de estudio de una estructura reciproca simple regular de múltiples lados

La historia de la arquitectura popular nos ilustra que una de las formas mas utilizadas por distintas culturas fue la planta circular o elíptica. Desde tiendas a cobijos bajo tierra hasta las famosas Yurt's de Mongolia. Esto en muchos casos se debe a una facilidad constructiva, en otros a la facilidad de estabilización de la estructura, a otros por protección contra el entorno natural (vientos, sismos…) y en otros por optimización y mejor distribución espacial. También la forma circular de planta fue utilizada desde siempre en tipologías de edificios religiosos.

A parte de la justificación más pragmática del porque de la utilización de estas geometrías, está también el facto de la propiedad de la simetría, los polígonos regulares y de el efecto de espiral que surgen en las estructuras reciprocas podremos encontrar de manera permanente (sacro) en la Naturaleza biológica.

Estas geometrías tan accesibles a nuestros sentidos repiten su presencia en distintas culturas. Tanto en la Arquitectura como en el Arte patrones y proporciones geométricas son aplicadas en forma de polígonos regulares no solo para cobijarse pero también con poder simbólico.

Los polígonos regulares concentran en si un universo de tradición, como es el ejemplo de la estrella pentagonal, el pentagrama utilizado por los pitagóricos como su símbolo; o el hexágono utilizado por judíos (estrella de David) o chinos (hexagrama de libro de las mutaciones "I Ching") como símbolo de sus ideologías.

Estos mismo polígonos contienen en si constantes geométricas que también las encontramos en estructuras del entorno biológico y en nosotros mismos como es el ejemplo de nuestro ADN. Los números irracionales √2, √3 y √5 presentes en las diagonales internas de los polígonos regulares octógono, hexágono y pentágono respectivamente, los encontramos en distintas hojas de plantas, en frutos, flores, etcétera…

Por otro lado la simetría y específicamente la simetría rotatoria que encontramos presente en las estructuras reciprocas y que nos da el efecto espiralado, la encontramos en la Naturaleza biológica en estructuras de espirales logarítmicas como son la formación de una piña, los cuernos de un ciervo o la disposición de las hojas en el tallo de una planta…

Imagen 3. Maqueta de una estructura reciproca regular complexa hexagonal.

Ya en lo que se refiere a tramas y redes, o sea a estructuras complexas de más de un polígono regular, el mayor ejemplo lo tenemos en las tramas hexagonales de la naturaleza biológica, como puede ser el cascarón de un animal o el ojo de un insecto. En este caso el hexágono permite la masificación del espacio y la consecutiva progresión en el plano. Las redes geométricas que permiten esta sistematización y repetición regular son las que se basan en polígonos regulares masificadores de espacio como es el caso del triángulo equilátero, del hexágono y del cuadrado. (imagen 03) Es también posible agrupar dos polígonos diferentes como es el ejemplo del octógono con el cuadrado.

Imagen 4. Sombra proyectada en el plano de la maqueta de una estructura reciproca regular compleja hexagonal. Se puede verificar que en el encuentro (vértices) entre hexágonos surgen triángulos equiláteros con unión reciproca.

A partir de esta idea de repetición se pueden lograr geometrías múltiples para techos que resultan en tramas morfológicas muy distintas.

En las tramas complexas, al juntar varios polígonos se origina en el encuentro de sus vértices otros polígonos que configuran la red de la estructura reciproca. (imagen 04) Partiendo de la red que se quiere conformar se analiza el numero de lados, vértices y los ángulos. Dado que cada vértice de la red bidimensional se remplaza por un polígono (vértice) reciproco, cuanto menor es el circulo del vértice mas curvatura va a tener la estructura. Con lo cual es importante ensayar distintos diámetros de los círculos de los vértices.

En definitiva, tanto las estructuras simples como complexas obedecen a un mismo principio físico de trabamiento. Las estructuras reciprocas son un entramado de ejes en el espacio. Para que se cumpla la condición de trama un mismo elemento estructural tiene que, mínimo, tener dos apoyos por abajo y servir de apoyo a otro elemento que pase por arriba. Además, como ya hemos visto, se tiene que tener mínimo 3 elementos estructurales. Si una de estas condiciones no se cumple no llega a ser una trama y el trabamiento del elemento individual no se cumple.

Una de las tramas más presentes en nuestro cotidiano son las tramas de los tejidos, donde las micro fibras se entraman armando una superficie resistente. Lo mismo pasa con las estructuras reciprocas: el juego de fuerzas verticales que se origina en la trama compensa y anula los esfuerzos en la totalidad de la estructura.

DISPOSITIVOS PROYECTUALES

Como hemos visto las estructuras reciprocas nos transportan al imaginario orgánico presente en la Naturaleza biológica. Rescato la palabra orgánico como un sistema complejo originado a partir de patrones simples y compuesto de partes que integran una totalidad, como sirve de ejemplo la trama hexagonal de las alas de una Libélula. Este es el imaginario del cascarón de un animal o de cualquier volumen de un nido que envuelve y protege a quien penetra en su interior.

Nos referimos a esto porque a nivel conceptual este marco es la premisa base para el uso de un techo reciproco. Obviamente que a esto le juntamos el valor agregado que podemos vencer un amplio vano sin ningún apoyo intermedio vertical. Una estructura reciproca se diseña para un espacio abierto sin elementos que se interpongan en el espacio y sin partición del mismo con paredes. A nivel funcional resulta valioso para que se pueda dejar un espacio libre.

Los parámetros que definen la geometría de una techo reciproco y que determinan el proyecto derivan de una serie de ecuaciones de base trigonométrica propuesta por Chilton y Choo (1992). Sin embargo no nos detendremos en la ecuaciones, dado que las tenemos no como ámbito de proyecto sino mas de investigación.

En el ámbito proyectual, el método mas utilizado por nosotros son las maquetas, tanto virtuales como analógicas.

Los parámetros a tener en cuenta son: Φ corresponde al ángulo entre vigas dimensionado en planta; *x* é a distancia entre el apoyo en el circulo exterior del techo (el pie de la viga) y el momento donde se apoya en la próxima viga en el centro interior del techo, así como *x1* es la distancia en planta desde el pie de la viga al primera

apoyo y *x2* es la distancia entre apoyos de las vigas; *H* es la altura que asume el techo reciproco y tiene que ver con el ángulo y la pendiente que hace con el plano horizontal, así como *h2* se puede considerar como el espesor de la viga ; *re* es el radio del circulo exterior; el *ri* es el radio del circulo interior que corresponde al punto de intersección (apoyos) entre las vigas; *n* es el numero de elementos (vigas) que componen la estructura; y *L* es la dimensión real del largo de la viga. (imagen 05)

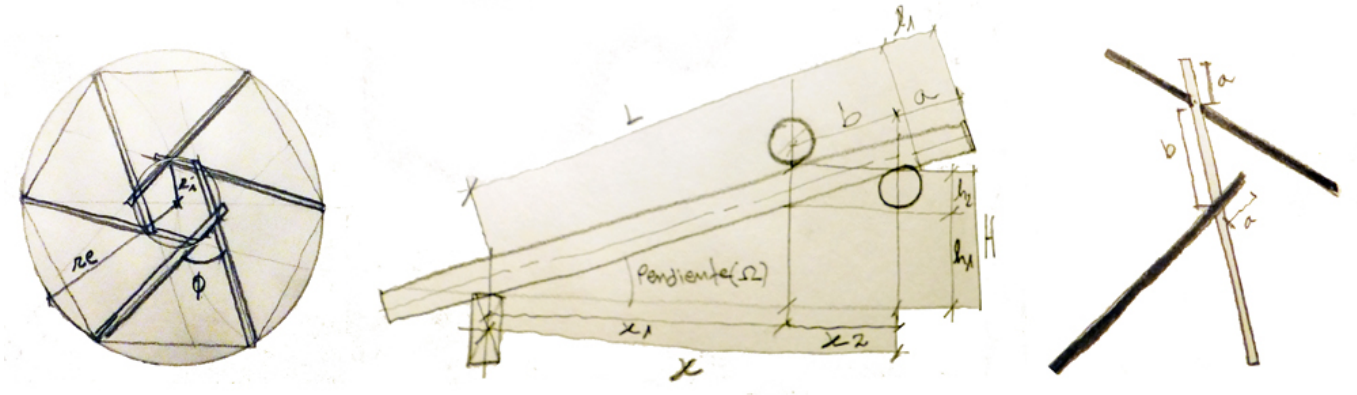

Imagen 5. Geometría de los elementos constitutivos de una estructura recíproca.

¿Ahora bien, por donde empezamos a dibujar?
Por facilidad proyectual empezamos naturalmente por fijar el radio del circulo exterior (re), dado que determina el área que pensamos cubrir con la estructura reciproca. En seguida determinamos el radio del circulo interior (ri). Prácticamente a par de esta decisión viene la determinación del numero de vigas (n) elección que tiene que ver con la índole estética del proyecto pero también con la determinación de la eficiencia estructural. Estas dos ultimas opciones proyectuales definen la pendiente del techo y conjuntamente con el numero de elementos estructurales (vigas) tenemos todos los datos para poder maquetar el techo reciproco. (imagen 06)

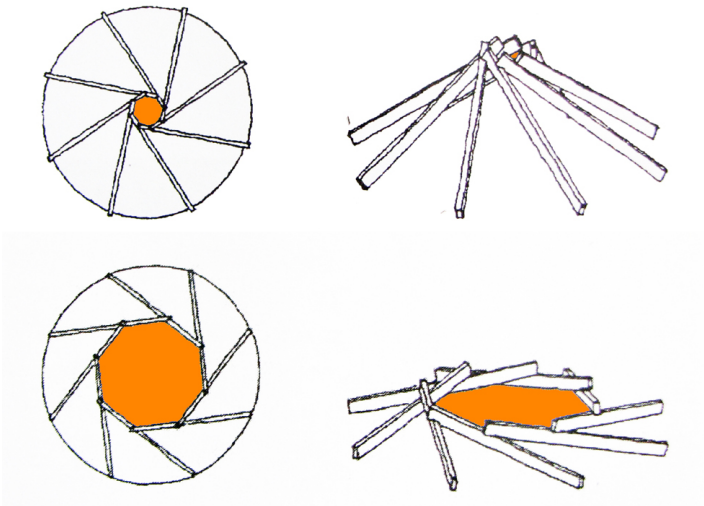

Imagen 6. Maquetas de estructuras reciprocas donde se puede ver la diferencia del ri (radio del circulo interior) y su influencia en la pendiente de la estructura

A partir de este momento a nivel de proyecto podemos hacer una maqueta virtual en programas como el 3d Studio Max o también hacer una maqueta analógica. Cualquiera de los casos tendrá el objetivo de conseguir dispositivos proyectuales importantes que posteriormente serán determinantes en obra: la altura del techo reciproco (H), el numero de vigas (n) y el largo real de cada elemento estructural (L), así como el punto de partida proyectual que son los radios de los dos círculos exterior e interior.

Al inicio del proyecto, en plano y una vez definido el circulo exterior, aplicamos un movimiento de rotación a los elementos estructurales teniendo como punto de rotación el pie de la viga (el punto que coincide con el circulo exterior). Si aplicamos el mismo ángulo de rotación (positivo o negativo) a todos los elementos estructurales podemos, por experimentación, definir el circulo interno.

En algunos casos cuando el espesor de las vigas (h2) es muy grueso y el radio del circulo interior (ri) se aproxima de cero no nos permite cerrar el reciproco. El caso extremo es cuando ri = 0 el reciproco se anula y pasa a ser un techo con apoyo central donde todas las vigas coinciden.

Igualmente el principal punto a tener en cuenta antes de todo es si a nivel geométrico es posible, o sea si no estamos cayendo en una geometría poco simétrica que debilite la estructura o si se puede elaborar la trama tridimensionalmente.

PRINCIPIOS ESTRUCTURALES

Las fuerzas internas que se originan en una estructura reciproca están directamente relacionadas con su geometría con lo cual tenemos que tener esto en cuenta desde el momento en que la dibujamos. La dimensión de las fuerzas depende de los siguientes parámetros geométricos: del radio exterior o del diámetro del vano libre a cubrir por la estructura; del radio interior; de la pendiente de la estructura; del largo de cada elemento estructural y del numero de elementos estructurales (vigas).

En el sistema reciproco el vértice correspondiente a cada apoyo de las vigas que se encuentra en el circulo interior conforma un nudo rígido. Esos apoyos generan cargas verticales con momentos flectores inevitables y con sus respectivas reacciones verticales. (imagen 07)

Dado que cada elemento estructural (viga) es soporte y se soporta en la otra, todos los elementos involucrados se complementan mutuamente. O sea, si se saca uno de los elementos todos los demás dejan de estar y se cae la estructura. Podemos así analizar individualmente como trabajan dos de las vigas, pero en definitiva, están trabajando todas al mismo tiempo a nivel de esfuerzos.

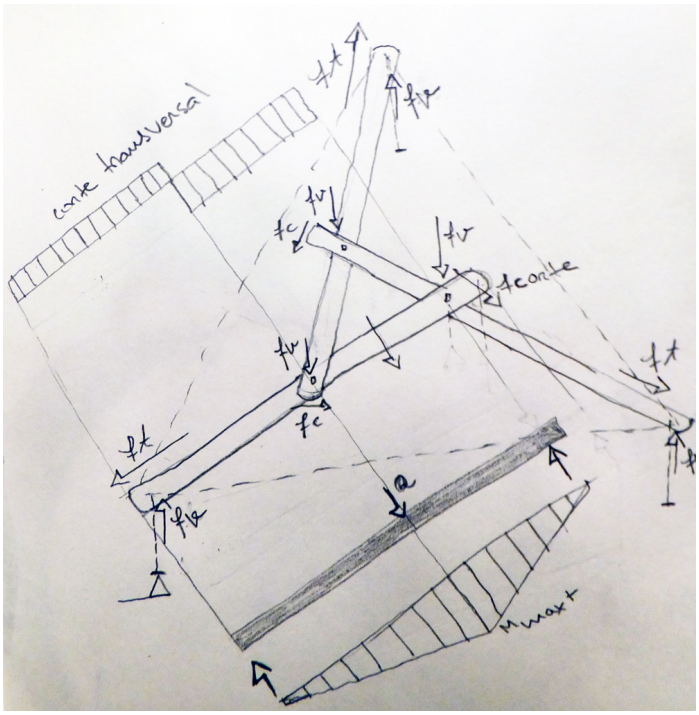

Imagen 7. Esquema de fuerza, diagrama de momentos y diagrama de corte transversal en una estructura reciproca regular simple.

El ri (radio interior) y el re (radio exterior) no solo determinan un cambio de estética en el edificio arquitectónico pero también, desde un punto de vista estructural, influencian la distribución de fuerzas y momentos en cada viga de la estructura reciproca. Con lo cual empecemos por ver como influencia estructuralmente la relación entre ri/re.

Como ya hemos visto, para el mismo re, cuanto menor es el ri, más pendiente se genera en el techo. Otra de las variables que también influencian la pendiente del techo es el numero de vigas. Para el mimo ri/re, cuanto mayor es el numero de vigas, mayor es la pendiente en el techo.

La cuestión de la pendiente es importante a nivel estructural porque cuanto mayor es la pendiente del techo más es el desplazamiento horizontal de las fuerzas verticales hasta el perímetro de la estructura. Las fuerzas verticales de compresión en el techo deben ser soportadas por el perímetro de la estructura, así como las fuerzas de tracción (fuerza axial) que se generan en el mismo perímetro. (imagen07) Si la pendiente es grande las fuerzas de compresión generan momentos horizontales de tracción ejercidos en el perímetro que se vuelven considerables. En este caso, el perímetro tendrá que tener un anillo de compresión para que no se deforme y abra.

Por otro lado, cuanto menor es la pendiente del techo mas se van a sentir las fuerzas de compresión en los nudos y mayor van a ser los momentos flectores en cada viga, generando mayor exigencia al material en función de la sección que tenga el elemento estructural.

Otra de as fuerzas importantes a tener en cuenta es que: una vez que se genera la carga vertical por el peso propio del techo y la carga en cada apoyo se origina una fuerza de corte lateral en el nudo correspondiente a cada vértice del circulo interior. Cuanto mayor es la pendiente más aumenta esta fuerza. (imagen 07)

Por fin, nos faltaría referir que independiente que las estructuras reciprocas regulares son bastante solidas por su simetría, pueden actuar sobre ella esfuerzos puntuales que las vuelven asimétricas estructuralmente. Nos referimos a estructurales adicionadas arriba del techo, a nieve, a vientos, sismos, personas en el techo, etcétera... Como tal, es importante simular estas cargas por maqueta virtual o analógica y por calculo.

Imagen 8. Techo reciproco de la vivienda P&L, Bella Vista, Buenos Aires.

SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

A nivel constructivo tenemos antes de todo que definir el material con que vamos a hacer la estructura reciproca y pensar el tipo de encastre o apoyo. En nuestra experiencia trabajamos con troncos de madera de sección circular de 20 a 30cm de diámetro como máximo. En cualquier estructura reciproca existen los elementos estructurales a los cuales llamamos vigas principales y luego las vigas secundarias que reducen el vano para poder cubrir el techo con el entablonado. Las vigas secundarias son de sección menor, normalmente alrededor de 15 cm de espesor. Cuanto mayor es la sección de cada viga principal y su largo más peso y aumenta la dificultad constructiva.

También aumenta la dificultad constructiva cuanto mayor es la pendiente del techo, además de aumentar la exigencia estructural en el perímetro y apoyos por las fuerzas de tracción y de corte que actúan sobre las paredes y sobre los nudos respectivamente.

Por otro lado, si el radio interior (ri) es muy grande dificulta cerrarlo con una claraboya y aumenta el costo y tiempo de obra, a parte de aumentar los momentos flectores por las fuerzas de compresión en el centro de la viga que

exige vigas de mayor sección. (Imagen 08) Con lo cual es importante, en función del radio exterior (re) llegar a un diseño armónico a nivel estético y estructural.

Para el montado de un techo reciproco empezamos por definir la madera y el tipo de unión de cada apoyo. Es importante que la madera este seca y sea lo más regular posible en función de su sección y de su eje. Si son palos de sección circular es importante que se suban ya pelados y con los nudos de la madera cortados para que no haya el peligro de que se traben cuando se están montando. Las uniones de los apoyos normalmente lo hacemos con: varilla roscada de 10mm, con un hierro de 10mm sirviendo de clavo o con un tarugo. Para mejorar la conexión se puede hacer un entalle en la madera para que sirva de encastre. Igualmente antes de poner la ultima viga queda solamente presentado cada apoyo con una madera o clavos laterales a las vigas que eviten su desplazamiento horizontal. Es importante que no se fijen los apoyos y que permitan el movimiento de las vigas hasta que se acomoden todas.

Antes de subir las vigas la estructura es montada primero en el piso como una maqueta real en 1:1. En este momento se puede verificar de vuelta la altura del techo (H) y determinar con eso el lugar y la altura del *“puntal estructural”.*

Al *puntal estructural* le llamamos a un palo que sirve de columna y que sustenta la primera viga y provisoriamente todo el techo hasta que se coloque la ultima viga. Este puntal debe ser aproximadamente 10cm mayor que la altura del techo (H) y colocado exactamente en la misma plomada que se mide la altura. Esta diferencia se debe a que pueda haber espacio para que la ultima viga entre en la estructura y pase cómoda por debajo de la primera viga y apoye arriba de la que la antecede.

Imagen 9. Etapas previas al montaje de una estructura reciproca. Montado en el liso de la estructura (a la izquierda) y gato manual debajo de “puntal estructural” (a la derecha)

Debajo del *puntal estructural* se coloca un gato hidráulico o manual para que se pueda bajar el puntal al momento de hacer que la primera viga caiga sobre la ultima y que quede toda la estructura montada. El mismo puntal debe tener unas “orejas” para que la viga que sostiene no se desplace y estar bien estaqueado y en plomo. (imagen 09)

Luego es importante marcar en el encadenado (perímetro) exterior donde apoya cada viga y hacer un circulo en el piso que corresponde al circulo interior de la estructura reciproca. En cada viga también se marca la dimensión que corresponde al largo que va de la cabeza de la viga (extremo del centro) hasta donde apoya (a) y del punto a donde apoya hasta el punto que sirve de apoyo (b). Con estas dos marcas en las vigas aseguramos que se conserve el polígono regular interior y el circulo interior. Para efectos de la construcción se considera el largo de la viga *l1* y al final, una vez asegurados todos los apoyos y la estructura finalizada, se corta el excedente y se queda con el largo real (L).

En ese momento estamos listos para empezar a subir todas las vigas del techo. Es importante acordarnos de la rotación que tiene la estructura. Si la rotación es hacia la derecha, empezamos a poner la vigas montadas arriba de cada una que la antecede hacia la izquierda y vice-versa.

Imagen 10. Secuencia del montaje de una estructura reciproca. Techo de la vivienda M&M, Golondrinas, Chubut

La primera viga apoya en el puntal. La siguiente viga apoya su primera marca en la segunda marca de la primera viga. La siguiente viga apoya su primera marca en la segunda marca de la viga que le antecede y así sucesivamente. Además de las marcas vamos confirmando que el circulo se mantiene con una plumada que va desde los vértices de cada apoyo hasta el circulo que esta marcado en el piso. (imagen10)

CONCLUSIÓN

Como ya hemos visto ésta se caracteriza por un sistema cerrado de elementos que se apoyan mutuamente, o sea, que un mismo elemento es a la vez soporte y apoyo. En la estructura se da lo mismo que en los sistemas orgánicos de la Naturaleza biológica, donde un animal es a la vez presa y predador. Por otro lado el sistema biológico de la cadena alimenticia se caracteriza como un sistema cerrado recíproco, donde el Sol y la tierra alimentan la planta, que origina un fruto o semilla, que alimenta un animal, que alimenta otro animal, que se muere y alimenta la tierra, que da alimento a la planta. Metafóricamente, podríamos decir que son estructuras altruistas que se soportan en un sistema de mutua ayuda.

BIBLIOGRAFIA

[1] ARESTA, Marco; *ARQUITECTURA BIOLÓGICA – La vivienda como organismo vivo*; Buenos Aires; ed. Diseño; 2014; ISBN: 978-987-3607-26-4

[2] POPOVIC, Olga; *Reciprocal Frame Architecture*; Larsen Slovenia, ed. Architectural Press y ed. Elsevier; 2008; ISBN: 978-07506-8263-3

[3] RUIZ, Jorge Orlando Ariza; *Estructuras Recíprocas: Bases para su aplicación Arquitectónica*; Bogotá; ed. Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Artes, Sede Bogotá, Colección “Punto Aparte”; 2009; ISBN: 978-958-719-210-0