

ANÁLISIS DE UNA EXPERIENCIA CONSTRUCTIVA EN BASE A PROTOTIPO MODULAR, HÍBRIDO Y AUTOPORTANTE EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

Felipe Mateo López

Universidad de Valparaíso, Chile, felipemateolopez@gmail.com

Palabras clave: prefabricación, morfología 3D, quincha, sistemas experimentales, construcción modular.

Resumen

El presente artículo busca sistematizar una experiencia proyectual de diseño y construcción basada en la idea de prototipo experimental para un refugio modular, unifamiliar en la zona central de Chile; un pabellón vertical de bajo costo en sistema quincha adaptada a elementos prefabricados, cuya modulación puede ser replicada o readaptada para diseños de viviendas de emergencia en autoconstrucción asistida. El estudio de la propuesta ha sido abordado desde experiencias previas con softwares de modelación 3D, geometría en base a patrones y fabricación digital.

1 INTRODUCCIÓN

Una vez que se plantea el desafío de construir un refugio modular y autoportante, la pregunta que viene en seguida es; ¿construir una bóveda, o un domo? y si es así ¿cómo estructurar la cúpula?, si bien la más tradicional y difundida fuera la que patentara Buckminster Fuller¹, en 1961, con su sistema geométrico de sinergia triangular geodésica, explorar otros referentes que se decantaban por modos análogos de auto-portabilidad y/o que han usado variaciones del sólido de revolución esférico clásico, era una alternativa atractiva de reflexión y exploración acerca del tema. En este sentido las tecnologías de modelación virtual 3D y modelación en base a patrones (Alexander, 1991) juegan un importante rol dentro de la experimentación en elaboración de nuevos sistemas de geometría compleja, fractales (Mandelbrot, 2005; Arguedas 2012) o sólidos de revolución híbridos (López, 2015), (figura 1), paralelamente en revisiones referenciales aparecieron algunas construcciones más antiguas y de latitudes lejanas como son las tipologías africanas denominadas Tolek, las que nos sirvieron de inspiración formal y como real alternativa para optar por una forma paraboloides, también por el uso del material natural de mayor recursividad; la tierra.

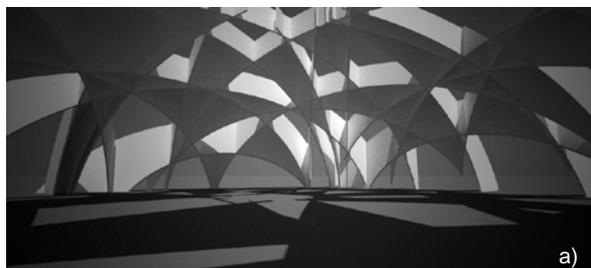


Figura 1. Exploración con entramado tridimensional de un sólido de revolución, panelizado con curvas fractales en base a sistemas iterados o L- System. a) vista interior b) vista exterior (elaboración propia)

La ventaja sustancial de este tipo de volumen es que minimiza la superficie normal a la caída del agua, por lo que presenta buen comportamiento ante lluvias. En la Quinta Región

¹ Richard Buckminster Fuller, 1895 1983, diseñador, arquitecto, visionario e inventor estadounidense, que se destacó también por desarrollar grandes cúpulas geodésicas en los años 1950

de Chile las lluvias son un tema delicado ya que en general no se presentan largas temporadas de precipitaciones, aunque si frentes de temporales invernales, lo que constantemente da prueba de que ni la ciudad ni la arquitectura -menos aún la arquitectura vernácula- están, en general, bien adaptadas a condiciones lluviosas. Hoy los domos en Chile han resurgido no solamente como alternativas económicas asociadas a un carácter estético/ecológico, sino que también significan una oportunidad de flexibilidad de espacio interior y exterior, correspondiente multiplicidad de usos o incrementalidad, sumado a una simplificación de ejecución acorde a la posibilidad de prefabricación de los componentes de la estructura, como lo propone el diseño inicial (figura 2).

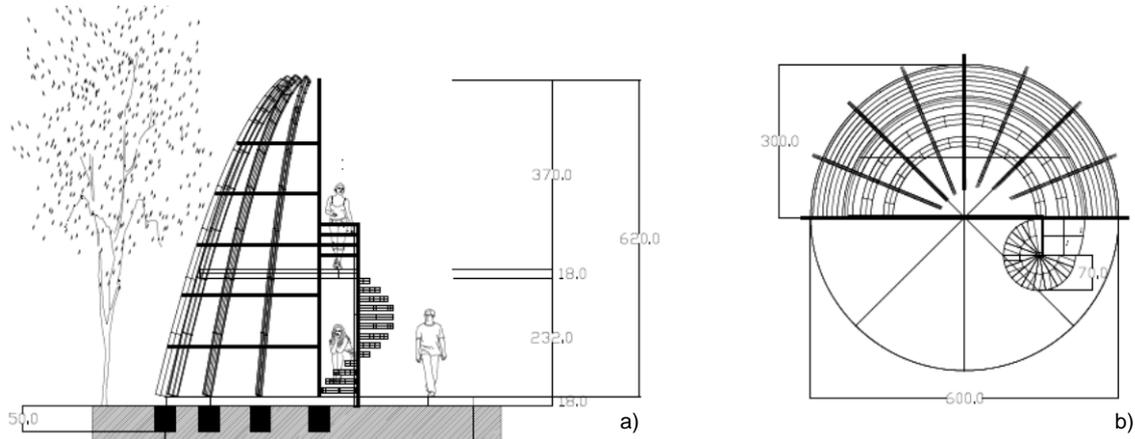


Figura 2. Esquema del anteproyecto mostrando principales elementos prefabricados: a) vista lateral; b) esquema de la planta (elaboración propia)

2 OBJETIVOS

Caracterización inicial de diseño, pre-fabricación, ejecución y puesta en funcionamiento del refugio modular auto-portante, en un principio las metas se vinculan con la economía; minimizar la superficie de construcción, maximizar el volumen interior y resistir las condiciones sísmicas y de clima local mediterráneo/seco de la región de Valparaíso. Como resolución se propone un sistema pre-hispánico (Flores, 1994), una estructura elástica (Minke 2005) y mixta denominada sistema de quincha o bahareque, dispuesto entre elementos prefabricados en forma de medios arcos parabólicos, construidos a modo de cajas compuestas de madera aserrada y tablero de astillas aglomeradas OSB (por sus siglas en inglés) (figura 3).



Figura 3. Montaje de quincha entre elementos parabólicos prefabricados (crédito: F. M. López)

El diseño volumétrico paraboloide ha sido modulado con el editor de algoritmo gráfico Grasshopper, dada su ductilidad para la generación de formas de geometría compleja y las posibilidades de información que ofrece; cálculos de áreas, volúmenes, panelizaciones, etc.

De este modo la puesta en marcha del prototipo busca atenuar el costo económico y de tiempos de ejecución, versus buen rendimiento de espacio interior y un buen comportamiento estructural, el que posteriormente quedaría demostrado luego de sobrellevar sismos de alta intensidad grados 7.0 y 6.0 en escala de Richter en el año 2017, sin presentar colapso estructural, ni graves deformaciones de los elementos estructurantes, cortes de tabiques o grietas de profundidad importante, lo que arroja prueba empírica del correcto comportamiento del sistema ejecutado, las decisiones tomadas oportunamente en obra y posibilidades de replicabilidad de modelos o patrones con entramados similares o con variaciones de la malla tridimensional.

3 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Luego de una extensa exploración con modelos de geometría iterada (López, 2012), y fabricación digital de maquetas a escala, como muestran la figura 4, el diseño del volumen se lleva a cabo en software 3D. Estudiando el paraboloides en editor de algoritmo gráfico se calcula su superficie exterior y volumen interior.



Figura 4. Maqueta de exploración tridimensional a escala para prototipo de fabricación digital

Una de las características de las formas que tienden a ser esféricas, elipsoides o paraboloides es que poseen una excelente relación superficie/volumen, es decir con superficies mínimas se consiguen volúmenes máximos, posteriormente a ello se procede a panelizar o subdividir radialmente en 16 partes que confluyen en el cenit del volumen, estos radios se construyen como piezas o piernas estructurales que en uno de sus extremos llega a un apoyo retranqueado sobre un envigado de piso de 16 lados y por el otro da cabida a un pequeño óculo octagonal en su extremo superior (figura 5). Dada la carencia de una mano de obra especializada, hubo que diseñar el escantillón (sección de detalle generalmente en escala 1:20) e imprimirlo en papel a escala real o 1:1. De este modo la forma del prototipo sería lo más fiel posible al diseño. Para construir desde esta plantilla inicial fue necesario tomar solamente media sección del paraboloides, ya que según la modulación geodésica se presenta que una de estas 16 secciones cubre la mitad de un arco al ser elementos idénticos; a modo de nervaduras principales que transmitirán los esfuerzos verticales de peso propio y sobrecargas de uso, análogos al funcionamiento de los pies derechos de una tabiquería tradicional, se fabrican y disponen como muestra la figura 6.

Posteriormente estas estructuras pre-fabricadas en taller se encadenan mediante anillos continuos (figura 7), en listones de madera aserrada de 1x4" proponiendo 7 anillos que funcionan de separadores de la estructura principal, tradicionalmente como una pieza horizontal de tabiquería análoga al can o cadeneta, formando la malla tridimensional, una red que a medida que se vuelve más alta se vuelve más discontinua, aunque también muchísimo más liviana (propio peso de la estructura). Las piezas principales que describen la geodésica del módulo fueron prefabricadas artesanalmente construyendo cada una de las medias partes de los arcos como se enuncia; imprimiendo las plantillas en tamaño real y luego cortando el escantillón de base manualmente en un tablero liviano de 3 mm. Posteriormente a eso se replican las 32 secciones idénticas encolándolas y atornillándolas a un alma reticulada compuesta por correas superior e inferior de madera aserrada con

respectivos separadores conformando las 16 cajas finales. Consecutivamente al secado de los elementos encolados se trasladan en un camión de tamaño estándar y se ensamblan al envigado de 16 lados ejecutado en el lugar, en paralelo a la faena de pre-fabricación de la estructura. Como se ha mencionado anteriormente este envigado descansa sobre poyos de fundación aislada, los que en el sector poniente hubo que arriostrar por medio de diagonales que rigidizaran los paños donde estos se vuelven más altos (no superando los 50cm), ya que hubo que salvar una pequeña pendiente de entre 5 y 10% en el nivel del terreno natural como muestra la figura 8



Figuras 5. Elementos estructurales confluyen en anillo octagonal superior (crédito: F. M. López)



Figura 6. Pablo Jerez construyendo la estructura principal en su taller



Figura 7. Disposición de los elementos principales con cadenas horizontales

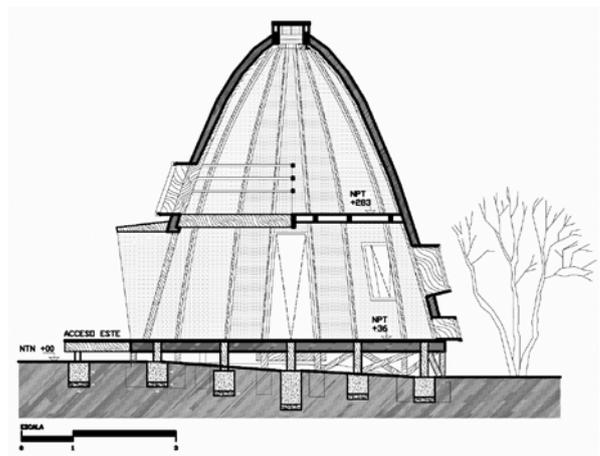


Figura 8. Sección donde se puede observar detalle del espacio interior y relación con el terreno natural

Una vez que la estructura estuvo en pie y ya que la quincha estuvo llena por sobre el 50% se corroboran deformaciones en los envigados, lo que motiva a replantear la disposición de los mismos por lo cual es necesario duplicar la cantidad de fundaciones aisladas, ya que según los cálculos estimados el módulo presentaría un peso superior a las 12 toneladas. Si bien como señala Minke (2005) las estructuras de cúpulas al contar con plantas circulares

presentan una buena distribución de los esfuerzos cortantes por sismo, las resultantes de la geodesia proyectada deben pasar por dentro de, idealmente, un sobrecimiento de ancho considerable para evitar que la cúpula tienda a abrirse en su base generando colapsos estructurales o deformaciones graves. Esta consideración fue un motivo para ejecutar más puntos de apoyo de fundaciones intermedias aisladas y diagonales interiores en el primer y segundo anillo de crecimiento vertical. En una de las mitades de la planta (Sur/ Este/ Norte) el envigado se encuentra proyectado hacia el exterior del módulo formando una pequeña pasarela-deck de 1,4 m de ancho evitando que el resto de la estructura basal del interior oscile por traslación o rotación con los movimientos sísmicos, ya que la pasarela-deck posee puntos de apoyo propios, arraigando complementariamente al domo al terreno natural, rectificaciones graficadas en la figura 9.

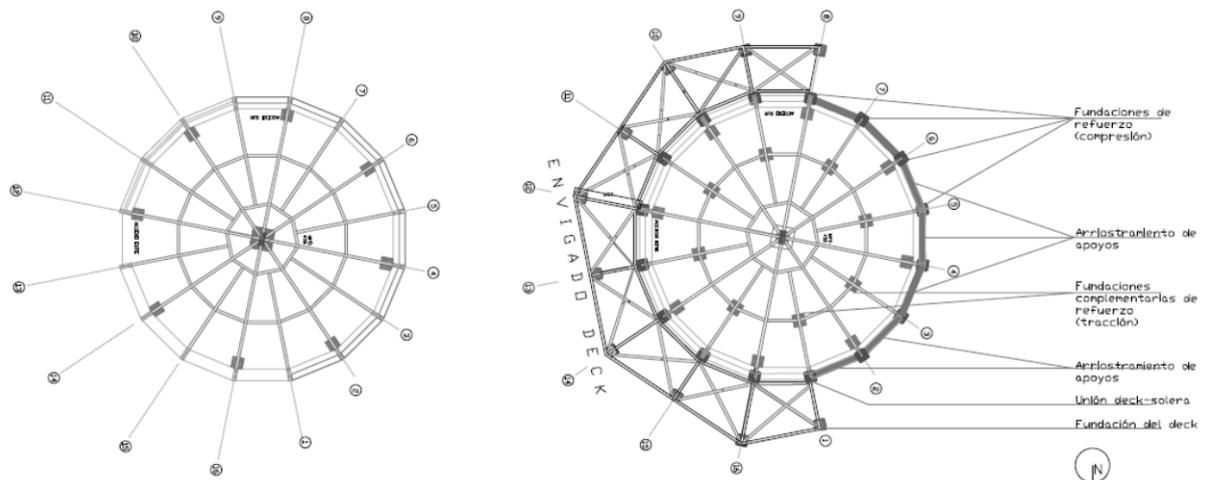


Figura 9. Diseño de fundaciones original y rectificadas con deck propuesto en obra (elaboración propia)

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Hibridación e innovación; desde un comienzo, como parte de los requisitos del encargo se solicitó una planta en forma circular para conseguir un espacio unitario y sin esquinas. Como recalca Minke (2005, p.9) “Mientras más compacta la planta, más estable será la vivienda. Una planta cuadrada es mejor que una rectangular y una circular es la forma óptima”. Este requerimiento pone de inmediato a prueba la capacidad de resolución, si bien se sabe que una planta circular distribuye de mejor modo los movimientos horizontales del sismo, los materiales de construcción estándar a emplear no cuentan con módulos curvos, por lo que se propuso la planta de 16 lados, desdoblando los lados del octágono, que a su vez deviene del doble de las direcciones cardinales hacia las cuales se orienta el refugio propuesto. Cada uno por medio de los vértices del polígono se ejecutaron 8 puntos principales de apoyos o fundaciones aisladas de 40x40 cm de base x 60 cm de profundidad, en un principio retranqueados 40 cm hacia el interior de la base. Los puntos de apoyo en planta, sumado a un punto central de envergadura mayor; un dado aislado de 50x50cm de base x 80cm de profundidad son, en principio, los elementos que distribuyen los esfuerzos al terreno natural; al tomar su peso con la masividad de la quincha, la excentricidad de los apoyos ejecutados hace que el envigado se deforme, al notar esta patología en la obra se decide ejecutar apoyos adicionales que descargarán puntualmente cada vértice, donde arranca cada nervadura estructural de la superficie del domo, fabricando un “doble poyo” colaborante. Como factor de seguridad o de refuerzo estructural se ejecutaron apoyos intermedios en 8 de las vigas que confluyen en el centro del polígono al igual que en los segmentos intermedios de cada vértice de la planta en sectores Sur, Este y Norte como elementos que actúan a compresión pura, que evitarán que el módulo se asiente produciendo desniveles de la plataforma de piso. Se consideró que esta era una manera adecuada de enfrentar el encargo con responsabilidad frente al carácter telúrico del país, es decir minimizaría los cortes por torsión en planta, al igual que amortiguaría esfuerzos

verticales que puedan devenir producto del contexto sísmico (figura 10). Dada la confluencia de las piezas prefabricadas de 6,7 m de alto, 25 cm de ancho y 7 cm de espesor, en el octágono superior central como óculo y posterior amarre mediante anillos de madera aserrada se salva la discontinuidad natural de la estructura (debido a las placas comerciales estándar del tablero OSB y los listones estándar de 3,20 m de largo) y se conforma la malla tridimensional.



Figura 10. Vista del envigado propuesto luego de las rectificaciones llevadas a cabo en obra (crédito: F. M. López)

Por envergadura de la obra hubo que prever arriostramiento interior en tabiques, a fin de garantizar continuidad en la distribución de cargas, se consideraron arriostramientos entre los principales vanos; puertas de accesos y ventanas, sectores con diferencias de masa considerable, así el arriostre complementario hace que cada paño construido no trabaje independientemente sino que colaborativamente, amarrado con los paños contiguos de la tabiquería experimental.

Utilizando materiales locales se desarrolla el carácter estructural y ecológico de la obra por reducción de la huella de carbono, aislamiento térmico y el balance de humedad interior / exterior. Posteriormente se utilizaría tierra con tratamiento de fermentación con paja de trigo, con arena del lugar, harina y materia orgánica para lograr la mezcla de masa impermeable, aglomerada con pulpa de tuna nopal, abundante en la localidad, revoque exterior aplicado que posteriormente al secado natural es sellado con una mezcla de arcilla colada y saturada, la que se agrega a una mezcla caliente de aceite linaza y sellador de cal, revolviendo por al menos treinta minutos, una vez comienza a enfriarse la mezcla se aplica con rodillo o espátula y luego se alisa con una brocha húmeda. Disponiendo en un espesor de 3 a 5 mm como indica la figura 11 y que debe garantizar un revestimiento a modo de cáscara o piel impermeable, que dé soporte a las lluvias de la temporada invernal, precipitaciones que en el clima costero de la zona central chilena, tienden a surgir entre los meses de Mayo y Septiembre.

Finalmente las terminaciones exteriores se realizaron en base a placa de tablero terciado de 15 y 18 mm previa aplicación de imprimante de aceite linaza en dos capas y posteriormente cubierto con barniz natural mate, aplicación que da mayor resistencia al efecto de las lluvias de invierno y a la radiación de verano. Al usar solamente materiales locales y colectados del lugar se garantiza economía a lo largo de todo el desarrollo de la obra y una interesante relación cromática con los elementos naturales del paisaje circundante (figura 12).



Figura 11. Aplicación del sello del revoque sobre la superficie del refugio.



Figura 12. Vistas de las fachadas principales del refugio (crédito: F. M. López)

5 CONSIDERACIONES FINALES

Las características del emplazamiento ofrecían un predio alejado de la situación urbana, un suelo muy arcilloso y pequeños cursos de agua entre las quebradas de las laderas sur. En un principio resulta imposible plantear cualquier montaje de construcción en un terreno sin recursos de agua potable y con poca accesibilidad. Si bien la estructura sería prefabricada de acuerdo a la modulación diseñada, debido a estas condiciones el montaje requería varios días continuados de trabajo por parte del equipo, por ello se propuso usar tierra, material abundante y de baja huella de carbono; excelente aislante térmico y acústico, gracias a la

mano de obra local colocamos de relieve técnicas tradicionales de arquitectura en barro, como es la quincha de doble malla, denominada por los artesanos locales como ensardinado. En los sectores donde el corte era mayor por los encuentros, ya sea con la base del envigado o el altillo de la planta superior, allí se dispusieron en diagonales, logrando una sub-estructura rigidizante; la superficie exterior e interior del módulo. La cámara de vacío resultante recibió lechada de barro arcilloso como aglomerante de un volumen de paja de trigo picada, materiales mezclados y tratados con agua de un arroyo de la quebrada, la que fue colectada mediante un dique de polines que hubo que construir como obra complementaria al módulo del domo-refugio.

Otra consideración importante de discriminación aplicada y que cabe señalar es que al conseguir la curvatura de la superficie se observa que tiene máxima exposición al sol, minimizando la orientación sur, en este sentido se jerarquiza la orientación norte con una buena abertura de vanos comunicados en el sentido vertical del módulo como indica la figura 13a y aberturas pequeñas, ventanas no practicables al oeste y noreste para controlar la iluminación interior (figura 13b), este y oeste practicables para ventilaciones cruzadas en primera planta (figura 13c) y nor-oeste, sur-este en segundo nivel para los mismos efectos (figura 13d). Se hizo necesaria la consideración de proponer el óculo superior a modo de lucarna o claraboya abatible para obtener ventilación por convección en los días más calurosos de verano, que por lo general son entre los meses de Noviembre a Febrero.

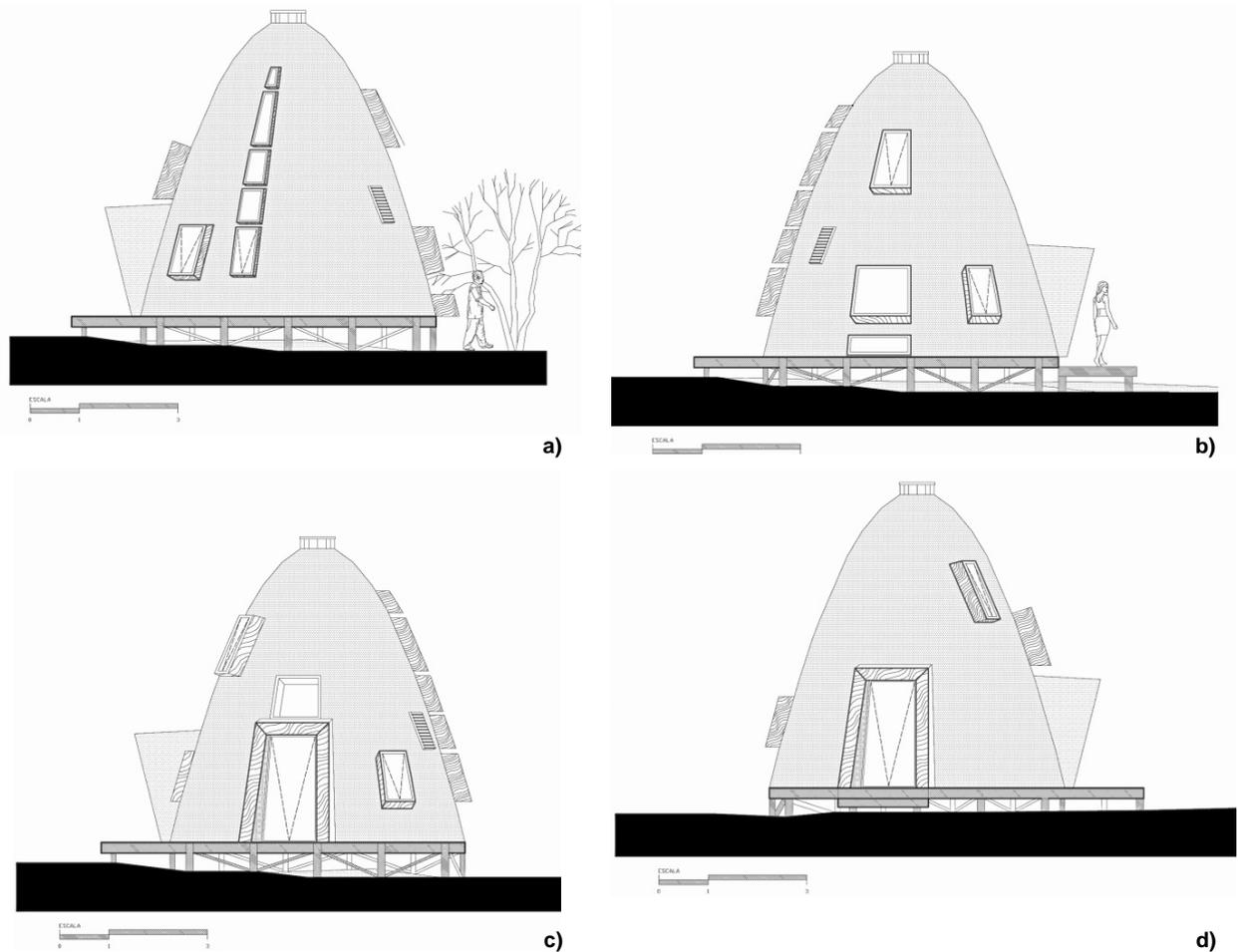


Figura 13. Elevaciones: a) Norte; b) Oeste; c) Este; d) Sul

Esta experiencia permite relacionar tendencias ligadas al *high-tech*, como lo es el denominado diseño generativo y fabricación asociadas a las herramientas de tecnologías cad/cam (Housmand; Fatahi, 2010) y modelación 3d, con técnicas tradicionales de fabricación artesanal, convirtiéndolo en un sistema híbrido y económico que puede ser considerado como replicable, y de fácil implementación en diferentes contextos, donde no existe una mano de obra especializada (Cañete; López. 2015).

Construir este tipo de encargo en primera persona lleva a tomar medidas que han sido oportunas, si bien desde la arquitectura siempre existen posibilidades de incidir en disposiciones de obra, en general se trata de una influencia meramente estética o -en un mejor caso- de usos prácticos. La importancia de una participación completa en la ejecución de la obra, por sobre una simple supervisión, radica en decidir la correcta solución de problemas que no han sido contemplados o previstos por el diseño del proyecto, estos eventos en general son inflexiones de gran complejidad e importancia tanto en partidas de obra gruesa como en detalles constructivos o etapas de logística, convirtiéndose en una actividad sumamente relevante que en procesos experimentales puede llegar a tener una influencia y envergadura vital.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexander, C. (1991). *The nature of order: An essay on the art of building and the nature of the universe*, Book 1. The phenomenon of life. Ed. Center for environmental structure.

Arguedas, T. V. (2012). *La geometría de la naturaleza: Benoit Mandelbrot*. Disponible en: https://tecdigital.tec.ac.cr/revistamatematica/Secciones/Historia/V_Arguedas_V12N1_2011/Scrn_V_Arguedas_V12N1_2011.pdf

Cañete, O.; López, F. M. (2015). *Desarrollos de modelos para refugio modular en base a estandarización de prototipos pre-fabricados*. Universidad Nacional de Córdoba. Disponible en: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/pensu/article/view/16517>

Flores, M. O. (1994). *Técnica de entramados*. En: Viñuales, G. M. (comp.) *Arquitectura de tierra en Iberoamérica*. Habiterra/Proterra. p.37-53. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/348065203/Arquitectura-de-Tierra-en-Iberoamerica-pdf>

Houshmand, M.; Fatahi, O. (2010). *Collaborative information systems Architecture for Cad/Cam in new product development based on STEP Standard*. En: *Proceedings of the World Congress on Engineering and computer science 2010 Vol II WCECS 2010*. Disponible en: http://www.iaeng.org/publication/WCECS2010/WCECS2010_pp1072-1080.pdf

López, F. M. (2012). *Paisaje, mapas y atracción*. En: Cañete, O. (Editor y comp.). *Exploraciones morfológicas digitales*. Valparaíso: Editorial Garín. P. 67-72.

López, F. M. (2015). *Paisaje natural vs. paisaje virtual. Notas y aplicaciones sobre mapeo tridimensional, entramados generativos y fabricación modular Cad/Cam*. En: Cañete, O. (Editor y comp.). *Bitácoras morfológicas*. Valparaíso: Editorial Garín. p. 92-99.

Mandelbrot, B. (2005). *Los objetos fractales*. Ed. Tusquets.

Minke, G. (2005). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Universidad de Kassel. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/360175111/Manual-de-construccion-para-viviendas-antisismicas-de-tierra-pdf>

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a todos quienes han compartido el largo proceso; Rodrigo Segura y Alejandra Tello, Francisco Rubio, Macarena Garrido, Felipe Saavedra, Oscar y Pablo Jerez, Luis Pineda, Marco Fierro, Camila Bidart, Mario Varela, Alejandro Saldías, Amparo Gonzalez, Macarena Monsalve, Cristian Olivos, Ángel Palma, Verónica Arrieta, Nino, AmaruMayu, Omar Cañete y Juan Pablo Cisternas. También a todos aquellos que nos animaron en los momentos difíciles, no han sido pocos, nos dieron la fuerza que necesitábamos en los momentos precisos.

AUTORES

Felipe Mateo López es arquitecto por la Universidad de Valparaíso en Chile, ha participado en diversos workshops de diseño paramétrico y fabricación digital, siendo publicado en países como España, Colombia, Argentina y Uruguay. Ha ejecutado proyectos Fondart de artes los años 2012 y 2015 e intervenciones urbanas de espacio público el mismo año. Profesionalmente se desempeña desde el 2013 como asesor de empresas de ingeniería, arquitectura y construcción en temas de desarrollo de proyectos, modelación digital, logística, investigación y recursos de agua y suelo. Actualmente desarrolla su trabajo de forma independiente y autónoma en la ciudad de Viña del mar, Chile.