



ARQ

ISSN: 0716-0852

revista.arq@gmail.com

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

RADIC, SMILJAN; MEDRANO, GABRIELA; SERPELL, RICARDO
Torre Antena Santiago, cerro San Cristóbal, Santiago, Chile: Smiljan Radic, Gabriela Medrano,
Ricardo Serpell, 2014
ARQ, núm. 87, agosto-, 2014, pp. 34-39
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37532094005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

TORRE ANTENA SANTIAGO

CERRO SAN CRISTÓBAL, SANTIAGO, CHILE

SMILJAN RADIC, GABRIELA MEDRANO,
RICARDO SERPELL

2014

TORRE V/S ANTENA, SANTIAGO 2014

Proponemos construir un objeto híbrido en la punta del cerro, para que la punta del cerro siga siendo cima y no sima (fig. 1). Su apariencia se moverá entre una torre y una antena. Entre un cuerpo estable y reconocible, y otro que se desarma transparentando una apariencia inestable e inquieta. Este híbrido es más un fantasma que una columna; es el esqueleto del fantasma de una columna.

Conceptualmente su forma no propone ninguna novedad para el futuro, como tampoco su figura aparece clara y aprehensible de una sola vez en el presente. Su lectura es nítidamente confusa. Proviene de la recuperación de ciertas arquitecturas pasadas que nos interesan: la inestabilidad formal de las estructuras *tensegrity* de Buckminster Fuller o de las esculturas de Kenneth Snelson, algunos ejercicios constructivistas de Vukobratovic, las espirales poligonales desplegadas en el espacio de Aleksandr Ródchenko, la manualidad de las maquetas en las torres de Constant Nieuwenhuys, o el ambiente del Aviario de Cedric Price en Londres. Todas ellas forman parte de la memoria real de este objeto.

Creemos que gracias a esta mirada hacia atrás –a esta aparente repetición– la forma globalizada y difusa de este objeto urbano no se perderá en el consumo de un rápido espectáculo. Tampoco competirá con los íconos formales construidos en otras ciudades, algo deseable para una ciudad de Santiago tratando de instalar su imaginario en el mundo.

La presencia de una torre de gran altura sobre Santiago es modulada por su estructura, reducida a su más ligera expresión. Ganadora de un concurso público de arquitectura, aparece como una sombra apenas visible sobre una cumbre del Parque Metropolitano.

PALABRAS CLAVE: ARQUITECTURA – CHILE, TENSEGRITY, INTEGRIDAD TENSIONAL, ESTRUCTURA TENSADA.

A structure reduced to its lightest expression modulates the presence of a high tower above the city. Being winner of a public architectural competition, it appears as a faint shadow on a summit of the Metropolitan Park in Santiago.

KEYWORDS: ARCHITECTURE – CHILE, TENSEGRITY, TENSIONAL INTEGRITY, TENSILE STRUCTURE.

ALREDEDORES

Por la escala y tamaño del proyecto propuesto, las lecturas obligadas para la revisión de su eficacia urbana deben ser hechas desde una distancia muy próxima y otra muy lejana. Todas las medidas intermedias se desprenden de las anteriores, como soluciones resultantes. Nuestra antena siempre se leerá como un cuerpo transparente fuera de línea, sutilmente cambiante gracias a sus módulos estructurales en rotación, pero ordenados formalmente a través de la modulación estándar de sus componentes y de los anillos técnicos que flotan desde sus vértices formando una columna virtual en toda su altura.

De noche, cada uno de los elementos que la construyen será distinguido con una iluminación cambiante día a día, en periodos semanales en su densidad y color. Esto permitirá medir el tiempo y la rutina semanal, de la misma manera como las antiguas torres de pueblo y sus campanas ritmaban los días (figs. 2 y 3).

Bajo la antena, el espacio público retoma la historia de urbanización del cerro San Cristóbal marcada por la ocupación de sus cimas: el Santuario de la Virgen en 1908, la piscina Tupahue en 1966, la piscina Antilén en 1976, y más tarde en 2009, el anfiteatro de Neruda (fig. 4). La terraza pública, el espejo de agua negra y sus servicios (cafetería, tienda, boletería, baños públicos) conforman el espacio público como un islote sólido de pesados muros que corona la topografía. De



FIG 1
Torre v/s antena.
Croquis de Smiljan Radic.



FIGS 2 Y 3
Iluminación nocturna: variaciones cíclicas.

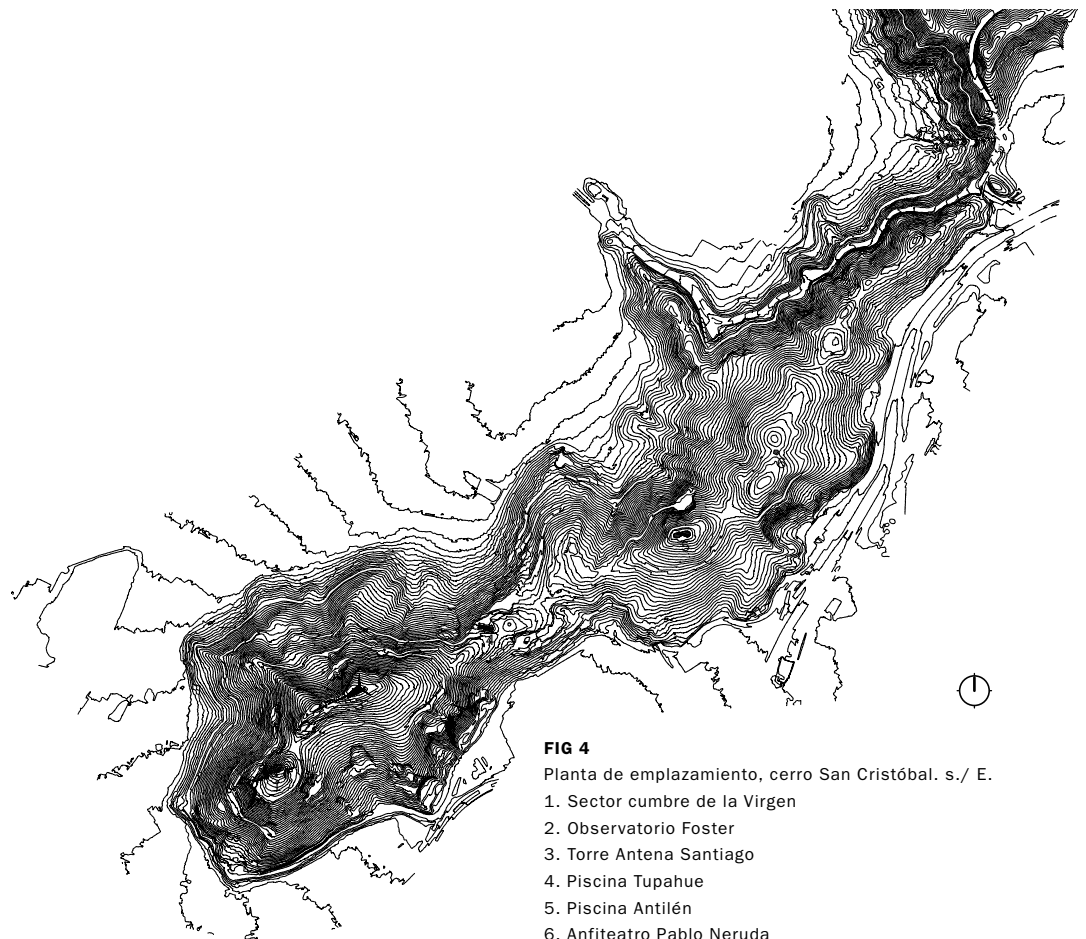


FIG 4
Planta de emplazamiento, cerro San Cristóbal. s./ E.
1. Sector cumbre de la Virgen
2. Observatorio Foster
3. Torre Antena Santiago
4. Piscina Tupahue
5. Piscina Antilén
6. Anfiteatro Pablo Neruda

SMILJAN RADIC | ARQUITECTO, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE, SANTIAGO, CHILE.

CV en página 72.

GABRIELA MEDRANO | PROFESORA, UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO, SANTIAGO, CHILE.

Arquitecta, 2007 y Magíster en Arquitectura, Universidad Andrés Bello, 2009; Diplomada en Arquitectura Sustentable, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009. En 2010, junto a Arq Design + Más Fernández, recibió el primer lugar del concurso para una sede para el colegio Alianza Francesa en Santiago; en 2011 obtuvo el primer premio del concurso Teatro Regional Bío Bío junto a Smiljan Radic y Eduardo Castillo.

Desde 2013 practica la docencia en la Universidad Diego Portales en Santiago, que combina con su labor académica en la Universidad Andrés Bello.

RICARDO SERPELL | PROFESOR ASISTENTE, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE, SANTIAGO, CHILE.

Arquitecto, 2000; Magíster en Ingeniería, 2011 y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, 2014, Pontificia Universidad Católica de Chile. Ha participado en los concursos Barrio Cívico de Concepción junto a Smiljan Radic y Eduardo Castillo (2000, primer lugar), Edificio TVN en el equipo de Gubbins Arquitectos (1998, primer lugar) y Edificio Consistorial de Vitacura junto a Smiljan Radic, Cecilia Puga y Gonzalo Puga (1998, primera mención). Actualmente es profesor en la Pontificia Universidad Católica de Chile.

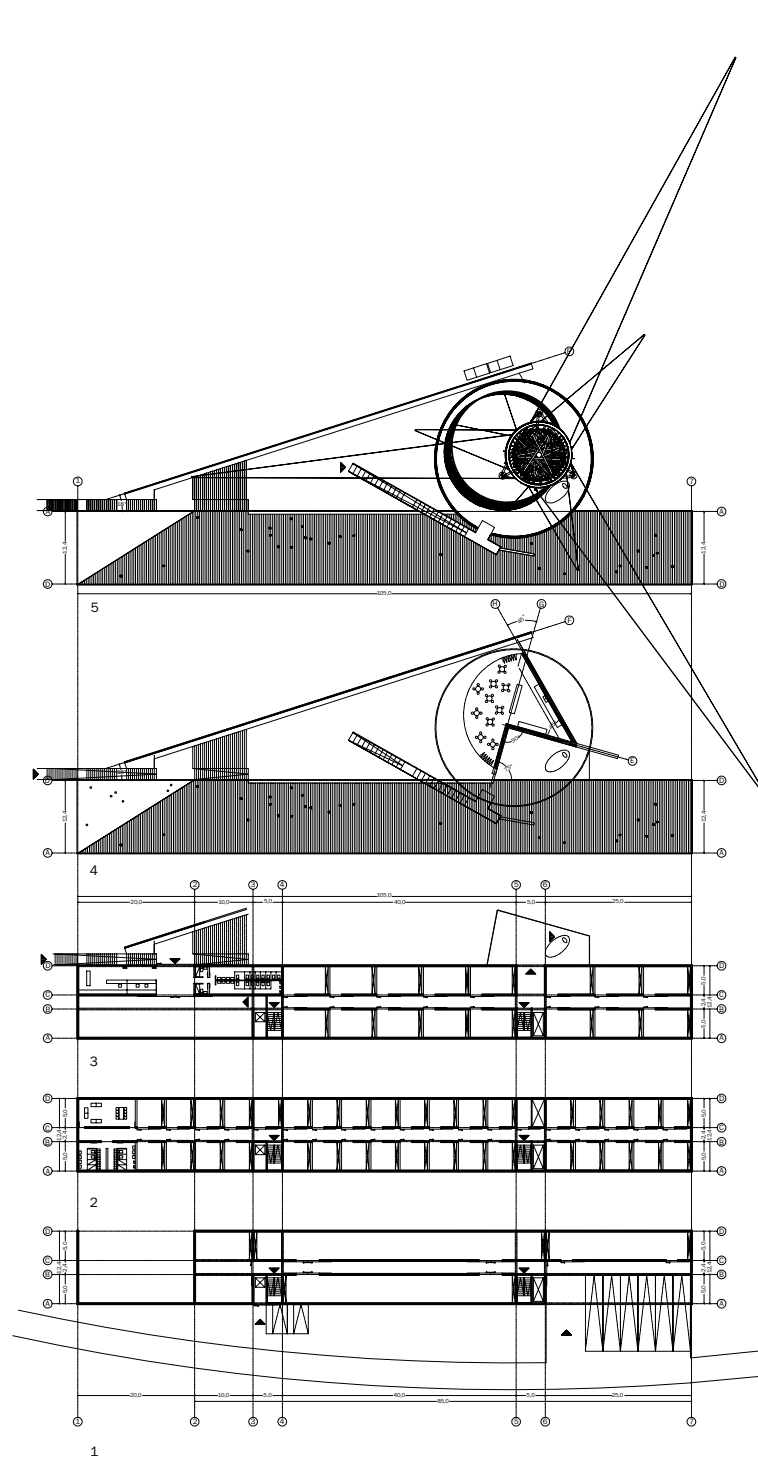


FIG 5
Plantas de niveles, plaza y edificio.
E. 1: 1.250.

1. Primer nivel +2,00
2. Segundo nivel +7,00
3. Tercer nivel +12,00
4. Nivel plaza +16,35
5. Nivel mirador panorámico +20,00

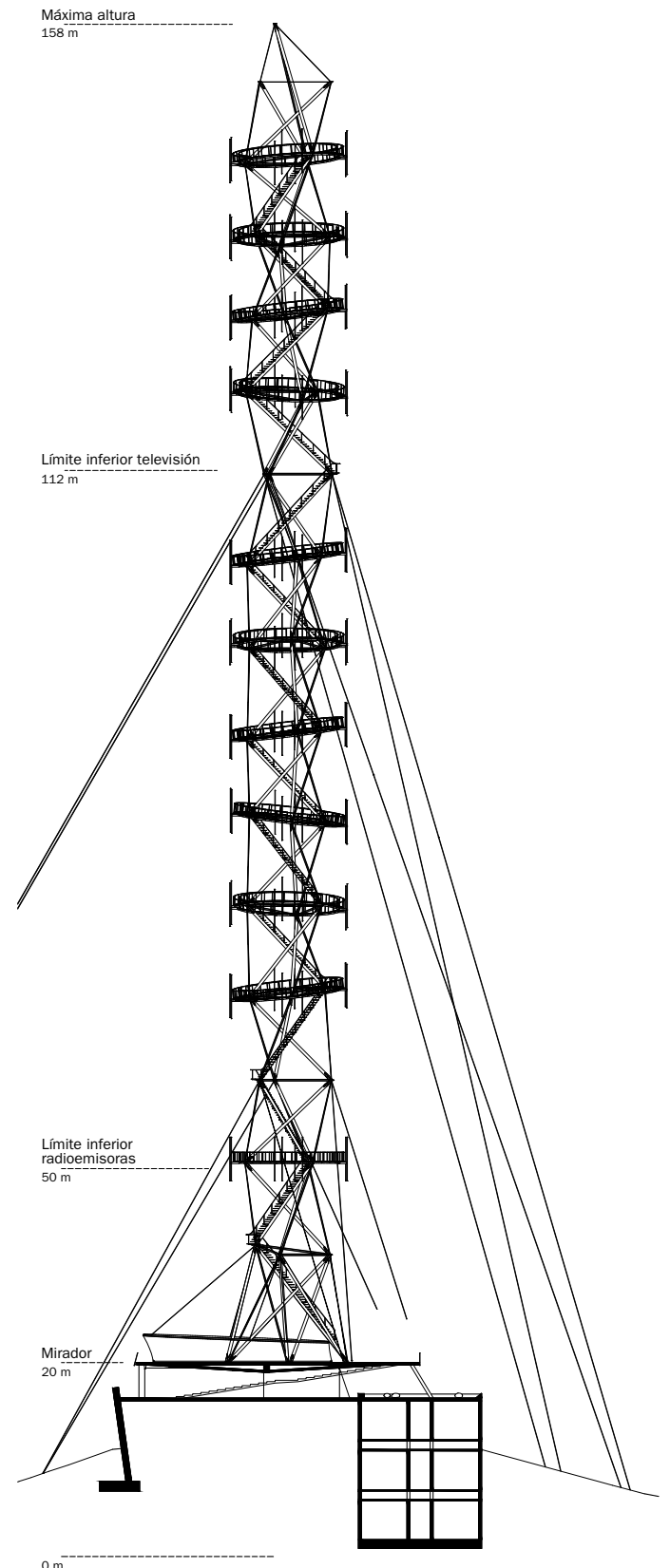


FIG 6
Corte general: antena, plaza, zócalo. E. 1: 750.

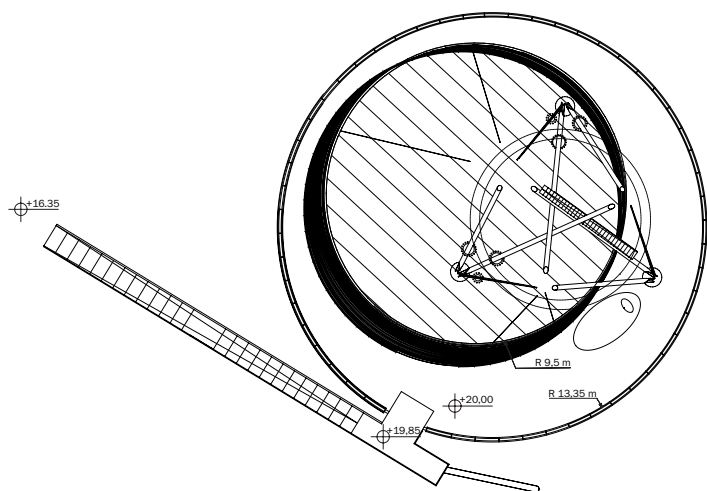


FIG 7
Planta nivel mirador.
E. 1: 500.

- FIG 8**
Isométrica. s./ E.
1. Estacionamiento visitantes
 2. Estanque nivel inferior
 3. Estacionamiento discapacitados / emergencia
 4. Estacionamiento vehículos mayores
 5. Acceso boletería – tienda
 6. Terraza pública nivel +16,35
 7. Estanque nivel superior
 8. Mirador nivel +20,00

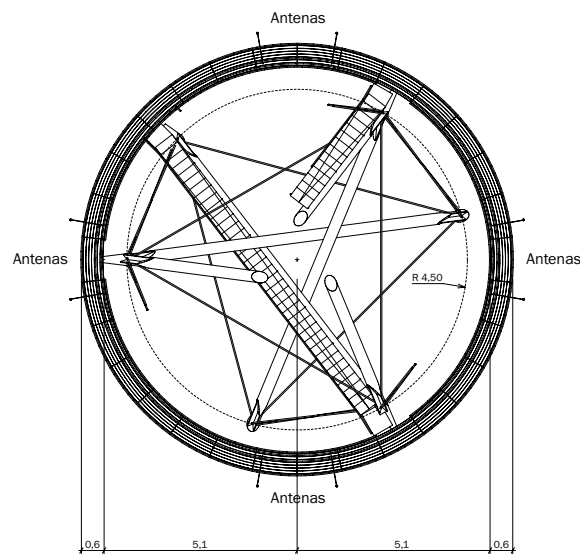
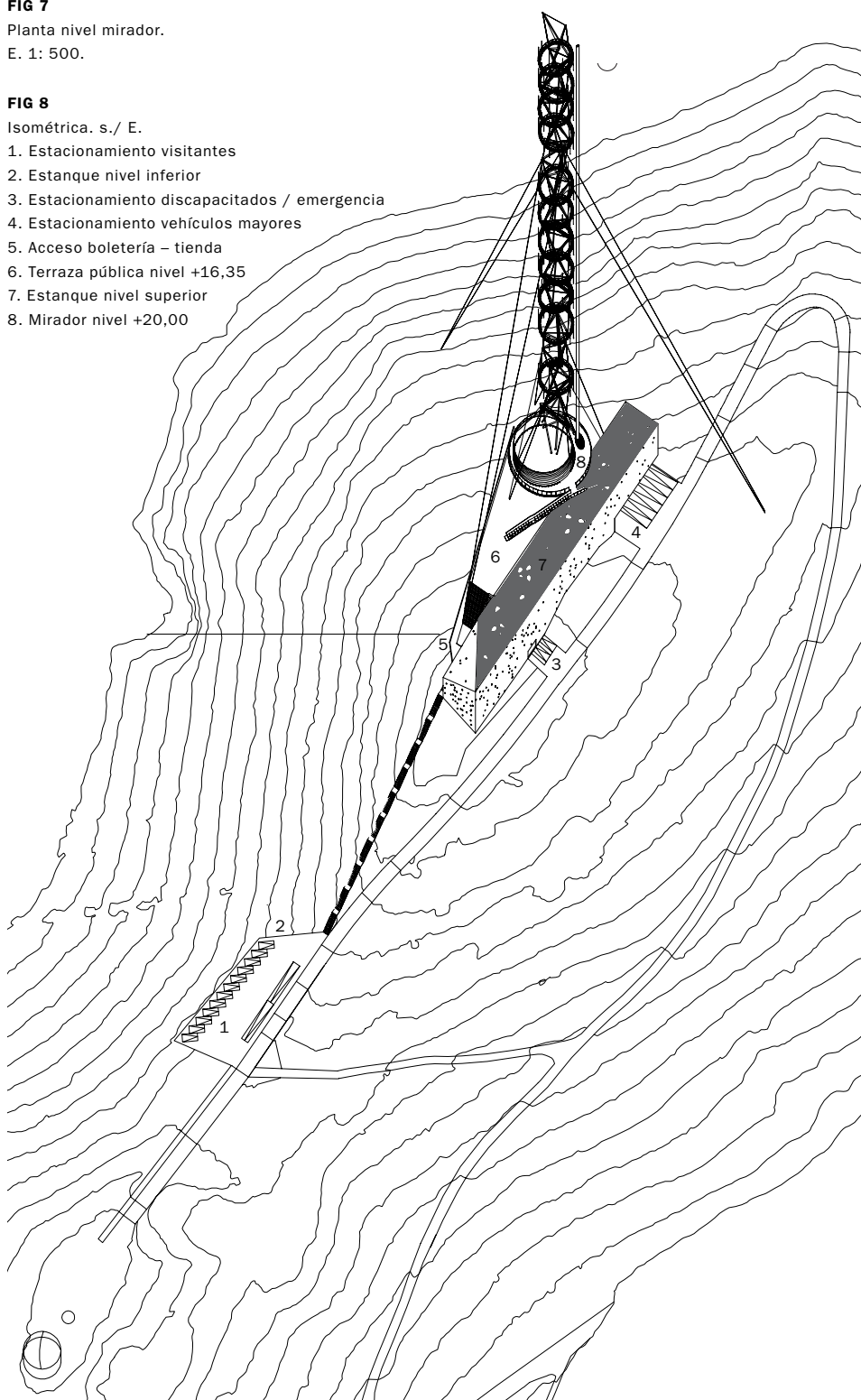


FIG 9
Planta antena nivel +40 m.
E. 1: 200.

esta manera, se consolida un recorrido mayor dentro del Parque Metropolitano, en el cual el mirador panorámico y el observatorio forman una unidad turística con acceso peatonal desde la plaza México (figs. 5, 6 y 7).

PROGRAMA

El programa se distribuye según el esquema “placa-torre”, donde todos los elementos de servicios técnicos y de apoyo a la antena están concentrados en la placa de tres niveles. La torre-antena permanece aislada como una pieza técnica, adyacente a este volumen (fig. 8). Ambos elementos son articulados de manera clásica por algunos ajustes menores en el terreno y la creación de la terraza pública. Los recorridos públicos siempre son exteriores y topográficos, mientras los recorridos técnicos son interiores. El acceso a estos recorridos ocurre desde los estacionamientos técnicos bajo el edificio placa, en el nivel 1.

La antena tiene una altura de 140 m. En ella se posicionan 11 anillos técnicos de 11,5 m de diámetro para la distribución de antenas de radio, televisión y microondas, distribuidos de la siguiente forma: nivel +35,0 m, un anillo para microondas; +51,5 a 95,0 m, 6 anillos para radio; +114,0 a +137,0 m, 4 anillos para TV (figs. 9 y 10).

En el perímetro exterior de cada anillo se han dispuesto dos niveles de antenas, distanciadas entre ellas 6,0 m en su altura, lo que permite colocar 16 antenas en cada anillo sin que se produzcan interferencias. Debido a la geometría espacial de la estructura algunos de estos anillos poseen pendientes de un máximo de un 8%. Conectado tangencialmente a estos anillos técnicos se ha dispuesto de un shaft de 0,6 m² de área útil, el cual alimenta de energía a la torre y provee de un montacargas tipo plataforma, para subir los insumos necesarios para el montaje de las antenas.

ESTRUCTURA

La estructura de la torre se basa en el principio de integridad tensional (*tensegrity*) de Buckminster Fuller, concebido a mediados del siglo XX. En este tipo de estructuras los elementos comprimidos se encuentran insertos en una red de elementos traccionados, lo que permite que sean estos los que delineen espacialmente el sistema invirtiendo la percepción habitual de una estructura reticulada.

Los elementos comprimidos y traccionados se distinguen explícitamente, lo que produce una lectura formal clara de las solicitaciones y da posibilidades formales dinámicas gracias a los cambios de rotación en planta y de alturas de los elementos, a pesar de mantener elementos estándares en sus medidas (fig. 11).

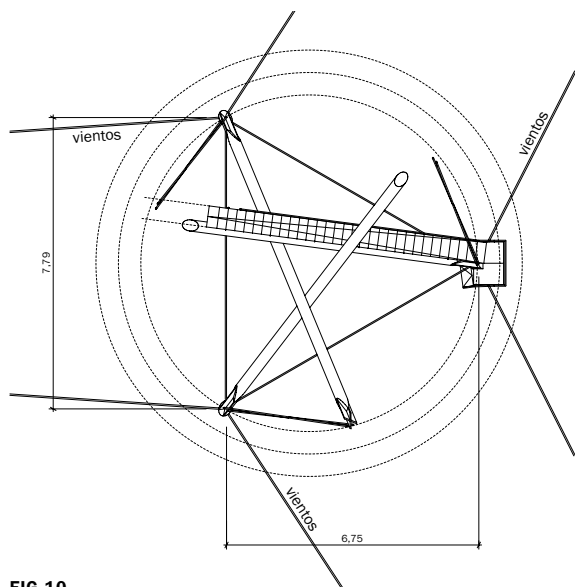


FIG 10
Planta antenna nivel
+112 m. E. 1: 200.

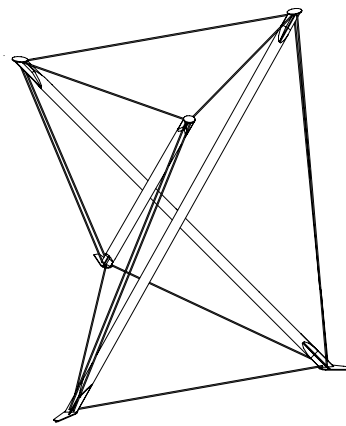
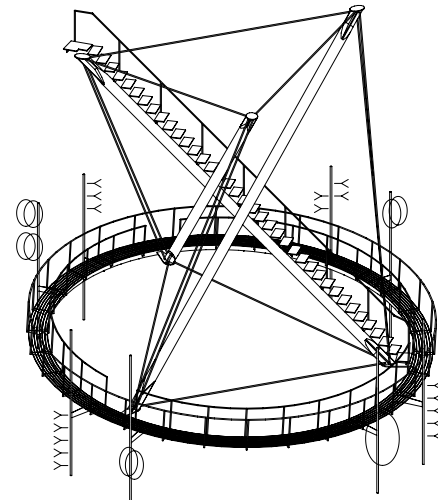


FIG 11
Isométricas estructura principal y
funcional. s./ E.



Al igual que en un reticulado convencional, todos los miembros están en compresión o tracción pura, es decir, no experimentan momento flector y, adicionalmente, todos los elementos en tracción se encuentran precargados. Esto produce estructuras con una relación masa/rigidez excepcionalmente alta.

Hemos pre-calculado la estructura considerando las propiedades de los materiales (acero), las cargas propias y sobrecargas de acuerdo a lo establecido en la normativa chilena. De ese análisis resultan las siguientes especificaciones de los elementos particulares que conforman el sistema:

- Elementos comprimidos: tubulares de 12" de diámetro, de espesores variables entre 8 a 12 mm. Estos existen en tres largos tipo (11,65 m, 12,3 m y 13,0 m) que se repiten en cada nivel o módulo estructural.

- Elementos traccionados: barras de 2" de diámetro. Se han contemplado dobles para proveer redundancia estructural.

- Vientos: 12 vientos colocados a tercios de la altura de la antenna en ángulos de 60° desde la horizontal, consistentes en cables de 2" de diámetro los cuales colaboran en el control de las deformaciones frente a esfuerzos horizontales (sismo y viento).

- Elementos adicionales: solicitados por esfuerzos de tracción y compresión en puntos particulares de la torre, como por ejemplo en su base. Sus dimensiones son equivalentes a los tubulares comprimidos.

Los elementos adicionales y redundancias estructurales - como son por ejemplo los tensores duplicados- contribuyen a la seguridad y al control de las deformaciones, transformando la estructura reticulada isostática inicial en una estructura hiperestática.

Esta estructura es un andamiaje al cual se anexan, en soportes pre-determinados, los elementos de transmisión que producen una piel virtual y funcional en torno a él (figs. 12 a 14).



FIG 12 Vista de la antenna en la cumbre del San Cristóbal.



FIG 13 Plaza de acceso y cafetería.

TORRE ANTENA SANTIAGO / Arquitectos: Smiljan Radic, Gabriela Medrano, Ricardo Serpell / Colaboradores: Claudio Torres, Matías Valcarce / Ubicación: Parque Metropolitano Cerro San Cristóbal, cota +880,0 msnm, Santiago, Chile / Encargo: Presidencia de la República y Ministerio de Vivienda y Urbanismo / Cálculo estructural: B y B Ingeniería Estructural / Sistema constructivo: piezas comprimidas de acero tubular de 12" de diámetro y largo variable (11,65 m, 12,3 m y 13,0 m) y espesor variable entre 8 a 12 mm; barras traccionadas de 2" de diámetro, dobles; cables de 2" de diámetro, como vientos; zócalo de hormigón armado / Presupuesto: sin datos / Superficie construida: 4.500 m² (edificio zócalo), 850 m² (plaza de acceso y cafetería), 550 m² (terrace panorámica) 130 m² (área planta tipo torre) / Año de proyecto: 2014 / Imágenes: Andrés Batlle.



FIG 14 Estructura de acero: 11 anillos técnicos.

EVALUACIÓN PARAMÉTRICA DE LA GEOMETRÍA ESTRUCTURAL

TEXTO: RICARDO SERPELL.

Desde el punto de vista del comportamiento estructural, las estructuras basadas en el principio de integridad tensional o *tensegrity* pueden modelarse como estructuras reticuladas en equilibrio isostático en las que todos los elementos están sometidos a esfuerzos puramente axiales, es decir, están sometidos a compresión o tracción en el eje de cada componente. Sin embargo, a diferencia de un reticulado convencional, una red de elementos sometidos a tracción delinea externamente el volumen de estas estructuras, mientras que un número reducido de elementos internos, sometidos a compresión, equilibra la tensión de la red envolvente. Esta inversión de funciones implica una dificultad adicional durante el diseño, ya que los tipos de esfuerzo a los que deben quedar sometidos los componentes, resultantes de la geometría de la estructura y de las cargas a las que se ve expuesta, son, en estos casos, prescritos por el principio estructural.

Para cualquier geometría propuesta, se hace necesario verificar que, frente a la acción de las cargas contempladas en el diseño, los elementos resultan sometidos a los esfuerzos prescritos, es decir, que haya puntales en compresión y tensores en tracción. En los módulos tensados más simples, cuyas geometrías pueden ser definidas por un conjunto reducido de parámetros, es posible verificar qué valores de estos producen configuraciones donde se cumplen los principios del sistema estructural, determinando así el rango de geometrías factibles para el proyecto.

Dentro de este rango, resulta conveniente realizar también un análisis de sensibilidad que permita evaluar el efecto de los parámetros de la geometría sobre la distribución y magnitud de los esfuerzos resultantes en cada uno de los elementos de la estructura. Para establecer con un nivel razonable de certeza una geometría inicial para la estructura, estas verificaciones son indispensables. Sin ellas se correría el riesgo de proyectar una geometría que no puede ser estructurada de acuerdo con los principios de integridad tensional, debiendo, por ejemplo, materializar un puntal donde estaba previsto un tensor. Por este motivo, el análisis que se presenta a continuación constituyó uno de los primeros pasos del proyecto.

DEFINICIÓN PARAMÉTRICA DE LA GEOMETRÍA

La geometría del módulo octaédrico seleccionado para la estructura tensada propuesta puede describirse mediante dos triángulos equiláteros, ABC y DEF, ambos inscritos en un círculo de radio r , horizontales y separados en la vertical por una distancia h entre sí. Respecto del triángulo inferior, el triángulo superior se encuentra rotado en el plano XY en un ángulo θ . Las aristas de los triángulos, a saber AB, BC, CA, DE, EF y FD, corresponden a los tensores horizontales del módulo. Los trazos AD, BE y CF y los trazos AE, BF y CD, conectan los vértices de ambos triángulos y corresponden, respectivamente, a los tensores verticales y a los puntales internos del módulo (fig. 15).

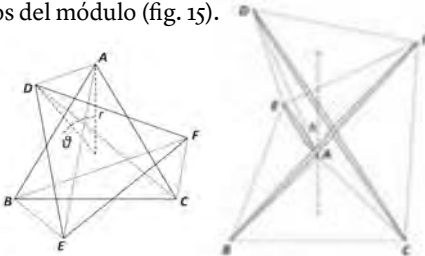


FIG 15
Geometría del módulo octaédrico (planta y axonometría).

Descrita de esta manera, la geometría del módulo queda totalmente definida por los parámetros r , h y θ . Para representarla, es conveniente determinar las coordenadas de los nodos A, B, C, D, E y F en un espacio cartesiano de tres dimensiones con ejes x , y , z . Tomando como origen del sistema de coordenadas el centro de gravedad del triángulo inferior, las coordenadas de los vértices corresponden a:

$$x_i = r \cdot \cos \varphi_i \quad \text{Ecuación 1.} \quad y_i = r \cdot \sin \varphi_i \quad \text{Ecuación 2.} \quad z_i = k \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde φ_i es el ángulo del vértice i en el plano XY con 90° , 210° , 330° para los vértices A, B y C, y $90^\circ + \theta$, $210^\circ + \theta$ y $330^\circ + \theta$ para los vértices D, E y F, respectivamente. En ambos casos, k es la altura del vértice con $k=0$ para los vértices A, B y C, y $k=h$ para los vértices D, E y F. A partir de las

coordenadas de los vértices es posible determinar las dimensiones reales de todos los trazos entre ellos de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$L_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde L_{ij} es el largo del trazo ij . Estos trazos corresponden a los ejes de los tensores y puntales del módulo. Es importante señalar que, en esta estructura tensada, los trazos AF, BD y CE no se materializan.

EQUILIBRIO ISOSTÁTICO DEL MÓDULO OCTAÉDRICO

Conocidas las relaciones geométricas del módulo, los esfuerzos a los que quedarán sometidos sus elementos pueden ser estimados inicialmente por el método de equilibrio de nodos. Para el análisis inicial se estimó apropiado considerar sólo fuerzas verticales debidas al peso propio y a las cargas de uso de la estructura. Desde el punto de vista del equilibrio global, el módulo se supuso simplemente apoyado sobre los nodos A, B y C, de modo que las reacciones en los apoyos son exclusivamente verticales y todos los esfuerzos horizontales deben ser equilibrados al interior de él. Esto es válido tanto para el módulo que queda en contacto con las fundaciones, como para los intermedios. Adicionalmente, dado que el módulo estudiado es rotacionalmente simétrico, basta con analizar el equilibrio en uno de sus nodos de base para conocer las solicitaciones de todos sus elementos. Desde el punto de vista de este análisis, los trazos correspondientes a las aristas del triángulo superior, DE, EF, FD, no son considerados, ya que se entienden como pertenecientes al módulo inmediatamente por encima del analizado.

La fig. 16 representa la geometría considerada para el análisis del equilibrio del nodo A, y por extensión de cualquiera de los nodos del triángulo inferior. En equilibrio, la suma vectorial de las fuerzas que convergen en el nodo debe ser nula, lo que implica que la sumatoria de sus componentes en cada una de las direcciones cartesianas sea igual a 0. Se tiene entonces que:

$$\sum F_x = F_{AD} \cdot \frac{x_A - x_D}{L_{AD}} + F_{AE} \cdot \frac{x_A - x_E}{L_{AE}} = 0 \quad \text{Ecuación 5.}$$

$$\sum F_y = F_{AD} \cdot \frac{y_A - y_D}{L_{AD}} + F_{AE} \cdot \frac{y_A - y_E}{L_{AE}} + 2 \cdot F_{AB} \cdot \frac{y_A - y_B}{L_{AB}} = 0 \quad \text{Ecuación 6.}$$

$$\sum F_z = F_{AD} \cdot \frac{z_A - z_D}{L_{AD}} + F_{AE} \cdot \frac{z_A - z_E}{L_{AE}} - R_{VA} = 0 \quad \text{Ecuación 7.}$$

Donde R_{VA} es la reacción vertical del apoyo en A, equivalente a $1/3$ de la carga vertical total al nivel de la base del módulo. F_{AD} , F_{AE} y F_{AB} son las fuerzas ejercidas sobre el nodo A por los elementos AD, AE y AB, respectivamente. En estas ecuaciones se considera que las fuerzas ejercidas por los componentes AB y AC, F_{AB} y F_{AC} son simétricas, condición necesaria para el equilibrio global del módulo. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones planteado permite determinar los esfuerzos en todos los elementos que llegan al nodo a partir de los parámetros geométricos del módulo y de las cargas verticales que inciden sobre la estructura.

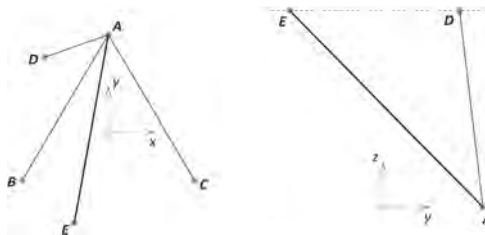


FIG 16
Equilibrio del nodo A (planta y elevación).

De la ecuación 5 se obtiene la relación entre los esfuerzos del tensor AD y el puntal AE. Considerando que la coordenada x del nodo A es igual a 0, expresado como $x_A = 0$, se tiene que:

$$F_{AD} = -F_{AE} \cdot \frac{x_E}{L_{AE}} \cdot \frac{L_{AD}}{x_D} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Reemplazando la ecuación 8 en la ecuación 7, es posible determinar el esfuerzo del puntal AE en función de la reacción vertical. Considerando que $z_E = z_D$, y que z_A es igual a 0:

$$F_{AE} = \frac{R_{VA}}{L_{AE} \left(\frac{z_E}{x_D} - 1 \right)}$$

Ecuación 9.

De la ecuación 9 se obtienen conclusiones relevantes para la definición de la geometría del módulo. En primer lugar, para que el puntal AE se encuentre sometido efectivamente a un esfuerzo de compresión, se debe cumplir que $(x_E/x_D) < 1$. Independiente de los valores de r y h , esta relación sólo se cumple para ángulos $\vartheta > 30^\circ$. Ángulos menores supondrían un esfuerzo de tracción sobre el puntal y, en consecuencia, compresión sobre el tensor. Considerando que un ángulo de 60° implicaría contacto entre los puntales en el centro del triángulo, la estructura tensada descrita sólo puede materializarse con un ángulo de rotación en planta en el rango $30^\circ < \vartheta < 60^\circ$.

La ecuación 9 muestra también que, en el rango de rotaciones posibles, el esfuerzo de compresión sobre AE aumenta a medida que el ángulo disminuye, dado que $x_E/x_D - 1$ tiende a 0 cuando ϑ tiende a 30° . En segundo lugar, la ecuación muestra que cuanto más bajo sea el módulo en relación con su radio, es decir, mientras sea menor la relación h/r , mayor será el esfuerzo de compresión sobre el puntal dado que la relación z_E/L_{AE} disminuye. Dado que las fuerzas ejercidas por los puntales y los tensores verticales se equilibran mutuamente en los nodos, siempre que aumenta el esfuerzo de compresión resultante en los puntales producto de un cambio en los parámetros de la geometría del módulo, aumenta también el esfuerzo de tracción de los tensores verticales AD, BE y CF. En consecuencia, si se desea limitar los esfuerzos máximos, resulta conveniente aumentar la esbeltez general del módulo y utilizar un ángulo de rotación en planta cercano a 60° . Sin embargo, dado que el vacío aparente entre los puntales disminuye cuando el ángulo de rotación aumenta, se hace necesario utilizar un valor menor de ϑ para lograr la lectura del principio de integridad tensional en la figura del proyecto.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS ESFUERZOS AL PARÁMETRO ϑ

El análisis de sensibilidad muestra que para módulos de proporciones $h=2r$, el esfuerzo de compresión resultante en los puntales y tensores aumenta a una tasa progresivamente mayor a medida que el ángulo de rotación en planta, ϑ , disminuye (fig. 17). Para ángulos de 50° , 45° y 40° , el esfuerzo de compresión en cada uno de los tres puntales resulta equivalente a un 60%, 73% y 100% del peso total de la estructura al nivel inferior del módulo, respectivamente. Para estos mismos ángulos, el esfuerzo de tracción de los tensores verticales resulta equivalente a 10%, 20% y 40% del peso total de la estructura, respectivamente. A partir de este análisis se seleccionaron los siguientes parámetros para la geometría de los módulos de la torre:

Altura media del módulo: $h = 8,5$ m

Radio del módulo: $r = 4,5$ m

Ángulo de rotación: $\vartheta = 45^\circ$

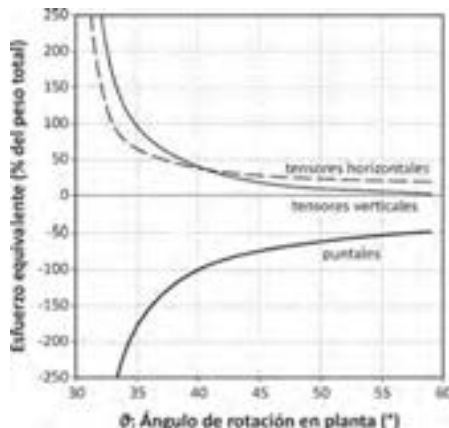


FIG 17
Análisis de sensibilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La torre se compone de quince módulos de este tipo. Si bien los parámetros geométricos iniciales se mantienen constantes en todos ellos, en el desarrollo posterior del proyecto se decidió introducir una variación en la geometría general, permitiendo que uno de los nodos de cada nivel cambie de altura respecto de los otros dos. La figura en planta no se ve alterada ya que el desplazamiento queda limitado a la coordenada z . Por ello, en la geometría de la torre existen puntales y tensores verticales de tres medidas distintas y tensores horizontales de dos medidas distintas. Además, los puntales del módulo inferior se extienden por debajo del nivel base del módulo, ampliando el radio basal de la torre. Por otro lado, los puntales del nivel superior se proyectan por sobre el nivel superior del módulo a modo de coronación. Debido a la complejidad de la geometría global se optó por programar un objeto paramétrico en lenguaje GDL, *Geometric Description Language* de *Graphisoft* SE, para generar automáticamente un modelo virtual completo. Más de 170 parámetros fueron habilitados en el *script* del objeto-torre con el fin de controlar desde aspectos globales de su geometría hasta opciones de visualización en planos y vistas de modelo. El proyecto se desarrolló modificando el código fuente del objeto, habilitando y ajustando los parámetros requeridos para definirlos formalmente.

Entre las funcionalidades del objeto paramétrico, se habilitó la capacidad de exportar la geometría estructural de la torre como un listado tabulado de elementos lineales definidos por las coordenadas cartesianas de sus extremos, entendidos como nodos. Utilizando esta información, el equipo de ingenieros consultores pudo realizar una verificación estructural de la torre en forma simultánea al desarrollo del proyecto, simulando cargas verticales y horizontales provocadas por viento o sismo. Las simulaciones confirmaron que, frente a cargas verticales, la geometría propuesta se comporta de acuerdo con las estimaciones del análisis inicial, verificándose que los elementos estructurales quedan sometidos a los tipos de esfuerzo previstos (tensores en tracción y puntales en compresión). Adicionalmente, se verificó que mediante vientos instalados aproximadamente a tercios de la altura de la torre, es posible limitar la redistribución de las cargas verticales, de modo que los elementos estructurales permanezcan sometidos a los tipos de esfuerzo previstos aun frente a la acción de cargas horizontales sobre la torre.

CONCLUSIONES

La definición paramétrica de la geometría del módulo octaédrico seleccionado para la estructura tensada de la torre permitió explorar el efecto de los parámetros sobre el tipo y magnitud de los esfuerzos a los que quedan sometidos los elementos que lo componen. Esta exploración evidenció que existe un rango limitado de valores para el ángulo de rotación del módulo en el que la geometría obtenida se comporta estructuralmente de acuerdo con los principios de integridad tensional o *tensegrity*.

De acuerdo con el análisis de sensibilidad, dentro del rango establecido, los esfuerzos en puntales y tensores crecen de manera no lineal a medida que disminuye el ángulo de rotación. Sin embargo, formalmente los ángulos menores logran lecturas más claras del sistema estructural propuesto. La selección del ángulo de rotación utilizado en el proyecto considera un compromiso entre ambos fenómenos. La verificación estructural de la geometría global de la torre confirmó un comportamiento de acuerdo con las estimaciones del análisis inicial. La evaluación paramétrica de la geometría estructural resultó ser una herramienta esencial y una ventaja en el desarrollo de un proyecto de estructura tensada. **ARQ**

BIBLIOGRAFÍA SUGERIDA

BURKHARDT, Robert W. *A Practical Guide to Tensegrity Design*. Unpublished, 2008. Disponible en: http://www.angelfire.com/ma4/bob_wb/tenseg.pdf
GÓMEZ-JÁUREGUI, Valentín. *Tensegrity Structures and their Application to Architecture*. Tesis (Master of Science). Belfast, Irlanda del Norte, Queen's University School of Architecture, 2004. 239 p. Disponible en:

http://www.tensegridad.es/Publications/MSc_Thesis-Tensegrity_Structures_and_their_Application_to_Architecture_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf
MOTRO, René y RADUCANU, Vinicius. "Tensegrity systems". *International Journal of Space Structures*, 18 (2): 77-84, 2003.
SNELSON, Kenneth. "The art of tensegrity". *International Journal of Space Structures*, 27 (2): 71-80, 2012.