

93



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

• ANALISIS DE INGENIERIA CIVIL,
EN OBRAS DEL MEXICO ANTIGUO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A

JORGE | SANCHEZ ARMASS TRUBY



ASESOR: M. en I. RICARDO PADILLA VELAZQUEZ

MEXICO, D. F.

2000

283806



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

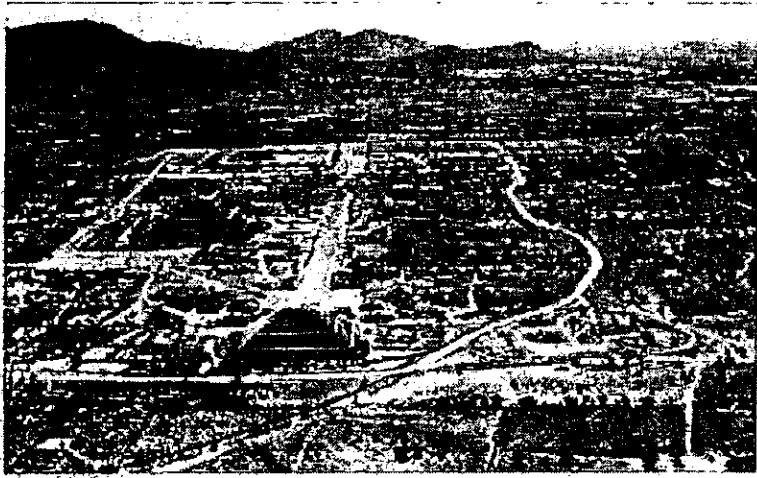


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





ACADEMIA NACIONAL
DE INGENIERIA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/208/99

Señor **JORGE SÁNCHEZ ARMAS TRUBY**,
Presente .

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. Ricardo Padilla Velázquez, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"ANÁLISIS DE INGENIERIA CIVIL EN OBRAS DEL MÉXICO ANTIGUO"

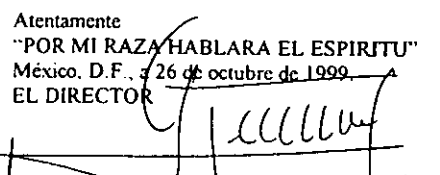
Introducción.

- I. Capacidad última de carga y características del suelo bajo condiciones de carga instantánea de la última etapa constructiva del Templo Mayor de Tenochtitlan.
 - II. Proceso y desarrollo constructivo del centro ceremonial de Teotihuacan.
 - III. Resistencia de materiales en las vigas del Conjunto Plaza Oeste de Teotihuacan.
- Conclusiones.**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D.F., a 26 de octubre de 1999.
EL DIRECTOR


M. C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/GMP/scr

A Dios, creador de la vida y fuente de felicidad y amor

*A mi padres Gury y Jorge,
fuentes de fuerza, alegría, orgullo e inspiración*

*A mis abuelos Emma y Truby,
por su cariño, experiencia y sabiduría*

AGRADECIMIENTOS

Aunque poco usado ya en nuestros días, tengo la necesidad y responsabilidad de agradecer algunas personas, que han sido importantes para mí en algún momento de mi vida.

Antes que nada, al M. en I. Ricardo Padilla V. Por su gran paciencia, conocimientos, ideas, palabras y apoyo, no solo para esta tesis, sino en todas las pláticas que sostuvimos; al M. en I. Hugo Haaz Mora, por su apoyo, energía y confianza; A los Ingenieros Juan Carlos Zamudio, Roberto Rojo, Hector Sanginés y Roberto Heathly por toda su ayuda; a los Arquitectos Guillermo Almazán y Gerardo Varela y al Ing. Alejandro Hernández por ser mis primeros profesores en la práctica.

A mi hermana Bárbara, por el enorme poder de su sonrisa

A Jorge, por los miles y miles de kilómetros de vida recorridos

A Carlos, por todo el tiempo y todas las semejanzas

A Iván, por toda su naturalidad

A Mauricio, por su fuerza, ejemplo y empuje

A Pablo, por todas las discusiones

A Erik, por su genialidad

A Roberto, por “construir” con entusiasmo y amistad, día con día

A Daniel, por sus ganas de vivir

A Carlos, por siempre estar presente

A Luis Eduardo, por ponerle música a la vida

A Toño, por su entusiasmo por aprender

A toda mi familia por ser lo grandiosos que son

A todos mis amigos

A la Dra. Carmen Reyes y al Sr. Rodolfo Sánchez, por sus palabras, sugerencias y emoción

A la *Universidad Nacional Autónoma de México*, en especial a la *Facultad de Ingeniería*, que me dieron sabiduría, ingenio, orgullo, fortaleza, conocimientos y lo necesario para triunfar. A todos mis profesores que compartieron sus conocimientos y experiencias con gran gusto y placer.

ÍNDICE

Introducción

i

I. Capacidad última de carga y características del suelo bajo condiciones de carga instantánea de la última etapa constructiva del Templo Mayor de Tenochtitlan.

1.1	Generalidades y marco histórico	1
1.2	Características del Templo Mayor	5
1.3	Problemas y comportamiento histórico del suelo bajo el Templo Mayor; planteamiento de la hipótesis	7
1.4	Geometría del Templo Mayor	9
1.5	Propiedades actuales del suelo y cálculo bajo esquema de proporción de las propiedades mecánicas del suelo en la época de construcción del Templo	11
1.6	Obtención del valor de cohesión y capacidad última de carga del suelo	19

II. Proceso y desarrollo constructivo del centro ceremonial De Teotihuacan

2.1	Proceso general	30
	2.2.1 Volumen o núcleo estructural	
	2.1.2 Definición espacial, relacionada a la construcción	
	2.1.3 Cuerpos posteriores o superpuestos	
2.2	Proceso y sistema por etapas; del basamento a los techos	33
2.3	Sobre los materiales de construcción	43
	2.3.1 Materiales pétreos	
	2.3.2 Materiales aglutinantes	
	2.3.3 Materiales manufacturados	
2.4	Organización del proceso y mano de obra	47

**III. Resistencia de materiales en las vigas del Conjunto
Plaza Oeste de Teotihuacan**

3.1	Historia urbanística	52
3.2	Introducción al Conjunto Plaza Oeste	56
3.3	Materiales, dimensiones y cargas	57
3.4	Resistencia de materiales; comportamiento de las vigas	64

Conclusiones	75
---------------------	-----------

Bibliografía

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Civil, una profesión sumamente amplia, vasta y completa, es también una profesión ancestral y, aunque no con este nombre, es una de las más viejas en nuestro planeta. Todas las culturas han necesitado constructores que hagan reales las obras de arte arquitectónicas que cada civilización ha gestado, pero además de hacerlas reales, tenían (tienen) que perdurar en el tiempo, ser funcionales, técnicamente eficientes y con el mejor aprovechamiento de recursos, para poder ejecutarlas.

Las grandes culturas solo pudieron serlo gracias a una civilización y progreso, que les permitió crear espacios urbanos, permitiendo así las actividades sociales, económicas, políticas, religiosas y comerciales que todo pueblo lleva a cabo. Para poder crear estos espacios, es necesario alterar el entorno y transformarlo, y hacer esto requiere de organización, planeación, técnica, recursos y arte; es decir, en conjunto, realizar lo anterior requiere de ingenio.

Las culturas prehispánicas realizaron lo mencionado de una forma grandiosa, artística, completa y vasta. Desde las primeras ciudades y centros ceremoniales de los Olmecas (La Venta), hasta la compleja y poderosa Tenochtitlan de los Aztecas, pasando por las grandes ciudades mayas (que eran realmente centros de conocimiento, ciencia, arte y técnica) como Palenque, Chichén Itza, Tikal Y Uxmal, las impresionantes ciudades zapotecas (Monte Alban) y mixtecas (Mitla), y por supuesto la impactante e imponente Teotihuacan. En todos estos

centros urbanos (por que los son), encontramos una gran capacidad de organización y planeación para la edificación de las misma, diversos y parecidos sistemas constructivos que permitieron la creación de estructuras con diversos fines y todo esto en conjunto con arte y belleza.

En este trabajo de Tesis, es mi intención de, con métodos y análisis modernos y actuales, estudiar una pequeña parte de los sistemas y procesos constructivos así como de contadas estructuras, para hacer valer la calidad de las técnicas de los constructores prehispánicos y presentar lo eficiente de las nuestras.

En el Capítulo I se plantea una situación hipotética sobre la construcción del Templo Mayor de Tenochtitlan, y los efectos que hubiera tenido esta obra en un suelo como el de la Ciudad de México. De esta forma, se puede vislumbrar también, la intuición geotécnica de los Aztecas o Mexicas. Vamos a poder estudiar la capacidad de carga del suelo, bajo el supuesto de la creación de un relleno artificial creado por los Aztecas, para mejorar las condiciones del suelo en la zona del lago de Texcoco (en particular el lago de México). Es intención del autor estudiar las características, teóricas, del suelo hace cinco siglos y las propiedades del mismo, y que estas nos reflejen el estado del terreno sobre el cual se levantó un templo de la magnitud del *Huey Teocalli* azteca; Esto nos permitirá entender que fue un fenómeno de consolidación en el suelo lo que evitó la destrucción del templo o pirámide. Asimismo veremos como una carga elevada, no cimentada fuertemente, construida directamente sobre el terreno (en este caso el relleno artificial llamado Isla de los Perros), y con geometría particular, tiene efectos adversos a la postre.

En los Capítulos II y III se estudiarán las obras de los constructores teotihuacanos, tanto en proceso y sistema, como en técnica. En el primer capítulo de estos dos, se entenderá el proceso y metodología llevados a cabo en la construcción de diversas estructuras que conforman un centro urbano. Se podrá apreciar la efectividad del mismo, y como un mismo sistema con algunas variantes, tiene fines distintos. Los teotihuacanos fueron hombres de gran capacidad, ingenio y orden. Al hablar sobre el sistema constructivo del volumen, y creación de espacios, se refleja la capacidad de una sociedad, y el avance técnico, científico y artístico que ha logrado; la cultura teotihuacana no es la excepción. Se tratará de encontrar el orden y organización del método, la fuerza de trabajo requerida, los materiales usados para la edificación y su tratamiento, ya que es a través de esto, que, en conjunto hacen que una obra perdure. En el tercer y último capítulo, se analizarán las vigas de una plaza en el centro del centro ceremonial, llamada Conjunto Plaza Oeste por su ubicación geográfica. Estas vigas son consecuencia del proceso constructivo, y de la creación de espacios. Pero, ¿cuál era el funcionamiento de estas vigas? ¿qué tan efectivas eran? ¿cumplían su función? Es intención entonces probar con técnicas modernas, estrictas y estudiadas, la resistencia del material de las vigas, y responder a las preguntas aquí planteadas.

Todo lo expuesto en esta introducción, es por supuesto rodeado de una serie de conocimientos y entornos culturales, artístico, sociales y antropológicos, que juegan un papel fundamental en toda sociedad. Para cada capítulo se presenta un pequeño marco histórico conceptual que nos ayude a ubicarnos en tiempo y espacio, y a entender las capacidades y limitaciones de cada cultura. Es todo esto en conjunto lo

que forma un escrito que trata de conjuntar técnica, historia, cultura, arte, formación, habilidad e ingenio.

*“... oquipan oquimatian mochiuh in tlacatl
cacta initoca Tlacayelleltzin Cihuacohuatl in
cemanahuac tepahuan.”*

*“... y esto ocurrió en la época
del señor Tlacaelel; el Cihuacóatl,
el conquistador del universo.”*

Fernando Alvarado Tezozómoc
Crónica Mexicáyotl.

I

**CAPACIDAD ÚLTIMA DE CARGA Y CARACTERÍSTICAS DEL
SUELO BAJO CONDICIONES DE CARGA INSTANTÁNEA DE LA
ÚLTIMA ETAPA CONSTRUCTIVA DEL TEMPLO MAYOR DE
TENOCHTITLAN**

1.1 Generalidades y marco histórico

El Templo Mayor de Tenochtitlan es posiblemente una de las construcciones más impresionantes que se hayan llevado a cabo por el hombre. Lo último no es solo por las dimensiones del templo, sino por las características del terreno y la ubicación de la capital del imperio Azteca. Levantar un templo con las características del Templo Mayor, requiere una gran cantidad de material, organización, planeación, recursos, mano de obra, y sobre todo, inspiración. Por otra parte, el subsuelo del lago de México y el terreno sobre el que se construyó no son los más apropiados para una obra de este tipo.

Para poder edificar el *Huey Teocalli* (nombre original del Templo), los Aztecas tuvieron que crear una isla artificial que sobresaliera de la superficie del lago, y que el material de la misma fuera adecuado para darle forma y poder compactarlo como se verá mas adelante. El terreno tendría que soportar una construcción de mampostería de grandes dimensiones, ya que llegaría a ser la representación del poder del imperio, y de la concepción del ombligo del mundo en el pensamiento nahuatl, según Gutierrez Tibón.

Es importante, antes de iniciar un análisis de Mecánica de Suelos, tener un marco histórico y conceptual de las causas y razones de la construcción del templo, así como una visión de su entorno físico.

Se sabe que los Aztecas a mediados del siglo XII d.C. peregrinaron desde un mítico lugar llamado Aztlán (de ahí su nombre), cuya

ubicación no se ha podido establecer. Este peregrinaje llevó a este pueblo, conformando por siete barrios o tribus, hasta la cuenca del Valle de México alrededor del año 1325 d.C.. Una vez en la zona, que se encontraba bajo el dominio de los Tepanecas, cuya ciudad principal era Azcapotzalco, los Aztecas encontraron la señal que su dios tutelar, Huitzilopochtli, les diera para ahí edificar la ciudad de residencia definitiva. Contrario a la creencia popular de que vieron esta señal debido a que llegaron a un islote ubicado en el centro del Lago de México. Efectivamente, los aztecas encontraron esta señal en el islote, pero su llegada al islote se debe a que el gobernante de Azcapotzalco les “cedió” el islote para habitarlo, creyendo que los provenientes de Aztlán no sobrevivirían a las condiciones adversas del islote mismo. Una vez en el islote los Aztecas vieron la mencionada señal “...entre una multitud de carrizales había flores blancas, sauces blancos, peces blancos, un tunal, un águila y pájaros de hermoso plumaje con los que ésta se alimentaba. Y ahí recibieron la orden de Huitzilopochtli, de llamar Tenochtitlan al lugar.”¹

En agradecimiento a su dios, los Aztecas levantaron una ermita, túmulo o montículo de céspedes y tapias, junto con barro, carrizo, tule y algunas pocas rocas encontradas en el lugar mismo.

Conforme los Aztecas fueron avanzando en tecnología y poder, tanto económico como político y social, erigieron el templo, tenía que ser representativo de este mismo avance; conforme se engrandecían los Aztecas, lo hacía su templo. Los gobernantes entonces fueron superponiendo su templo sobre los anteriores, además de que Tenochtitlan sufría de constantes inundaciones. Las superposiciones o

¹ FRANCO B. María Luisa, Conservación del Templo Mayor de Tenochtitlan, GV. Editores, Colección Divulgación, INAH, Proyecto Templo Mayor, México D.F., 1990

etapas fueron seis principales, sin tomar en cuenta el montículo o adoratorio inicial, el cual se encuentra ahora por debajo del nivel freático, y su composición no es propiamente la de un templo en forma, además, los materiales de construcción no son duraderos.² Para poder levantar estos templos superpuestos, y que los mismos se mantuvieran a lo largo del tiempo, eran necesarios materiales más resistentes, como roca, madera, arena, cal, y grandes cuerpos monolíticos de roca para esculturas. Estos materiales en un principio fueron adquiridos mediante el sistema de trueque en mercados y una muy pequeña explotación en los bancos del lago, bajo la supervisión del señorío de Azcapotzalco. Mientras transcurría el tiempo, los Aztecas, Mexicas o Tenochcas, fueron adquiriendo poder en el valle, y su influencia se fue acrecentando. Gracias a esto último, los materiales de construcción se obtenían también mediante la participación de otros grupos y pequeños reinos asentados en las orillas del lago, así como de algunos tributos. Fray Diego Durán relata, para ejemplificar lo anterior, el momento en que Moctezuma I (Ilhuicamina) decide levantar una nueva etapa del templo (esto para demostrar su poder y bonanza económica), una vez que el rey Mexica anterior, o el primer emperador, Izcoatl, había derrotado a Maxtla, rey de Azcapotzalco y comenzara el dominio del valle por parte de los aztecas. También, ocurrió que Tlacaelel, el Cihuacoatl o sumo sacerdote Azteca, había sido nombrado sacerdote supremo de Quetzalcoatl en toda la región. Para levantar el templo, Durán dice que al reino de Texcoco, encabezado por Nezahualcoyotl le fue encargado proveer el material y realizar la construcción del frente y delantera del templo, así como a Chalco y a Xochimilco les fueron encargadas las fracciones laterales. A forma de historia, fue esto último

² Op. Cit.

causa de la invasión y posterior conquista por parte de los Aztecas a Chalco, ya que este pueblo, en un principio, se rehusó a proveer material y mano de obra para el Teocalli. ¡Y que mejor excusa para una guerra, que un desconocimiento o falta de adoración hacia una deidad!

1.2 Características del Templo Mayor

El templo mayor de Tenochtitlan, o *Huey Teocalli* estaba formado por una enorme plataforma o basamento sobre el cual se yergue un cuerpo piramidal dividido en dos secciones, con el frente viendo al poniente de la ciudad. Este frente dividido, tenía una escalinata en cada sección, siendo éstas el acceso a una plataforma en la zona superior del templo, en donde se encontraban dos adoratorios: el primero, situado en la zona norte de esta plataforma, y estaba dedicado a la adoración del dios de la lluvia, Tlaloc; el segundo, a un costado del adoratorio a Tlaloc y en la zona sur de la plataforma, estaba dedicado a Hutzilopochtli, dios tutelar de los Tenochcas, y representante del sol y la guerra.

Según evidencias obtenidas en las excavaciones, el templo en su última etapa constructiva, y en su base, tenía las siguientes dimensiones: 76.60 m de norte a sur (frente y parte trasera), y 83.50 m de oriente a poniente (costados). Estas dimensiones toman en cuenta los adornos, alfardas, esculturas, jardineras y remates, lo cual hace al cuerpo principal, y por ende la masa principal, ligeramente menor.

A continuación se presentan las fechas de cada etapa constructiva, o sobreposición de cuerpos del templo mayor, así como el gobernante Mexica que ordena esto.

<u>Etapa</u>	<u>Construcción</u>	<u>Calendario Nahuatl</u>	<u>Gobernante (mandato)</u>
II	1390 d.C.	Dos Conejo	Acamapichtli
III	1431 d.C.	Cuatro Caña	Izcoatl (1427-1440) d.C.
IV	1454 d.C.	Uno Conejo	Moctezuma I (1440-1469) d.C.
V	1481-1500 d.C.	no especificado	Tizoc-Ahuizotl (1481-1486-1502) d.C.

VI posterior a 1502 d.C. no especificado Moctezuma II (1502-1520) d.C.

Dentro de estas etapas, existen varios puntos que se deben mencionar: tanto la etapa II como la IV, tienen varias “subetapas” atribuidos a los reinados de Chimalpopoca y Axayacatl respectivamente, que consistieron no en la construcción de un cuerpo piramidal, sino en aumento de las escalinatas, fachadas, y adoratorios, así como nuevas esculturas y adornos. En la etapa V se pueden observar en la esquina noreste restos de pilotes cilíndricos de hasta 1.70 m de diámetro hechos de pizarra y tezontle, así como pilotes más delgados de madera, que funcionan como refuerzos a la superposición piramidal. Los materiales usados para la construcción de las pirámides son principalmente andesita, basalto, tezontle y pizarra.

1.2 Problemas y comportamiento histórico del suelo bajo el Templo Mayor; planteamiento de la hipótesis

El ingenio de los Aztecas fue el que permitió construir un templo tan impresionante (según describen los cronistas, y nuestra imaginación supone a la vista de los restos) como el templo mayor, la creación de la llamada Isla de los Perros, un relleno artificial para mejorar las condiciones del terreno, es prueba de ello. De esta forma podemos tener una idea de la intuición geotécnica de los constructores mexicas para cimentar una estructura de las dimensiones y masa del *Huey Teocalli*.

La construcción del templo en diferentes etapas, como se mencionó anteriormente, es un primer indicador que el hundimiento y consolidación del subsuelo fueron asimismo, en etapas. Esto resulta obvio, ya que el proceso constructivo de cada etapa, y con las limitaciones técnicas de la época histórica, requiere un tiempo considerable, aumentando el volumen anterior, y mientras más grande sea este, mayor el peso y carga sobre el suelo (que era un relleno artificial semi compactado). El incremento de carga sobre el suelo en el tiempo, fue provocando una deformación en el suelo que resultó en hundimientos. Estos hundimientos, registrados por exploraciones y sondeos realizados sobre todo en el presente siglo, nos indican que ocurrió una consolidación en el suelo. Esto quiere decir que el factor tiempo juega un papel sumamente importante en el proceso geotécnico y el funcionar de la Mecánica de Suelos. Tiempo fue lo que requirió la construcción de cada etapa, y tiempo transcurrió entre la construcción de cada una de estas, lo que permitió que el suelo fuera admitiendo las cargas distribuidamente, y reaccionara proporcionalmente a las mismas. De esta forma, la distribución de esfuerzos fue tal que dio oportunidad al suelo de no fallar, es decir, de no quebrarse y que por esto el Templo

Mayor se hundiera. En este momento cabe hacer énfasis en que es diferente la distribución de esfuerzos y distribución de la carga sobre el suelo, que los esfuerzos y distribución de los mismos en la estructura piramidal y en el material que conforma a la misma. Las fallas que se hubiesen podido presentar por respuesta plástica (como sucedió en la pirámide “truncada” de Egipto) en el material de construcción, es decir, la pirámide en sí, son independientes de las fallas en el suelo por capacidad de carga.

Es ahora que surge una pregunta válida que, de haber sido diferente la historia, podría considerarse como real:

¿Qué hubiera sucedido si el Templo Mayor se hubiese construido en una sola etapa, siendo esta la última, de una sola vez, y conservando las dimensiones y pesos finales?

Es el propósito de este Primer Capítulo del trabajo de tesis contestar la interrogante anterior. Para lograr tal fin, se pretende de estimar las características del suelo hace quinientos años, y posteriormente calcular la carga última resistente del suelo, para compararla con la descarga provocada por el peso de la pirámide, y así obtener un resultado y respuesta posible a la pregunta.

1.4 Geometría del Templo Mayor

Para poder conocer las cargas sobre el suelo, es necesario conocer la geometría de cada templo (en su respectiva etapa) así como los materiales que lo componen para determinar el peso volumétrico y la carga total.

Para tener la geometría de las seis principales etapas constructivas, se supone su posible configuración con base en las excavaciones recientes.

A continuación, se presenta un esquema de las etapas del Templo Mayor y su geometría.

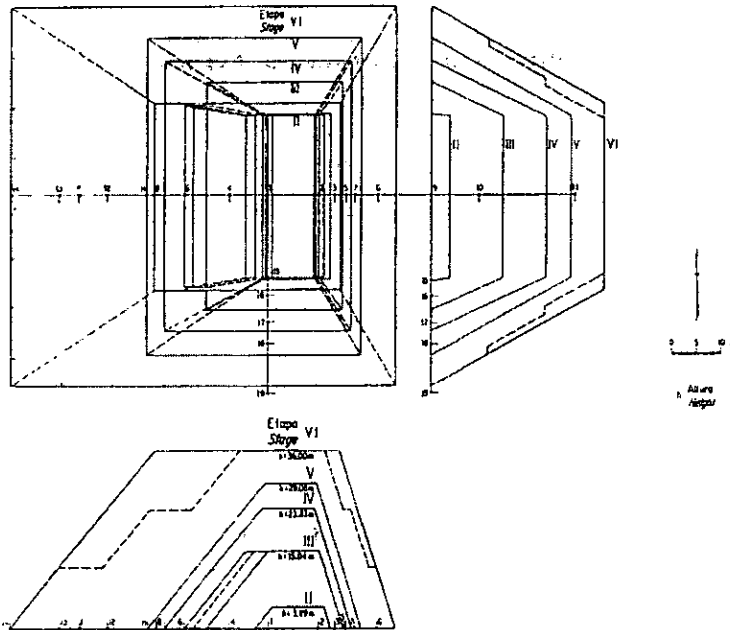


Figura 1.1 Proyecciones y dimensiones de Templo Mayor

Etapas	B[m]	L[m]	h[m]	b[m]	l[m]	A[m ²]	a[m ²]	Vd [m ³]	γ[kg/m ³]	q[kg/cm ²]
--------	------	------	------	------	------	--------------------	--------------------	----------------------	-----------------------	------------------------

I										
II	15.26	33.65	3.89	10.57	32.84	513.50	346.95	1663.03	1600.00	0.52
III	30.52	45.78	15.04	13.30	32.87	1397.21	437.17	13114.50	1600.00	1.50
IV	38.35	54.39	23.83	10.95	32.48	2085.86	355.62	26234.81	1600.00	2.01
V	43.43	64.17	29.06	10.33	32.87	2786.90	339.55	39707.80	1600.00	2.28
VI	78.26	76.69	36.00	37.95	37.56	6001.76	1425.40	124224.49	1600.00	3.31

Volumen de una pirámide truncada con bases paralelas: $Vd = (h/3) * (A+a+\sqrt{Aa})$

- Donde:
- h = altura de la pirámide
 - A = área de la base inferior o mayor
 - a = área de la base superior o menor
 - γ = peso específico o volumétrico del material
 - q = carga por unidad de área

Tabla I.1
Dimensiones, volúmenes, pesos y descargas de las etapas del Templo Mayor
Asumiendo homogeneidad en el material.

Una vez que se tienen las dimensiones, volúmenes y descargas de las pirámides, es posible comenzar un análisis de suelos, para poder contestar a la interrogante anteriormente planteada, esto es, qué hubiera sucedido si en un tiempo pequeño, y en un solo proceso constructivo se hubieran edificado todas las etapas o todo el *Huey Teocalli* en una sola etapa. Esta etapa consistió en una pirámide de 124224.50 metros cúbicos de material, con un peso de 1.99×10^8 kg, y una descarga al suelo de 3.31 kg/cm^2 (33.1 T/m^2).

1.5 Propiedades actuales del suelo y cálculo bajo esquema de proporción de las propiedades mecánicas del suelo en la época de construcción del Templo

Para poder hacer un análisis verdadero de suelos, es necesario conocer las características y propiedades del suelo, ya que con estos parámetros se puede hacer un cálculo más preciso, y podemos obtener mejores resultados y conclusiones. Esto es obvio, ya que en todo análisis de ingeniería es fundamental incluir la mayor cantidad de factores o variables que actúan en un problema para llegar a una solución óptima y más próxima a la realidad. Es prácticamente imposible conocer u obtener los valores exactos de las propiedades mecánicas del suelo existentes en la época de la construcción del Templo Mayor, sin embargo, conociendo los valores actuales, se puede hacer un esquema teórico de aproximación proporcional de las características del suelo. Con el propósito de lograr este esquema, se tomaron los valores de las características del suelo de la zona obtenidos este siglo en varios sondeos y pozos estratigráficos. Estos sondeos fueron realizados para los ensayos de consolidación para el estudio del subsuelo de la Ciudad de México, realizado por Raúl J. Marsal y Marcos Mazari³. Los pozos más representativos del subsuelo (en opinión de los autores antes mencionados, junto con el maestro Alberro⁴) para el estudio actual son los sondeos Pc143 y Pc128-1.

De estos estudios, se obtuvieron los siguientes datos:

³ MARSAL, R.J. y Mazari, M, El subsuelo de la Ciudad de México, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F., 1969

⁴ MAZARI Marcos, Marsal Raúl J., Alberro Jesús, Los asentamientos del Templo Mayor analizados por la mecánica de suelos, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F., 1985

Profundidad	Contenido de Agua
[m]	w %

3.80	105
11.85	332
21.15	385
29.30	402
37.00	390

promedio	0.00 - 37.00	350
----------	--------------	-----

44.00	214
49.00	201
54.75	197

promedio	39.70 - 54.75	204
----------	---------------	-----

Profundidad
[m]

Ss	e
-----------	----------

3.80
11.85
21.15
29.30
37.00

2.61	2.85
2.41	7.98
2.48	9.23
2.42	9.68
2.52	9.65

promedio	0.00 - 37.00	2.488	7.878
----------	--------------	-------	-------

44.00
49.00
54.75

2.52	5.58
2.48	4.6
2.51	4.66

promedio	39.70 - 54.75	2.503	4.947
----------	---------------	-------	-------

Tabla I.2 (sig. pag.)

Tabla 1.2 (pag. anterior)
Propiedades mecánicas del suelo actuales
Sondeo Pc143

En donde: S_s = densidad de sólidos = γ_s / γ_w ;

γ_s = peso específico de sólidos

γ_w = peso específico del agua

e = relación de vacíos = V_v / V_s ;

V_v = volumen de vacíos

V_s = volumen de sólidos

El esquema teórico consiste en, conociendo los valores actuales, hacer una relación proporcional y equivalente de estos valores y la profundidad del estrato arcilloso como se encuentra en la actualidad, contra una supuesta profundidad del estrato hace quinientos años, considerando los hundimientos sufridos y el aumento en el terreno debido a la existencia de la Isla de los Perros, por lo tanto, incluyendo un aumento porcentual (equivalente) en el peso y cantidad del agua.

Aquí cabe mencionar que la Isla de los Perros fue un relleno hecho por los Aztecas antes de la construcción del Templo Mayor (al menos sabemos con certeza, a partir de la tercera etapa). La isla sobresalía aproximadamente de cinco metros sobre la superficie del lago, siendo la profundidad de este de alrededor seis metros. El relleno se encontraba compactado, mas no consolidado. Esto último se llevó a cabo a lo largo de años, y con el aumento de peso debido al levantamiento de las etapas del *Huey Teocalli*. Además, la isla era extensa, no comprendía solamente el área ocupada por el templo, sino que abarcaba una zona mucho mayor. Es en general, en esta área, la isla la que sufrió los asentamientos en su gran mayoría. (Fig. 1.2)

Para obtener la relación entre las propiedades de los suelos, utilizaremos las propiedades del suelo en su estado actual, como se muestran en la tabla 1.2. El esquema consiste en un principio, en obtener el peso del agua en el volumen actual del suelo, con la relación de vacíos, la densidad de sólidos y el contenido de agua (obtenidos por promedios pesados). De la misma forma, y por consiguiente, se obtiene el peso de sólidos. Los datos obtenidos son los siguientes:

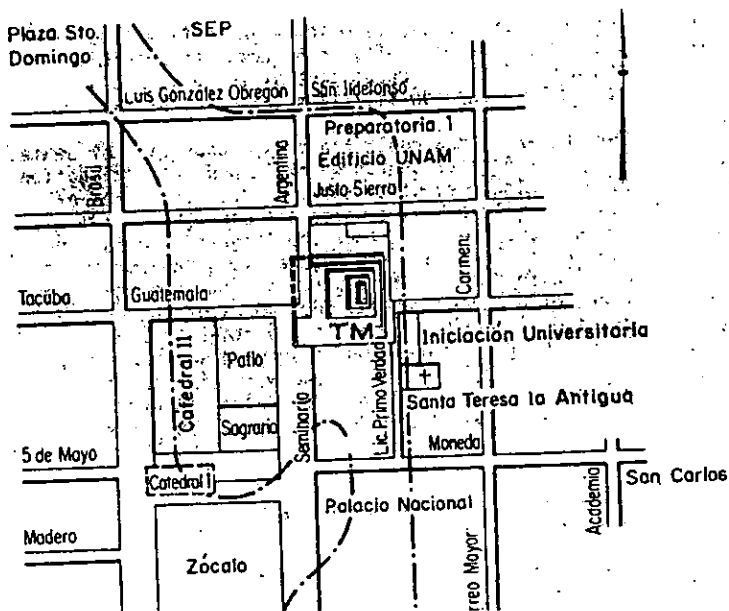


Figura 1.2 Posible Isla de los Perros

Si : $w \% = (W_w/W_s) * 100$

y : $\gamma = W/V$; $S_s = \gamma_s/\gamma_w$, $e = V_v/V_s$

suponiendo : $V_s = 1$

obtenemos que : $w \% = (e\gamma_w)/(S_s\gamma_w)$ $\gamma_w = 1 \text{ T/m}^3$

despejando : $W_w = (w\%W_s)/100$

Promedios pesados

$e = 7.04$

$S_s = 2.49$

promedio actual	$W_w =$	8.715	T
promedio actual	$W_s =$	2.49	T

Donde: $w \% =$ contenido de agua

$W_w =$ peso del agua

$W_s =$ peso de los sólidos

Con estos resultados podemos ahora calcular (modelo teórico) las propiedades del suelo en la época de la construcción del Templo Mayor. Para poder lograr esto, hacemos la relación proporcional antes mencionada entre los volúmenes y pesos del suelo, con las alturas de los estratos arcillosos que componen al suelo en las dos diferentes épocas. Con este proceso podemos obtener también una visión física de las diferencias y características de la forma de reaccionar de los suelos, bajo distintas cargas y formas constructivas, así como diversos métodos de edificación.

En el estado actual tenemos los siguientes datos:

$$V_o = 1 + e \cong H_b$$

$$H_b = 54.75 \text{ m}$$

Ahora bien, para la altura del manto en la época de los aztecas, se incluye la diferencia provocada por los asentamientos, que curiosamente es muy similar a la altura de la Isla de los Perros. Las diferencias, tanto físicas como porcentuales son:

El asentamiento sufrido en la zona del zócalo metropolitano.

$$\Delta H = 11.52 \text{ m}$$

Para considerar un manto inicial de espesor H_f , antes del asentamiento :

$$H_f = \frac{H_o + \Delta H}{\quad} = 66.27 \text{ m}$$

Diferencias porcentuales

$$\begin{aligned} H_o &= 54.75 \text{ m} &= 100\% \\ H_f &= 66.27 \text{ m} &= 121.40\% \end{aligned}$$

$$\Delta\% = 21.40\%$$

Una vez obtenidos las diferencias porcentuales, y con el peso del agua y sólidos calculados anteriormente, se calculan el peso del agua y el contenido de agua en el manto final (época de construcción del templo, en nuestro razonamiento, el tiempo fluye al revés). El peso de sólidos permanece igual, debido a que la masa sólida es la misma, siendo el cambio en volumen, y originado por la pérdida de agua por causa de la carga y esfuerzos sobre el suelo, que es lo que finalmente causa el reacomodo de partículas, y por lo tanto los asentamientos. Con los siguientes cálculos se obtiene el contenido de agua y su peso:

Para la obtención de w % en el pasado :

$$W_{wf} = W_{wo} (\text{anterior}) \pm 1\%$$

$$W_{wo} = 8.715 \quad \text{ton}$$

$$W_{wo \pm 1.40\%} = 1.865 \quad \text{ton}$$

$$W_{wf} = 10.580 \quad \text{ton}$$

Sabemos que W_s permanece constante, entonces, obtenemos el resultado con las siguientes expresiones :

$$w_f \% = W_{wf} / W_s$$

$$w_f \% = 4.249 = \boxed{424.9} \quad \%$$

Finalmente, para completar el esquema de características y propiedades del suelo, se estiman valores teóricos de la relación de vacíos y densidad de sólidos. Estos valores, aunque no exactos, son valores suficientes para tener una idea de las condiciones geotécnicas de

aproximadamente quinientos años. El proceso es ahora inverso para el cálculo de estos factores.

Proporcionalidad de alturas y volúmenes

$$V_f = 1 + e \cong H_f$$

$$H_f = 66.27 \text{ m}$$

$$1 + e = 9.73$$

$$e = \boxed{8.73}$$

$$w_f \% = (e \gamma_w) / (S_s \gamma_w) * 100$$

$$424.9 = (8.732) / (S_s 1.0) * 100$$

$$S_s = \boxed{2.055}$$

Finalmente:

Propiedades mecánicas del suelo en la época de inicio de construcción del Templo Mayor

Relación de vacíos	Cantidad de agua	Peso del agua	Densidad de sólidos
e	$w\%$	W_w	S_s
		ton	
8.73	424.9	10.580	2.055

Tabla 1.3
Resumen de propiedades del suelo calculadas

1.6 Obtención del valor de cohesión y capacidad última de carga del suelo

Ahora bien, si el *Huey Teocalli* se hubiera construido en un solo evento, no hubiera existido el proceso de asentamiento y consolidación a lo largo de casi 140 años que duró la edificación del templo en etapas. Este período de tiempo permitió que el suelo no fallara, y que existiera un fenómeno que puede considerarse unidimensional. El análisis que se llevará a cabo es uno que permite determinar lo que hubiese sucedido sin la existencia de consolidación, es decir, una situación en tiempo inmediato bajo condiciones de carga extremas.

El análisis consiste en verificar la estabilidad del suelo por capacidad de carga. Para lograr tal fin primero se determinará un valor estimado de cohesión (c), a través de una serie de promedios pesados de este coeficiente. Los valores iniciales usados para los promedios pesados fueron obtenidos del estudio que realizaron Jesús Alberro, Raúl J. Marsal y Marcos Mazari con referencia a los asentamientos en el Templo Mayor⁵. Realmente se usarán dos promedios en el análisis en curso, el primero es el promedio pesado de los coeficientes en los diversos estratos del manto arcilloso, en la época de construcción de la segunda etapa, es decir para condiciones de carga menores. Esto se hará para tener un coeficiente promedio del suelo con muy poca alteración. El segundo promedio se obtendrá de una serie de promedios de los coeficientes de un mismo estrato en las diferentes etapas constructivas, es decir de promedios de coeficientes a una misma altura bajo cargas cada vez mayores. Lo anterior tiene el propósito de tener un valor

⁵ MAZARI Marcos, Marsal Raúl J., Alberro Jesús, Los asentamientos del Templo Mayor analizados por la mecánica de suelos, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F., 1985

general ante la imposibilidad de conocer físicamente el suelo en condiciones de hace quinientos años.

Una vez con el valor de cohesión, se revisará la capacidad de carga por medio de las expresiones de Skempton y de Terzaghi, tanto generales como para cimientos cuadrados, ya que las dimensiones del Templo Mayor son muy semejantes a las de un cuadrado, y debido a la magnitud de las mismas, la diferencia es despreciable. Los resultados obtenidos de estas expresiones se compararán con la descarga de la pirámide al suelo, y se determinará el comportamiento mecánico del suelo bajo las condiciones descritas.

Los coeficientes iniciales para el primer promedio son:

Estrato	Profundidad	Espesor	c	w
i	h [m]	H [cm]	kg / cm ²	%
1	3.80	380.00	0.83	105
2	11.85	805.00	0.39	302
3	21.15	930.00	0.28	385
4	29.30	815.00	0.30	390
5	37.00	770.00	0.26	402

Tabla 1.4
Valores de cohesión en los estratos del manto arcilloso⁶

Con los valores encontrados en la tabla 1.4, calculamos el primer promedio de la siguiente forma:

⁶ Op. Cit.

$$c_p = \frac{\sum c_i(H_i)}{\sum H_i}$$

$c_p =$	0.361 kg/cm²
---------	--------------------------------

donde: c = cohesión por estratos

c_p = promedio pesado de la cohesión por estratos en la segunda época

Ahora se realizará el segundo promedio, por estratos y épocas constructivas, por ende por incrementos de carga. El promedio se obtuvo a través del mismo proceso que para el anterior. Primeramente se calcula la serie de promedios para cada estrato del manto, y con los resultados obtenidos, se obtiene el promedio y valor de cohesión final, y se considera este como un dato general y aplicable como una de las propiedades mecánicas del suelo.

	H [cm]	c [kg / cm ²]	cH
Etapa II	380	0.83	315.4
Etapa III	380	0.83	315.4
Etapa IV	380	0.89	338.2
Etapa V	380	0.93	353.4
Etapa VI	380	0.99	376.2

$c_p =$	0.894
---------	-------

	H [cm]	c [kg / cm ²]	cH
Etapa II	805	0.39	313.95
Etapa III	805	0.4	322
Etapa IV	805	0.53	426.65
Etapa V	805	0.53	426.65
Etapa VI	805	0.54	434.7

$c_p =$	0.478
---------	-------

	H [cm]	c [kg / cm ²]	cH
Etapa II	930	0.28	260.4
Etapa III	930	0.3	279
Etapa IV	930	0.35	325.5
Etapa V	930	0.39	362.7
Etapa VI	930	0.4	372

$c_p =$	0.344
---------	-------

	H [cm]	c [kg / cm ²]	cH _i
Etapa II	815	0.3	244.5
Etapa III	815	0.3	244.5
Etapa IV	815	0.37	301.55
Etapa V	815	0.4	326
Etapa VI	815	0.4	326

c _p =	0.354
------------------	-------

	H [cm]	c [kg / cm ²]	cH _i
Etapa II	770	0.26	200.2
Etapa III	770	0.27	207.9
Etapa IV	770	0.31	238.7
Etapa V	770	0.35	269.5
Etapa VI	770	0.37	284.9

c _p =	0.312
------------------	-------

c_p en kg / cm²

Tabla 1.5
Promedios de c, por estratos en las distintas etapas constructivas.

Finalmente obtenemos el coeficiente c general (realizando el mismo procedimiento de cálculo).

<i>H</i>	<i>c</i>	<i>H</i>	<i>c</i>
<i>cm</i>	<i>kg / cm²</i>	<i>kg / cm</i>	
380.00	0.894	339.72	
805.00	0.478	384.79	
930.00	0.344	319.92	
815.00	0.354	288.51	
770.00	0.312	240.24	
<i>c_p</i> =	0.425		<i>kg / cm²</i>

Tabla 1.6
Coeficiente *c* final o general (promedio)

Ahora bien, con los datos obtenidos, podemos finalmente responder a la interrogante planteada. Se va a determinar la capacidad de carga última del suelo, con lo que se sabrá que hubiera sucedido en el manto arcilloso bajo condiciones de carga extremas y en un tiempo inmediato. Las capacidades de carga se calcularán según Skempton y Terzaghi primeramente con el primer promedio o valor de $c = 0.36$ (valor por estratos con poca alteración del suelo, carga pequeña de una sola etapa constructiva), después se realiza el mismo análisis pero con el segundo valor de $c = 0.425$ (diversos estratos con incremento de carga debida a las seis etapas constructivas).

Capacidad última de carga

Según Skempton

$$q_u = cN_c + \gamma D_f$$

$$q_u = 5.14c + \gamma D_f$$

Donde:

- N_c = factor de cohesión
- c = cohesión kg / cm^2
- γD_f = sobrecarga por desplante a una profundidad D_f

entonces:

$$q_u = 5.14$$
$$ya \quad \gamma D_f = 0$$

Debido a que el Templo se desplanta directamente sobre el suelo, es decir, no existió excavación previa.

por lo tanto:

$q_u =$	1.85
---------	-------------

 kg / cm²

Ahora, si se considera la base del *Huey Teocalli* como un cimiento cuadrado, debido a sus dimensiones muy cercanas a un cuadrado, y la magnitud de las mismas, la expresión de Skempton se altera. Existe un aumento del veinte por ciento en el factor de cohesión N_c , entonces la capacidad de carga se incrementa.

Skempton para un cimiento cuadrado (aumento de 20%)

$$q_u = 5.14(1.20)c + \gamma D_f$$
$$q_u = 6.168c + \gamma D_f$$

$q_u =$	2.225
---------	--------------

 kg / cm²

Obtenemos ahora la capacidad última de carga según Terzaghi, en donde para suelos cohesivos, como los son los suelos arcillosos y limo arcillosos, Terzaghi determina que el factor N_c tiene un valor de 5.7.

Capacidad última de carga

Expresión de Terzaghi

$$q_u = cN_c + \gamma D_f$$

$$q_u = 5.7c + \gamma D_f$$

entonces:

$$\text{como : } \gamma D_f = 0$$

$$q_u = 5.7c$$

$q_u =$	2.056	kg / cm ²
---------	--------------	----------------------

De igual forma que con la expresión de Skempton, la fórmula de Terzaghi se altera cuando el cimiento es cuadrado. Terzaghi establece que con el efecto del cuadrado, el factor de cohesión N_c , se incrementa en un treinta por ciento, aumentando entonces la capacidad de carga.

Terzaghi para un cimiento cuadrado (incremento del 30%)

$$q_u = 5.7(1.30)c + \gamma D_f$$

$$q_u = 7.41c$$

$$\text{ya que : } \gamma D_f = 0$$

$q_u =$	2.673	kg / cm ²
---------	--------------	----------------------

Ahora, obtenemos la capacidad última de carga tanto con Skempton como con Terzaghi (para cimiento rectangular y cuadrado), pero con el segundo promedio de c .

Skempton con segundo promedio

$$q_u = N_c + \gamma D_f$$

$$q_u = 5.14c + \gamma D_f$$

$$c = \text{cohesión} \quad \text{kg / cm}^2$$

$$\gamma D_f = \text{sobrecarga por desplante a una profundidad } D_f$$

$$\gamma D_f = 0$$

$$q_u = 5.14c$$

$q_u =$	2.185
---------	--------------

$$\text{kg / cm}^2$$

Skempton para un cimiento cuadrado (aumento de 20%)

$$q_u = 5.14(1.20)c + \gamma D_f$$

$$q_u = 6.168c + \gamma D_f \quad \gamma D_f = 0$$

$q_u =$	2.623
---------	--------------

$$\text{kg / cm}^2$$

Expresión de Terzaghi

$$q_u = N_c + \gamma D_f$$

$$q_u = 5.7c + \gamma D_f \quad \gamma D_f = 0$$

$q_u =$	2.424
---------	--------------

$$\text{kg / cm}^2$$

Terzaghi para un cimiento cuadrado (incremento del 30%)

$$q_u = 5.7(1.30)c + \gamma D_f$$

$$q_u = 7.41c \quad \gamma D_f = 0$$

$q_u =$	3.151
---------	--------------

$$\text{kg / cm}^2$$

Para determinar si el suelo resiste, es necesario calcular la descarga actuante sobre el mismo, es decir, el peso de la pirámide en el área que esta ocupa, y comparar si es mayor, menor o igual al valor calculado de q_u .

Carga actuante

$$q_a = q / A$$

donde : q = peso de la pirámide = 198759184 kg
 A = área de desplante = 6001.76 m²

$q_a =$	33116.82 kg/m ²	=	3.312	kg / cm ²
---------	----------------------------	---	-------	----------------------

Como se puede observar la carga actuante es mayor que la mejor o más grande capacidad última de carga calculada. Esta capacidad de carga fue obtenida a través de la expresión de Terzaghi, para un cimiento cuadrado y con un coeficiente de cohesión $c = 0.425 \text{ kg / cm}^2$, obtenido de promedios pesados a partir de coeficientes c de distintos estratos, en donde cada uno de ellos se encuentra bajo condiciones de carga cada vez mayores.

Podemos determinar entonces, que el suelo no resiste, existe falla. Esto quiere decir que si el Templo Mayor o *Huey Teocalli* se hubiera construido en un solo evento, instantáneamente, con las dimensiones de la última etapa (es decir, si las seis etapas se hubiesen construido en una sola), el suelo no hubiera aguantado, y se hubieran presentado

deslizamientos en el mismo; esto hubiera provocado el derrumbe del templo y su subsecuente destrucción.

*“Amo el canto del Zentzontle
pájaro de cuatrocientas voces;
amo el color del jade
y el enervante perfume de las flores,
pero amo más a mi hermano el hombre.”*

Nezahualcoyotl

II

**PROCESO Y SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LOS CUERPOS Y
VOLÚMENES EN TEOTIHUACAN.**

2.1 *Proceso general.*

La construcción de los cuerpos piramidales, basamentos y plataformas, tanto de adoratorios como de conjuntos habitacionales, es un proceso conjunto de planeación, dimensionamiento, construcción *per se* e interrelación con el entorno. Para lograr el fin de crear espacios, estructuras y volúmenes necesarios tanto para las actividades político-religiosas y socio económicas, como para los habitacionales, y como en toda actividad constructiva, existe en Teotihuacan un completo sistema de organización formado por subprocesos tales como: obtención y concentración de materiales, tipo de estructura, organización de mano de obra, elementos de la edificación, agrupamiento y comunicación.

En orden de explicar el proceso constructivo en general, se explicará las diferentes etapas en la formación de una estructura.

Volumen o núcleo estructural

El primer paso para la construcción de una pirámide o plataforma, es el definir el área total que el cuerpo en construcción va a ocupar. Este proceso es fundamental y único en los dos casos, ya que en ambos el área definida es aquella para levantar el basamento inferior o principal. De aquí se parte para la definición del volumen total y en sentido vertical, ya sea habitacional, adoratorio o plataformas subsecuentes de menor área.

La construcción de este basamento (que en el caso de las pirámides es igual al de las siguientes plataformas o cuerpos) consiste en una retícula ortogonal de muros de mampostería que definen espacios a forma de cajones. Estos cajones fueron rellenos con tierra, rocas y algunos materiales diversos, posteriormente, este relleno fue apisonado y semi compactado para conformar un cuerpo sólido que cabe aclarar, no sólo sirvió de relleno y cimentación, sino que también forma la estructura en sí, es decir, es el cuerpo de la edificación que se desea. Es sobre este basamento que se levantan los templos, habitaciones o las siguientes plataformas (siguiendo el proceso mencionado) de una pirámide.

Definición espacial relacionada a la edificación

Suena obvio decir que una vez que se ha definido el basamento y el área ocupada, las siguientes edificaciones se construyen con base en la anterior y con relación a esta; sin embargo, en palabras del arqueólogo Noel Morelos García “El único aspecto que es seguro como determinante es la condición de distribuir las estructuras alrededor de espacios abiertos.”⁷

El establecer los espacios y cuerpos tiene también una relación geométrica con las construcciones levantadas antes. Otro aspecto de suma importancia en Teotihuacan para la definición espacial, tanto constructiva como urbanística y arquitectónica es aquel de las zonas para la circulación. Estas zonas son las que finalmente relacionan un volumen con otro y los hacen funcionar como parte integral. Así, la

⁷ MORELOS G. Noel., Proceso de producción de espacios y estructuras en Teotihuacan, INAH, colección científica, México D.F., 1990

definición de espacios es una interacción de volúmenes, áreas y espacios, tanto de la propia construcción como de la circulación.

Cuerpos posteriores o superpuestos

Con el área de los basamentos y/o plataformas definidos, con base en la retícula de muros y relleno, se obtiene un cuerpo o volumen rectangular con las caras externas en talud, y un área superficial de dimensiones grandes. Estos volúmenes ya tienen definido cual va a ser su función final, que puede ser un adoratorio o habitación, o una pirámide.

En el caso de que sobre la plataforma se vaya a la levantar un adoratorio o habitación, el proceso que sigue es levantar los muros del mismo, y aplanar los taludes para posteriormente estucarlos. Una vez concluidos los muros se colocan las vigas de madera, los morrillos y la techumbre, para, finalmente, realizar los acabados y pintar. Si la etapa siguiente a la plataforma es formar una pirámide, se realiza un proceso igual al de la plataforma misma en menor área; es decir, se levantan muros ortogonalmente, formando una retícula y relleno los cajones, dejando las caras laterales en talud, para por último estucar y pintar.

2.2 *Procesos y sistema por etapas; del basamento a los techos*

Sistema reticular, rellenos y compactación

Como se mencionó anteriormente, el basamento y cimentación de toda estructura considerable en Teotihuacan, está formado por una retícula de muros de mampostería, creando una especie de cajones que retendrán material de relleno, que además de formar esta cimentación, crean el volumen de una estructura.

Para desplantar los muros del basamento primero se tiende sobre el terreno natural, una capa de tepetate, el cual se emparejaba y apisonaba para lograr una superficie uniforme y estable. Una vez obtenido el nivel requerido se comenzaba a levantar la retícula. Los muros que forman esta retícula eran de rocas grandes, generalmente basaltos, unidas con barro, siendo estos muros irregulares en sus lados y sin acabados, y que iban a ser cubiertos o tapados por el relleno, o adornados posteriormente. El relleno como se mencionó anteriormente, era de rocas, tierra y algunos trozos de madera, que eran unidos también con barro. Posteriormente se procedía a compactar el material y a nivelarlo, ya sea para proseguir con otro sistema reticular, o para realizar acabados de piso en las plataformas o pisos de recintos habitacionales, religiosos o gubernamentales. La retícula en algunos casos era levantada a una altura mayor que la necesaria, ya que se usaban los muros de la misma como muros de algunas habitaciones, y el relleno se mantenía al nivel del piso del recinto. Este sistema constructivo sirvió también para levantar y nivelar la superficie en etapas posteriores, y es sumamente efectivo, ya que no solo se eleva el nivel del piso, sino también se usaba para casos particulares, como interior de habitaciones, pequeñas plataformas, nuevos templos, superposición de recintos y para la

estructuración de pirámides. Es en el último caso mencionado, donde encontramos al sistema sumamente efectivo. Al ir realizando una serie de retículas, una menor que la anterior, es posible lograr volúmenes mayores, alturas más grandes y una estructura más resistente. Es de la misma manera, más fácil darle forma a los taludes, para que estos reciban esculturas o adornos y existan espacios de circulación alrededor de los distintos niveles de una pirámide. El sistema además permitió que exista estabilidad en la estructura, ya que hay un proceso de compactación, confinamiento y rigidez que evita deslizamientos, fallas y que las cargas no se distribuyan adecuadamente.

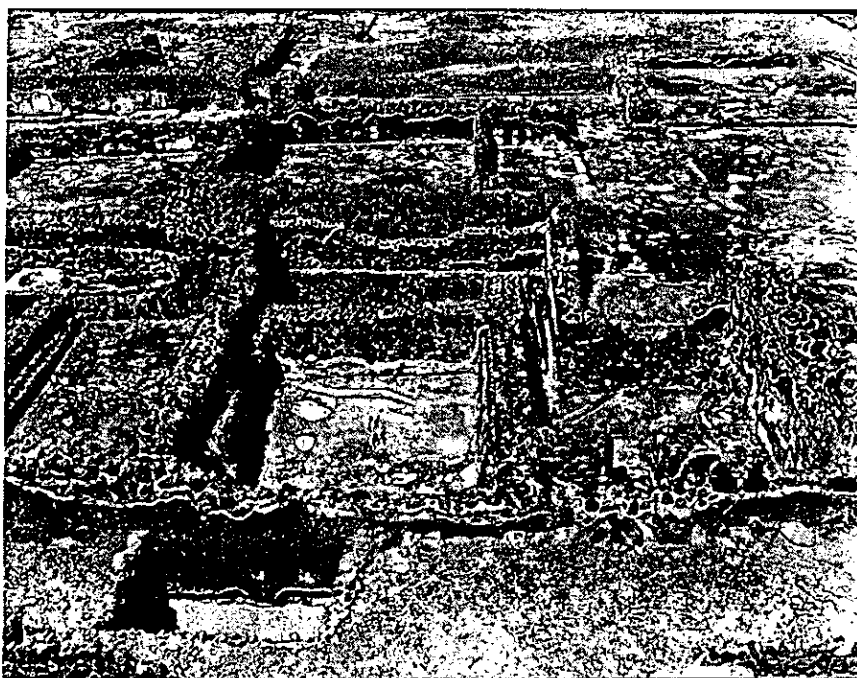


Fig. 2.1

Ciudadela; Muros de los cajones de basamentos o cimentación.
Se aprecia el cajón inferior (sin relleno) y el inicio de los muros y piso de las habitaciones

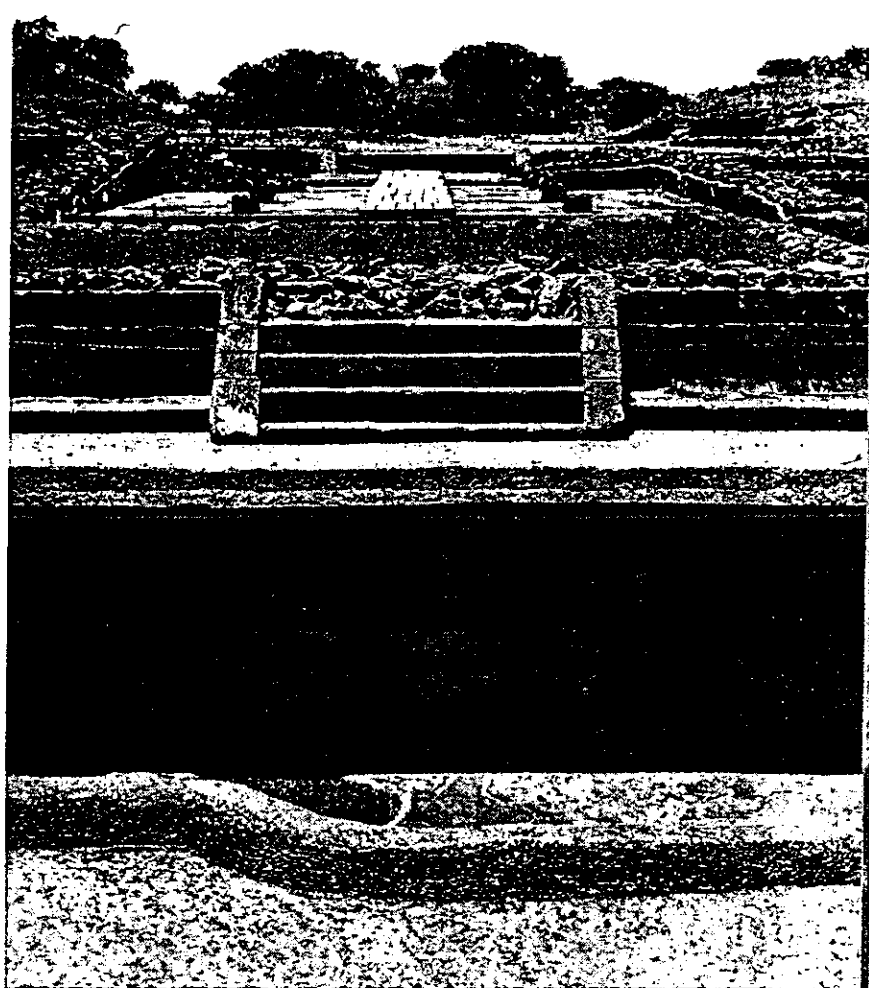


Fig. 2.2

El sistema de retícula y cajón, sirvió también par elevar el nivel del suelo. aquí se aprecian los distintos niveles y etapas constructivas, el suelo se elevó con base en el sistema mencionado; se aprecia también como el método sirve para la formación de plataformas o adoratorios.

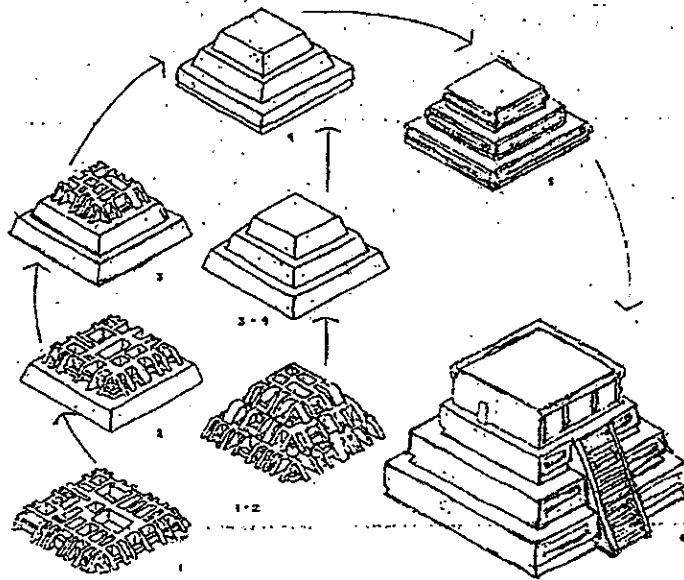


Fig. 2.3
 Uso del sistema reticular de cajones y relleno, para la construcción de una pirámide, basada en cuerpos superpuestos y plataformas.

Muros

Los muros eran formados de mampostería, apoyados sobre los muros de los cajones que forman la estructura de plataforma o base; en ocasiones, algunos muros estaban apoyados sobre el material de relleno de los cajones, y como soporte tenían bloques de piedra alineados debajo de ellos a manera de una dala de cimentación. Existen muros secundarios adosados a los principales (que son los descritos líneas arriba), y estos se desplantan sobre el piso terminado, con pendiente en ambos lados para mejorar estabilidad.

Los muros de las habitaciones y de accesos (vestíbulos), son gruesos con una cara vertical (el arranque siendo con pendiente) y la otra en pendiente en su totalidad, esto resulta seguramente, a que debido a la amplitud de los vestíbulos, era necesario obtener mayor estabilidad. El proceso constructivo era simple en la etapa inicial de la creación de un muro: las rocas que conformaban estos muros, estaban unidas con barro o lodo y recubiertas de estuco y aplanado (según Carlos Margain, el aplanado era un verdadero mortero hidráulico). Las rocas eran de tamaño regular sin geometría particular, y eran colocadas varias en una misma sección de espesor del muro, lo cual hacía al mismo suficientemente grueso y resistente para recibir el techo. Aquí cabe hacer mención del sistema utilizado en la parte superior del muro; debido a la irregularidad de las rocas usadas para la construcción del muro, se colocaba en la parte superior sobre la superficie del muro una "dala" o viga de madera que cumplía con una doble función: facilitaba la nivelación del muro "...es más fácil nivelar las vigas al ser colocadas,

que los muros al ser terminados...”⁸, y la segunda función mejor expresada por Margain “...permitían ejecutar sin mayor dificultad una obra de mantenimiento muy importante: cambiar aquellos murrillos que con el uso y tiempo lo requirieran, sin destruir el muro ni su aplanado...”⁹. Los murrillos son elementos de la techumbre que será analizada mas adelante.

Los muros fueron estructurados uniendo unos con otros, y en otras ocasiones, cuando no se unían, se colocó un poste de madera a manera de castillo. En los muros exteriores, se hicieron adosamientos para lograr estabilidad y para conducir la bajada de aguas pluviales. Estos adosamientos o apoyos adosados, por geometría pudieran parecer columnas, sin embargo no lo son, forman parte del muro y funcionan en conjunto con él. Los apoyos adosados, son una especie de castillos, formados por un grupo de rocas unidas alrededor del poste de madera antes mencionado, de geometría cuadrada o rectangular, que confinaban a los muros, y les daban rigidez. Estos apoyos adosados componen el esqueleto de la estructura de muros, y además, ayudaban a cerrar espacios y a darle continuidad a los muros encontrados (perpendiculares), para que estos sean suficientemente estables y no pierdan forma en conjunto, causando un severo daño al recinto. En otras ocasiones, los apoyos adosados, eran una especie de contrafuerte, que servía para sostener al muro, y en ellos se hacían ranuras para la bajada de aguas pluviales. Existieron diversas formas o geometrías para los muros, estando estas en función de la arquitectura mas que ser una cualidad estructural o de técnica constructiva.

⁸MARGAIN Carlos R., Sobre sistemas y materiales de construcción en Teotihuacan, sobretiro de Teotihuacan, onceava mesa redonda, 1966, México D.F.

⁹*Op. Cit*

Columnas

Las columnas fueron construidas de mampostería, siguiendo el mismo método que los muros; es decir, unión de rocas (generalmente basaltos) con barro, en algunas ocasiones las columnas tenían un núcleo de madera de forma similar al de los apoyos adosados. En el Conjunto Plaza Oeste, como ejemplo de diversas etapas arquitectónicas, las columnas son cuadradas o rectangulares, es decir prismáticas, al contrario de otras zonas del centro ceremonial donde se pueden encontrar pilares o columnas redondas. El proceso constructivo es similar al de los muros, al estar las columnas apoyadas en los muros de cimentación (basamento reticular) o en las uniones de estos, transmitiendo de esta forma, las cargas hacia el suelo. Cuando las columnas eran interiores, es decir no se encontraban en los ejes de los muros, sino en los espacios habitacionales o cuartos, estaban construidas sobre el relleno. Para lograr que la descarga fuera eficiente, se les hacía una especie de cimentación que consistía en crear un espacio en el relleno para enterrar o encajar el núcleo de madera (en el caso de existir) y en este espacio y su alrededor, se colocaban rocas en lajas a manera de apoyo para recibir a la columna.

Las columnas se encontraban en los vestíbulos y algunas en la periferia de los recintos y, funcionaban en su mayoría, junto con los muros, ya que es en esta zona donde se tienen adornos y remates en las cornisas haciendo más pesada a la techumbre. En el caso de las columnas interiores, se usaban cuando era necesario salvar claros grandes para permitir un espacio interior amplio y aumentar las capacidades de circulación.

Desagües

El sistema de desagüe de Teotihuacan es sumamente interesante desde el punto de vista que coincide con el sistema de circulación. Esto nos dice de un conocimiento técnico de los constructores teotihuacanos, así como de su capacidad de planeación y optimización, de la misma manera que de aprovechamiento de los recursos. El sistema de desagüe esta compuesto por ductos o canaletas cubiertas únicamente por el apisonado del piso terminado en la superficie, o por este y el relleno. El canal está formado por aplanado (el mortero hidráulico al que se refiere Margain) aplicado sobre rocas (que componen parte del relleno) que definen la geometría principal, que en Teotihuacan era un canal de sección rectangular con el recubrimiento bien acabado y pulido; sobre la zona superior se colocan lajas en segmentos de aplanado.

En las esquinas de los espacios abiertos es donde se encontraban las coladeras, las cuales eran de diversos tipos. Algunas veces las coladeras consistían de un orificio en el piso terminado para que el agua se colara, en otras ocasiones la coladera estaba compuesta por una losa rectangular de piedra, con un orificio para permitir el paso del agua. Las coladeras y canales de desagüe en Teotihuacan estaban muy bien planeados, con pendiente suficiente para que el escurrimiento fuera eficiente, y los trazos eran adecuados para que este sistema no interfiriera con las actividades humanas y con la distribución de espacios cerrados, abiertos y circulatorios.

Bajo un concepto de urbanismo estos avances ya habían sido reportados: "...este arreglo de la ciudad es la mejor expresión material del grado de civilización que había alcanzado este pueblo... la nivelación que supone el trazo de los desagües y caños encontrados indican el conocimiento de procedimientos e instrumentos topográficos,

si se quiere primitivos pero que solo pueden obtenerse después de una larga experiencia...” esta cita según Noel Morelos García es de Gamio (Gamio, 1970), según Carlos Margain es de Marquina (La población del valle de Teotihuacan, La población prehispánica).

Techos

Esta etapa del proceso constructivo es la más difícil de determinar, ya que en nuestros días las techumbres se encuentran destruidas o son restos desplomados. Para poder establecer el sistema de construcción de techos y cubiertas se recurrió a los restos hallados en todo el centro ceremonial y en los reconstruidos con base en información de excavaciones.

Los techos estuvieron apoyados en murrillos que a su vez estaban apoyados en los muros y en algunas ocasiones en vigas. Aquí cabe mencionar que son los murrillos: los murrillos son “vigas” de madera de sección circular, delgados y largos, no son lo suficientemente resistentes individualmente para soportar grandes esfuerzos a flexión, como tampoco cargas axiales principalmente por su alto grado de esbeltez; sin embargo, trabajando en conjunto o confinados, son buenos elementos estructurales.

Los techos estaban contruidos de la siguiente manera: primero se coloca un enramado o una red compuesta por varas entrelazadas o un petate grueso; sobre esta red se coloca una capa de tepetate apisonado y aplanado, inmediatamente después se coloca una capa de lodo con poca arena y arcilla (para obtener consistencia); inmediatamente era tendido un compactado de gravilla o tezontle, siendo esta la zona más pesada de la techumbre y la que la hacía resistente (aunque no impermeable *per se*)

a la lluvia. Estas últimas dos capas durante el período constructivo pudieron mezclarse en la zona de contacto, y aunado a que la gravilla o tezontle podía estar unido con lodo, para poder colocarlo fácilmente, creaban una especie de concreto que funcionó muy bien para los fines a los que los techos estaban destinados. Finalmente, se colocaba en la parte superior de la cubierta, un aplanado de estuco y eventualmente se pintaba. Cabe aclarar que en la parte inferior de los muros, se coloca también un aplanado de barro que se pinta y completa la función arquitectónica.

Pisos

Los pisos en Teotihuacan seguían un proceso muy parecido al de los techos. El proceso constructivo de los pisos es el siguiente: Primeramente se hace un aplanado de tepetate de alrededor de 15 cm de espesor, colocado directamente sobre el relleno del basamento o cimentación. Luego se procede a colocar una especie de concreto hecho con cementantes naturales, probablemente puzolanas, que constituye un tipo de firme, el concreto o firme era probablemente de tezontle desmenuzado en grano grueso (a forma de grava), y era de un espesor de alrededor de 8 cm. Finalmente, sobre esta sólida base se coloca un acabado a base de cal muy bien pulido y nivelado, que permitía la circulación y caminar fácil.

2.3 Sobre los materiales de construcción

Ahora presentamos una pequeña descripción de los materiales usados por los constructores Teotihuacanos para la creación de los recintos en el centro ceremonial.

Materiales pétreos

Tepetate

Toba volcánica, muy abundante en el subsuelo del Valle de México, en Teotihuacan se han podido observar dos tipos, uno arcilloso pesado, de grano fino, y el otro de grano pero con mayor ligereza debido a la existencia de carbonatos de cal (CaCO_3); el uso de tepetate fue muy amplio, en muros, rellenos, columnas, para los apisonados de los pisos, para los techos y cajones de cimentación.

Tezontle

Roca de origen volcánico, muy abundante en el valle. El tezontle es de color gris muy oscuro, o rojo, es una roca porosa, dura y ligera, lo cual la hace ideal para la formación de las techumbres, en forma de gravilla. El uso de tezontle también fue muy extendido, se utilizó para muros y columnas, para los muros de contención o para los taludes de las estructuras.

Basalto

El basalto es una roca de origen ígneo, pero de abundancia relativa en esta zona del valle a pesar del origen mencionado. El uso de basalto en Teotihuacan fue más restringido en la construcción, tuvo un uso más extendido en la escultura. Esta roca se utilizó principalmente en muros gruesos, en cimentaciones y en los acabados de las caras de algunas estructuras debido a su dureza. Fueron utilizadas lajas de basalto provenientes de Hidalgo, para soportar las molduras de los taludes y para cubrir los ductos del sistema de drenaje; se les conoce en la zona con el nombre de *iztapaltetes*.

Arena

La arena utilizada en Teotihuacan es compuesta por diversos materiales rocosos, de variada graduación y coloración. La arena se utilizó en rellenos y apisonados, y para complementar el concreto de las techumbres así como para el mortero hidráulico.

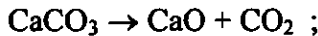
Arcilla

Silicato de aluminio hidratado natural, puro o impurificado por óxidos de hierro, que al contacto con agua se vuelve plástico y que por la calcinación se contrae y endurece en un material que contiene arena, cal y óxidos de hierro. Muy útil para la compactación de gravillas y para formar los lodos o barro que sirvieron de cementantes, se utilizó también en el apisonado de los pisos.

Materiales Aglutinantes

Cal

La cal es muy abundante en todo el centro ceremonial; podríamos decir que todas las construcciones fueron cubiertas con ella. Sirvió para el aplanado y para acabados. La cal para la creación de morteros, se obtuvo posiblemente por una calcinación expresa de rocas calizas, ya que la cal viva u óxido de calcio (CaO) no existe en la naturaleza. La calcinación se debe efectuar en espacios y recipientes abiertos para que exista contacto con aire y así expulsar bióxido de carbono de acuerdo con:



Esto es: carbonato de calcio (rocas calizas) se calcinan (aplicación de calor), y se obtiene cal más bióxido de carbono que se despiden al aire.

Aquí cabe hacer mención de la relación que existe entre la cal, las rocas calizas arcillosas (materiales pétreos), y el mortero que se puede obtener con la cal. Cuando las rocas calizas- arcillosas tienen un porcentaje de 9 a 10 de arcilla, la cal obtenida a través de la calcinación puede conformar morteros de mediana hidraulicidad; esto es, que cuando la cal mezclada con agua y arena llega a adquirir una relativa dureza después de 15 ó 20 días. Si el porcentaje de arcilla aumenta, la dureza se adquiere en menor tiempo, con un porcentaje de 25 a 30 de arcilla se obtiene un mortero que eminentemente hidráulico que endurece en cuatro días, y en meses consistencia pétreo.

Esto explica que todavía podamos ver los aplanados en Teotihuacan, y que estos sean relativamente resistentes, y en algunos casos sean realmente rocas. Si los aplanados se hubieran hecho de simple barro, no podríamos estudiarlos hoy en día, ya no existirían.

Barro

El barro arcilloso fue utilizado sólo como lodo para unir los bloques de roca en todas las variedades de muros y columnas, y para aglutinar la gravilla en techos.

Materiales Manufacturados

Canteras

Estas son rocas de varios orígenes (lodolitas, areniscas y brechas) trabajadas en bloques de geometría definida, y se usaron para alfardas, escalones y banquetas. Fueron usadas en algunos casos para construir el acabado de algunas estructuras y acabados arquitectónicos.

Adobes

Los adobes fueron hechos de arcillas, agregándoles paja y pasto, para darles consistencia, y fueron de geometría en general de prisma rectangular o paralelepípedo. Se ha detectado su uso únicamente para construir muros de contención de relleno entre etapas o épocas constructivas.

2.4 Organización del proceso y mano de obra

La cantidad y variedad de construcciones, procedimientos y creación de estructuras (desde la cimentación, hasta la edificación de recintos), obtención de materiales, y transformación de los mismos requirieron seguramente de una planeación y organización social del trabajo suficientemente complicada. La construcción de plazas, templos, recintos y unidades habitacionales, así como de vías de transporte y circulación crearon una participación de personas organizada y planeada por especialidades directamente relacionadas a un objetivo común: "... algunas actividades, como la de la construcción, en la que intervienen varios especialistas que están trabajando en diversos aspectos: producción de cal, albañilería, trabajos en madera, etcétera..."¹⁰. Para que lo anterior fuera posible, fue necesario algún tipo de control sobre los yacimientos, minas y bancos de materiales necesarios para la construcción de los elementos y estructuras de Teotihuacan.

Para poder apreciar la cantidad de personas que intervienen en el proceso constructivo, se tiene que hacer referencia al proceso en sí, y como este requiere de la permanente presencia de especialistas y trabajadores. Las fases constructivas inician con la obtención de materia prima, actividad que no termina, ya que siempre se requiere durante el desarrollo completo de la construcción. En el principio de la edificación de un conjunto, se definen las reglas de los espacios, y las características de los mismos, tomando en cuenta que a los espacios principales, se añadirán otros espacios y los volúmenes estructurales, es decir, las unidades de los conjuntos. Posteriormente se crean los

¹⁰ MATOS M. Eduardo, 1979; 103

basamentos o plataformas que servirán de arranque o inicio de las estructuras o habitaciones, que son la última fase del proceso en general. Esto requiere necesariamente de un movimiento significativo de material, de organización de los recursos, de las ideas y participación de los especialistas, y de organización laboral y social. Es claro que hay que comprender que existen diversas y diferentes formas de estructuras, unas particulares y únicas, otras generalizadas y más comunes, además hay diversos estilos arquitectónicos y acabados.

Es ahora que podemos apreciar la cantidad de trabajadores necesarios para poder llevar a cabo todas las actividades del proceso, tanto en su etapa de planeación (definición de espacios) como en la de la cimentación, hasta llegar a los acabados de los recintos. Con base en las excavaciones llevadas a cabo y los datos recabados por Noél Morelos García y el Maestro Matos, podemos establecer una lista de la gente dedicada a la construcción en Teotihuacan, así como su jerarquía oficio.

A) Gente dedicada a la obtención de materia prima.

1. Rocas (tanto para construcción, como para la obtención de cal).
2. Madera
3. Arenas

B) Gente dedicada directamente a la primera fase de construcción.

1. Un director o varios directores de obra (depende de la magnitud de la misma)
2. Albañiles experimentados
3. Carpinteros y talladores de madera
4. Cargadores de piedra
5. Peones en general

- C) Gente dedicada a la segunda fase de construcción
 - 1. Preparadores de cal
 - 2. Albañiles para preparación, colocación y pulido de estuco
 - 3. Peones en general

- D) Gente dedicada a la tercera fase de construcción (acabados)
 - 1. Pintores
 - 2. Escultores
 - 3. Preparadores de pigmento
 - 4. Ayudantes

Vemos reflejada en esta estructuración de especialidades y organización de trabajo (como en toda obra moderna), la compleja división que en Teotihuacan existió. La jerarquización de los niveles de trabajo supone como debe de ser, un aumento en la cantidad de trabajadores mientras menos especialización se requiera. Es obvio entonces que debieron existir pocos directores de obra con relación a los peones; pero, lo interesante de la organización de obra, con respecto a las personas dedicadas directamente a la construcción, no es la jerarquización en sí, sino dos factores fundamentales que de aquí emanan:

- 1. Conocimiento, aprendizaje y especialización
- 2. Planeación, organización y existencia de un proyecto

En el punto número uno encontramos un factor sumamente interesante, el conocimiento y aprendizaje (lo considero uno ya que no se puede separar conocimiento del aprendizaje); lo cual nos quiere decir que en Teotihuacan existió una metodología y sistema que en un principio pudieron ser producto del empirismo y de la experiencia, pero que se convirtieron en un proceso estudiado y perfeccionado que, para su correcta realización, era necesaria gente preparada. Este proceso lleva a la especialización, tanto de oficios en particular, como de conocimientos. El hacer lo último demuestra que existió en Teotihuacan constructores como tal, es decir, gente que se puede considerar un ingeniero y/o arquitecto de nuestros días. Estas personas tenían que tener un conocimiento exhaustivo de procesos constructivos, calidad de material, aprovechamiento de los recursos, organización de obra, programación control de calidad.

En el segundo punto, hallamos la razón, en buena parte, de la belleza y complejidad del centro ceremonial de Teotihuacan. Toda obra ingenieril requiere de planeación y organización, y la obra en sí (vaya, incluyendo su construcción) cuando tiene los dos factores anteriores, y se basa en conocimiento y estudio, se puede llamar proyecto. Para el caso en estudio, fueron necesarias personas que planearan (urbanismo, distribución, ingeniería, localización, obtención y uso de recursos, arquitectura, técnica, y usos y fines de la construcción), personas que organizaran (distribución y aprovechamiento de los recursos, fuerza de trabajo, mano de obra, tiempos, calidad, especialización y técnica), y gente, por supuesto, dedicada a la etapa de construcción (tanto especialistas y supervisores, como la gente dedicada directamente como la mencionada anteriormente, con su respectiva jerarquía).

Todo lo anterior, queda de manifiesto en lo descrito en este capítulo, ya que los volúmenes de los basamentos y plataformas, compuestos de retículas de mampostería y rellenos de tierra y materiales diversos, los cuerpos posteriores (sobre todo piramidales, siguiendo el proceso de retículas), la construcción de espacios habitacionales y sus elementos (muros, techos, columnas, apoyos y pisos), los sistemas de drenaje y el concepto de urbanismo como la distribución de cuerpos y definición de espacios (estacionales y circulatorios), no es más que una visión de obra y realización de un proyecto. Cuando un proyecto es realizado y consumado de forma efectiva y eficiente, y que traiga un beneficio, podemos afirmar que existe una sociedad urbana, desarrollo y progreso.

La relación sobre la construcción se da siempre, ya que es obvio y determinante el cambio de la vinculación del hombre con el medio; si bien antes, para sobrevivir y mantenerse, el hombre se adapta al medio en situaciones muy relativas, es ahora que el ámbito natural sufre una transformación a manos del hombre.

*“... Más allá del azar y de la muerte
duran, y cada cual tiene su historia,
pero todo esto ocurre en esa suerte
de cuarta dimensión, que es la memoria...”*

Jorge Luis Borges
Adrogué

III

RESISTENCIA DE MATERIALES EN LAS VIGAS DEL CONJUNTO PLAZA OESTE DE TEOTIHUACAN

3.1 Historia Urbanística

Bien sabemos que no todas las estructuras prehispánicas son pirámides, solo que estas son las que por los materiales con los que están hechas y por sus volúmenes, permanecen en el tiempo y se mantienen en mejores condiciones. Sin embargo, la mayoría de las construcciones en el México antiguo eran recintos habitacionales, gubernamentales o religiosos, los cuales estaban levantados sobre una plataforma y no eran pirámides, sino cuartos, recámaras o espacios abiertos. Esto en conjunto, además de las calzadas y calles circulatorias, forman un sistema urbano. El sistema urbano es el que obliga a mejoras constructivas y a poner atención, tanto arquitectónica como ingenierilmente, en las estructuras que lo componen. Esto resulta obvio una vez que una sociedad se define en un centro urbano, las necesidades de vivienda, de gobierno, religiosas, sociales y políticas son mayores y requieren de espacios cada vez más complejos. Para poder lograr estos espacios complejos, se necesitó de ingenio y de un estudio que permita construirlos para que sean resistentes, suficientes, cómodos y que satisfagan las necesidades creadas.

Para poder entender las construcciones teotihuacanas, se presenta un pequeño marco histórico del desarrollo de la ciudad a lo largo de casi nueve siglos.

La ciudad prehispánica de Teotihuacan, fue edificada a lo largo de novecientos años, del siglo II a.C. al año 700 d.C. y para observar los distintos momentos de la historia de esta ciudad, se ha hecho una división de fases: Teotihuacan I, II y III.

Teotihuacan I

Esta era cubre aproximadamente los dos siglos iniciales antes de la era cristiana; durante esta época, la ciudad creció enormemente tanto en extensión como en población, puede que se haya alcanzado una población de 50000 habitantes. Esto último puede ser por la inmigración hacia Teotihuacan por parte de pueblos y pequeñas ciudades aledañas y cercanas a la zona.

En esta etapa se construye la calzada de lo muertos en su zona norte, y posiblemente las avenidas Este y Oeste son iniciadas; gracias a esto, la ciudad comienza a tomar su forma definitiva, largas avenidas bajo un plan de retícula o cuadrícula y división en cuadrantes. Se define la orientación norte – sur con una desviación de 15° 30' NE, lo cual recuerda la orientación de la ciudad planeada más vieja de mesoamérica, La Venta de la cultura Olmeca, con una orientación de 8° NO.

Es en esta fase cuando se empiezan a construir la mayoría de los grandes monumentos de la ciudad: la pirámide del Sol, que se amplió posteriormente al doble de su altura, y la parte interior de la pirámide de la Luna.

Existen aproximadamente veintitrés conjuntos de plazas, formados por tres templos que circundan un patio con una plataforma al centro, el Conjunto Plaza Oeste cumple con estas características y es un ejemplo claro del proceso de organización y urbanización teotihuacano. Es

posible que en estas fechas, se comenzaran ciertas obras y proyectos de irrigación así como proyectos de zonas de producción y mercado.

Teotihuacan II

Este período abarca hasta el año 350 d.C. Durante esta fase, el área metropolitana crece en el valle, inclusive con pueblos satélite en Hidalgo y Puebla. En esta era se observan signos de un área de influencia o *hinterland* en el valle de Oaxaca, en Veracruz e inclusive en la zona de Kaminaljuyu en la meseta alta de Guatemala. Se construye el centro político y comercial de Teotihuacan, es decir la Ciudadela y el conjunto del Templo de Quetzalcoatl. Se terminan las calzadas Este y Oeste.

Es en esta etapa donde se alcanza la cifra de 100000 habitantes en una superficie de aproximadamente 20 km². La organización vecinal y residencial, es clara y bien planeada, los vecindarios están organizados por profesión y por mercado o comercio. Vemos ya crecimiento en arquitectura de las casas y de los recintos ceremoniales y gubernamentales. El Conjunto Plaza Oeste, toma su forma actual, como zona ceremonial, y los espacios cerrados se convierten en conjunto de cuartos y pasillos. Este conjunto cambia en la tercera fase, elevando su nivel topográfico alrededor de dos metros, pero conservando la distribución y arquitectura.

Teotihuacan III

Esta es la etapa final, y la mayor grandeza de Teotihuacan, abarca hasta el 650 d.C. Se alcanza una población cercana a los 200000 habitantes, sin embargo el área que abarca la ciudad permanece

prácticamente la misma. Se termina el palacio de Quetzalpapalotl, y la magnífica plaza de la luna. Cabe mencionar que hacia el final de esta etapa, la población vive en departamentos mas que en zonas residenciales con unidades habitacionales o casas individuales. Esto provocó un cambio en los sistemas constructivos, urbanización y planeación, así como en las vialidades. Sin embargo, el modelo arquitectónico permaneció muy similar al de épocas anteriores, alterando las dimensiones.

Se cree que la sobrepoblación, fricciones entre diversos sectores de la sociedad y problemas económicos, provocaron que la gente se retirara del centro ceremonial hacia zonas rurales; de la misma forma los gobernantes perdieron control sobre estas nuevas zonas, causando la caída del reinado teotihuacano.

3.2 Introducción al Conjunto Plaza Oeste

Ahora bien, con la creciente población, con necesidades más grandes, y una sociedad cada vez más compleja, los recintos, sobre todo religiosos y de gobierno, necesitaban ser resistentes, adecuadamente contruidos y que permanecieran en el tiempo. Para poder probar que esto se llevó a cabo, se realizará un análisis sencillo de las vigas del acceso y cuartos del Conjunto Plaza Oeste (CPO). Cabe mencionar que en la mayoría de las habitaciones, las losas o techumbres estaban apoyadas sobre muros de mampostería, solamente en los accesos y portales, se apoyaban en vigas de madera (que realmente eran dos o tres vigas unidas, funcionando como una sola).

Las técnicas constructivas y cálculos realizados por las culturas prehispánicas no se parecen o acercan, en lo mas mínimo, a los cálculos usados actualmente, o por lo menos eso suponemos a falta de datos o pruebas que demuestren la existencia de algún método científico o sistema de cálculo; sin embargo, existió alguna técnica ya sea basada en el empirismo, en observaciones bajo el método de prueba y error, o la realización, como mencioné antes, de cálculos desconocidos por nosotros (y no es nuestro papel descubrirlas, en el caso de que existieran), que permitió construir estructuras suficientemente resistentes para ser utilizadas y que fueran funcionales, tanto en el tiempo como en la actividad. El análisis que se presenta, siendo muy sencillo, tiene la única finalidad de, con lenguaje y métodos de nuestros días, presentarnos el alcance de la capacidad técnica de los ingenieros constructores de Teotihuacan.

3.3 Materiales, dimensiones y cargas

Se realizarán cálculos sobre las estructuras tipo habitacional, más grandes del CPO, esto se debe a que son las que mayores cargas tienen, así como las mejor conservadas, y en las cuales se pudieron obtener dimensiones más precisas.

Para poder analizar la resistencia de las vigas en los recintos del CPO, primero hay que definir materiales dimensiones y cargas. Se revisarán primero las habitaciones 13 y 14 del conjunto, así como el acceso al mismo (que se encuentra entre las dos habitaciones mencionadas). Lo anterior se realiza con el fin de obtener la zona o área con mayor descarga y peso, para posteriormente revisar las vigas que soportan este peso.

Las dimensiones y claros librados de las vigas, son los siguientes:

	vigas		
Claros (mayores)	peralte	ancho	
m	m	m	
<i>Hab. 13 y 14</i>	5.35	0.23	0.12
<i>acceso al CPO</i>	5.35	0.23	0.12

Tabla 3.1a
Dimensiones de las vigas estudiadas
Los datos fueron obtenidos de diversas publicaciones (Margain, Morelos) y comprobadas en campo.

La madera tiene el siguiente peso volumétrico:

	peso volumétrico
	kg / m ³
<i>Hab. 13 y 14</i>	550.00
<i>acceso al CPO</i>	550.00

Tabla 3.1b
 Peso volumétrico de la madera
 El peso volumétrico corresponde a madera de pino.

Ahora bien, estas vigas, junto con los muros tanto externos como internos, sostenían a la techumbre del recinto. La techumbre a su vez estaba sostenida por una cama de mórtillos de madera, que durante el proceso constructivo realizó la función de cimbra. Los mórtillos son largos cilindros de madera con un factor de esbeltez grande y que no han sido pulidos para lograr una estética arquitectónica. Los mórtillos, que en general conservan una sección circular, tienen las siguientes características.

	peso volumétrico	mórtillos
	kg / m ³	diámetro [m]
<i>Hab. 13 y 14</i>	550.00	0.14
<i>acceso al CPO</i>	550.00	0.14

Tabla 3.1c
 Dimensiones de los mórtillos de madera

Las techumbres estaban compuestas por varias capas de diversos materiales, como se explicó en el proceso constructivo descrito en el Capítulo II de este trabajo. Estas techumbres que resultaban ligeras para su espesor, pero suficientemente resistentes estaban compuestas con materiales en diferentes capas que se vemos en la siguiente tabla, indicando los espesores de cada capa y los pesos volumétricos de cada uno de estos materiales:

<i>Techumbre</i>			
Elemento	material	espesor	peso volumétrico
		m	kg / m ³
<i>aplanado 1</i>	barro	0.02	1300.00
<i>enramado</i>	madera	0.02	450.00
<i>apisonado</i>	tepetate	0.13	1100.00
<i>relleno</i>	tezontle	0.16	1300.00
<i>aplanado 2</i>	barro	0.03	1300.00

Tabla 3.2
Composición de la techumbre y materiales de la misma

Debido a la distribución espacial y estructural de columnas y traveses, las vigas principales de las habitaciones y acceso al CPO, es necesario definir el área de la techumbre que afecta a las vigas en estudio, con relación al área total del techo o cubierta. Esto se hizo primero basándose en planos del conjunto y posteriormente se hizo una revisión de campo para precisar las medidas y la distribución espacial y estructural.

Como en todo análisis de losas, la distribución de cargas hacia la periferia de la losa y sobre los elementos que soportan estas cargas (trabes, vigas o muros), está definida según la geometría de la losa; esto es, en el caso de una losa rectangular (como la de nuestro caso), la carga sobre el lado largo del rectángulo (área tributaria mayor), corresponde a la de una sección trapezoidal de grosor igual al espesor de la losa, donde la base mayor del trapecio es el lado largo de la losa. En el caso del lado corto del rectángulo que conforma la losa (área tributaria menor), la carga la define una sección triangular de ancho igual al de la losa, y la base corresponde al lado corto de la losa.

Entonces, las dimensiones de las áreas de las losas en estudio del CPO son las siguientes:

	ancho	largo	área	área tributaria	área tributaria
	m	m	m ²	m ²	m ²
<i>Hab. 13 y 14</i>	3.95	5.35	21.13	6.67	3.90
<i>acceso al CPO</i>	3.97	5.35	21.24	6.70	3.92

Tabla 3.3
Áreas de las losas o techumbres (de mayor dimensión y peso)

Estas áreas corresponden a las secciones que distribuirán los pesos o cargas recibidas por las vigas y muros de los recintos del Conjunto Plaza Oeste. Los pesos, desglosados por material y capa, ya relacionados con las áreas son los siguientes:

Pesos por áreas

Hab. 13 y 14

		Peso losa [kg]	Peso losa [kg]
		área mayor	área menor
<i>aplanado 1</i>	barro	173.31	101.42
<i>enramado</i>	madera	44.99	26.33
<i>apisonado</i>	tepetate	953.18	557.79
<i>relleno</i>	tezontle	1386.45	811.33
<i>aplanado 2</i>	estuco	173.31	101.42
<i>Total</i>		2731.24	1598.28

Tabla 3.4a
Pesos por áreas de las habitaciones 13 y 14

Acceso CPO

		Peso losa [kg]	Peso losa [kg]
		área mayor	área menor
<i>aplanado 1</i>	barro	174.18	101.93
<i>enramado</i>	madera	45.22	26.46
<i>apisonado</i>	tepetate	958.01	560.61
<i>relleno</i>	tezontle	1393.47	815.44
<i>aplanado 2</i>	estuco	174.18	101.93
<i>Total</i>		2745.07	1606.37

Tabla 3.4b
Pesos por áreas del acceso al CPO

Los pesos de las vigas y los morrillos de madera que sostienen y forman a la techumbre, respectivamente, son:

Hab 13 y 14 Acceso CPO área menor

Peso viga [kg]	81.21	81.21	61.48
morrillos [kg]	513.25	486.39	300.35

Tabla 3.5
Pesos de los elementos estructurales de madera en el CPO

Cabe mencionar que las vigas del área menor, o del lado corto del rectángulo que conforma la losa o techumbre, están apoyadas directamente sobre los muros; es decir, no existe un claro que tengan que librar, mientras que las vigas del lado largo (habs. 13 y 14, y acceso al conjunto), si libran un claro (antes mencionado), y están libremente apoyadas sobre columnas.

El peso total de la techumbre, morrillos y vigas (es decir peso propio) que actúa en las vigas, se distribuye linealmente sobre estas, haciendo que sea una carga uniformemente distribuida, y sin ninguna carga puntual o concentrada. Desglosando capa por capa (y obviamente material por material), y calculando las cargas sobre las vigas, obtenemos la siguiente tabla de distribución de pesos:

Cargas Hab. 13 y 14 área menor Acceso CPO

	Peso lineal kg / m	Peso lineal kg / m	Peso lineal kg / m
<i>aplanado 1</i>	32.39	18.96	32.56
<i>enramado</i>	8.41	4.92	8.45
<i>apisonado</i>	178.17	104.26	179.07
<i>relleno</i>	259.15	151.65	260.46
<i>aplanado 2</i>	32.39	18.96	32.56
<i>dos vigas (propio)</i>	30.36	30.74	30.36
<i>morrillos</i>	95.94	75.09	96.42
TOTAL	636.81	404.57	639.88

Tabla 3.6 (página anterior)
Cargas lineales sobre las vigas

Es claro entonces, que la viga a analizar será la del acceso al Conjunto Plaza Oeste, debido a que es la que presenta mayores cargas, y las dimensiones no son diferentes. Como se mencionó anteriormente, la viga está libremente apoyada en sus extremos, y resiste una carga distribuida y uniforme. Aquí cabe recordar que, tanto en las habitaciones como en el acceso al conjunto, eran dos vigas las que sostenían la techumbre, estas vigas estaban unidas y trabajaban como una sola.

3.4 Resistencia de materiales; comportamiento de las vigas

Para el análisis mecánico y de resistencia de materiales de la viga o trabe en la estructura, primeramente se calcula el momento flexionante, provocado por las cargas mencionadas, al cual está sometida la viga, este momento es interno. El momento flexionante es uno de los elementos mecánicos a los que está sujeta una estructura, estos son cuatro: momento flexionante, fuerza cortante, fuerza normal y momento torsionante. Debido a las características de la viga (isostática, libremente apoyada y con carga uniformemente distribuida), se calcula el momento flexionante o momento actuante máximo (M_a), de la siguiente manera:

$$M_a = \quad W L^2 / 8$$

donde: W = carga uniformemente distribuida (kg / m)

L = longitud de la viga (m)

El momento máximo se encuentra al centro del claro. El cálculo es como sigue:

$$M_a = \quad W L^2 / 8$$

$$M_a = \quad (639.88 * 5.35^2) / 8$$

$$\boxed{M_a =} \quad \boxed{2289.36} \quad \text{kg} \cdot \text{m} \quad = \quad \boxed{228936.32} \quad \text{kg} \cdot \text{cm}$$

Ahora bien, a pesar del clima, tiempo y de la destrucción por mano del hombre, que ha acabado con gran parte de los centros arqueológicos de nuestro país, muchas de las estructuras se mantienen en pie, lo cual indica su resistencia, su buen proceso y técnica constructiva y el claro comportamiento mecánico eficiente del material (si bien, en función de la geometría de los elementos estructurales). Esto en términos de las estructuras, se denomina resistencia de material en cada uno de los elementos mecánicos (ya mencionados) que actúan sobre o a los que están sujetas las piezas, conjuntos o sistemas estructurales. La resistencia del material en el caso del momento flexionante, que es el que estamos estudiando, se llama momento resistente; está en función del esfuerzo al que se somete el elemento, a la geometría del mismo y, dependiendo del tipo de cálculo que se realice, de la calidad y tipo del material así como de los efectos del clima sobre el material.

Para revisar el momento resistente de las vigas de las habitaciones 13 y 14, así como del acceso al CPO, se llevarán a cabo dos procedimientos diferentes. El primero consiste en la ecuación o fórmula del momento flexionante, conocida también como fórmula de la escuadría. Esta fórmula solamente considera las características de esfuerzo del material y la geometría de la pieza en estudio, para que el uso de esta ecuación sea válido, el material tiene que ser homogéneo. El segundo procedimiento, es aplicar la fórmula de momento resistente para elementos de madera del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Este procedimiento es el mas adecuado, ya que además de considerar la geometría y capacidad ante el esfuerzo, particular de cada material, toma en cuenta los tipos particulares de madera y calidad de la misma, toma en cuenta los efectos del clima sobre el material, toma también en cuenta la humedad natural de la madera, esbeltez y

estabilidad lateral (esto último depende del sistema estructural en conjunto).

Análisis por medio de la fórmula de la escuadría:

Momento resistente (M_R)

$$\sigma = (M / I) \cdot y$$

donde:

$\sigma =$ esfuerzo = 170 kg/cm² madera de pino, clase A al momento de construcción
 $I =$ momento de inercia
 $y =$ distancia del centroide de la sección (eje neutro) a la fibra mas alejada de la sección
 $y =$ 11.5 cm

El momento de inercia, se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} I &= (1 / 12) b h^3 && \text{sección rectangular} && (\text{cm}^4) \\ I &= (1 / 12) (12) (23^3) \\ I &= 12167.00 && \text{cm}^4 \end{aligned}$$

donde:

$b =$ ancho de la sección (cm)

$h =$ alto de la sección (cm)

Entonces, despejando el momento (M) de la ecuación de la escuadría, obtenemos el momento resistente de la viga, es decir, del funcionamiento en conjunto de las dos vigas, de dimensiones antes mencionadas, unidas trabajando como una sola trabe.

$$M_r = \sigma I / y$$

$$M_r = (170 * 12167) / 11.5$$

$M_r =$	179860.00
---------	-----------

kg · cm

dos vigas	
359720.00	kg · cm

Como se puede observar, el sistema resiste, y está sobrado, pero ahora, hay que considerar los tipos de madera, humedad, y al sistema en conjunto, para tener información a través de un análisis mas completo de las vigas y poder determinar el funcionamiento de las mismas de una manera mas precisa.

Según el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, el valor del momento flexionante resistente en una pieza de madera se define como:

$$M_R = F_r f_{fu} S \Phi$$

donde :

$$\begin{aligned}
 F_r &= 0.8 \\
 f_{fu} &= f_{fu} k_h k_d k_c k_p k_{ct} \\
 S &= \text{módulo de sección} \\
 \Phi &= \text{estabilidad lateral}
 \end{aligned}$$

Existen varios factores y parámetros que se deben tomar en cuenta en la fórmula anterior. Para definir el factor de estabilidad lateral, se debe definir la geometría del elemento, y las condiciones en las que se encuentra con respecto al sistema estructural. Según reglamento, para la estabilidad lateral, se realizan los siguientes cálculos.

para Φ :

C_s = factor de esbeltez

$$C_s = \sqrt{(L_u d / b^2)}$$

$$C_s = 9.244$$

$C_s > 6$ entonces:

$$C_k = \sqrt{E_{0.05} / f_r}$$

$$C_k = 65000 / 140.76$$

$$C_k = 21.49$$

$$L_u = 5.35 \text{ m} = 535 \text{ cm}$$

$E_{0.05}$ = Módulo de elasticidad de la madera

f_{fu} obtenido líneas abajo

$6 < C_s < C_k$ se usa la siguiente expresión:

$$\Phi = 1 - 0.3 (C_s / C_k)^4$$

$$\Phi = 0.990$$

Lo anterior se realiza con el fin de determinar un factor de afectación (aumento o reducción) del momento en la viga.

Como podemos observar en los cálculos, el factor de estabilidad lateral es menor a la unidad, esto afecta a la viga reduciendo la capacidad a la flexión de la misma. Esto es, el momento resistente (flexionante) de la viga va a ser menor debido a las condiciones (en este caso constructivas) en las que se encuentra. Particularmente, esto sucede debido a que la viga de soporte en el acceso al CPO carece de soportes laterales como viguetas perpendiculares a la viga, anclajes en los extremos de la viga y los soportes (principalmente columnas) de ella, o que la viga esté soportada en toda su longitud (como es el caso de que la viga esté apoyada directamente sobre un muro), y que estos impidan la traslación y rotación de sus extremos. Lo único que realmente impide estos movimientos en la viga en estudio, es la fricción entre los materiales y el gran peso que le transmite la losa o techumbre.

Una vez obtenida la estabilidad lateral de la viga y su factor correspondiente, se calculará el factor f_{fu} . Este es un factor que en realidad lo que hace o su función es reducir o aumentar el módulo de elasticidad. Esto se lleva a cabo debido a que la madera es un material que es afectado notoriamente por factores externos como la humedad, tipo de madera, tipo y condiciones de carga. Estos factores son tomados en cuenta al momento de construir el sistema o grupo estructural, ya que es cuando se encuentran presentes todo en un mismo período de tiempo. Para fines de experimentación y de laboratorio cabe mencionar que el módulo de elasticidad tomado en cuenta para el cálculo del factor de esbeltez es al 5 percentil.

Las constantes para determinar el factor f_{fu} son:

f_{fu} : módulo de elasticidad (kg / cm^2)

K_d : factor por duración de carga

K_h : factor por contenido de humedad

K_c : factor por compartición de carga, igual a 1.15. Aplicable en sistemas formados por miembros paralelos separados 61 cm centro a centro o menos, dispuestos de tal manera que soporten la carga conjuntamente.

K_p : factor por peralte. Aplicable a secciones que tengan un peralte d , menor o igual a 14 cm

K_{ct} : factor por clasificación (madera maciza de coníferas únicamente).

Como se aprecia, el reglamento toma en cuenta una gran serie de factores que además están relacionados con la geometría de las vigas, y con la disposición de ellas en un sistema estructural. Todo esto afecta la forma de recibir la carga, y por supuesto la forma de comportarse del material. Ahora, para obtener todos los factores, se recurre a tablas y normas (Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y Norma Oficial Mexicana NOM-C-239-1985) obtenidas por experimentación y pruebas de laboratorio.

Finalmente, con los valores obtenidos en las tablas, se calcula f_{fu} ; recordando, se obtiene de la siguiente forma:

$$f_{fu} = f_{fu} K_h K_d K_c K_p K_{ct}$$

Terminando con los cálculos del reglamento:

$$\begin{aligned}
 f_{bu}: \quad f_{bu} &= 170.00 \quad \text{kg/cm}^2 \\
 K_d &= 1.00 \\
 K_h &= 0.80 \\
 K_c &= 1.15 \\
 K_p &= \text{Aplicable a secciones de peralte } d, \text{ igual o menor a } 14 \text{ cm} \\
 K_{\alpha} &= 0.90
 \end{aligned}$$

$$f_{bu} = 140.76 \text{ kg/cm}^2$$

$$S = I/y$$

$$S = 1058.00$$

$M_R =$	117915.36	kg * cm		dos vigas	235830.73	kg * cm
---------	-----------	---------	--	-----------	-----------	---------

Relaciones de resistencia o seguridad

$$R_s = M_R / M_k$$

$R_s =$	1.571	=	57.10%	=	3.00%	=	escuadria
$R_s =$	1.030	=	3.00%	=	3.00%	=	reglamento

Como se puede apreciar, las vigas que sostienen la techumbre del acceso al Conjunto Plaza Oeste, no solo eran suficientes para este fin, sino que inclusive cumplen con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Cabe mencionar que el Reglamento fue actualizado, cambiado y mejorado a partir de los sismos de 1985, y estos cambios están enfocados a hacer las construcciones más seguras. Para lograr lo

anterior, las experimentaciones realizadas en los materiales y estructuras para obtener las fórmulas y procedimientos de cálculo de resistencia, son muy rigurosas y exigentes. Esto lo menciono ya que de forma indirecta, y por simple comparación, nos demuestra los conocimientos constructivos de los ingenieros – arquitectos teotihuacanos, y la capacidad de llevar a la práctica métodos de edificación eficientes. Es aún más claro sabiendo que hace mil quinientos años, obviamente, no existían las técnicas actuales de construcción, métodos de experimentación, sistemas y procedimientos perfeccionados que tenemos hoy en día, y a pesar de estas limitaciones técnicas y científicas (que como bien mencioné anteriormente, puede ser que los pobladores de México de hace más de quinientos años tuvieran o hubieran desarrollado otros sistemas y métodos de cálculo desconocidos, hasta el momento, por nosotros y que fueran, aunque de forma distinta, igual o más eficientes que los utilizados en la actualidad), las estructuras en el CPO, por lo menos, resistieron efectiva y eficientemente las cargas a las fueron sujetas, y cumplieron su función adecuadamente. Cabe aclarar, para los escépticos, que prácticamente ninguna estructura resiste más de medio milenio a la intemperie; y que si bien la gran mayoría de las techumbres del centro ceremonial de Teotihuacan se han derrumbado, esto se debe a la acción del agua, viento, factores de erosión, vegetación y falta de mantenimiento por más de mil años. Sin embargo, que las vigas del acceso al CPO cumplan con la normatividad que exige el R.C.D.F., es un indicio de la gran capacidad técnica (¿empírica?), organizativa, y constructiva que tuvieron los teotihuacanos, y que gracias a esto podemos aprender, disfrutar, conocer y gozar una parte de la historia que nos forma como seres humanos.

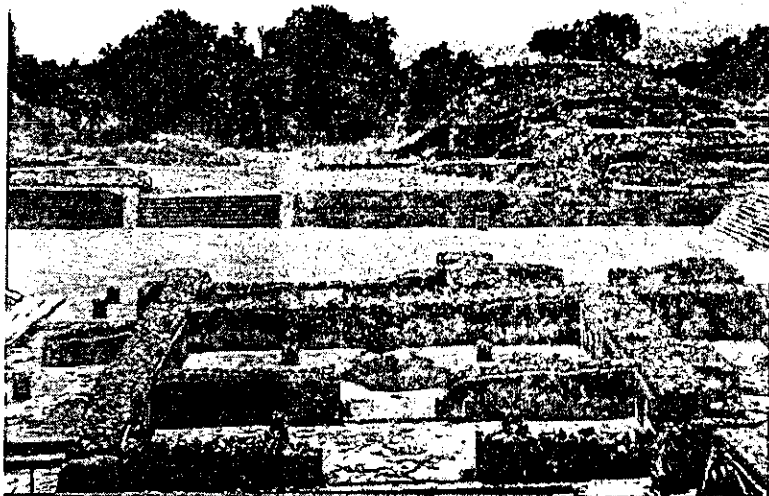


Fig. 3.1
Habitación 13 del CPO
Vista WE; a la izq. se encuentra el acceso al CPO



Fig. 3.2
Habitación 14
distribución de columnas
(sobre estas se encontraban las vigas de nuestro estudio)

CONCLUSIONES

El presente trabajo nos permitió aprender varios aspectos, tanto históricos como técnicos, de las culturas prehispánicas de la zona centro del país. Todo desarrollo de una cultura, su establecimiento como sociedad y civilización, y progreso urbano, es consecuencia de un conocimiento del entorno, de una organización y planeación, y de técnicas y conocimientos que permitan el mejoramiento de la calidad e vida.

En el caso del Templo Mayor de Tenochtitlan se pudo conocer la intuición geotécnica de los Aztecas. La construcción o levantamiento de la Isla de los Perros, es un hecho fundamental para el funcionamiento mecánico del suelo destinado a soportar una carga sumamente pesada y extensa. Si el suelo falla bajo la hipótesis de carga instantánea y con magnitudes muy elevadas, la construcción del *Huey Teocalli* sobre terreno virgen hubiera sido catastrófica, es mas, imposible después de la tercera etapa por lo menos. Esto se debe a que la descarga al suelo de esta etapa, es de 2.01 kg / cm^2 y según las expresiones de Skempton y Terzaghi con el primer valor de cohesión obtenido, y considerando un cimientto rectangular, nos arrojan valores de 1.85 y 2.056 kg / cm^2 respectivamente. Como vemos, la capacidad de carga del suelo es menor a la descarga causada por la pirámide. Cabe recordar que este valor de cohesión fue obtenido considerando la existencia de la Isla de los Perros, entonces, si esta no hubiera existido, la cantidad de agua en el suelo aumenta debido a la presencia directa del lago; esto causa un aumento en la relación de vacíos, el contenido y peso del agua, engrandeciendo la compresibilidad y disminuyendo la estabilidad del suelo. .Es obvio también, que las deformaciones ocurridas hubieran sido

mucho mayores de las existentes, gracias a lo anteriormente mencionado.

Ahora bien, de haberse construido el Templo Mayor, como propone la hipótesis, instantáneamente, en un solo evento y con las dimensiones y volumen final, queda claro que el suelo no hubiera resistido. Al no haber resistido, se hubieran presentado fallas y fisuras en el suelo, además de deslizamientos en los estratos y grandes deformaciones. Estas fallas, se deben, en parte, a que no existió una excavación con fines de cimentación previa a la construcción del templo. Al no existir esta excavación, no se permite al suelo tener un proceso de expansión, recuperación elástica, y aumento de capacidad de carga relacionada con la profundidad de la excavación. De esta forma, nos queda claro que el suelo bajo el templo, sufrió un fenómeno unidimensional de consolidación, por lo menos, durante los 140 años que duró su construcción en etapas. También queda claro que fue esto mismo, la construcción en etapas lo que permitió, el fenómeno de consolidación en sí, y por lo tanto la permanencia y no destrucción del Teocalli.

El esquema de proporción de propiedades y alturas resultó muy efectivo para el cálculo de las propiedades y características mecánicas del suelo, tomando en cuenta la imposibilidad de realizar pruebas de laboratorio, ya que es imposible obtener muestras de suelo de hace quinientos años. Aunque las aproximaciones y cálculos no son exactos, si demuestran ser precisos, ya que los valores se encuentran dentro de rangos que podemos considerar normales, y permiten realizar cálculos adecuados.

Los capítulos que hablan de Teotihuacan, si bien no son lo mismo, están relacionados. Es gracias a ambos, que podemos determinar el grado de desarrollo, en lo referente a la construcción, de este pueblo prehispánico.

Podemos concluir que realmente existió un sistema constructivo, un proceso elaborado que insisto, si bien en un principio fue creado por observación y empirismo, se especializó hasta lograr ser un una serie de métodos desarrollados eficientes y efectivos. Los constructores Teotihuacanos tenían conocimiento de un concepto de edificación urbanística, tanto de conjunto como de unidades. Esto queda demostrado en el proceso constructivo en dos aspectos:

El primero radica en un proceso estudiado de creación de plataformas a través de la creación de cajones de cimentación o basamentos, lo cual permite seguir con la construcción de edificios más altos y extendidos, y la creación de plazas y conjuntos habitacionales. Además es con este sistema que fue posible la superposición de estructuras para poder hacer construcciones de grandes dimensiones y para elevar el nivel de piso de toda un área de estructuras.

El segundo se manifiesta en comprender el desarrollo de la construcción como un proyecto global, en el cual es necesario contar con espacios, con zonas de distribución, estructuras de circulación y sistema de drenaje. La planeación y ubicación de las estructuras con respecto a los espacios (abiertos, cerrados y circulatorios) es un indicio del estudio que se debió haber realizado para poder lograr un conjunto urbano.

Podemos identificar que en el sistema constructivo llevado a cabo en Teotihuacan tres procesos fundamentales:

1. Proceso estructural. Identificado por la formación de volúmenes estructurales, basamentos, habitaciones, recintos, adoratorios y templos, y la generación de espacios internos mediante la distribución de los apoyos de las estructuras.
2. Proceso de planos y formas. La creación de formas generales y particulares que definen el conjunto espacial que permite una urbanización por grupos que se refleja en lo general.
3. Proceso de planeación. Este proceso implica no solamente la técnica constructiva, sino la organización la mano de obra, el aprovechamiento de los recursos, la distribución de material, y los conocimientos técnicos, como por ejemplo, la obtención de cal.

Los tres procesos no son independientes, sino que son un sistema, y consecuencia uno del otro. Esto es, como lo mencioné en el capítulo correspondiente, un proyecto, que incluye una planeación, estudios tanto técnicos como sociales, localización, obtención, distribución y aprovechamiento de los recursos, un sistema elaborado de construcción, guiado por la técnica y el conocimiento, que a su vez establece la organización de obra con respecto a la fuerza de trabajo..

Con respecto a las vigas del acceso al CPO, se determinó que no solamente resisten, sino que a pesar de las limitaciones tecnológicas en la época de construcción del CPO, se encuentran dentro de reglamento con respecto al R.C.D.F. Esto demuestra la efectividad del sistema

usado por los Teotihuacanos, y en buena parte la razón de que todavía existan las construcciones aunque algunas en muy malas condiciones.

Si bien los cálculos usados son herramientas desarrolladas en nuestros días, son un muy buen punto de referencia para ver el alcance de las técnicas prehispánicas de construcción y visión para edificar. Esta forma de construir les permitió no solamente hacer edificios que resistieran, sino lograr espacios interiores más amplios, mayores espacios de circulación y recintos más espaciosos.

Es entonces que podemos concluir que las técnicas constructivas, conocimientos, intuición y métodos desarrollados por las culturas prehispánicas si bien no son las mejores, son efectivas, llevadas a cabo con ingenio y demuestran una gran capacidad para resolver problemas. Demuestran un alto nivel de organización y planeación, aprovechamiento de recursos y una enorme energía. Esto fue lo que hizo de estas culturas grandes civilizaciones tanto cultural como técnicamente, y es por ello mismo que hoy en día podemos disfrutar de la herencia que nos dejaron y de la cual podemos aprender mucho.

BIBLIOGRAFÍA

- FRANCO B. María Luisa, Conservación del Templo Mayor de Tenochtitlán, GV Editores, Colección Divulgación, INAH, Proyecto Templo Mayor, México D.F., 1990
- JUÁREZ BADILLO E. y Rico Rodríguez, Mecánica de Suelos, ed. Limusa, Tomo II, México D.F.
- MARGAIN Carlos R., Sobre sistemas y materiales de construcción en Teotihuacan, sobretiro de Teotihuacan, onceava mesa redonda, México D.F., 1966
- MARSAL R. J. y Mazarí M., El subsuelo de la Ciudad de México, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F., 1985
- MATOS Moctezuma E., El Templo Mayor: Excavaciones y estudios, INAH, México D.F., 1982
- MAZARÍ M., Marsal R. J. y Alberro J., Los asentamientos del Templo Mayor analizados por la mecánica de suelos, Instituto de Ingeniería, UNAM; Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México D.F., 1985
- MORELOS G.Noel, Proceso de producción de espacios y estructuras en Teotihuacan, INAH, colección Científica, México D.F., 1990

ARNAL S., Luis, Nuevo Reglamento de Construcción para el D.F., 2ª ed., Editorial Trillas, 1994, México D.F.

CONSULTA

HALPIN W. D., Leland S. Riggs, Planning and Analysis of Construction operations, John Wiley & Sons. Inc, 1992, New York

REYES Cortés, Manuel., Estratigrafía del área Templo Mayor – Catedral Metropolitana, en Antropología e Historia, Boletín 24, INAH, 1978, México D.F.

