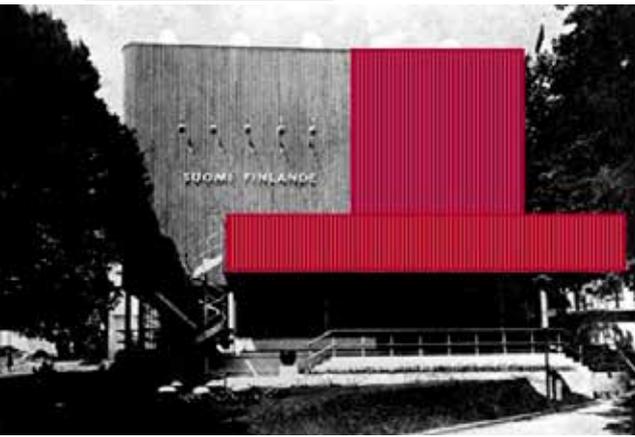


# «LE BOIS EST EN MARCHÉ»



Pabellón de Finlandia en la Exposición Internacional de París de 1937

«Le Bois est en Marche» [1] fue el lema con que, en el año 1936, el arquitecto Alvar Aalto ganó el primer premio del concurso convocado para la construcción del pabellón de Finlandia en la Exposición Internacional de París «Art et Techniques dans la vie Moderne» de 1937.

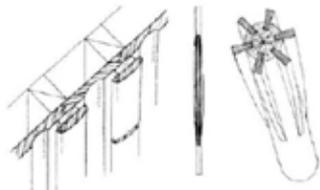
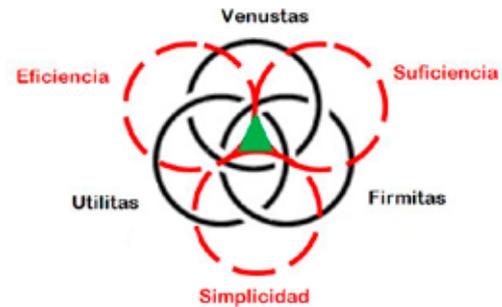
El edificio se configura mediante un recorrido perimetral respecto a la sala de exposiciones disponiendo volúmenes encadenados que, desde el vértice de un cubo, se colocan en anillos. La presencia de dos pequeños patios junto a su intención de cierre en espiral culmina en la gran sala inferior, sometiendo al visitante a múltiples sensaciones interior-exterior, luz-penumbra, alto-bajo, etc. que, al extremo, sugieren el bosque llegando a confundirse naturaleza y arquitectura, aspectos que después de 83 años conservan plena vigencia.

En lo esencial, la composición del edificio interpreta la arquitectura vernácula finlandesa recogiendo su tradicional forma de agrupación y permanente presencia de la madera, utilizando en su interior revestimiento de picea por sus propiedades para el reflejo de la luz, o el entablado en las fachadas pintado en rojo Falun [2].

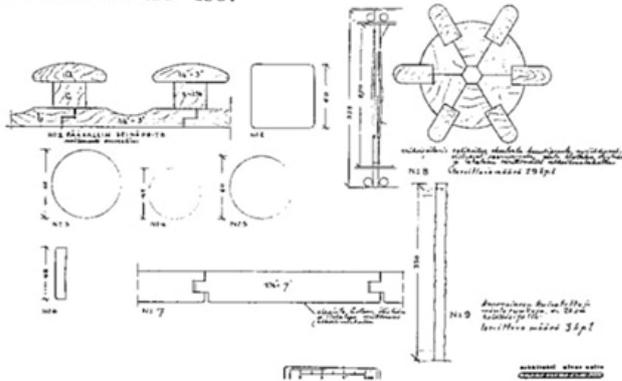
El lema del proyecto ganador junto al título de la exposición nos trasladan un empuje de dinamismo y modernidad del que, transcurrido ya una quinta parte del siglo XXI, bien

podríamos servirnos **para pensar más, de manera responsable, sobre lo que construimos**, en como lo construimos y si mantiene el equilibrio entre los tres principios básicos de Vitrubio: la *Venustas*, la *Firmitas* y la *Utilitas* (especialmente, con la primera) sobre los que descansa la obra de arquitectura, a la vez que tratamos de comprender como está cambiando nuestra forma de vivir, haciéndonos una idea de dónde estamos y hacia dónde nos dirigimos.

En línea con lo dicho acerca de **pensar más, de manera responsable, sobre lo que construimos y en como lo hacemos** se propone, como guía, la agregación de tres nuevos principios a los enunciados por Vitrubio junto a los que, en la actualidad, toda obra arquitectónica podría descansar conjuntamente.



SUOMI PARIS 1957



Detalles del entablado de fachada y del soporte de madera reforzado con aletas que ilustra la portada. Pabellón de Finlandia en la Exposición Internacional de París de 1937

EL PRIMERO: **La Suficiencia**, que cuestiona la necesidad de realizar nuevas construcciones, ya que no haciéndolo se aprovecharía al completo la energía incorporada [3].

Propuesta de agregación de tres nuevos principios a los tres de Vitrubio

La reutilización de edificios existentes con materiales rescatados limitaría el uso de otros nuevos aprovechando el carbono incorporado o emisión inicial de carbono. Por eso, a medida que aumente la eficiencia energética de las edificaciones y electrodomésticos, la energía incorporada irá cobrando más importancia frente a la energía operacional [4].

También, resulta interesante pensar en el final de la vida útil de los nuevos edificios incluso antes de que se construyan, ya que así, durante su vida útil, podrían tener dos o tres usos diferentes con la sola adopción en su comienzo de procedimientos constructivos blandos o abiertos que impidan, o limiten, la emisión de carbono otras dos o tres

veces.

La energía incorporada, que ya se encuentra en la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>, en contra de lo que se ha venido

[1] Le Bois est en Marche, según P.B. Mackeith, puede traducirse como "El bosque está en marcha" o, también, como "La madera está en camino". Ambas traducciones recogen la pretensión de Aalto.

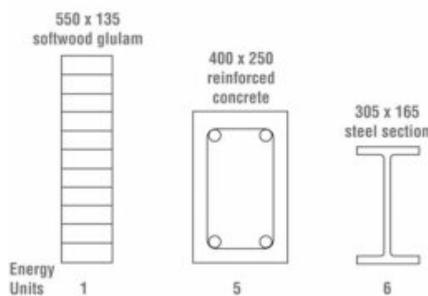
[2] El rojo Falun toma el nombre de una mina sueca de cobre de cuyos residuos se extraía el pigmento que durante 1000 años abasteció la región. Resulta algo similar al almagra español, mezcla de aceite de linaza cocido con tierra de óxido de hierro y esencia de trementina, usado como protección y acabado de la madera y, también, como pigmento en pintura y alfarería.

[3] La energía incorporada es la consumida por todos los procesos asociados a la producción de un edificio, desde la extracción y procesamiento de recursos naturales hasta la fabricación, transporte y entrega de los productos. La fabricación de materiales de construcción representa el 11% del total de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Para métodos convencionales, el impacto resulta del 28%, aunque a medida que los edificios van siendo más eficientes, el carbono incorporado aumenta su proporción.

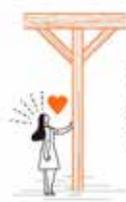
[4] La energía operacional es aquella que depende del consumo realizado por los ocupantes del edificio, se acumula con el tiempo pudiendo afectarlo durante toda su vida útil.



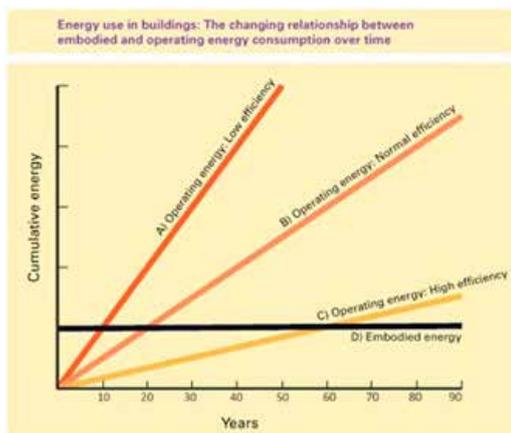
Edificación vernácula sueca revestida con entablado de madera pintado en rojo Falun.



Relación entre tamaño y resistencia de un material para una misma carga.



**BIOPHILIA:** the instinctive connection and attraction people have to natural materials.



Relación en el tiempo entre energía incorporada y operacional en función del grado de eficiencia



Representación gráfica del eslogan 1 m<sup>3</sup> de madera inmoviliza 1 Tn de CO<sub>2</sub>

creyendo, puede ser equivalente a muchos años de energía operacional, de ahí el esfuerzo en disponer aislamientos térmicos con baja energía incorporada que contribuyan a la eficiencia energética de la envolvente del edificio. Se ha comprobado que el promedio de energía incorporada en una vivienda de construcción convencional equivale, aproximadamente, a 15 años de energía operacional.

También, resulta preciso identificar los materiales y sistemas incorporados al edificio que más contribuyan a la emisión de carbono, seguido de la adecuada y ponderada evaluación del ciclo de vida útil de todo el edificio [5].

EL SEGUNDO: **La Simplicidad**, que postula el adecuado diseño arquitectónico usando la menor cantidad posible de cualquier tipo de material, evitando construir más superficie de la que se necesita; compartimentando su interior de manera flexible facilitando posteriores adaptaciones y/o cambios de uso; modificando o renovando en lugar de demoliendo o ampliando optimizando los procedimientos estructurales y constructivos; utilizando materiales de origen local y baja energía incorporada; proyectando viviendas multifamiliares atractivas y asequibles provistas de mucha menos estructura y energía incorporada por ocupante; introduciendo atributos de diseño biofílico [6] como principio de extensión a la re-naturalización de la ciudad (ciudades biofílicas).

Y, EL TERCERO: **La Eficiencia**, que pretende el diseño de edificios logrando el más eficiente consumo energético posible o, como se señala en el aptdo. 14 del artº 2 de la DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 *relativa a la eficiencia energética de los edificios, alcanzar el nivel óptimo de rentabilidad definido como el "nivel de eficiencia energética que conlleve el coste más bajo durante el ciclo de vida útil estimada"*.

Estos tres nuevos principios conducen a la evaluación de los aspectos siguientes:

- Emisiones de carbono incorporadas en los materiales asociados a la producción del edificio, desde la extracción y proceso de los recursos naturales hasta su fabricación, transporte y entrega.
- Emisiones de carbono debidas al funcionamiento de los edificios durante un plazo de cincuenta años, incluyendo las relativas al procedimiento de eliminación del material de construcción.
- Almacenamiento de carbono o ENERGÍA INCORPORADA al resultar muy variable entre productos y materiales. Recurso para la economía circular.
- Conservación de la ENERGÍA INCORPORADA en operaciones de mantenimiento, renovación o cambio de uso durante la vida útil del edificio.

De donde resulta que el carbono incorporado en el proceso previo a la construcción del edificio, el emitido durante la misma y el posterior durante su uso, precisa un ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA ÚTIL que asegure que las reducciones de carbono son reales.

El concepto de CICLO DE VIDA ÚTIL figura ampliamente referido en la DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 *relativa a la eficiencia energética de los edificios*, aunque no incluye definición alguna dejándola, según el aptdo. 14.b) del artº 2 *Definiciones*, a criterio de cada Estado miembro.

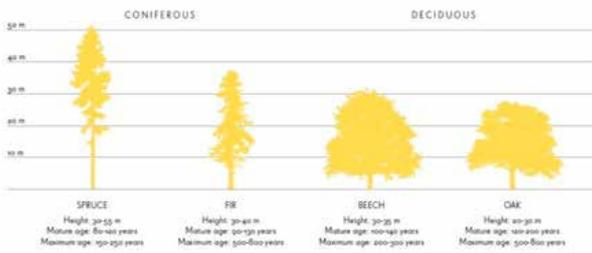
Ahora bien, en la actualidad el colapso climático y la pérdida de la biodiversidad son los problemas más serios de nuestro tiempo, ya no queda tiempo para afrontar con la tranquilidad que requeriría el ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA, al parecer, solo quedan 11-10 años para tratar de revertir las consecuencias del cambio climático.

La toma de conciencia de esta situación y que los edificios y la construcción representan el 40 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía, ha dado lugar a que el pasado mes de mayo más de 200 firmas de arquitectos británicos hayan suscrito una DECLARACIÓN DE EMERGENCIA CLIMÁTICA que ha sido seguida por otra similar de los ingenieros estructurales.

En la actualidad son ya siete los países que han suscrito declaraciones de ESTADO DE EMERGENCIA CLIMÁTICA entre los que en quinto lugar, desde el 17 de Septiembre de 2019, figura España. Los cuatro primeros fueron Irlanda, Canadá, Francia y Argentina y los posteriores Austria y Malta. El resto de las declaraciones efectuadas corresponden a otras administraciones u organismos

[5] Aunque la huella de carbono se exprese en kg CO<sub>2</sub> equivalente, no resulta apropiado comparar materiales solo por ese peso en un proyecto de edificación, de ahí la ponderación. No se debería comparar por sus respectivas emisiones 1 kg de ladrillo con 1 kg de aluminio. Para eso se utilizan las declaraciones ambientales de productos (DAP) que proporcionan información acerca de la evaluación del ciclo de vida en lugar de en peso. Entodo caso, tampoco las DAP resultan del todo adecuadas, las de madera, acero y hormigón resultan incomparables. La única forma clara de comparar un material con otro es evaluando el ciclo de vida de todo el edificio en el contexto de un proyecto concreto.

[6] El biólogo de Harvard Edward O. Wilson, Ph.D., acuñó el término biofilia en su libro del mismo nombre (Harvard University Press, 1984), argumentando que los seres humanos tienen una afinidad innata y evolutiva por la naturaleza. Definió el término como "las conexiones que los seres humanos buscan inconscientemente con el resto de la vida".



Comparación entre las maderas blandas de rápido crecimiento utilizadas en la fabricación de CLT con maderas duras de frondosa. 100 PROJECTS UK CLT © Waugh Thistleton Architects



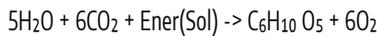
Diferente apariencia entre plantación y bosque

de numerosos países.

En España, el CONSEJO SUPERIOR DE LOS COLEGIOS DE ARQUITECTOS DE ESPAÑA – CSCAE – ha aprobado durante el pasado mes de julio una declaración institucional de emergencia climática y ambiental a la que se ha adherido la ASOCIACIÓN SOSTENIBILIDAD Y ARQUITECTURA – ASA –.

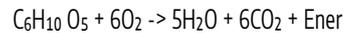
Más reciente resulta el informe suscrito por más de 11.000 científicos de 153 países en el que, partiendo del principio de que el planeta es finito y sus recursos limitados, se proponen actuaciones sobre los aspectos de Energía, Contaminantes de vida corta, Naturaleza, Alimentación, Economía y Demografía.

Considerando este escenario y las medidas recogidas en las declaraciones, la única determinación que con rapidez podría adoptarse sería la paralización del vertido de CO<sub>2</sub> a la atmósfera reduciendo al mínimo la fabricación de aluminio, acero, plástico y hormigón, productores de casi el 25 % de las emisiones globales mundiales de CO<sub>2</sub>, junto a la intensificación, de manera responsable, de la fabricación de madera por su capacidad para *inmovilizar* CO<sub>2</sub>, *en forma de celulosa*, y producción de oxígeno conforme a la hipótesis simplificada de que toda madera es solo celulosa (fórmula empírica de la celulosa C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>):



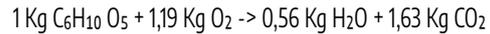
#### Reacción química fundamental de la fotosíntesis

Invertiendo el sentido de esta reacción, se estaría ante la combustión de la celulosa que liberaría el CO<sub>2</sub> *inmovilizado*, vapor de agua y calor:



#### Reacción química fundamental de la combustión de la madera

Ajustando esta reacción con pesos moleculares y principio de Avogadro, se obtiene:



#### Balance térmico de masas para la combustión de la madera

De donde se obtiene que 1 Kg de madera combustionada produce 1,63 Kg de CO<sub>2</sub>, por lo que 1.000 Kg (1 To) de CO<sub>2</sub> producirán una cantidad de 613,50 Kg de madera que, al resultar bastante aproximada al peso específico de la madera, sirve de letra al conocido y tan utilizado eslogan que dice:

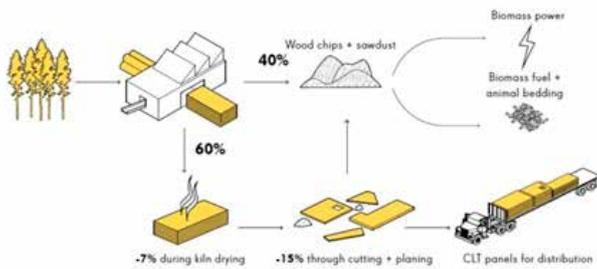
« 1 m<sup>3</sup> de madera inmoviliza 1 To de CO<sub>2</sub> »

Por tanto, las cifras del eslogan no resultan generalizables a cualquier especie, en especial a las coníferas que con un peso específico inferior en torno a un 30 %, inmovilizarían solamente del orden de 0,70 To CO<sub>2</sub>.

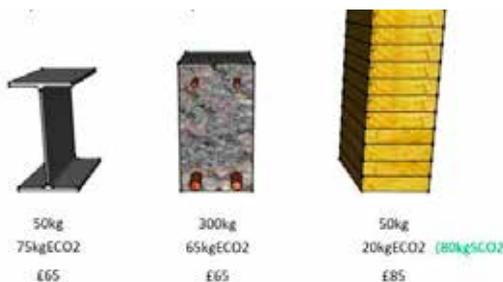
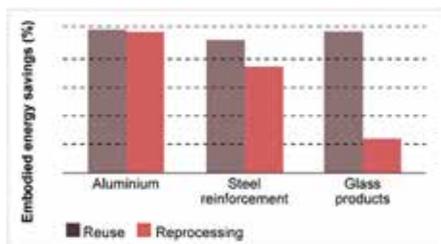
Otro aspecto a considerar es que ciertos estudios muestran como los bosques almacenan gran cantidad de carbono en el suelo y subsuelo, no estando claro cuánto carbono y metano (gas de efecto invernadero más potente) se libera con la tala ni, especialmente, con su forma de hacerlo.

También, señalan que los bosques se están cortando demasiado pronto sin que hayan alcanzado su volumen óptimo. Así como que la absorción de carbono depende de la especie, de la edad del árbol y de la superficie de la hoja, siendo los árboles de más edad los que tienen muchas más hojas y de mayor tamaño que los jóvenes.

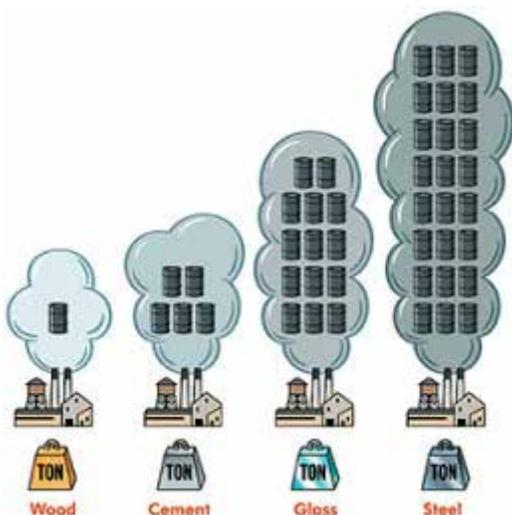
La investigación concluye considerando que, en la actualidad, los árboles en Europa central crecen más rápido pero son más livianos debido a que las temporadas de crecimiento son más largas a causa de las temperaturas más altas, al aporte de nitrógeno en la agricultura, los gases procedentes del tráfico y la contaminación industrial que, en conjunto, ocasionan que la madera cultivada en Europa resulte entre un 8 y 12 % más ligera desde 1900, con lo que el inmovilización actual de carbono estaría sobreestimada al calcularse con densidades superiores a las reales (Universidad Técnica de Munich –TUM –).



Ciclo cerrado de producción de CLT donde la mayoría de los desechos se reutilizan. 100 PROJECTS UK CLT © Waugh Thistleton Architects.



Masa, emisión de CO<sub>2</sub> y coste a igualdad de resistencia de las estructuras de acero, hormigón y madera.



Emisión de CO2 en la fabricación de madera, cemento, vidrio y acero



Idea de sobreingeniería estructural en hormigón



Pórticos hiperestáticos de estructura de acero



Pórticos isostáticos de estructura de acero arriostrado con diagonales.

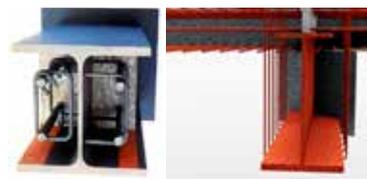
También, sucede que la abundancia de datos y sobreinformación existente en la actualidad ocasiona cierta incertidumbre que, en algunos casos, favorece respuestas más emocionales que científicas. Desde el aspecto de la biodiversidad, se trata de proteger el desarrollo del bosque mejorando la gestión forestal, especialmente, distinguiendo entre plantación y bosque. El árbol, en cuanto que madera, se puede plantar, cultivar y cosechar como si de un monocultivo agrícola se tratase, pero no puede confundirse con un bosque. Los árboles pueden ser renovables, pero los bosques no.

Como aproximación al rendimiento maderable para la producción de tablero contralaminado CLT a partir de coníferas - madera blanda de hoja perenne - como abeto y cantidades variables de abeto Douglas, alerce occidental y pino, se acompaña el estudio que figura en la publicación de 2018 - *100 PROJECTS UK CLT* - de Waugh Thistleton Architects, donde se señala que el árbol tipo cosechado para CLT tendrá alrededor de 80 años y 30 metros de altura. La eliminación de la corteza y el aserrado tiene una tasa de rendimiento en volumen de alrededor del 60%. El secado en horno, corte y cepillado representa una pérdida adicional en torno al 22%. Finalmente, cada m<sup>3</sup> de madera en rollo habrá producido alrededor de 0,47 m<sup>3</sup> de CLT, lo que supone 2,20 m<sup>3</sup> de madera en rollo para la producción de 1 m<sup>3</sup> de CLT [7]. La energía para el secado en horno de la madera se ha obtenido procesando subproductos - corteza, recortes, serrín, etc. - como biomasa, cuya emisión de carbono se considera neutral al resultar el proceso autosuficiente.

Conforme a estas investigaciones, resultaría oportuno completar aquel conocido eslogan con así como: «1 m<sup>3</sup> de madera inmoviliza casi 1 To de CO<sub>2</sub> según la especie, porte y edad del árbol». En general, la **reutilización de materiales de construcción** proporciona un ahorro del 95 % de energía incorporada que, de no realizarse, se perdería. El ahorro energético del reciclado de materiales resulta muy variable: 95 % para el aluminio, 85 % para el acero y 20 % para el vidrio. Además, se debe considerar que algunos de éstos pueden consumir más energía por la necesidad de transporte a largas distancias.

En la actualidad, se estima que la construcción en forma tradicional emite 1,5 To CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> correspondiendo, a las fases de estructura y cimentación, según el tipo de edificio, hasta el 80 % de carbono incorporado. De ahí, la importancia que para su reducción resulta la adecuación del sistema estruc-

[7] Las cifras que figuran en la publicación de Waugh Thistleton Architects de 2018 coinciden con las aportadas en 2012 por el Sector Forestal Vasco <https://madera-sostenible.com/madera/el-panel-contralaminado-clt-es-presentado-como-detonante-para-reactivar-el-sector-forestal-vasco/>



Vigas de hormigón/acero



Idea de integración de vigas y soportes en estructuras de hormigón/acero y acero/hormigón.



Idea de uso intenso de posibilidades estructurales de la madera



Unión carpintera a media madera



Unión de piezas de madera con herrajes de acero



Idea de estructura mixta madera/hormigón



Idea de estructura mixta madera/acero

tural, sea hormigón, acero o madera. Como referente, para el año 2020, el estándar francés BBC A establece, en general, una limitación de emisiones de 1,25 To CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> mientras que para actuaciones más singulares establece un valor inferior a 1 To CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

Ahora bien, el análisis de la ENERGÍA INCORPORADA, o HUELLA DE CARBONO, en las estructuras de hormigón, acero o madera, no resulta tan sencillo de realizar como en principio podría parecer.

En las de hormigón resulta decisiva la fabricación del cemento. La producción de 1 To (0,40 m<sup>3</sup>) de cemento emite 1 To de CO<sub>2</sub> (2,5 To CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), además de requerir 1,5 To de caliza y 1.600 litros de agua, representando el 5 % del total mundial de emisiones de CO<sub>2</sub>. En cambio, ofrece la ventaja de que su masa térmica puede contribuir a estabilizar las temperaturas interiores ahorrando energía a largo plazo (dicotomía energía incorporada/energía operacional).

El acero tiene una *huella de carbono mucho más elevada*, La producción de 1 To (0,13 m<sup>3</sup>) de acero emite 1 To de CO<sub>2</sub> (7,70 To CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), constituyendo el 6,6 % de la emisión mundial de CO<sub>2</sub>. La única opción real para reducir la huella del acero es limitar su uso, aunque como las estructuras de acero resultan más ligeras que las de hormigón su limitación no resulta relevante (la misma dicotomía de nuevo). En cambio, la madera produce entre 0,5 y 1 To CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, según su densidad, pero absorbe en torno a 757,49 kg/m<sup>3</sup> (no hay dicotomía, la energía incorporada y la absorción resultan decisivas).

En todo caso, aunque la comparación entre los valores unitarios de emisión de CO<sub>2</sub> ilustra la capacidad relativa de cada material, será en el valor total de emisiones del conjunto del edificio donde se valore su respectiva contribución.

En todo caso, siguiendo el neo vitrubiano principio de la *Simplicidad*, puede afirmarse que aquello que es bueno para el acero y el hormigón lo es también para la madera. En definitiva, se trata de *usar solamente lo que se necesita*.

En las estructuras de hormigón evitando soluciones de sobre-ingeniería [8], usando solo el que realmente se necesita.

En las de acero, utilizando pórticos isostáticos arriostrados con diagonales frente a los rígidos o hiperestáticos.

Una alternativa para las estructuras de hormigón y acero es su mutua integración que permite la reducción de tamaño en soportes y vigas.

[8] Sobreingeniería (o sobre-ingeniería) es el diseño de un producto para ser más robusto o complicado de lo necesario para el uso que se le pretende dar con el fin de garantizar suficiente seguridad, suficiente funcionalidad, o debido a errores de diseño. La sobre-ingeniería puede ser deseable cuando la seguridad o el rendimiento en un aspecto particular es crítico, o cuando se requiere una funcionalidad extremadamente amplia, pero generalmente es criticada desde el punto de vista de la ingeniería del valor como un desperdicio. Como filosofía de diseño, tal sobre-complejidad es lo opuesto a la escuela de pensamiento de "menos es más" (y por lo tanto una violación del Principio KISS y de la parsimonia).  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Sobreingenier%C3%ADa>

En las estructuras de madera, el procedimiento más adecuado es no usarla como si fuese algo que no fuera a acabarse nunca. Más bien, se trata de utilizar su singularidad convirtiéndola en objetivo de diseño limitando los excesos de uso intenso de sus posibilidades estructurales.

La diferencia entre configuraciones de la estructura, más y menos óptimas para un mismo edificio, puede alcanzar el doble de volumen de madera.

Por otra parte, relegadas las uniones carpinteras a actuaciones singulares y vernáculos, la energía incorporada de los herrajes de acero y tornillería empleados resulta, por lo general, irrelevante en el conjunto de la estructura.

Con idéntico fin al señalado anteriormente, la estructura de madera puede también integrarse con las de hormigón y/o acero conforme al criterio del mejor uso ofrece cada uno de los materiales.

Sin necesidad de llevar al límite aquella afirmación del famoso ingeniero suizo Hermann Blumer de que "Si se puede dibujar, se puede construir", el diseño de la estructura, como la propia arquitectura, podrían asumir **los diez principios del buen diseño** de Dieter Rams, jefe de diseño de Braun durante 40 años:

- El buen diseño es innovador.
- Un buen diseño hace que un producto sea útil.
- El buen diseño es estético.
- Un buen diseño hace que un producto sea comprensible.
- El buen diseño es discreto.
- El buen diseño es honesto.
- El buen diseño es duradero.
- El buen diseño es minucioso hasta el último detalle.
- El buen diseño es ecológico.
- El buen diseño es el menor diseño posible

Aspectos a los que, en línea con los preceptos actuales, pueden añadirse los siguientes:

- El uso de los materiales y procedimientos han de resultar adecuados a las características de cada proyecto.
- El uso de los materiales y los procedimientos han de optimizarse conforme a la evaluación del ciclo de vida útil de todo el edificio como guía.
- El consumo de material debe limitarse a la menor cantidad con el menor esfuerzo posible.

Las **estructuras pesadas en madera**, o también llamadas de madera masiva, cuentan con mayor energía acumulada a causa de su elevado volumen de madera, aspecto que se verá incrementado en aquellas que necesiten para su ejecución medios auxiliares de elevado consumo energético, empleen adhesivos o precisen largos recorridos de transporte en camión. Sería el caso de las estructuras realizadas con paredes de carga y forjados en CLT material muy extendido a nivel mundial, pórticos de entramado pesado, combinación de ambos o híbridas por la inclusión de elementos de hormigón y/o acero.

Entre los edificios más recientes con estructura pesada se encuentra el famoso **Stadthaus** que, finalizado hace poco más de 10 años, ha servido para despertar el interés mundial por el CLT. Su uso resulta completamente residencial, cuenta con nueve plantas que fueron montadas en tan solo nueve



Idea de estructura en madera de entramado pesado



Aspectos constructivos del edificio Stadhaus. Waugh Thistleton Architects.

semanas con cuatro operarios. Se encuentra en Hackney – Londres – estando, íntegramente, construido en CLT. Su arquitecto, Andrew Waugh, director de Waugh Thistleton Architects (WTA), afirma que los edificios en estructura masiva de madera pesan la quinta parte que los de hormigón viniendo a indicar, entre otros aspectos, su reducida energía incorporada frente a aquellos otros.

Tras de cuanto este edificio pueda tener de referente para la construcción en madera en el s. XXI conviene, de acuerdo a los principios post-vitruvianos enunciados, analizar su procedimiento constructivo, si bien, cabe suponer que, seguramente, en la actualidad se habría enfocado mediante la prefabricación.

En este caso, el sistema estructural empleado de paredes de carga se ha trasladado a los elementos de compartimentación interior, dando lugar a una planta extremadamente rígida, casi propia de una aptitud centroeuropea, que dificulta o impide posteriores modificaciones de su interior o cambios de uso. Por otra parte, la fachada, también realizada sobre la base de tablero estructural CLT, resulta especialmente rígida dificultando en el futuro modificaciones de posición y/o tamaño de los huecos. La envolvente exterior se resuelve con una *fachada ventilada* por superposición de capas, realizada in situ, que no presenta diferencia alguna respecto de la solución convencional salvo la sugerente apariencia de los paneles inspirada en la obra del artista Gerhard Richter.

Quizás, la idea de *flexibilidad* que debería proporcionar la compartimentación interior para facilitar futuras adaptaciones o cambios de uso, debería hacerse extensiva a la envolvente por idénticos motivos. La correspondencia entre el tamaño y forma del hueco con la función interior a la que atiende resulta una rigidez heredada del MOVIMIENTO MODERNO a superar.

Una solución opuesta se encuentra en el edificio **Brock Commons** cuya construcción comenzó en 2015 concluyendo su montaje en un plazo de 70 días. Situado en Vancouver y destinado a residencia de estudiantes universitarios, cuenta con 18 plantas y 53 m. de altura, habiendo sido durante algún tiempo el edificio de mayor altura construido en madera. Ha sido proyectado por Acton Ostry Architects.

La estructura presenta dos núcleos rígidos de arriostramiento frente a viento y sismo realizados con pantallas de hormigón armado en cuyo interior se alojan las escaleras y ascensores. El resto de la estructura se encuentra formada por pórticos de entramado pesado realizados con soportes y vigas de madera laminada y forjados de tablero de CLT estando montada *planta a planta*.

La solución estructural adoptada facilita una *planta libre* con interior *flexible* que a futuro, con cierta facilidad, permite su readecuación y/o cambio de uso. Este aspecto, también se extiende a la envolvente de las fachadas que, realizadas con módulos prefabricados, permite con cierta facilidad su modificación o sustitución en el futuro.

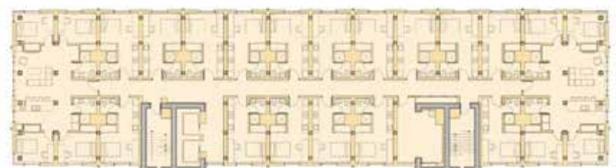
El proceso de montaje coordinado de la estructura seguida de los elementos modulares de fachada ha reducido el tiempo de colocación, facilitando su control, seguridad y control de la precisión en encuentros y uniones.

En línea similar, se encuentra la recientemente concluida **Torre de Mjøs** que, en la actualidad, resulta el edificio de mayor altura realizado en madera. Situada en Brumunddal, a unos 100 km al norte de Oslo, cuenta con 18 plantas y más de 80 m de altura. El uso resulta diverso contando con viviendas, hotel, oficinas y restaurante. Ha sido proyectado por VOLL Arkitekter.

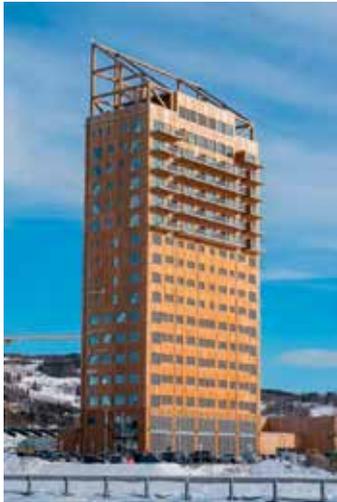
La estructura de este edificio se ha realizado elevando pórticos de



Aspectos constructivos del edificio Brock Commons. Acton Ostry Architects



entramado pesado de varias plantas realizados en madera laminada. El arriostramiento se confiere a las piezas diagonales de madera laminada dispuestas en los pórticos de las fachadas laterales. Los forjados están formados por módulos provistos de vigas y entablado superior en madera microlaminada LVL provistos, en las últimas plantas, de un grueso de hormigón que, a modo de lastre, contrarresta los efectos del viento y sismo. La disposición estructural proporciona una gran flexibilidad en las plantas permitiendo readaptaciones de su interior. La envolvente presenta una solución de módulos prefabricados en madera similar a la empleada en el **Brock Commons**. Los cerramientos de los recintos de ascensores y escaleras se han realizado con tablero CLT pero sin función estructural alguna.



Desde la mirada arquitectónica, las **estructuras pesadas en madera** permiten la realización de interesantes soluciones que van desde volúmenes elementales de gran calidad a arriesgadas formas que logran despertar atracción y asombro aunque, en ocasiones, atienden más a motivos de promoción, exhibición de los "superpoderes" del material o representatividad de sus promotores que impiden su consideración como arquitectura de acuerdo a los principios vitrubianos y neovitrubianos.

Las **estructuras ligeras en madera**, con menor masa que las pesadas, ofrecen menor energía incorporada. Entre este tipo de estructuras de madera se encuentran los sistemas de paneles y el muy extendido entramado ligero de plataforma que conserva, prácticamente intacta, su elemental configuración tradicional. Con la aparición de nuevos materiales como los tableros especiales, aislamientos térmicos, láminas y membranas, elementos metálicos de arriostramiento o iniciativas de optimización como *Advanced Framing*, etc., han logrado cierta evolución. Desde su origen, la aplicación más tradicional ha sido para vivienda unifamiliar.

Por su sencillez, resulta escasamente mediático, aunque en EEUU, donde su uso se encuentra muy extendido, resulta bastante común su presencia en el cine. También, se encuentra muy extendido en Canadá, Centroeuropa, países escandinavos, Rusia, Australia o Chile.

La idoneidad de este sistema se basa en la consideración de los forjados como diafragmas rígidos que unidos a los entramados verticales (muros de cortante) permiten una transmisión efectiva de los esfuerzos verticales y horizontales a la cimentación.

La segunda generación del sistema de plataforma corresponde a su aplicación en la construcción de edificios de media altura, especialmente, en Canadá y EEUU con la inclusión de madera laminada en vigas y soportes, dejando los forjados de ser meras tablas para formar vigas de celosía o de doble T con alma de tablero OSB, alcanzando alturas de hasta seis/siete plantas sobre una baja con estructura de hormigón (plinto), máxima permitida por la normativa de seguridad contraincendios para garantizar su extinción.

La tercera generación del sistema de plataforma ha sido protagonizada por fabricantes suecos de entramado ligero introduciendo la prefabricación automatizada. Este procedimiento se aplica a la construcción de edificios de media altura con tanta precisión como con el CLT utilizando la quinta parte de madera. Se trata de la prefabricación modular.

El proceso de automatización consiste en encuadrar los marcos de entramado ligero mediante robots para su atornillado, pegado o clavado según se precise, realizando las aberturas para ventanas, cajas eléctricas y conductos. Una vez finalizado el proceso, aspira el polvo depositando los residuos en el contenedor para su reciclaje. La evolución experimentada por este sistema resulta muy interesante, especialmente, por la reducción de volumen de madera a una quinta parte que, además de minimizar la energía incorporada en la edificación, supone una reducción de stress medioambiental.



Idea en línea vitrubiana



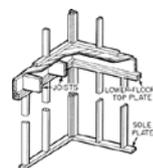
Idea en línea vitrubiana



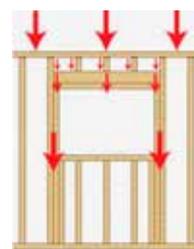
Idea de dudosa línea vitrubiana



Aspectos constructivos de  
la Torre de Mjos. VOLL  
Arkitekter



Esquema de  
entramado ligero  
tradicional  
con sistema  
plataforma



Entramado ligero de plataforma en  
edificación unifamiliar



Entramado ligero de plataforma en edificación de media altura

Frente a esta evolución, históricamente, los arquitectos se han dividido entre los que utilizan las limitaciones impuestas por la prefabricación y los que la ven como un obstáculo. Para superar estas posiciones se ha implantado un proceso de comprensión de la creatividad arquitectónica a través de las dos fases consecutivas siguientes:

En primer lugar, el diseño arquitectónico pasa por una secuencia divergente/ convergente del proceso dirigida hacia la forma de producción automatizada del sistema de plataforma. Durante el proceso divergente, se explora la comprensión de los requisitos del cliente y de la ubicación en relación con las limitaciones propias del sistema de plataforma. A continuación, en el proceso convergente se sintetizan las ideas en propuestas conforme a los objetivos de diseño, requisitos funcionales, características y detalles estéticos.

En segundo lugar, se propone un proceso de compensación abierto entre la creatividad arquitectónica y eficiencia de producción para su introducción eficaz en la rutina del proceso automatizado.

En todo caso, la innovación en madera para uso estructural continúa abierta como demuestran las posibilidades que ofrecen los conocidos paneles de madera micro laminada - *Laminated Veneer Lumber* - LVL - así como el más reciente de madera contrachapada masiva - *Mass Plywood Panels* - MPP - (en inglés) o *Massiv Holz Maner* - MHM - (en alemán), procedente de EEUU, que ofrece un espesor desde 5 cm. (2") hasta 30 cm. (12") con saltos de 2,5 cm. (1"). La capacidad de carga de un panel de 15,24 cm. (6") resulta idéntica a la de un tablero de CLT de cinco capas solo que con un 20 % menos de madera. El abundante encolado les proporciona mayor energía incorporada respecto al CLT o MLE.

El uso de la madera en edificación debe afrontarse de manera inteligente mostrando una actitud responsable de contribución a la sostenibilidad, aspecto que resulta más amplio que el del eslogan que exhibe su capacidad para la inmovilización de carbono - 1 m<sup>3</sup> madera inmoviliza 1 To CO<sub>2</sub> -, además de ajeno a pretendidos maridajes entre la madera y la eficiencia energética por la sola cifra de su coeficiente λ de conductividad térmica.

La madera, como elemento actual de arquitectura y edificación, se integra en una nueva paleta de materiales y procesos para el nuevo siglo que reclaman su inclusión en marcos de responsabilidad más amplios como resulta la nueva DIRECTIVA (UE) 2018/844 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética donde se recogen, además de aspectos de eficiencia energética, la conveniencia de introducir soluciones constructivas de tipo natural como la vegetación urbana bien diseñada, tejados verdes y muros que aporten aislamiento y sombra a los edificios, en cuanto que contribuyen a la reducción de la demanda energética limitando la necesidad de calefacción y refrigeración y la mejora de la eficiencia energética de los edificios.

La arquitectura en madera debe situarse en la categoría de la nueva arquitectura del carbono, que es algo con mayor alcance que el aspecto EECN. Se trata de construir edificios con cero emisiones de carbono (carbono negativo) que, bajo el patrón[9] de la flexibilidad, permita una adaptación sostenible de los edificios a las nuevas necesidades y usos con la sola aportación de su propia energía incorporada. De nuevo: ¡¡Le bois est en marche!!

***“Como material sostenible, la madera nos permite avanzar hacia un modelo económico donde el uso de los recursos esté en armonía con nuestro planeta para proporcionar a las futuras generaciones una base de existencia”***

Hermann Blumer[10]

[9] El término patrón alude a la teoría del lenguaje de patrones elaborada por el arquitecto Christopher Alexander donde señala que el secreto se halla en una «cualidad sin nombre» que es fruto de la vivencia histórica y social del entorno, y de la aplicación directa de determinados preceptos muy sencillos.

[10] Hermann Blumer, famoso ingeniero suizo habitual colaborador en estructuras del arquitecto Shigeru Ban.



Edificios construidos con módulos prefabricados en sistema plataforma

# MEJORES PROYECTOS 2019 (I)