



## Construcción con Tierra Patrimonio y Vivienda X CIATTI 2013

Congresos de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos  
2013.

Coordinadores: José Luis Sáinz Guerra, Félix Jové  
Sandoval.

ISBN: 978-84-617-0473-6

DL: VA 470-2014

Impreso en España

Junio de 2014

Publicación online.

Para citar este artículo:

ALARCÓN MARTÍNEZ, J. Ricardo, BRAVO REYNA, Noemí, CARBALLO CRUZ, J. M. Evarado, et. al. "Evaluación del comportamiento geométrico-estructural del Prototipo de las ánimas". En: *Construcción con tierra. Patrimonio y Vivienda. X CIATTI. Congreso de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2013*. [online]. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. 2013. P. 275-286. Disponible en internet:

<http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2014/275-286-alarcon.pdf>

URL de la publicación: <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones.html>

Este artículo sólo puede ser utilizado para la investigación, la docencia y para fines privados de estudio. Cualquier reproducción parcial o total, redistribución, reventa, préstamo o concesión de licencias, la oferta sistemática o distribución en cualquier otra forma a cualquier persona está expresamente prohibida sin previa autorización por escrito del autor. El editor no se hace responsable de ninguna pérdida, acciones, demandas, procedimientos, costes o daños cualesquiera, causados o surgidos directa o indirectamente del uso de este material.

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Copyright © Todos los derechos reservados

© de los textos: sus autores.

© de las imágenes: sus autores o sus referencias.





## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMÉTRICO-ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO DE LAS ÁNIMAS

X CIATTI 2013. Congreso Internacional de Arquitectura de Tierra  
Cuenca de Campos, Valladolid.

*Juan Ricardo Alarcón Martínez<sup>1</sup>, profesor investigador de la UAM-X. México.*

*Noemi Bravo Reyna<sup>2</sup>, investigadora de la UAM-X. México.*

*Juan Manuel Everardo Carballo Cruz<sup>3</sup>, maestro en Arquitectura de la UNAM. México.*

*Arturo Mercado Escutia<sup>4</sup>, maestro en Arquitectura de la UNAM. México.*

*Pedro Jesús Villanueva Ramírez<sup>5</sup>, maestro en arquitectura de la UNAM. México.*

*PALABRAS CLAVE: construcción con tierra, morfología, sistema constructivo.*

### 1. Introducción

*NOMBRE DEL PROYECTO:* "UAM X- Las Ánimas Tulyehualco, proyecto académico.<sup>1</sup>

*FASE 3 DE LA INVESTIGACIÓN DE ARQUITECTURA CON TIERRA:* Evaluación de la cubierta del prototipo experimental con barro colado.

Como parte del trabajo de investigación que se está realizando dentro del proyecto rector "UAM X-Las Ánimas Tulyehualco" sobre nuevas tecnologías para sistemas constructivos. En esta fase de la investigación aplicada, en agosto del 2012 se efectuó una evaluación estructural y constructiva del

prototipo experimental edificado con tierra, teniendo como punto central el diseño de cubiertas en agosto del 2012, así pues, resultaba fundamental registrar datos previos y verificar las hipótesis planteadas para su aplicación en el mejoramiento y/o sustitución de elementos estructurales de vivienda en comunidades del estado de San Luis Potosí.

En la evaluación geométrica-estructural de la cubierta realizada con varilla metálica y tierra estabilizada, se supuso que al modificar la forma<sup>2</sup> recta de los bordes por curvas entre los trapecios alabeados y el empleo de una trabe triangular entre ellos, se incrementaría la rigidez de las superficies trapecoidales

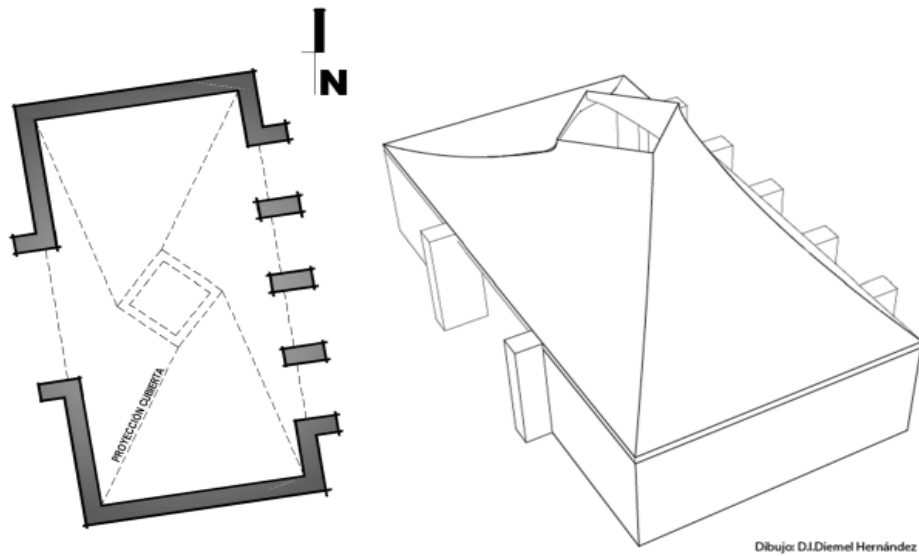


Figura 1. Planta y perspectiva del prototipo © LITEC.

alabeadas por el efecto de trabe-losa y tendríamos la posibilidad de disminuir el espesor de la cubierta.

El material base empleado fue tierra estabilizada con cemento portland en una proporción de 1:0.25:8 aplicado de manera manual sobre una membrana de metal desplegado sustentado por una estructura colgante de acero, que por su forma, daría la rigidez necesaria para mantener la forma desde su fase de manufactura hasta el final de su construcción.

Con la simulación infográfica se estudió el comportamiento estructural ante cargas gravitacionales y se desarrolló un modelo físico a escala para realizar el análisis geométrico-estructural del diseño de la cubierta.

También se ha creado un monitoreo in situ para identificar las fallas estructurales, así como su comportamiento ante cargas gravitacionales (cargas vivas y cargas muertas) y laterales horizontales (sismos)<sup>3</sup>.

## 2. Antecedentes

Como es bien sabido, la tierra cruda ha sido empleada por el hombre desde inicios de la humanidad como elemento constructivo, en la producción de viviendas, murallas u otros elementos útiles. La familiarización de su uso y observación de su comportamiento permitió mejorar sus propiedades adicionando elementos orgánicos como ramas, paja, estiércol o litológicos, dependiendo de las características iniciales u originales del estrato o bien del sistema contemplado lo que permitió desarrollar estructuras monolíticas como el tapial o bajareque.

Los sistemas y procedimientos constructivos donde se utiliza la tierra cruda se pueden identificar como poco complejos y materializables por casi todo el mundo; en México esta forma de construir se ha realizado desde la época de esplendor de las culturas mesoamericanas, asimismo, los factores geográficos y culturales imprimieron a sus viviendas algunas particularidades que todavía hoy en día se aprecian en la arquitectura de este tipo (aún con la introducción de nuevos materiales, técnicas y sistemas constructivos).

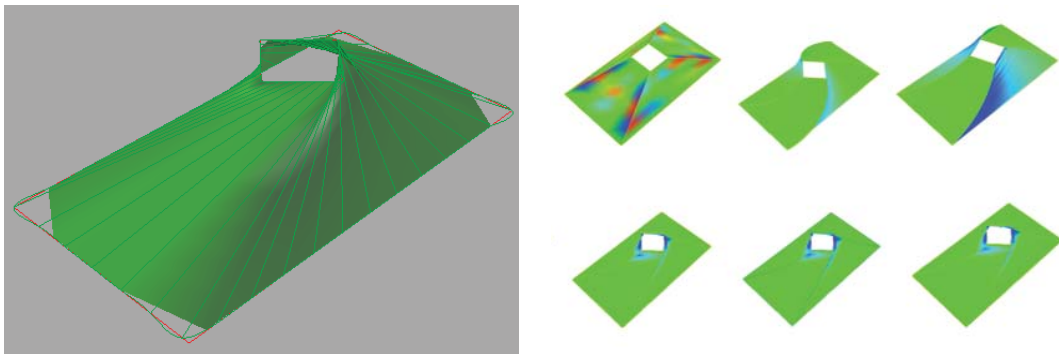


Figura 2, 3 y 4. Rutina Grasshopper que genera diversos estados polimórficos de la cubierta © Pedro Villanueva Ramírez.

Los materiales elaborados con tierra cruda han sido empleados, mayoritariamente, en la fabricación de elementos verticales, ya sea en sistemas “monolíticos” o de mampostería simple. Los sistemas verticales estructuralmente podemos clasificarlos como de masa activa de acuerdo con la propuesta de Heino Hengel. Por el contrario, los materiales de tierra cocida se han ocupado tanto en la construcción de mampostería simple como confinada, en elementos verticales sobre un plano y en superficies alabeadas. Cabe mencionar que en cubiertas se han desarrollado muy diversas formas estructurales planas o de superficie activa y abovedada, esferoidal o cónica.

En la naturaleza la mayoría de las formas estructurales responden a las características y propiedades físico-mecánicas de los materiales que están hechos, y su forma se puede considerar que es la representación del equilibrio entre fuerzas internas y externas. En esta experimentación se consideró como principio estructural partir de una superficie laminar monolítica plana similar a una hoja de papel, que al modificar su forma flexionándola y confiriéndole una curvatura se aprovechará al máximo la masa del material empleado; aplicando el principio estructural que Mario Salvadori señala: al cambiar la forma de una hoja de papel, se reparte mejor el material alejándolo del eje neutro donde no es necesario, incrementando así su momento de inercia. “Al flexionar la superficie ya no es

el espesor o peralte el que resistirá la flexión sino el espesor de la forma obtenida por éste; ya no es el material el que trabaja, el concepto detrás de las superficies estructuradas es la resistencia por la forma” (VANDEN, 2000, p. 96).

La cubierta en su conjunto se puede considerar como una superficie discontinua conformada por cuatro membranas con rigidizaciones localizadas en torno a un punto, resultado de girar 45° sobre el eje vertical la parte superior de una pirámide rectangular truncada; en el seccionamiento de la cubierta se quiso aprovechar el aumento de la rigidez al modificar la forma sin incrementar el peralte o espesor de la membrana como ya se ha señalado, las líneas o dobleces que dan continuidad a la cubierta, son las únicas zonas donde se incrementó el peralte producto de las nervaduras embebidas. En este caso a diferencia de la mayoría de los ejemplos en la construcción, la elección del material considerado como “barro colado”, no responde a sus propiedades físico-mecánicas, sin embargo, se eligió éste para determinar su viabilidad en obras de bajo costo, ejecutables, con capacitación mínima, dando la posibilidad de hacer valoración de maleabilidad, durabilidad, impermeabilidad, resistencia a agentes intemperantes, elasticidad ante aplicación de cargas muertas y capacidad de cualidades estéticas en una obra ya concluida.

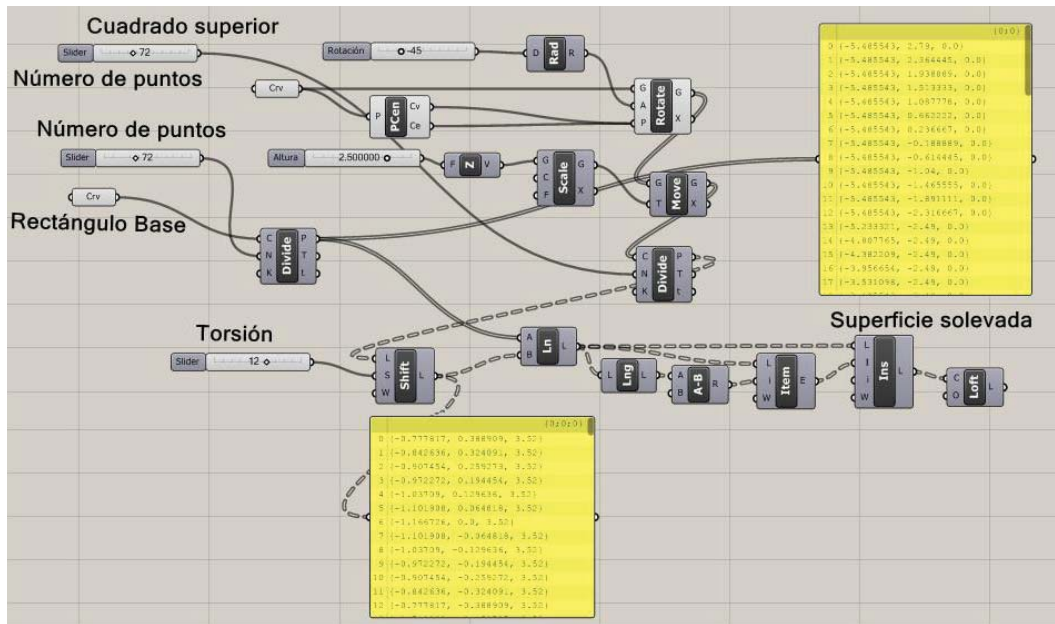


Figura 4. Rutina Grasshopper que genera diversos estados polimórficos de la cubierta © Pedro Villanueva Ramírez.

Este tipo de obra con barro colado tiene su antecedente directo en las construcciones de ferro-cemento, material fabricado con mortero de cemento-arena y un refuerzo metálico constituido por mallas y barras de acero de diferente tipo y diámetros (OLVERA, 1985, p. 75). En nuestro caso, la cubierta analizada desplantada sobre una trabe perimetral de concreto reforzado se propuso con una cuantía de acero baja con la pretensión de reducir el volumen de materiales que impacten negativamente el ambiente y la consideración de construir una superficie altamente flexible que permitiera las deformaciones necesarias durante el proceso de construcción.

### 3. Descripción del sistema constructivo

#### Ubicación

El predio se localiza en las calles de Aquiles Serdán y Francisco y Madero, pueblo de Santiago Tulyehualco, Xochimilco al sur del Distrito Federal y coordenadas geográficas 19°15'22.16" latitud norte y 99°17.02" longitud oriente. Santiago de Tulyehualco es un poblado que se encuentra ubicado en una zona de

transición constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados por capas de arcilla lacustre y de acuerdo con la zonificación geotécnica del Distrito Federal, el predio se clasifica en zona II (Art. 170 RCDF).

#### Aspectos formales

Planta de sección rectangular con proporción 2 a 1 (10.00 x 5.00 m.) con orientación oriente – poniente y girada 9° al poniente con respecto del norte. Los muros en forma de grapas tienen un espesor de 0.40 m, en sentido corto son muros macizos y en el largo, el diseño es vano sobre macizo quedando hacia el oriente 4 vanos de 1.76 x 2.10 y al poniente un vano de 3.52 x 2.10 a ejes; la envolvente de la cubierta se describe como una pirámide trucada que gira 45° sobre su eje en la parte superior, resultado de la intersección en el eje vertical de la pirámide mencionada en la base y un prisma cuadrangular y la parte superior que da como resultado una superficie reglada.

Tabla 1.- MATERIALES EMPLEADOS						
Cubierta	Peso vol. (Kg/m3) proporción 1:0.25:8		espesor (m)	CM (kg/m2)	Peso (kg)	
	Unitario	P.V.				
Cemento gris	1510	1383.05				
Cal	1000					
Tepetate	800					
Metal desplegado plafón 600 Kg/m2	7600	57				
Acero (fluencia) fy= 2320 kg/cm2 Diámetro de 5/16 "		54				
Peso volumétrico		1494.04	0.1	149.404	9412.45	
Ladrillo rojo recocido	1500		0.02	30	1895.7	
Carga adicional				40		
Carga Viva				40		
ª Área total de la cubierta (según Rhinoceros).				63.19 m2		
Combinación de cargas (de acuerdo al RCDDF): Carga muerta + 1.4 de carga viva						
Trabes de unión de concreto armado (f'c= 250 kg/m2)						
Elemento	Peso espec. (kg/m3)	Armado	Ancho	alto	Área	Peso/ml (kg/m)
Anillo perimetral inferior (T1)	2400	4#3 y 2#4 (e#2@15)	0.4	0.3	0.12	288
Anillo perimetral superior (T2) con malla acero Armamex		12x12x10	0.2	0.2	0.04	9.6
Nervadura de liga (TL-1) de tierra-cemento	1494.04	3#4 (e#2@10)	0.1	0.4	0.04	9.6

Tabla 1. Materiales empleados.

### Aspectos constructivos

El prototipo está desplantado sobre una cimentación de zapatas corridas de mampostería de piedra braza (h 0.80 m), dala de desplante de concreto armado. Los muros son de 0.40 m. de espesor de tierra estabilizada y hemos utilizado dos técnicas constructivas: el 50 % de los muros se realizaron con bloques de tierra comprimida BTC de 0.10 x 0.15 x 0.30 m y el otro 50 % con la técnica de barro colado<sup>4</sup> y metal desplegado sobre los que se coló una cadena de cerramiento de 0.40 x 0.20 m. de concreto armado. La composición de la cubierta tiene dos capas de malla plafonera no. 600 y una capa de compresión de aproximadamente 0.05 m de tierra y tiene un acabado final de ladrillo de 0.025 m de espesor.

### Aspectos estructurales

Estructuralmente se concibe como un sistema compuesto, con muros de carga de características físicas ya expuestas y en cubierta, un conjunto de cuatro superficies regladas de barro colado, reforzado en los

vértices con trabes embebidas. Las superficies en cubierta se consideran como apoyadas por las diferentes propiedades físicas y mecánicas de los materiales empleados.

### 4. Metodología

1) La valoración del comportamiento estructural se realizó por medio de simulación infográfica utilizando el programa de modelado en tercera dimensión Rhinoceros y el programa SAP 2000 para el análisis estructural.

2) La evaluación de la geometría estructural del diseño de la cubierta se hizo a escala 1:10 con un modelo y utilizando materiales que simularan el comportamiento de la capa de compresión (tela de tul, papel con pegamento y clavos que aportaron el peso necesario para dar la forma funicular), una vez retirada la torre central que se usó como cimbra, la cubierta giró y se desplazó por no tener el aporte del material a compresión. Posteriormente, se aplicó una capa de yeso para simular el comportamiento de la tierra.



3) Para la realización de las pruebas en sitio, se realizó un levantamiento topográfico del estado actual de la cubierta (utilizando un nivel óptico) que sirviera como referencia para el monitoreo de la deformación obtenida una vez colocada la carga. Asimismo, se elaboró un inventario fotográfico de fallas constructivas y estructurales resultantes.

## 5. Polimorfismo y análisis estructural de la cubierta

La morfogénesis<sup>5</sup>, como objeto de estudio de la morfología arquitectónica constituye la generación formal del espacio arquitectónico más adecuada para que ésta pueda ser habitada por el ser humano de manera confortable y segura. Es en este punto donde el estudio de la determinación de la forma (*form finding*) y de la propia estructura portante juega un papel primordial.

D'Arcy Thompson (1860-1948) en el capítulo "Forma y eficiencia mecánica" en su libro *Sobre el crecimiento y la forma*<sup>6</sup>, menciona cómo las fuerzas mecánicas intervienen en la forma y función estructural de un organismo vivo convirtiéndolo en una estructura mecánicamente más eficiente. Aquí se denota que una de las claves primordiales del proceso selectivo de un sistema o ser vivo es la economía de la materia y energía, aunadas a una sencillez y funcionalidad. Este mismo principio puede ser aplicable a las formas artificiales, en específico a las arquitectónicas. Partiendo de lo anterior, en el análisis estructural de la cubierta de Las Ánimas fue necesario, como primer punto, entender su morfogénesis para que, posteriormente, se pudiera llevar a cabo el análisis morfológico-estructural más apegado a su lógica geométrica; para esto, auxiliándonos de las nuevas tecnologías digitales y del proceso de generación formal denominado *Las deformaciones morfológicas continuas y polimorfismos*<sup>7</sup>, se logró, al menos de manera aproximada, conformar la geometría de la cubierta.

### 5.1 Generación de la forma de la cubierta

Si consideramos que el polimorfismo obedece a un comportamiento de naturaleza generativa natural, se pueden emplear sistemas emergentes los cuales permitan, mediante código programado, generar formas

polimórficas que presenten comportamientos complejos de acuerdo a la adaptabilidad y emergencia, según la naturaleza de las relaciones que se establecen, produciendo sistemas combinatorios no lineales.

Para llevar a cabo esta fase de clasificación contamos con la herramienta *plugin Grasshopper* la cual está estrechamente integrada con las herramientas de modelado del software *Rhinoceros* y su principal virtud es diseñar algoritmos que operan con datos y geometría que se obtienen a partir del manejo de los comandos y funciones del propio *Rhinoceros*.

En la búsqueda de la forma de la cubierta de Las Ánimas, se llevó a cabo un algoritmo que permite, mediante la elección de los dos rectángulos involucrados, crear una superficie reglada, misma que al girar y torcer el anillo superior, permite encontrar, además de la forma original, otras que pudieran comportarse morfológicamente de mejor manera.

Es interesante observar que los diversos polimórficos parten de dos consideraciones basadas en la transformación geométrica torsional de la superficie reglada de un sólido piramidal truncado. En el primer caso, el sólido es torcido a partir del centroide. El resultado es la generación de dos superficies alabeadas con predominio funicular en el lado corto y dos superficies alabeadas con predominio anti-funicular en el lado largo. En el segundo caso (el cual nos llevó a la generación de la forma buscada) el anillo superior fue el único elemento que se torció, dando como resultado cuatro superficies con tendencia al plano en las zonas inferiores y medias de la cubierta, cambiando a superficies alabeadas en la parte superior.

En cada caso se realizó un análisis de curvatura gaussiana para conocer el grado. El resultado en una escala 0 a 1 y comparándolo con una pirámide truncada cuyas cuatro superficies son planas y, por ende, su curvatura gaussiana es cercana al cero, fue una variación promedio entre los dos casos de 0.22 (magnitud adimensional).

### 5.2. Análisis estructural de la cubierta por carga gravitacional.

Para conocer el comportamiento estructural de la cubierta por carga gravitacional, además

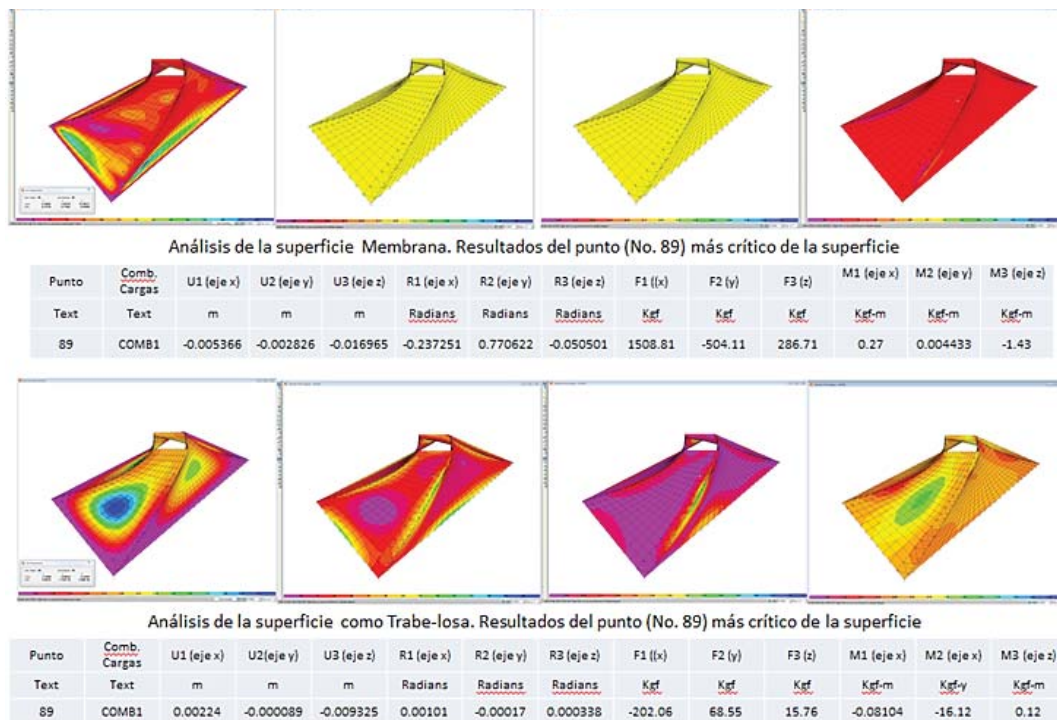


Figura 5. Análisis de la superficie © Pedro Villanueva Ramírez.

de la forma de la cubierta de barro colado fue necesario considerar los demás factores estructurales: las 4 nervaduras diagonales colgantes TL-1 de tierra-cemento que unen los pliegues de las 4 superficies alabeadas, el anillo superior girado 45° T2 y la trabe perimetral inferior que liga los muros de adobe y recibe la cubierta T1, ocasionando una junta fría, ambos de concreto armado, además de los materiales considerados como ortotrópicos para la tierra-cemento e isotrópicos para el concreto armado, las dimensiones y apoyos simples que lo definen, así como el sistema estructural que se apega más a su morfogénesis. La tabla 1 ejemplifica dichos factores.

### 5.3. Resultados del análisis

Considerando los factores de carga gravitacional, los materiales empleados, tanto en la cubierta como en los elementos de soporte y una condición de apoyo simple lineal (a lo largo de la trabe perimetral inferior por la discontinuidad de las propiedades de los materiales entre la trabe perimetral y la

cubierta), los resultados obtenidos (realizados mediante el software Sap 2000) se muestran a continuación:

#### 1) Como membrana

En el primer caso, la cubierta al ser una membrana trabajará a tracción, en su estado natural, por lo que la aparición de momentos flectores y cortantes en las 4 superficies será despreciable, gracias en gran medida, a la forma alabeada que adopta la parte superior de la cubierta, sin embargo, ésta presenta una deformación mayor en las partes planas inferiores de las cuatro superficies al estar construida con materiales como la tierra-cemento cuya naturaleza de morfología estructural es ser anti-funcular, y al estar unidas por 4 nervaduras, igualmente de tierra-cemento, que adoptan la forma de cables curvos, lo que evita que la cubierta se adapte morfológicamente en esa zona, presentando sólo la condición de alabeo en las zonas superiores de la cubierta, gracias, principalmente, a la presencia del acero en forma de funcular.

## 2) Como trabe-losa

En el caso del análisis como trabe-losa, el desplazamiento total actuante en la parte inferior y media de las cuatro superficies de la cubierta es menor comparado con el de la membrana, además de que las fuerzas axiales y cortantes de los elementos soportantes también disminuyen al distribuir los esfuerzos de manera más homogénea entre la cubierta y éstos, no así la flexión ya que al ser una trabe-losa, este esfuerzo actúa principalmente en el centro de las superficies. Otra diferencia es la deformación mínima, que se presenta en la parte inferior de las 4 superficies, debido principalmente, a que en esas zonas las superficies son casi planas, ocasionando un comportamiento característico de una trabe-losa.

## 6. Análisis de la geometría estructural mediante modelos físicos

En las plantas y alzados del proyecto, podemos observar que la geometría original de la cubierta, se compone de cuatro paraboloides de bordes rectos, concebidos como superficies regladas, que convergen en un cuadrado girado elevado, paralelo a la base rectangular de dichos paraboloides. En el proyecto estructural se observa en cada pliegue que une dos paraboloides las nervaduras TL-1 para la cumbrera de la trabe-losa. El paraboloide es resistente por su forma de doble curvatura inversa en virtud de la propiedad geométrica que le confiere el momento de inercia.

En cuanto a compatibilidad de materiales, la trabe de concreto armado que liga los muros de adobe y recibe la cubierta, requirió de un material de transición entre trabe de concreto y muro de barro colado, así como entre trabe de concreto y la cubierta de barro colado.

De acuerdo con la mano de obra y en virtud de que el material de las nervaduras de la TL-1 sería tierra estabilizada armada en lugar de concreto armado, se re-interpretó la geometría de la estructura y se optó por dejar las nervaduras de borde (originalmente rectas), como cables colgantes formando trabe-losas curvas en los bordes y obligando a toda la cubierta a su forma funicular donde los originales paraboloides conservaron su alabeo sólo en la parte superior y a ceder el alabeo de su

parte inferior para la formación de canales funiculares por el peso de la tierra, trabajando como trabe-losas apoyadas en los pliegues de sus extremos y en las trabes de concreto armado.

El modelo físico muestra una cubierta colgante con la misma geometría del proyecto original con una carga de clavos equidistantes para obtener su forma funicular. Asimismo, se buscó analizar el comportamiento estructural de la forma propuesta en donde, al retirar la cimbra donde se apoya, la cubierta cede como se muestra en la imagen 6 formando unas canales perimetrales apoyadas en los pliegues de unión de los cuatro paraboloides que forman la cubierta, que con la capa de compresión proporcionada por el barro colado forman trabe-losas trabajando a flexión como se muestran en la imagen 7.

## 7. Identificación de daños, fallas estructurales y valoración del comportamiento ante cargas gravitacionales

Al estar constituido el sistema con muros flexibles se corre el riesgo de fallas. Se identificaron los daños producto de errores de factura, los muros dúctiles constructivos y deformaciones geométricas, realizadas a través del monitoreo del comportamiento, también se realizó una prueba de carga.

Se analizaron los resultados a lo largo de un año. Cabe mencionar que todo el proceso de construcción fue forzado a pasar por las condiciones más desfavorables, pues no se utilizaron ni mano de obra calificada, ni herramienta o equipos para su óptima ejecución con el objetivo de emular las condiciones y recursos con los que cuentan las personas para construir sus viviendas en la modalidad de "autoconstrucción" de espacios para almacenaje y trabajo.

### 7.1 Valoración del proceso constructivo

#### 7.1.1 Cimentación

Zapatas corridas de mampostería (piedra braza de la región) sobre mejoramiento del terreno de material inerte (tepetate) compactado en capas de 20 centímetros con pisón de mano.

- El mejoramiento del terreno; defectuoso. Al realizarse a mano, no se alcanzó la

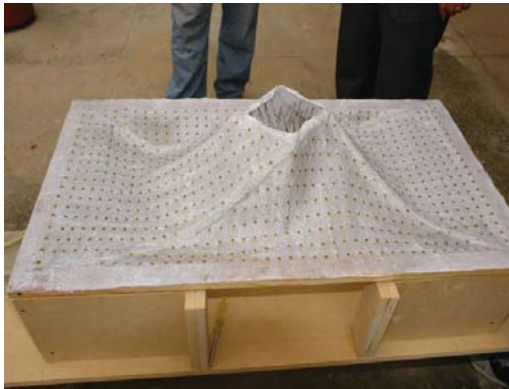


Figura 6. Modelo físico sin apoyo central  
© LITEC.



Figura 7. Trabe- losas en forma de canal  
© (ENGEL, 2009, pág. 234).

compactación adecuada (90% Proctor). Esta acción se consideró necesaria debido a que el suelo de esa zona está compuesto por una capa de aproximadamente 40 cm de espesor de “tierra negra” que evidencia un alto contenido de materia orgánica, a partir de esa profundidad, el suelo es de arcilla medianamente expansiva. Sobre el cimiento de piedra, se colocó una cadena de concreto reforzado y desplante de los muros de 0.40 m de espesor.

- Resultados de la observación. En general, el comportamiento de la cimentación ha sido satisfactorio, gracias a la flexibilidad de la piedra y el concreto, las deformaciones ocasionadas por hundimientos diferenciales debidas a lo defectuoso de la compactación en la sustitución del terreno. No se han presentado agrietamientos en las zapatas.

#### 7.1.2. Muros

De block de tierra comprimida (BTC) y barro colado; mezcla de técnicas. En la primera etapa, se construyeron las dos grapas cabeceras, con BTC sin refuerzo en las esquinas, en sustitución del refuerzo, el block se colocó cuatrapeado para complementar los elementos verticales de la estructura, se construyeron muretes de barro colado a manera de columnas como elementos para confinar las grapas y salvar el claro de los vanos laterales del prototipo. Los muros y columnas se remataron con una cadena o trabe de concreto armado.

Tanto los muros de BTC como las columnas de tapial, se aplanaron con un recubrimiento de mortero de tierra y cal.

#### Resultados de la observación

Los muros de las dos cabeceras (claros cortos) presentan agrietamientos verticales importantes, este efecto se atribuye a los hundimientos diferenciales por defectos de la compactación del suelo y contracción por deshidratación acelerada en la fabricación del BTC, sin embargo, este hallazgo no representa un riesgo para la estabilidad del módulo.

#### 7.1.3. Cubierta

Cabe aclarar que no se utilizaron moldes o cimbra, sólo puntales para soportar las catenarias de varilla y la malla, al aplicarse con las manos, el espesor de la capa presenta muchas variaciones y su aspecto es muy rústico. Finalmente, se recubrió con ladrillo de cerámica de la región asentado con mortero a base de tierra y cemento como protección e impermeabilizante del techo de tierra.

#### Resultados de la observación

A un año de su construcción, el techo presenta varias fallas en forma de agrietamientos generando humedades y goteras en lugares puntuales, los agrietamientos más importantes se presentan a lo largo de los muros en sentido largo, esto es atribuible a una defectuosa

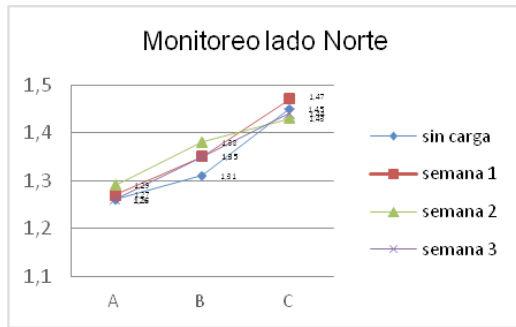


Figura 8. Comportamiento estructural del lado Norte de la cubierta © LITEC.

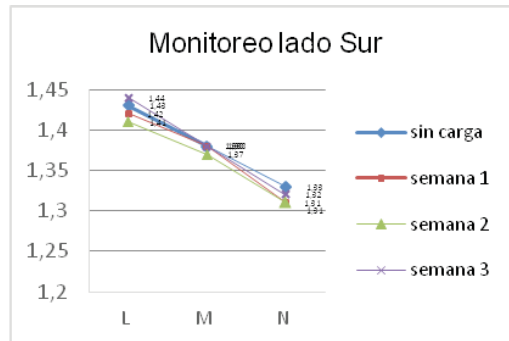


Figura 9. Comportamiento estructural del lado Sur de la cubierta © LITEC.

conexión entre el armado de la techumbre y la trabe de cerramiento. Otros puntos que tienen fisuras, son las esquinas que se atribuyen a la deformación que se presentó en el momento de retirar los puntales.

#### 7.4. Prueba de carga

Para la realización de la prueba de carga se procedió a colocar costales de 50 kg de arena hasta alcanzar las 3 toneladas, se dispuso de manera uniformemente repartida sobre las dos caras que arrancan en los lados cortos de la cubierta, previamente se hizo una nivelación en catorce puntos. El comportamiento se monitoreó durante las 3 semanas posteriores a la aplicación de la carga muerta, tomando lecturas cada semana de los puntos en referencia, y al mismo tiempo, se detectaron las fisuras y se registraron las grietas que se acusaron significativamente por el comportamiento plástico del material; las siguientes gráficas muestran los puntos que tuvieron más variación de nivel.

La línea azul de las figuras 8 y 9 representa los tres puntos que presentaron mayor variación de nivel en la cubierta sin carga adicional, al aplicar la carga se fue registrando una variación de nivel de hasta 7 cm, en el punto B, las deformaciones de la cubierta se acentuaron mucho más en el lado norte que en la parte sur, se deduce que el comportamiento

es el de una membrana debido a que al aplicar la carga en un punto se flechaba en ese lugar, pero al mismo tiempo se elevaba en otro punto.

#### 7. Conclusiones

Como se comentó, las configuraciones formales de cada una de las superficies que generan la cubierta tienden a ser superficies funiculares en el lado largo hay un predominio en la parte superior de doble curvatura inversa, mientras sobre el lado corto hay un predominio de superficie plana.

El predominio general, de acuerdo con el análisis de curvatura gaussiana, es de superficie casi plana, excepto en la parte del anillo superior donde se aplicó la torsión. Además de que la cubierta está soportada por trabes perimetrales en su parte inferior y superior, así como, por trabes de liga en sus diagonales, todas ellas de concreto armado, lo que ocasiona junto con los materiales empleados que tienden a un comportamiento natural de compresión, que la cubierta considerada como membrana no tenga un esfuerzo adecuado, comparado con el trabajo estructural de trabe-losa.

Posiblemente la única ventaja es la casi nula presencia de flexión en su superficie.

Sin embargo, si revisamos los resultados obtenidos fundamentando a la cubierta como cuatro trabe-losas se observa que el desplazamiento es menor, además de que la distribución de los esfuerzos entre las superficies y los elementos soportantes es más uniforme.

Lo anterior hace suponer que la cubierta, al menos desde el punto de vista de cargas gravitacionales, se comporta más como trabe-losa que como membrana, siendo una estructura atípica, donde una cubierta colgante de cables de acero trabajando a tracción se modifica para trabajar a flexión.

## Agradecimientos

*Se agradece la colaboración del equipo de trabajo del Laboratorio de Investigación Tecnológica: Arq. Leónides Alejandro Díaz Tenorio, Arq. Luis Xólotl Morett Muñoz, Arq. Eduardo Paulino, D.I. Diemel Hernández Unzueta, D.I. Guillermo Rodríguez Reyes*

## Citas y Notas

<sup>1</sup> *Profesor Investigador de la UAM-X. docencia de Tecnología en Arquitectura (Construcción, Instalaciones y Estructuras). Secretario Académico de la División de Ciencias y Artes para el Diseño, Jefe del Departamento de Tecnología y Producción. Jefe del Laboratorio de Tecnología de Arquitectura.*

<sup>2</sup> *Investigadora Departamento de Tecnología y Producción, Laboratorio de Investigación Tecnológica CyAD UAM-X.*

<sup>3</sup> *Maestro en Arquitectura de la UNAM. Profesor Investigador de la UAM-X. Docencia de Tecnología en Arquitectura (Costos, Construcción, Instalaciones y Estructuras) y Diseño en la carrera de Arquitectura. Director de la División de Ciencias y Artes para el Diseño y jefe del Departamento de Tecnología y Producción. Publicaciones: Reclusorio Tipo, Secretaría de Gobernación, Planeación Penitenciaria del Estado de Puebla, Costos en la Construcción de la UAM-X..*

<sup>4</sup> *Maestro en Arquitectura de la UNAM. Profesor Investigador de la UAM-X. Docencia de Tecnología en Arquitectura (Estructuras, Diseño).*

<sup>5</sup> *Maestro en Arquitectura de la UNAM. Profesor Investigador de la UAM-X. Docencia de Tecnología en Arquitectura (Estructuras, Diseño)*

<sup>6</sup> *Este proyecto se presentó en el Congreso de tierra el año pasado*

<sup>7</sup> *La sección en planta de la cubierta es rectangular en una proporción 2 a 1, en volumen es una pirámide irregular, con el eje de su cúspide sobre el centro geométrico del rectángulo, la altura es de 1.50 m, truncada en un plano paralelo a su base y girando este 45°, dando por resultado una superficie reglada simple.*

<sup>8</sup> La ubicación del predio de Las Ánimas se encuentra en el valle de México, zona altamente sísmica y terreno de alta compresibilidad.

<sup>9</sup> El barro colado es la aplicación de una mezcla similar a la consistencia del concreto.

<sup>10</sup> El significado de morfogénesis viene de su origen etimológico morphé (forma) y génesis (origen). Wikipedia.

<sup>11</sup> D'Arcy Wentworth Thompson, *Sobre el crecimiento y la forma*, España, Blume, 1980.

<sup>12</sup> De acuerdo al diccionario de la Real Academia Española, se puede definir al polimorfismo como la cualidad de una entidad que tiene o puede tener distintas formas. La palabra proviene del griego poly=mucha, y morphos=formas. Esta cualidad se puede utilizar en la tecnología digital dentro del proceso de diseño arquitectónico para poder generar múltiples estados de la forma, a partir de uno o más procesos ejecutados dentro de un software.

## Bibliografía

D'ARCY, W. T. (1980). *Sobre el crecimiento y la forma*. España: Blume.

ENGEL, H. (2009). *Sistemas de estructuras*. Barcelona: GG.

M. Neville, A. (1999). *Tecnología del concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.

OLVERA, L. A. (1985). *El ferrocemento y sus aplicaciones*. México: Instituto Politécnico Nacional.

VANDEN, B. F. (2000). *El diseño de la naturaleza o la naturaleza del diseño*. México: UAM- Azcapotzalco.

VILLASANTE, S. E. (2008). *Mampostería y construcción*. México: Trillas.