

LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA MANO DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

ENERGY EFFICIENCY BY THE HAND OF CONCRETE STRUCTURES

Xavier AGUILÓ I ARAN

Master Ingeniero Industrial Superior, *MEng*
BAC Engineering Consultancy Group
Subdirector Edificación. Director Madrid. *Deputy*
Building GM, Madrid Director xaguilo@bacecg.com

Lluís MOYA FERRER

Catedrático Arquitecto, *Chairman Architect*
BAC Engineering Consultancy Group
Director General de Edificación. *Building GM*

lmoya@bacecg.com

RESUMEN

La reciente aceleración de proyectos de edificios de bajo consumo requiere de la mayor interacción posible con su estructura dado que es, en general, el material más presente (en términos de peso) en la totalidad del edificio. Además, el mayor confort de los usuarios se consigue con sistemas radiantes, pues se basan en sistemas sin corriente de aire y trabajan con temperaturas de operación más cercanas a las de confort. El hormigón de los forjados es capaz de actuar no sólo como protagonista principal en esta nueva filosofía de trabajo energético sino que permite ir un poco más allá. Se presentan dos proyectos basados en la misma tipología estructural con una plena integración de sistemas técnicos.

PALABRAS CLAVE: Sostenibilidad, EstructurasActivadas, EficienciaEnergetica, HuellaCarbono, Integración

1. Introducción

Se presentan a continuación dos proyectos de edificación en los que la estructura se presenta como un actor principal y no sólo por hacer su función resistente sino también por participar muy activamente en la termodinámica del edificio y en la integración de los sistemas técnicos del mismo.

En la mayoría de los edificios la estructura se esconde detrás de falsos techos, falsos suelos y enlucidos. De todos modos, viendo los proyectos que se están llevando a cabo actualmente, se empieza a notar una clara tendencia a proyectar dejando los materiales vistos y jugando con ellos para enriquecer los espacios. Las estructuras de hormigón son aún más proclives a permanecer vistas, bien por permitir unos acabados buenos, bien porqué el encofrado puede comportarse como un sistema de patrón bello y artístico.

Los proyectos que aquí se cuentan se resuelven en hormigón, tanto para la estructura vertical como la horizontal y, como veremos más adelante, se saca el máximo partido de este material.

En la época en la que estamos, todos los productos de la industria tienden a etiquetar sus productos como “verdes” y respetuosos con el medioambiente; en comparación con el mercado, el hormigón está en una mala posición. De todos los materiales denominados “estructurales” es el que peor lo lleva, puesto que la emisión de CO₂ en su fabricación y la necesidad de estropear las montañas para obtener sus áridos lo relegan a la peor posición.

Aun así, en España se sigue construyendo en hormigón un porcentaje muy elevado de los edificios y, en cambio, a excepción de la capacidad resistente, se le saca muy poco provecho. Con los actuales softwares de modelado energético se puede ver fácilmente cómo el hormigón es un material altamente capacitado para almacenar energía (como una batería) y, por lo tanto, soltarla lentamente. Esto permite aprovechar la inercia térmica de la estructura pudiendo activarla térmicamente.

Si en un ciclo de vida útil de un edificio de estructura de hormigón se incluye la contribución en la reducción de los costes de explotación por la menor energía requerida, se puede mejorar notablemente la etiqueta “verde” del hormigón. Según la siguiente imagen, es destacable la mejora que puede conseguir y el porcentaje en el que puede actuar:

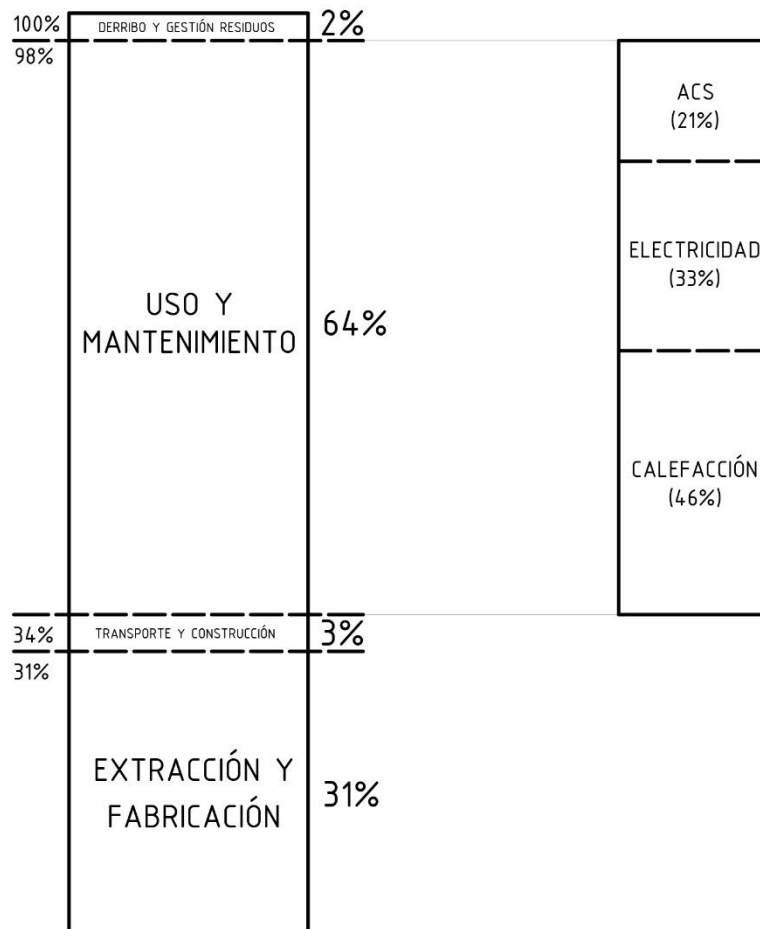


Figura 1: reparto de la energía de ciclo de vida de 50 años de un edificio¹

Está claro que puede mejorarse el 31% de la fabricación y extracción (mediante uso de áridos reciclados, por ejemplo) y además influir en el 46% de la calefacción (más bien debería catalogarse como climatización). Actualmente estamos desarrollando un proyecto investigación para determinar cuánto puede ayudar la colaboración del hormigón en la reducción de la huella de carbono en el análisis de ciclo de vida.

¹ Fuentes: CIES; ELISAVA, Universidad Pompeu Fabra, Ignasi Pérez Arnal; IDAE

2. Edificio ICTA-ICP en Ballaterra

El edificio ICTA (para abreviar) es en sí mismo un experimento o un proyecto de investigación puesto que no hay partida no que haya tenido un análisis pormenorizado y puesto en crisis para optimizar su resultado. Tuve la suerte de trabajar codo con codo con el equipo de arquitectura y sus colaboradores en 2011:

- Arquitectos: H arquitectes y dataAE
- Constructibilidad: Coque Claret y Dani Calatayud
- Sostenibilidad: Societat Orgànica
- Instalaciones: Oriol Vidal Enginyers
- Arquitectura Técnica: Eulàlia Aran

Los objetivos que ha perseguido su diseño son:

- Edificio nZEB (near zero energy building) o consumo cero
- Edificio nZIB (near zero impact building)
- Edificio de coste reducido

Las estrategias seguidas para conseguir todos y cada uno de los objetivos han sido varias, pero entre ellas están las siguientes:

- Sistema de invernadero
- Estrategia de la cebolla
- *Sectorización de climatización*
- *Estructura activada térmicamente*
- *Sistemas prefabricados o pre industrializados*
- *Temperatura radiante*
- Alta iluminación natural difusa
- Ventilación natural (buoyancy ventilation)
- *Alto confort térmico y acústico*
- Automatización de funcionamiento (BMS)
- Sistemas desmontables
- Pozos canadienses
- Ciclo del agua

Las que se destacan en letra cursiva están directamente relacionadas con la estructura de hormigón.

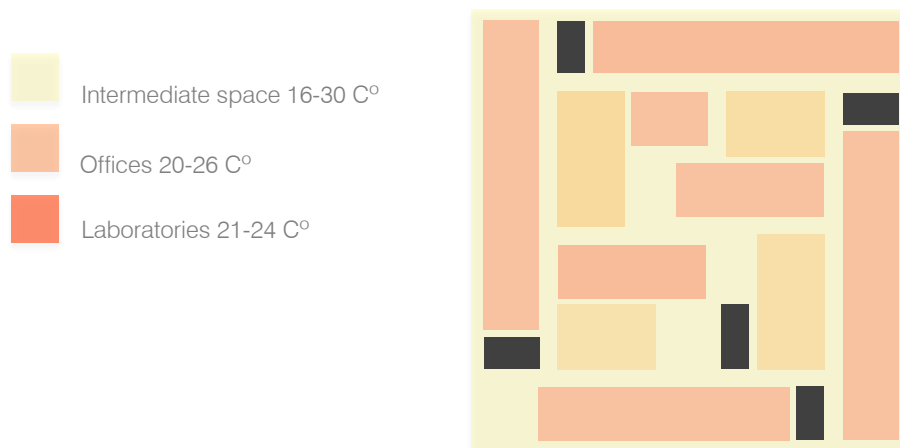


Figura 2: Sectorización de climatización

La figura anterior muestra en modo esquemático la planta del edificio. En ella se indican las zonas que están climatizadas y las que no, además se pueden observar, en color negro, los elementos de comunicación vertical o aseos y en amarillo intenso, los grandes patios interiores.

Con este concepto de planta arquitectónica se diseñaron varios tipos estructurales que permitiesen cumplir con los requisitos iniciales de proyecto:

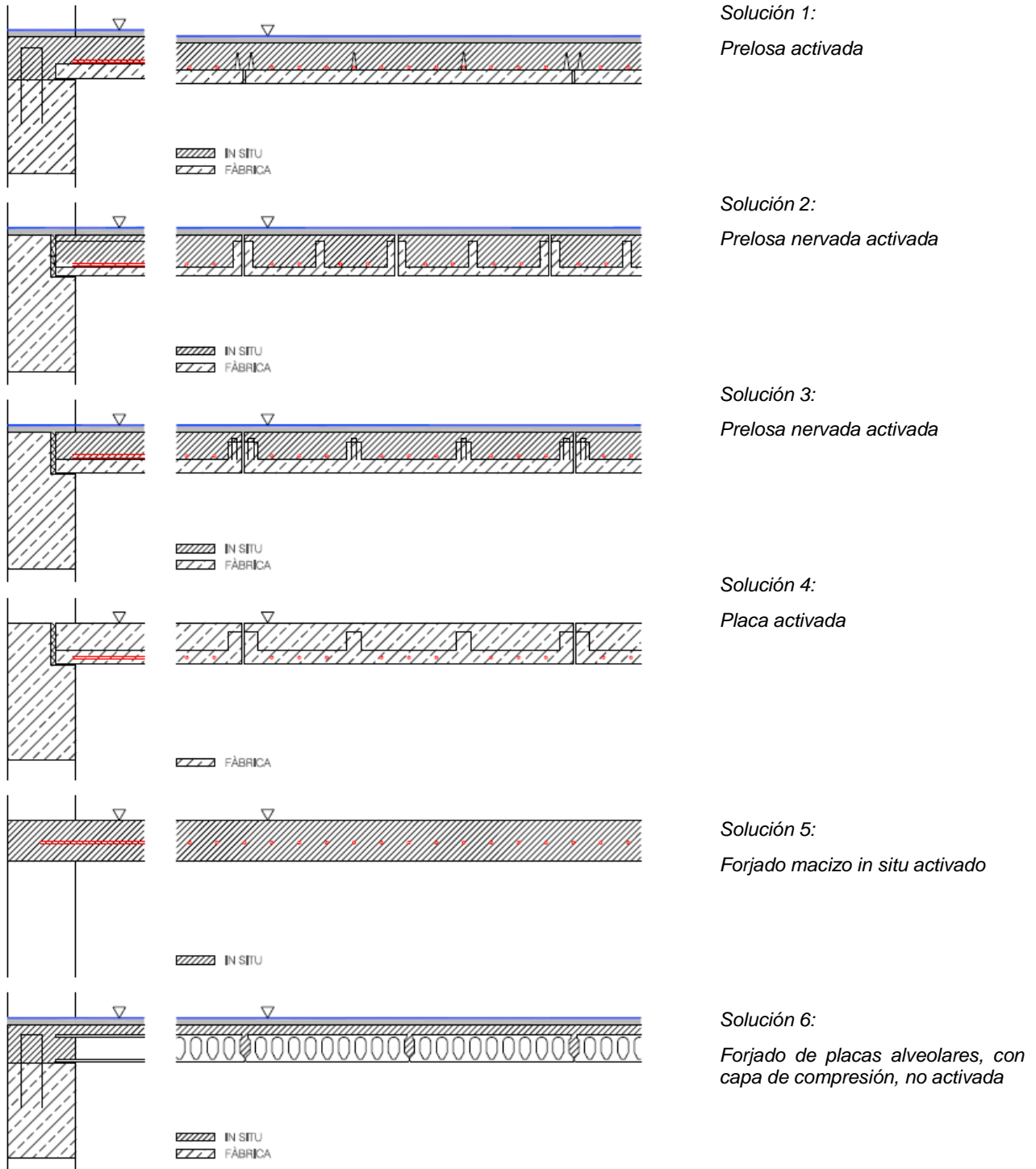


Figura 3: Tipologías estructurales estudiadas

El resultado del estudio de emisiones de CO₂ y energéticos, así como de coste de construcción y peso para cada tipología es el siguiente:

Total								
Soluciones	€	%	kg	%	MJ	%	kgCO2	%
1 - prelosa activada	1.062.767	15%	10.594.295	25%	13.203.369	27%	1.595.710	24%
2 - suberolita 1.10 activada	1.181.450	23%	9.825.750	20%	13.941.903	30%	1.412.727	14%
3 - suberolita 2.20 activada	1.244.151	27%	9.253.234	15%	13.486.448	28%	1.532.384	21%
4 - placa arumí activada	1.423.893	36%	8.969.635	12%	15.991.731	39%	1.588.681	24%
5 - in situ posttesat activat	908.186	0%	7.905.550	0%	9.699.107	0%	1.208.827	0%
6 - alveolar no activat	930.574	2%	9.350.700	15%	11.792.296	18%	1.390.934	13%
7 - alveolar sense comp. no activat	936.463	3%	8.340.796	5%	11.167.413	13%	1.289.897	6%

Figura 4: Datos característicos de cada tipología estructural

Está claro que la opción que mejores resultados obtiene en todos los indicadores escogidos es la solución realizada in situ de losa maciza postensada. Esta losa tiene 25cm de canto y unas luces máximas de 8m.

A partir de este punto el equipo de arquitectura se planteó la posibilidad de trabajar con estructuras in situ y por lo tanto, replantearse la posición de pilares y las luces entre ellos. Así que se planteó la posibilidad de trabajar con techos de mayor canto y con luces cercanas a los 13m. Esto responde a que los edificios más flexibles son mayormente reutilizables y por lo tanto, más sostenibles.

Dado que el canto del techo se incrementaba, también lo hacía la emisión de CO₂ y la energía precisa, así que se optó por una solución de losa maciza aligerada internamente mediante casetones de EPS (tipología muy utilizada por nuestra oficina históricamente). Con estos aligeramientos se podía disminuir notablemente el peso propio y por lo tanto la cantidad de hormigón. Por otro lado, el equipo de arquitectura se lamentaba de no poder utilizar estos espacios aligerados para poder ubicar las instalaciones del edificio (aire, agua, comunicaciones, etc).

La determinación de la emisión de CO₂ de los casetones de EPS fue clave para repensar el sistema de aligeramiento y pasar a tubos vacíos. La emisión de CO₂ del casetón de EPS era equivalente al hormigón ocupado; por el contrario, el sistema de tubos vacíos, no aligeraba del mismo modo, pero sí que permitía reducir notablemente las emisiones de CO₂ totales de la tipología.

De las primeras propuestas del nuevo tipo estructural (ver figuras 5 y 6) se pasó a la determinación del espesor total, la ubicación de las jácnas postensadas y definición de la sección constructiva. Se realizó un estudio del trabajo de la tipología que permitiese evaluar las tracciones entre los aligeramientos y cómo se distribuían las tensiones principales (ver figura 7). Cabe destacar que aunque los aligeramientos reducen la masa total del forjado, afectan poco a la capacidad térmica total.

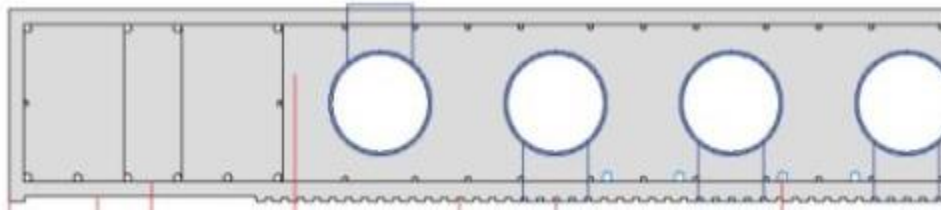


Figura 5: Sección estructural



Figura 6: Planta P1 de Arquitectura versus encaje de estructura

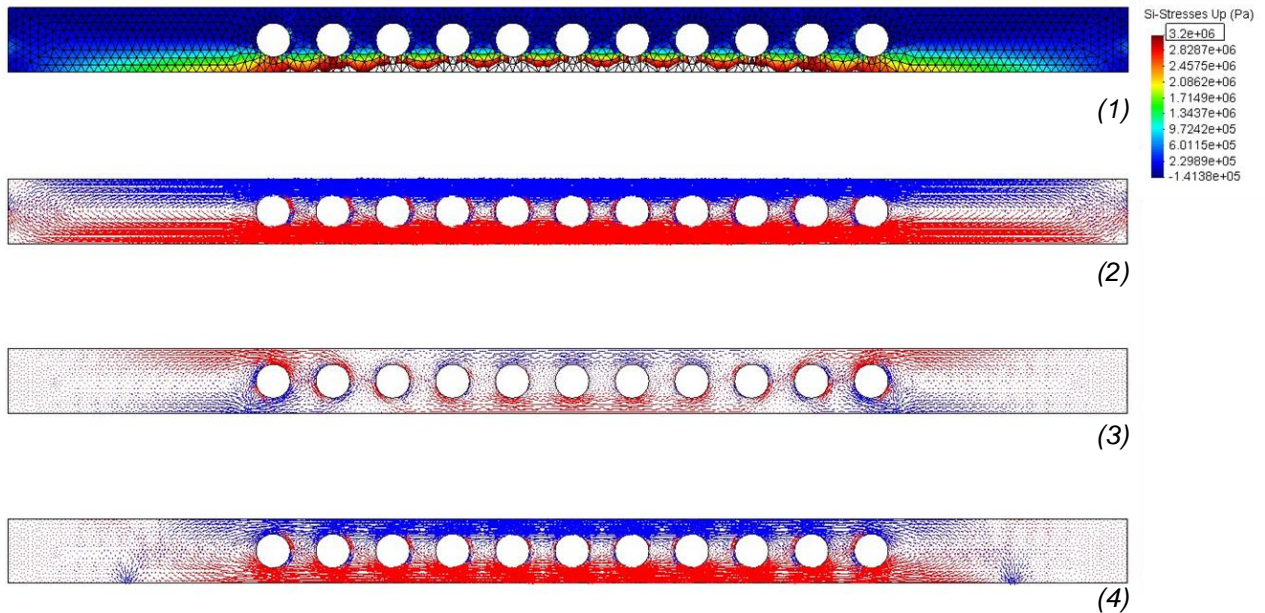


Figura 7: Análisis resistente de la sección estructural aligerada, en una sección transversal del forjado. (1) Análisis de tracciones y compresiones, (2) a (4) Análisis de las tensiones principales en función de la posición de los apoyos en la viga; (2) apoyo en los extremos de la viga, (3) apoyo en el extremo interior de los laterales macizos, quedando éstos en voladizo (4) apoyo en el punto medio de los laterales macizos

Las conclusiones del análisis realizado permitió modelar la estructura como si de placas macizas bidireccionales se tratara aunque considerando distintos módulos para cada dirección emulando el comportamiento real de la sección, además de tener en cuenta las zonas de las jácenas planas postensadas. Las cuantías de hormigón no se ven alteradas por los cambios térmicos introducidos puesto que el gradiente de temperaturas es muy pequeño.

Las plantas de estructura finales son las que se exponen a continuación, en las que se observa el trabajo estructural diferenciando las vigas postensadas del resto de la losa:

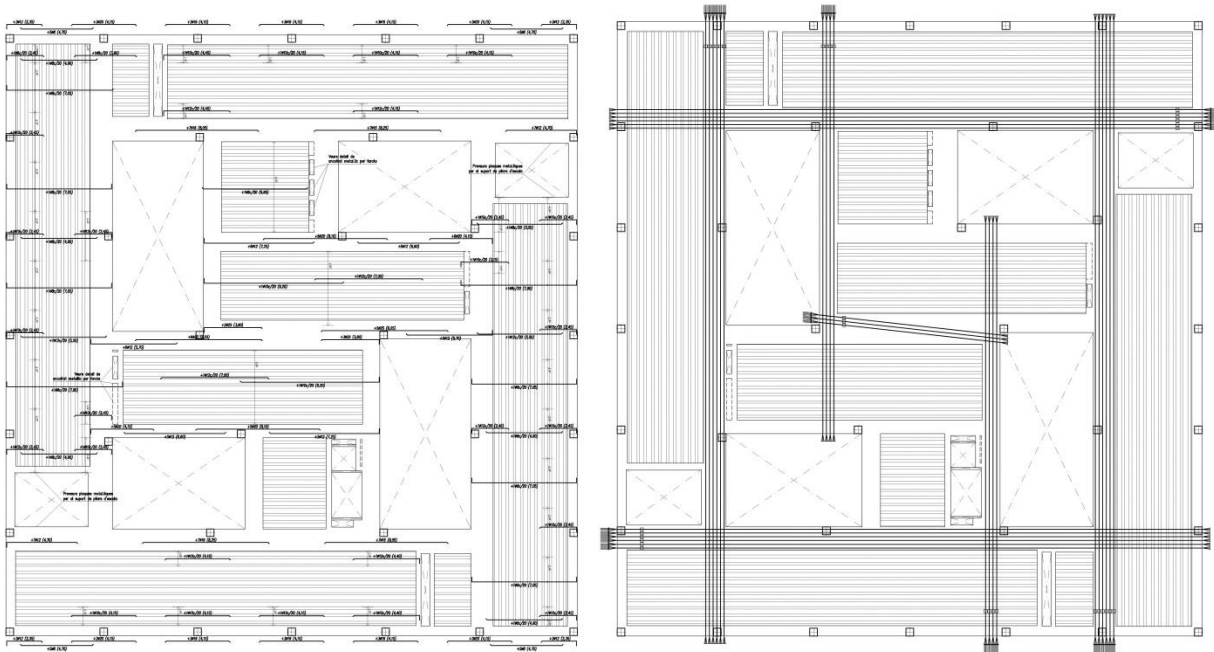


Figura 8: Plantas de estructura: armado longitudinal y jácenas postensadas

En las imágenes de la construcción se aprecian todos los aspectos anteriormente relacionados. Cabe destacar que el encofrado inferior está diseñado para que absorba la reverberación acústica que tendría el techo de hormigón en caso de ser liso y además incrementa la superficie de radiación en aproximadamente un 50%.



Figura 9: Planta en ejecución antes de ser hormigonada



Figura 10: Detalles varios de los elementos de la sección de la losa

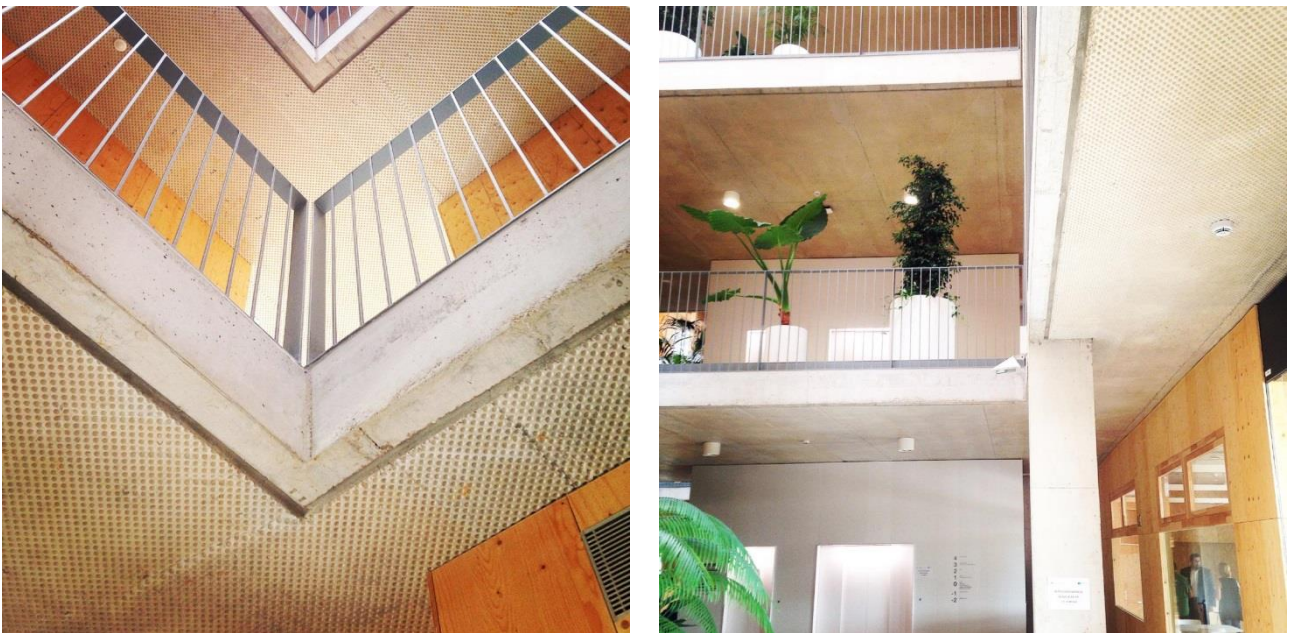


Figura 11: Imágenes del interior mostrando el techo de hormigón visto

2.1. Conclusiones. Estructura Edificio ICTA

La estructura del edificio ICTA logra alcanzar unos objetivos más allá de los establecidos inicialmente, con lo que se consigue superar algo que parecía muy complejo y, lo que es mejor, generar un confort muy elevado para los usuarios. Obviamente, los logros alcanzados no provienen únicamente de la estructura, pero sí aporta una parte muy relevante.

Por último, cabe destacar que el coste de este tipo estructural no es muy elevado; es importante considerar que en su interior alberga muchos elementos y que en sí mismo permite ahorrar falso suelo, falso techo y sistemas de absorción acústica. El precio real del sistema alcanza los 130€/m² en comparación con la losa de 25cm postensada con luces menores de 93€/m². De todos modos, lo más destacable es que el porcentaje final de la obra civil del proyecto es mucho más elevado que de costumbre, principalmente por su alto protagonismo y por la menor exigencia a las instalaciones. El edificio se construyó con un ratio de 1.000€/m²:

- Movimiento de Tierras, Cimentación y Estructura: 23,90%
- Instalaciones de electricidad, climatización, telecom, etc: 35,58%

3. Edificio Torre Nobelia, Kigali en Rwanda

El proyecto de la Torre Nobelia da una vuelta de tuerca más a la tipología investigada para el ICTA. El equipo de arquitectura de Carlos Arroyo hizo un trabajo excelente asumiendo esta tipología para hacer real lo que ellos se habían ya imaginado que podría funcionar.

Los objetivos para la Torre Nobelia son muy parecidos a los del proyecto del ICTA, pero se incluye uno que determina notablemente el devenir del proyecto: **eliminar el aire acondicionado**.

Este objetivo es muy ambicioso, pero el clima de la ciudad de Kigali, por su latitud (cercano al ecuador) y altitud (1.500m sobre el mar), ayuda a que sea posible. La latitud permite definir perfectamente el comportamiento norte-sur y este-oeste y establecer protecciones sin que existan diferencias estacionales. La altitud favorece lo que se denomina el *free cooling*, puesto que durante la noche se puede refrigerar el edificio sólo con las bajas temperaturas que se alcanzan en el exterior (cerca de 17°C) y durante el día éstas no son demasiado elevadas (menores de 30°C).

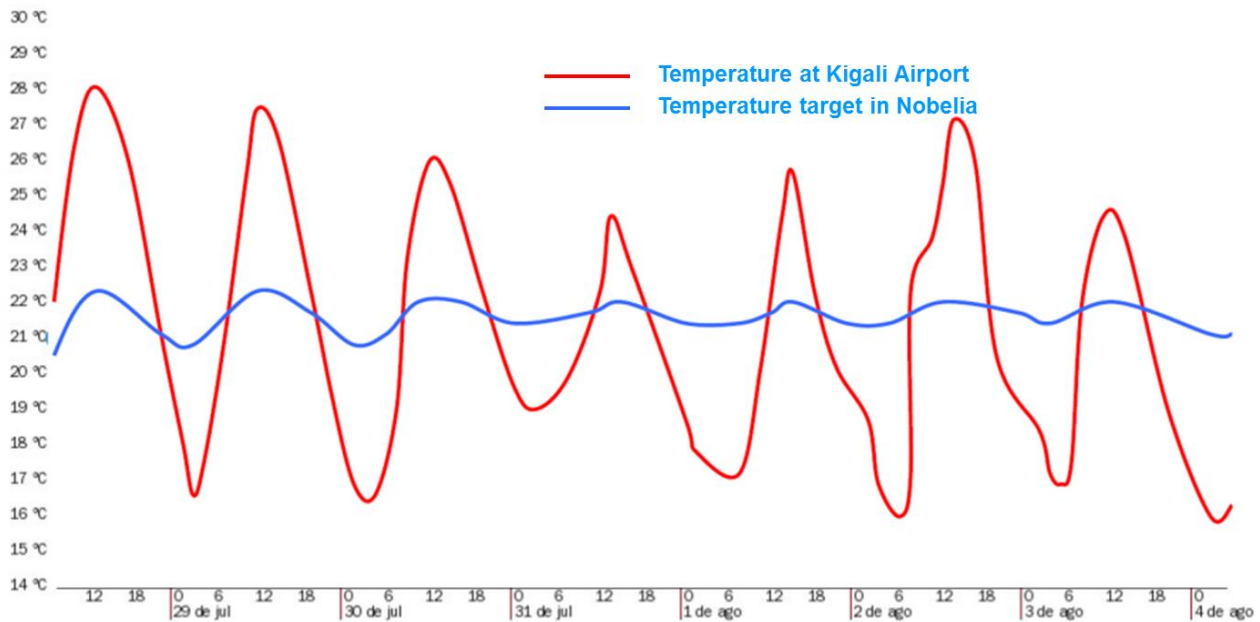


Figura 12: Temperaturas diurnas y nocturnas de finales de julio en Kigali

Con los anteriores condicionantes en mente, se decide proyectar un forjado que permite ser refrigerado durante la noche, almacenar en su masa térmica el frío del ambiente nocturno que será utilizado durante el día. Para verificar el funcionamiento del edificio y asegurar que se alcanzaran los resultados esperados se realizó una simulación energética de un año completo. Se trabajó con distintos escenarios hasta conseguir aquél que permitía obtener los mejores resultados y con sistemas asumibles por el proyecto:

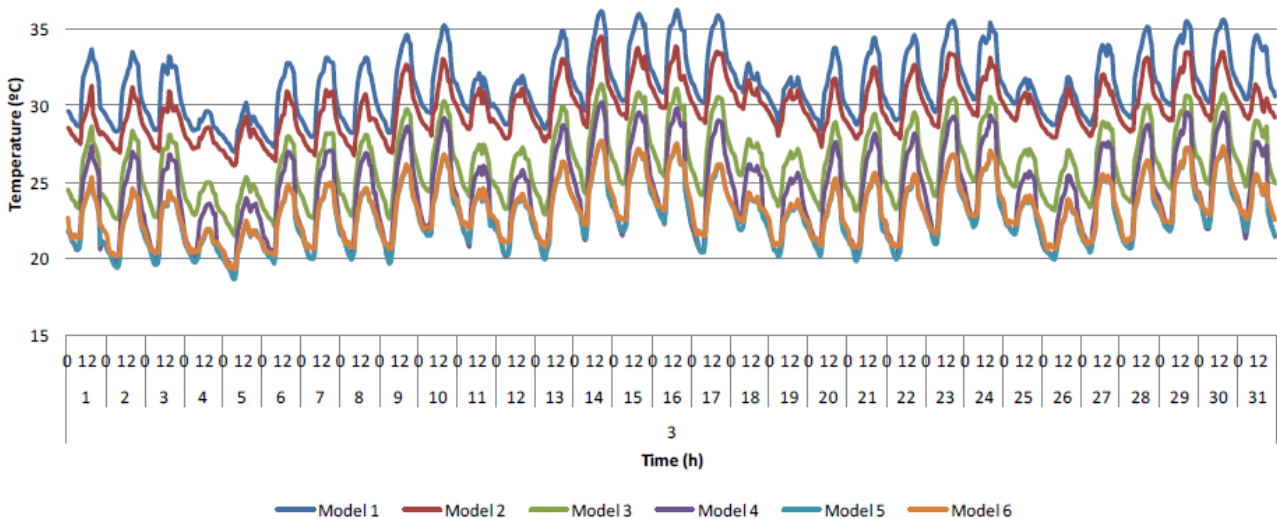


Figura 13: resultados de los distintos modelos energéticos realizados

Los modelos energéticos tienen que ver con varios aspectos, pero hay dos que están íntimamente ligados con la estructura:

- Consideración de la inercia térmica del forjado de hormigón
- Consideración de dos circuitos de ventilación

Los otros hacen referencia a los cerramientos, la sombra de las fachadas y los sistemas de deshumidificación. De nuevo, el papel que juega la estructura es muy relevante, puesto que es

capaz de refrigerar el edificio simplemente mediante la circulación por su interior del aire frío nocturno.

En la planta de la siguiente imagen se muestran los dos circuitos de aire definidos: en verde, los responsables de refrigerar; en azul, los responsables de renovar el aire interior de las oficinas. Su división es necesaria porque si se mezclan ambos aires en las épocas húmedas, la humedad interior impide alcanzar el confort requerido:

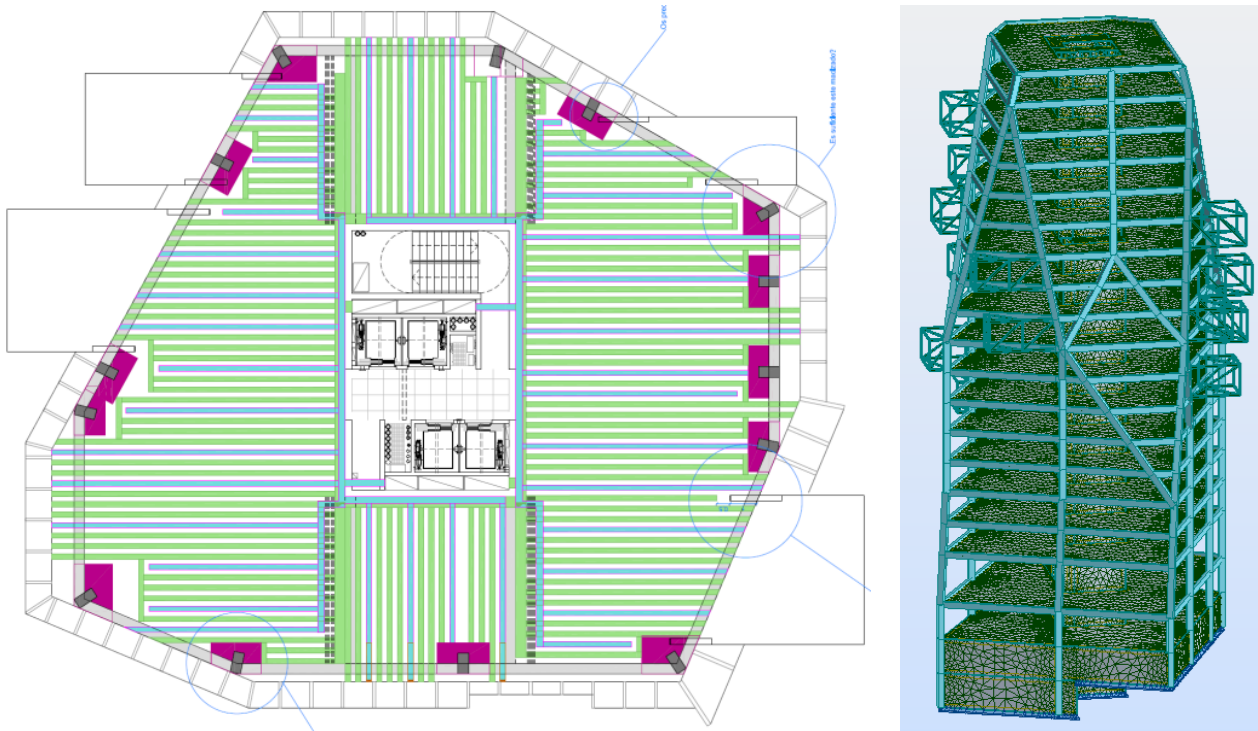


Figura 14: Planta tipo y modelo en MEF de la estructura de la Torre Nobelia

3.1. Conclusiones Torre Nobelia

El papel de la estructura en la termodinámica de la Torre Nobelia es altamente destacable, puesto que no existe otro sistema que asuma dicho papel. De nuevo se consigue un confort mediante un sistema radiante, sin ruidos de aire acondicionado en este caso y utilizando la estructura como una batería energética a la vez que un sistema inercial.

El coste de construcción no alcanza un 10% adicional a los edificios vecinos ($1.200\$/m^2$) pero en cambio se consigue un ahorro en la explotación unas 25 veces inferior. Esto nos lleva a pensar que muy probablemente se puede alcanzar una valoración pública sostenible para el hormigón mucho más merecida y que contribuya a su uso de un modo más respetuoso con el medioambiente.

Agradecimientos

Claudi Aguiló Aran, Roger Tudó, Albert Domingo, David Lorente, Albert Sagrera, Carlos Arroyo, Vanesa Cerezo, Alexander Krol, Ismael García Peñin, David Tuset, Daniel Vilavedra, Frederic Gil, Jordi Pérez, Aleksandar Ivancic, Lluís Escudero, Lluís Guixé, Araceli Guaita, Martín Ocampo, Oscar Cerecero, Sònia Martín, Núria Jallé, Gerant Bordón, Anna Mestre.