

Edificio “The Cloud” en los Jardines de Médongaule, en Corea del Sur

The Cloud at Les Jardins du Médongaule in South Korea

(메둔골 정원의 구름)

Antón García Abril^a, Débora Mesa Molina^b, José Manuel Simón-Talero Muñoz^c,
Alberto Fernández Álvarez^d, Ángel Carriazo Lara^e y Kim Kyungtae^f

^a Dr. Arquitecto. Ensamble Studio. Full professor MIT (Boston-Cambridge, MA). anton@ensemble-studio.com

^b Dr. Arquitecto. Ensamble Studio. Full professor ETH Zurich. debora@ensemble-studio.com

^c Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Torroja Ingeniería SLP. jsimontalero@torroja.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Torroja Ingeniería SLP. afernandez@torroja.es

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Torroja Ingeniería SLP. acarriazo@torroja.es

^f PhD Structural Mechanics. Chang Minwoo Structural Consultants. ktkim@minwoo210.com

RESUMEN

“The Cloud” es un edificio que se enmarca en la “Arquitectura de la Tierra”, movimiento arquitectónico que es a la Arquitectura, lo que el Expresionismo Abstracto es a la Pintura. La disrupción de la forma, de la textura, para crear una estructura que levita sobre el suelo permitiendo la entrada de luz y aire. Una secuencia de espacios que guían a los visitantes por una atmósfera inmersiva, mitad edificio, mitad paisaje.

ABSTRACT

“The Cloud” is a building that is part of the ‘Architecture of the Earth’, an architectural movement that is to Architecture, what Abstract Expressionism is to Painting. The disruption of form, of texture, to create a structure that levitates above the ground allowing light and air to enter. A sequence of spaces that guide visitors through an immersive atmosphere, half building, half landscape.

PALABRAS CLAVE: Hormigón proyectado, GFRC, Ingeniería Inversa, Arquitectura de la Tierra.

KEYWORDS: Shotcrete, GFRC, Reverse Engineering, Architecture of the Earth.

1. Los jardines

“Les Jardins du Médongaule” son unos jardines situados en Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do, Corea del Sur. 170.000 metros cuadrados de espacios verdes en conexión con la historia, la cultura, la filosofía y el arte.

El edificio “The Cloud”, nombrado así por el arquitecto autor del diseño, Antón García-Abril, de Ensamble Estudio, sirve de punto de entrada y centro de visitantes que acoge y apoya a los usuarios de los jardines durante su estancia.

“The Cloud” se funde con el paisaje y levita como una nube permitiendo que la luz y el aire penetren y creen una atmósfera envolvente.

La secuencia de espacios que guía a los visitantes desde la recepción, pasando por la galería, el restaurante y hasta los jardines, se entrelaza con una serie de masas de agua que enriquecen el espacio.



Figura 1. Vista general del edificio The Cloud, centro de visitantes de Les Jardins du Médongaule.



Figura 2. Recreación de la vista interior del edificio The Cloud, centro de visitantes de Les Jardins du Médongaule.

2. El edificio

The Cloud se extiende en una superficie aproximada de 50m x 50m. El edificio se resuelve con sótano, planta baja a nivel de calle, y cubierta.

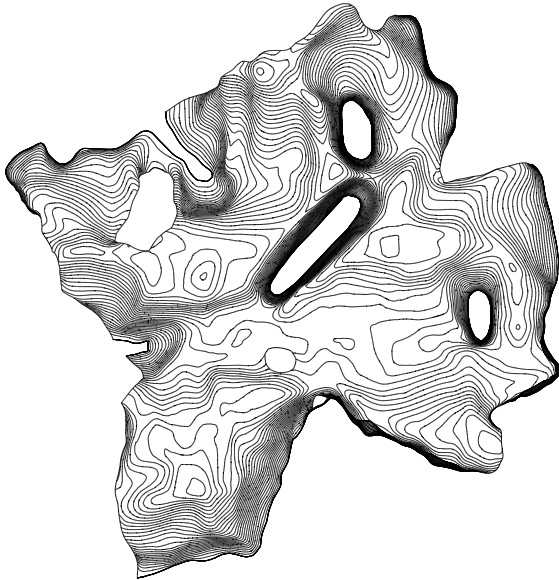


Figura 3. Curvas de nivel en la superficie que define la geometría de la cubierta, cada 20cm.

La geometría de la cubierta sigue formas irregulares, y el elemento estructural que abarca las zonas cubiertas, y soporta las cargas muertas, consiste en una losa de hormigón armado de 25 cm de espesor, puntualmente regruesada en determinadas localizaciones hasta 40 cm.

La planta baja consiste en una losa de hormigón armado de 20 cm de espesor, rigidizada por vigas de hormigón armado de 80 cm de espesor total. La anchura de las vigas varía entre 40 y 80 cm. La disposición de las vigas es una retícula irregular, gobernada en todos los casos por directrices curvas.

El sótano consta de tres niveles. El más bajo aloja instalaciones, mientras que el segundo y el tercero son espacios habitables. El grosor de la losa del nivel inferior es de 80 cm. El grosor de la losa en los otros dos niveles es de 50 cm, pero bajo los muros y pilares se aumenta hasta 80 cm.

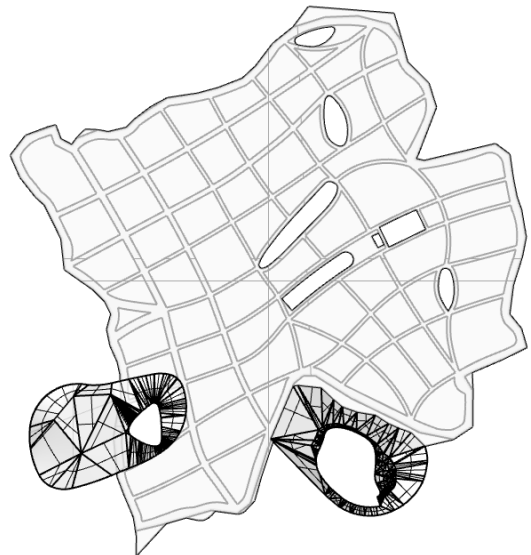


Figura 4. Geometría en planta de las vigas del forjado de planta baja.

Se disponen muros interiores que conectan la planta baja con los cimientos en la parte central del edificio, y columnas alrededor del perímetro del edificio. Los muros interiores son de hormigón armado y su grosor oscila entre 30 y 60 cm. Las columnas son de hormigón armado y su diámetro es de Ø40cm o Ø60cm.

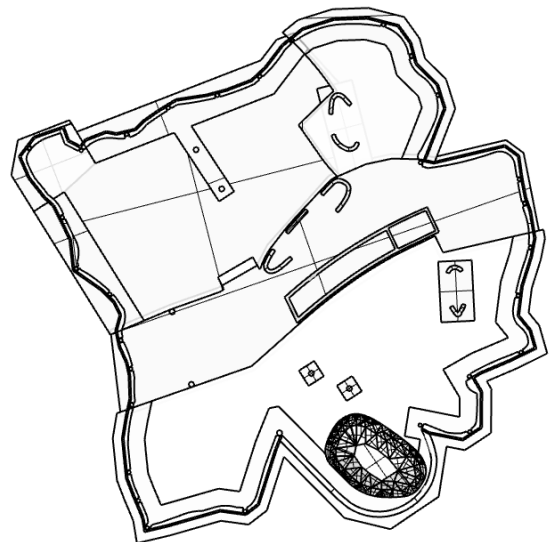


Figura 5. Geometría en planta de losas de cimentación y muros.

Los muros exteriores, que definen el perímetro del sótano, son de hormigón armado de 60 cm de espesor. El muro perimetral soporta el empuje horizontal ejercido por el relleno en toda su altura, porque la elevación superior del muro coincide con la elevación del suelo circundante.



Figura 6. Recreación de una sección del edificio The Cloud.



Figura 7. Vistas aéreas de la construcción del edificio “The Cloud”: Cimentaciones y encofrado cubierta

Toda la estructura enterrada se ve condicionada por los efectos de la subpresión ejercida por el agua intersticial del terreno.

No se definen juntas de dilatación en el conjunto tejado - planta baja. Existe una única junta de dilatación, que divide el nivel del sótano en dos, separando la cimentación del nivel II respecto a los niveles I y III.

Las columnas perimetrales que soportan el forjado de planta baja se alojan en nichos practicados en el muro perimetral.

El muro perimetral no se conecta con el forjado de planta baja.

3. Esquema estructural

La cubierta del edificio consiste en una estructura laminar de hormigón armado de forma irregular, que de forma simplificada podría asemejarse a una bóveda.

Es bien sabido que para que los arcos y las bóvedas alcancen un equilibrio horizontal de fuerzas en la parte inferior, se requiere una coacción horizontal. En el caso de este edificio, el forjado de la planta baja se utiliza como viga de atado, que une todos los contornos inferiores de la bóveda, evitando así que ésta pierda su forma.

Dada la irregularidad de la cubierta, el criterio de diseño consiste en evitar el uso de juntas de dilatación, por lo que el conjunto de cubierta y forjado está unido monolíticamente en todos los puntos de contacto entre ambos elementos.

Las dimensiones de este conjunto son mayores de lo que sería aconsejable para una construcción sin juntas, por lo que se considera apropiado permitir que la estructura se contraiga o dilate libremente, reduciendo al máximo cualquier coacción horizontal en el perímetro. Se controla, por tanto, la posible fisuración del

hormigón por la concurrencia de acciones térmicas o reológicas.

Por otro lado, el conjunto también debe ser capaz de resistir fuerzas horizontales directamente aplicadas sobre el edificio, tales como la acción sísmica o el viento.

Para resolver simultáneamente ambos condicionantes – las deformaciones impuestas, y las fuerzas exteriores aplicadas – se define un núcleo, formado por muros de hormigón, que transfiere la mayor parte de las fuerzas horizontales a los cimientos. Este núcleo se sitúa

lo más centrado posible en el edificio, y se aprovecha para alojar en su interior las escaleras que comunican planta baja y sótano, además de los ascensores.

El núcleo actúa, en adelante, como punto fijo frente a las acciones térmicas y reológicas. En el perímetro, el apoyo vertical necesario se resuelve con pilares de hormigón armado, que presentan una rigidez vertical importante, pero una rigidez horizontal reducida, que acompaña los corrimientos esperados en la estructura.

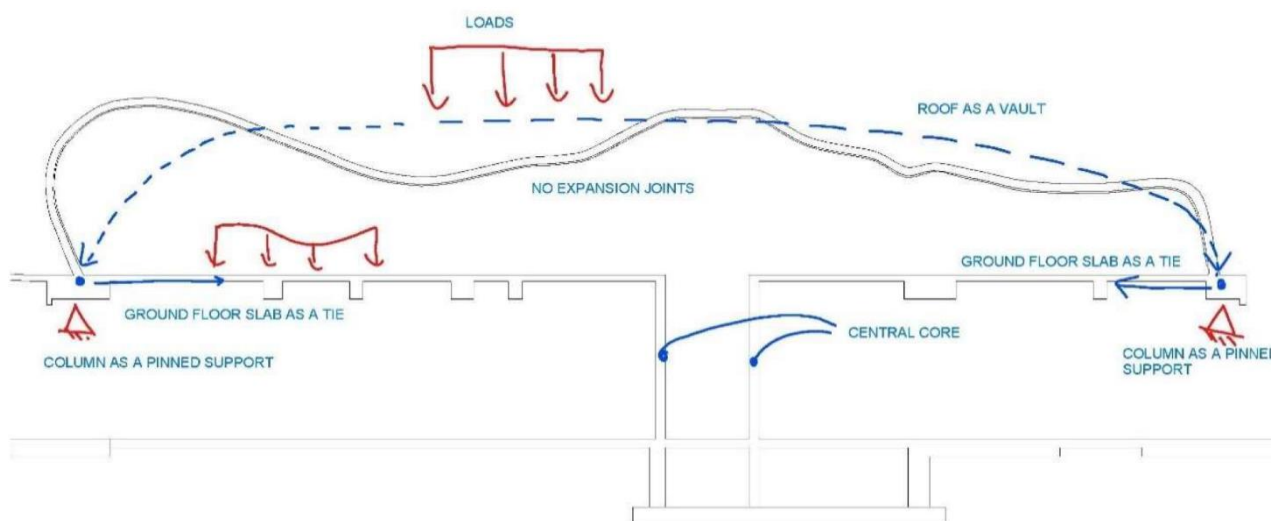


Figura 8. Esquema estructural del edificio.

4. Secuencia constructiva propuesta

La construcción del sótano, los muros y el primer piso son convencionales para elementos regulares de hormigón armado, aunque la geometría es compleja.

La construcción de la cubierta, en cambio, constituye una propuesta innovadora tanto por los materiales escogidos, como por la secuencia constructiva empleada. Durante la redacción del proyecto ejecutivo se propuso la siguiente secuencia:

Se instala en primer lugar un apuntalamiento provisional, que se extiende hasta el nivel de los cimientos, por debajo de la planta baja.

Sobre esta cimbra cuajada, la compleja geometría de la cubierta se define mediante un molde, fabricado en fibra de vidrio, ensamblando piezas de reducidas dimensiones, que son previamente alabeadas para conferir la forma deseada.

El molde de fibra de vidrio actúa como primer encofrado, que luego recibe una capa de GFRC (Glass fiber reinforced concrete) de unos 5 cm de espesor, que después de fraguar presenta cierta consistencia.

El hormigón estructural, que es la tercera capa, se vierte in situ mediante una técnica de hormigón proyectado (wet shotcrete), directamente sobre la capa de GFRC [1].

Ambas capas se vinculan entre sí con ganchos de acero previamente embebidos en la capa de GFRC.

La cubierta se remata colocando encima de la losa el aislamiento y una costra “orgánica” o cubierta vegetal, materializada con un relleno ligero sobre el que se planta vegetación no arbustiva.

Finalmente, se retiran tanto la cimbra como el molde, de modo que el intradós de la capa de GFRC queda como superficie visible, y la losa de hormigón armado de 25cm como elemento portante.



Figura 9. Secuencia constructiva propuesta.

5. Las texturas en el hormigón

Ensamble Estudio desarrolla, como parte de sus actividades ordinarias, un proyecto de investigación consistente en la constante exploración de las posibilidades estéticas del hormigón como material formáceo, directamente vertido sobre superficies irregulares, bien sean fondos de excavación [2] o moldes deliberadamente preparados a tal efecto.

En el caso del edificio The Cloud, la capa de GFRC proyectada sobre la fibra de vidrio, con elementos añadidos tales como gomas o dobleces del propio molde, que interrumpen la continuidad del paramento, consiguen un efecto estético al desmoldar de apariencia prácticamente textil, aun cuando el material empleado sea un conglomerante pétreo artificial, tal como el hormigón armado.



Figura 10. Prototipo de cubierta ejecutado previamente al inicio de la construcción del edificio. Texturas en el intradós del edificio The Cloud.

6. El proceso de creación de la cubierta

El diseño de la cubierta resulta, por lo complejo de su geometría y lo innovador de su proceso constructivo, el elemento de más interés de este edificio.

La creación de la geometría de la cubierta comienza por parte de los arquitectos a través de una experiencia personal, en la que interactúan directamente con el material, moldeándolo con sus propias manos.

El objeto moldeado repetidas veces, perfeccionado con la práctica, da paso al siguiente paso, el escaneado 3D.



Figura 11. Prototipo de edificio modelado a mano. Modelo original reducido del edificio The Cloud.

El escaneado captura la forma, geometría y dimensiones del objeto moldeado, y genera una representación digital tridimensional de este.

Escalando el modelo digital aproximadamente 200 veces, surge la geometría de la cubierta.

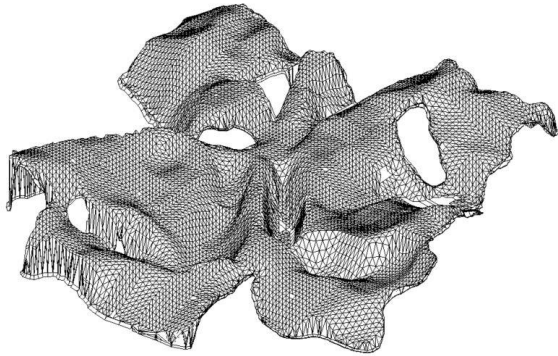


Figura 12. Modelo digital de la cubierta obtenido del escáner 3D.

La malla escaneada se regulariza, creando una malla refinada constituida por cuadrángulos uniformes y alineados. Para ello se reduce la densidad de la malla original, manteniendo la forma y los detalles. Se filtra el ruido, y se toman en consideración algunas curvas guía o aristas, que influyen en la orientación de los cuadrángulos generados.

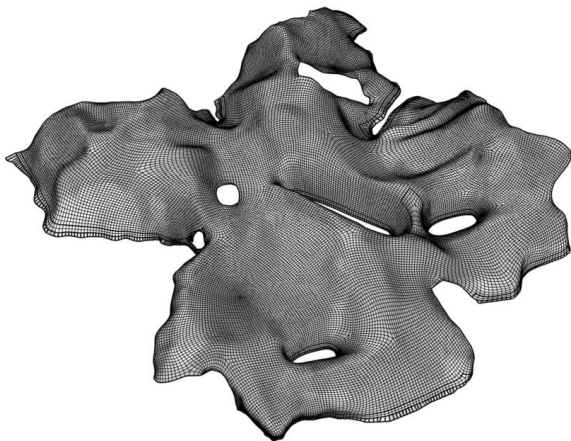


Figura 13. Malla refinada para la cubierta.

El proceso matemático empleado para el refinamiento de la malla incluye la minimización de la distorsión de ángulos, que persigue el objetivo de generar cuadrángulos lo más rectangulares posibles. Se minimiza la función:

$$D(Q) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{l_{\max,i}}{l_{\min,i}} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

donde $l_{\max,i}$ y $l_{\min,i}$ son las longitudes máximas y mínimas de los lados del cuadrángulo Q_i .

Para reducir ruido y mejorar la uniformidad de la malla, se aplica suavizado Laplaciano a los vértices:

$$v_i^{\text{nuevo}} = \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} v_j \quad (2)$$

Donde N_i es el conjunto de vecinos del vértice v_i . La idea básica es reposicionar cada vértice v_i como promedio de sus vecinos inmediatos N_i .

La malla refinada se exporta a un software de cálculo para la aplicación de un análisis según el Método de Elementos Finitos.

Previamente a la realización del análisis, se enriquece la definición de la cubierta, añadiendo al modelo de cálculo el resto de los elementos correspondientes a la subestructura, con el fin de realizar un análisis estructural global del edificio completo.

En el análisis estructural efectuado se combinan las deformaciones impuestas y las fuerzas exteriores aplicadas sobre la subestructura, y se evalúa la interacción con el terreno de cimentación mediante el empleo de muelles elásticos (apoyos tipo bedding).

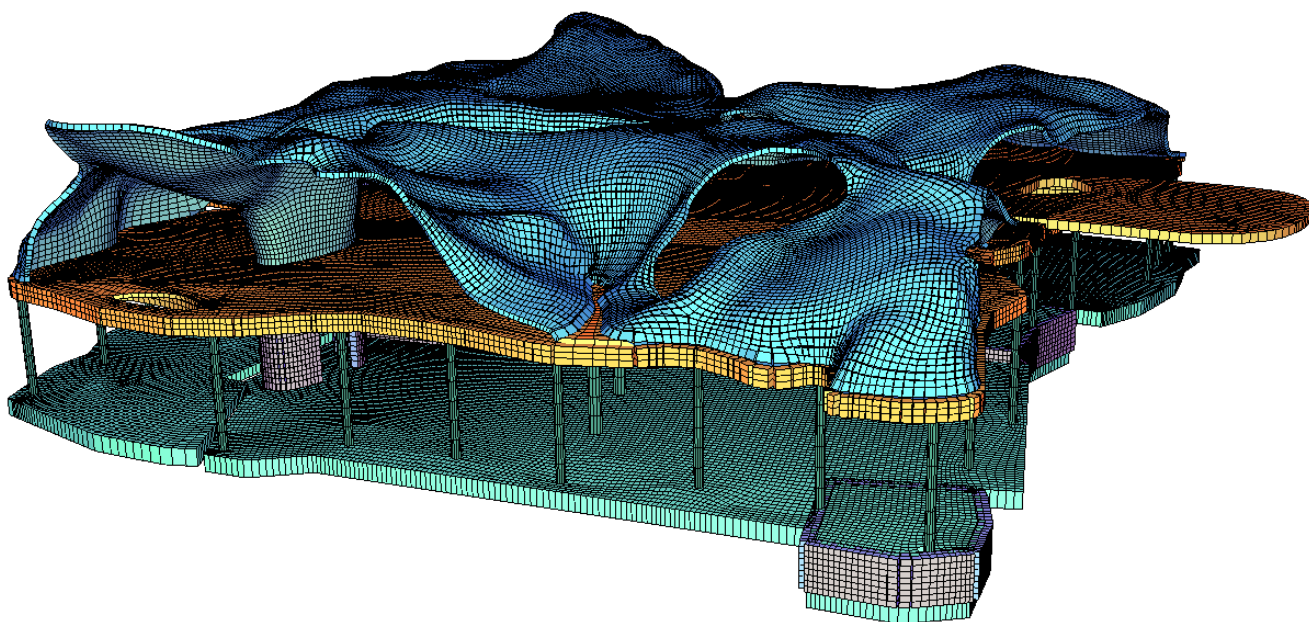


Figura 14. Modelo de cálculo desarrollado para el análisis estructural del edificio The Cloud.

7. Consideraciones acerca de las cargas aplicadas

El edificio se ubica en las estribaciones de los Montes Taebaek (en coreano: 태백산맥), que son una cadena montañosa que se extiende de norte a sur, al este de la península de Corea. La proximidad a esta cadena montañosa se relaciona con la presencia de nevadas suaves en la época invernal, seguidas de heladas.

Se considera en el diseño la tendencia de la cubierta a la acreción de nieve en las partes bajas [3]. Se comprueba la armadura en la losa para esta hipótesis en particular. Se propone el empleo de cables calefactores como dispositivo de seguridad adicional frente a episodios de fuertes nevadas.

El clima coreano es monzónico desde el punto de vista de las precipitaciones. Se desarrolla un modelo hidráulico de la cubierta, evaluando la escorrentía en las áreas más planas, así como la capacidad de desagüe necesaria para evacuar la precipitación que de manera natural se retiene en el interior del edificio, cayendo en los patios interiores.

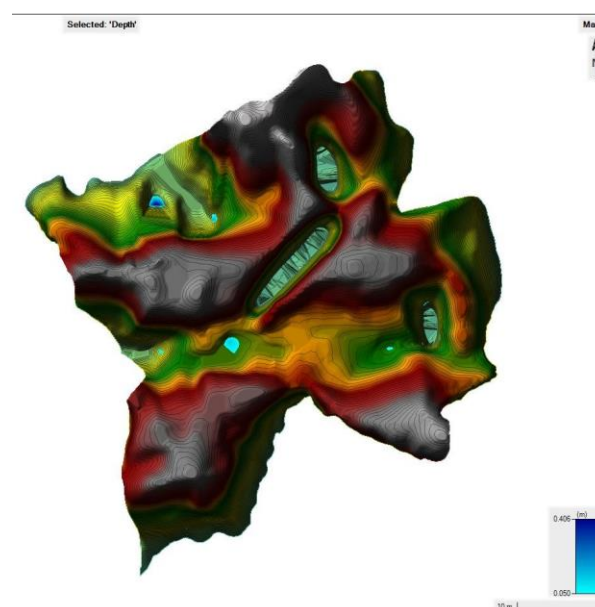


Figura 15. Modelo hidráulico de la cubierta del edificio The Cloud.

8. Cálculo de la armadura de refuerzo necesaria en la cubierta

Del análisis efectuado mediante el Modelo de Elementos Finitos se obtiene la distribución de fuerzas internas en los elementos placa que representan la cubierta.

Cada elemento perteneciente a la malla se subdivide en tres paneles según el espesor, dos exteriores y uno central [4].

Los paneles exteriores son tipo membrana. Elementos bidimensionales que trabajan únicamente en su plano.

Los paneles interiores son tipo placa, respondiendo a cargas perpendiculares a su superficie.

Los esfuerzos de flexión se descomponen en esfuerzos axiales aplicados en los paneles exteriores tipo membrana (n_{xx} , n_{yy} , n_{xy}), tomando como brazo mecánico la distancia entre ambos paneles. Si a los esfuerzos de flexión en la placa interior (m_{xx} , m_{yy} , m_{xy}) se le añaden los esfuerzos axiales (n_{xx} , n_{yy} , n_{xy} , repartidos equitativamente entre ambos paneles exteriores), se obtienen los esfuerzos totales de cálculo N_x , N_y , N_{xy} en el elemento de la cubierta.

$$N_x = \frac{n_{xx}}{2} + \frac{m_{xx}}{z} \quad (3)$$

$$N_y = \frac{n_{yy}}{2} + \frac{m_{yy}}{z} \quad (4)$$

$$N_{xy} = \frac{n_{xy}}{2} + \frac{m_{xy}}{z} \quad (5)$$

Las fuerzas aplicadas en los paneles N_x , N_y , N_z se transforman a continuación en las fuerzas principales N_I y N_{II} .

$$N_I = \frac{N_x + N_y}{2} + \frac{\sqrt{(N_y - N_x)^2 + 4 \cdot N_{xy}^2}}{2} \quad (6)$$

$$N_{II} = \frac{N_x + N_y}{2} - \frac{\sqrt{(N_y - N_x)^2 + 4 \cdot N_{xy}^2}}{2} \quad (7)$$

$$\tan 2\varphi_0 = 2 \cdot \frac{N_{xy}}{N_x - N_y} \quad (8)$$

El armado necesario se obtiene según [5]:

$$Z_x = N_I + \frac{N_I - N_{II}}{2} \cdot \sin 2\alpha \cdot (1 - \tan \alpha) \quad (9)$$

$$a_s = \frac{Z_x}{\sigma_{sd}} \quad (10)$$

La definición de las armaduras es tridimensional. Se generan modelos espaciales para definir las áreas a cubrir con armadura base, que sigan un patrón lo más rectangular posible, y áreas en las que se disponen refuerzos locales.

Dada la complejidad de la geometría, se opta por definir cuantías de armadura iguales en ambas direcciones ortogonales, de manera que independientemente de la dirección local que tomen los esfuerzos principales en un elemento particular, la cuantía de armadura disponible sea siempre la misma.

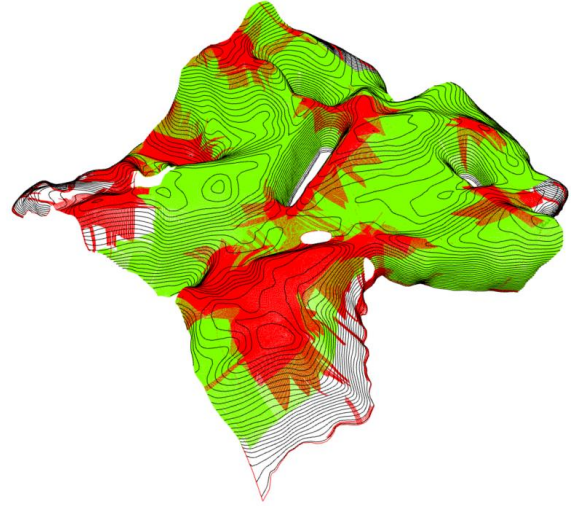


Figura 16. Áreas donde se requiere armadura de refuerzo en la cara superior en la cubierta The Cloud.

9. Consideraciones acerca del empleo de hormigón proyectado

Se consideran unas características mecánicas particulares en el hormigón de la cubierta, dado que se trata de hormigón proyectado.

Se considera un grado de porosidad entre el 8% y el 18%, y un rebote entre el 5% y el 15%. Se ajusta consecuentemente el módulo de deformación longitudinal a emplear en los cálculos bajo estos parámetros.

$$E_{cmp,j} = \gamma_p \cdot \gamma_r \cdot 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{cmp,j}} \quad (11)$$

Respecto a la resistencia característica del hormigón a tracción, se pondera en función de la densidad final esperada en la masa de hormigón.

$$\eta_p = 0.4 + 0.6 \cdot \frac{\rho_p}{2.400} \quad (12)$$

Se considera una resistencia a cortante reducida, de acuerdo con la normativa considerada. [6]

Respecto a la granulometría del árido a emplear en el hormigón proyectado, se utilizan los valores límites especificados según ACI [2] para “fine-aggregate” y “coarse-aggregate”, y se comparan con los indicados en el Código estructural [6].

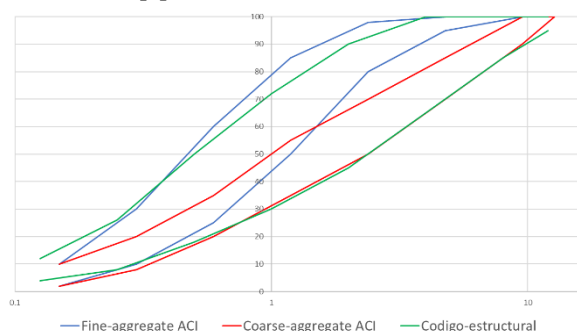


Figura 17. Porcentaje de finos según abertura de tamiz en áridos para hormigón proyectado, según ACI, comparado con los valores límites establecidos en Código Estructural.

Conclusiones

Ejecutar una construcción de naturaleza única como “el Cloud” ha supuesto un desafío de primer orden en cada etapa del proceso: Desde la propia definición geométrica de la obra, realización de los modelos de cálculo, definición e instalación de los encofrados y armaduras o la aplicación del hormigón ha sido un verdadero reto técnico por el carácter singular de la obra.

Agradecimientos

La adquisición de los terrenos donde se asientan los jardines, así como la construcción del edificio, son el resultado de una iniciativa completamente privada por parte de un único particular, que prefiere permanecer en el anonimato.

El proyecto Medongaule se concibió por primera vez en 2012, y el propietario empezó a comprar terrenos en 2016. Se espera su finalización en el año 2025.

“Tengo la convicción de que, si los visitantes pueden apreciar y celebrar juntos un jardín histórico de esta escala, esto sólo supondrá un salto para las artes y para la sociedad en su conjunto”.

Vaya para él nuestro agradecimiento.

Referencias

- [1] American Concrete Institute (2014) *Specification for shotcrete ACI 506.2-13*, ACI Committee 506.
- [2] Ensamble Studio. (2020) *Structures and experiences*, Monografía AV 230.
- [3] Architectural Institute of Korea (2003) *Korean Building Code*, KBC.
- [4] Ulrich P. Schmitz (1999) *Biegebemessung nach der neuen E-DIN 1045-1*, Bauinformatik JOURNAL pp. 49-51.
- [5] EN 1992-1-1 (2004) *Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings* or *ean Building Code*, CEN.
- [6] Gobierno de España (2021) *Código Estructural*, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.