

5520



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DE DAÑOS Y PROPUESTA DE REPARACION
PARA LA PIRAMIDE DEL ADIVINO EN UXMAL,
YUCATAN.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA CIVIL
P R E S E N T A :

ANA LAURA GALLEGOS Y TELLEZ ROJO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

INDICE

I INTRODUCCION

II ANTECEDENTES

II.1 Generalidades

II.2 Métodos de reparación y estabilización de estructuras

2.1 Resinas epóxicas

2.2 Anclajes

2.3 Concreto lanzado

II.3 Casos particulares de reparación

3.1 Túneles

3.2 Presas

3.3 Almacenamientos

3.4 Puentes

3.5 Carreteras

3.6 Edificios y otras estructuras

3.7 Monumentos históricos

III ANALISIS DE DAÑOS

III.1 Descripción de la Pirámide del Adivino

III.2 Generalidades de la técnica constructiva maya

III.3 Evolución

III.4 Análisis y estudios previos

III.5 Descripción de daños

5.1 Lado Norte

5.2 Lado Poniente

5.3 Lado Sur

5.4 Lado Oriente

III.6 Análisis de daños

IV PROPUESTA DE REPARACION

IV.1 Generalidades

IV.2 Datos de alimentación para el paquete SAP80

IV.3 Resultados

IV.4 Propuesta de reparación

V DISEÑO DE ELEMENTOS DE REFUERZO

V.1 Cámara central, Templo I

1.1 Diseño de muros de concreto

1.2 Diseño de barras de acero

V.2 Túnel

2.1 Diseño de la armadura

VI CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

I INTRODUCCION

*'...El pasado no es ruina sino
huella y los vestigios, más que
sombra, testimonio...'*

P. Ramírez Vázquez

La Península de Yucatán (Fig. I.1) es una formación calcárea correspondiente al Mioceno (Formación Carrillo Puerto). El subsuelo está constituido principalmente por rocas calcáreas fosilíferas, de origen marino, generadas por procesos de formación, intemperismo y erosión. El intemperismo se manifiesta en acción cárstica, es decir, acción química que produce disolución de calizas. Como consecuencia, se pueden encontrar numerosos conductos y cavidades subterráneas intercomunicadas; la probabilidad de encontrarlas en los primeros 5m de profundidad es cercana al 50%. La erosión, por su parte, se ha encargado de transportar los suelos; la capa de tierra vegetal es delgada, por lo que la roca aflora frecuentemente. El suelo y el subsuelo, muy permeables, propician la infiltración de las aguas pluviales, por ello, en la región no existen corrientes superficiales. Al penetrar en la roca, el agua provoca disolución superficial e interior; así, por las cavernas, grutas y fisuras circulan corrientes subterráneas. (1)

El área Puuc, al norte de la Península, es una gran planicie cubierta casi totalmente por monte bajo; los árboles, cuya altura

máxima es de 12 m, son de hojas caducas. Esta zona constituye las últimas estribaciones de la serranía del Petén, que atraviesa la península de oeste a este; las colinas que la forman tienen una altura máxima de 150 m (Puuc en maya significa serranía). [Fig. I.2]

En la región Puuc, el clima es cálido y se distinguen dos estaciones importantes: una calurosa y seca, entre febrero y mayo, en la que la temperatura llega a alcanzar los 35°C; otra, húmeda, entre junio y septiembre, en que la temperatura promedio es de 26°C. El resto del año, la temperatura varía entre 18°C y 22°C.

Las lluvias son escasas, de modo que la precipitación pluvial alcanza un máximo de 600 mm de lámina de agua anualmente, aún cuando es una zona en la que se resienten los efectos de los ciclones.

Dentro de este contrastante paisaje, árido en el período de sequía y verde durante la época de lluvias, floreció Uxmal (Ox-maal), 'la tres veces edificada', 'la ciudad santa del Puuc', majestuoso ejemplo de la arquitectura maya, que se convertiría durante el Período Clásico Mesoamericano en el principal centro de la región.

La ciudad de Uxmal cubre un área de 4 km² en los que se distribuye un conjunto de monumentales edificaciones de tipo religioso [Fig. I.3]. Los estudios de radiocarbono indican que las construcciones antiguas provienen del siglo VI D.C.; el máximo florecimiento se alcanza entre 800 y 900 (Período Clásico) y se piensa que la ciudad fue abandonada entre 1200 y 1400. (2.3.4)

La arquitectura de Uxmal refleja una profunda preocupación por lograr integración al paisaje. Muestra de ellos son: la forma alargada de la mayoría de sus edificios; el predominio de la línea horizontal y

la combinación de muros inferiores lisos contra otros, superiores, abundantemente decorados (Fig. I.4, I.5 y I.6).s.e

Otras características notables de las edificaciones de Uxmal son los arcos abovedados, los zócalos lisos o alternados con 3 ó 4 tambores de columnas (para lograr una arquitectura menos masiva) y las columnas, ya sea monolíticas, de mampostería o de varios tambores superpuestos, para dividir las entradas, y como elementos decorativos en zócalos, arquitrabes, frisos, cornisas y muros de fachadas.

Los edificios se construyeron con piedras muy bien talladas (calcáreas, gredosas o dolomíticas) que se ensamblaban formando enchapados. Su magnificencia queda manifiesta en los escritos de Stephens: '...no hay rudeza ni barbarie en el diseño o proporciones; por el contrario, el conjunto tiene un aire de grandeza y simetría arquitectónica...es difícil creer que el extranjero ve ante sí la obra de una raza en cuya epitafio, de acuerdo con lo escrito por los historiadores, se dice que corresponde a pueblos ignorantes en el arte que permanecieron en la rudeza de la vida salvaje...' (7).

Estas manifestaciones arquitectónicas, imponentes por su belleza y dimensiones, sólo podían ser el resultado de una organización en que, además de los materiales, la mano de obra fuera suficiente: '...eran los humildes sembradores de maíz, con cuyo sudor y trabajo se sostenían no sólo ellos sino su jefe supremo, los señores del lugar y los sacerdotes, [quienes], además de realizar esta labor nada despreciable fueron los constructores de los grandes centros ceremoniales, los elevados templos-pirámide...los palacios, juegos de pelota... y las calzadas de piedra que ...unían entre sí las ciudades

principales. Eran ellos los que extraían de la cantera, labraban y esculpían las enormes cantidades de piedra y sillares que se emplearon en estas grandes construcciones. Ellos, con sus hachas de piedra, derribaron los millares de árboles que sirvieron de combustible para los hornos en que se quemaba la piedra caliza de aquellos lugares, a fin de convertirla en cal para hacer la mezcla o mortero; y con las mismas hachas y cincelos de pedernal derribaban, labraban y grababan los dinteles de madera dura de las puertas y las vigas de chico-zapote de los techos... Eran ellos los canteros que labraban los sillares... los escultores que grababan las estelas y los diferentes elementos que entraban en la elaboración de la fachada. Y estas mismas gentes del pueblo servían hasta de bestias de carga para transportar las piedras de las canteras a los sitios de las construcciones; eran los que escalaban los andamios, atados con bejucos silvestres, llevando sobre la cabeza los pesados bloques de piedra labrada...' (8).

En Uxmal los recintos más importantes son el Palacio del Gobernador, la Casa de las Palomas, la Casa de la Vieja, el Cuadrángulo de las Monjas y, de modo especial, la Pirámide del Adivino [Fig 1.7], cuya importancia radica tanto en su altura como en su secuencia constructiva, resultado de la superposición de estructuras correspondientes a 5 etapas distintas.

El paso del ciclón 'Gilberto', en 1988, fue el motivo de que se realizara un reconocimiento a los monumentos arqueológicos de la región. En Uxmal se descubrió entonces la alarmante situación de la Pirámide del Adivino. El Instituto Nacional de Antropología e Historia

solicitó la opinión de arquitectos e ingenieros y finalmente decidió que se rellenaran algunas de las cámaras internas de la pirámide, con objeto de que quedara con una configuración similar a la que tuviera en la época previa a ser abandonada.

El presente trabajo tiene como objetivo proponer una alternativa diferente al uso del relleno, ya que estoy convencida de que la ingeniería civil ofrece mejores soluciones. Al mismo tiempo pretendo enfatizar la importancia y la necesidad de que la reparación de los monumentos históricos sea el resultado de un trabajo conjunto entre arqueólogos, historiadores e ingenieros, de modo que se llegue a soluciones satisfactorias desde el punto de vista técnico y desde el punto de vista estético, evitando improvisaciones.

De acuerdo con esto, el capítulo II de esta tesis contiene algunas de las técnicas empleadas por la ingeniería en la reparación de estructuras, ejemplificando con casos particulares y en especial con algunos referentes a monumentos antiguos en el mundo.

El capítulo III se refiere a las etapas constructivas de la pirámide y su paulatina degradación a partir de su abandono hasta nuestros días, con objeto de mostrar cuántas alteraciones ha sufrido. Se comentan varios de los estudios y propuestas de solución presentadas al INAH y, finalmente, se exponen la descripción y el análisis de daños.

En el capítulo IV se plantea un análisis estructural realizado con el paquete SAP80 para obtener el orden de magnitud de los esfuerzos en la pirámide, y se presenta una propuesta de reparación alternativa.

Finalmente, en el capítulo V se han diseñado los elementos de

refuerzo. El último capítulo está dedicado a las conclusiones.

Sustentando este trabajo está el apoyo firme y desinteresado de personas e instituciones a las cuales manifiesto mi más profundo agradecimiento: al Instituto Nacional de Antropología e Historia, en especial a los arqueólogos Roberto García Moll, Angel García Cook y Ricardo Velázquez por todas las facilidades y atenciones que recibí, y al arqueólogo Roberto Gallegos por su inapreciable asesoría, por haberme mostrado el mundo prehispánico y enseñarme a respetarlo y valorarlo profundamente; así mismo a José Ramírez, del archivo; al Dr. Roberto Centeno, de la Universidad Autónoma de Yucatán; a la División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica de la Facultad de Ingeniería; a Susana Sánchez Alfaro y a Javier Téllez Pineda, y al maestro Daniel Gleason Galicia.

Mi agradecimiento especial al Ing. Ricardo R. Padilla Velázquez, por su participación decisiva en la elección del tema, por su asesoría, sus comentarios y su tiempo.

Para el Dr. Mario E. Zermeño de León todo mi reconocimiento y mi gratitud por su entusiasmo, interés y participación, por su paciencia y su tiempo, factores invaluable en el desarrollo de esta tesis.

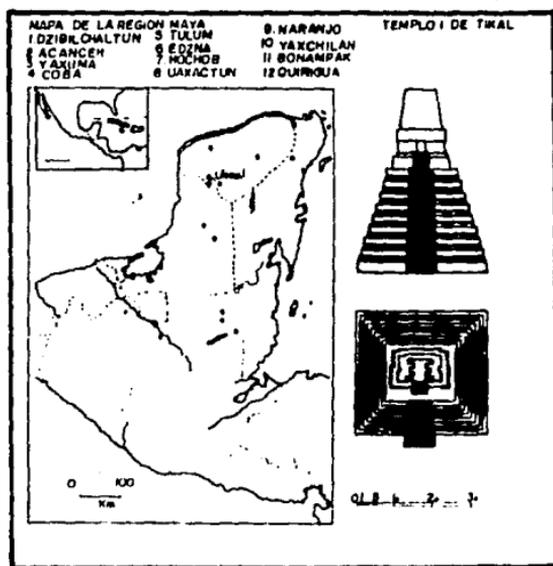


Fig. 1.1 Península de Yucatán

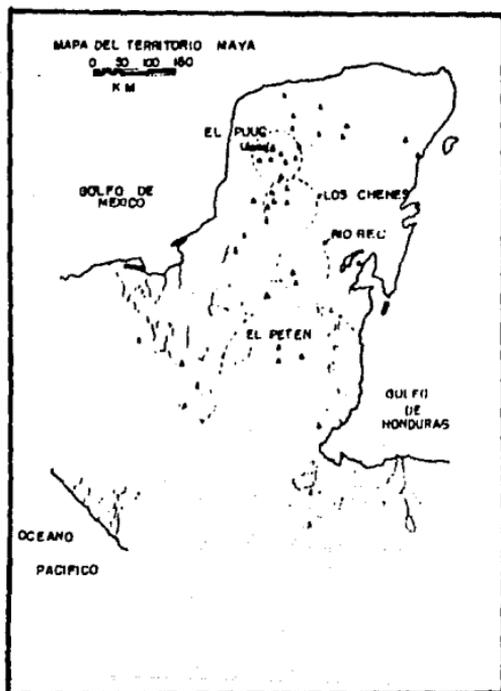


Fig. 1.2 Ubicación de Uxmal dentro del territorio maya

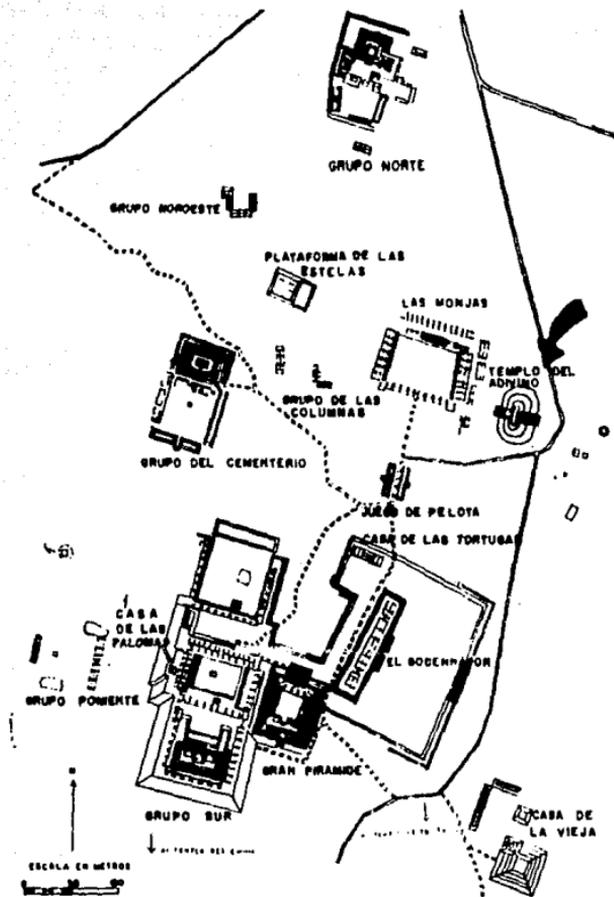


Fig. 1. 3 Plano de Uxmal



Fig. I.4 Cuadrángulo de las Monjas, Uxmal.



Fig. I.5 Gran Pirámide, Palacio del Gobernador

y Casa de las Tortugas, Uxmal

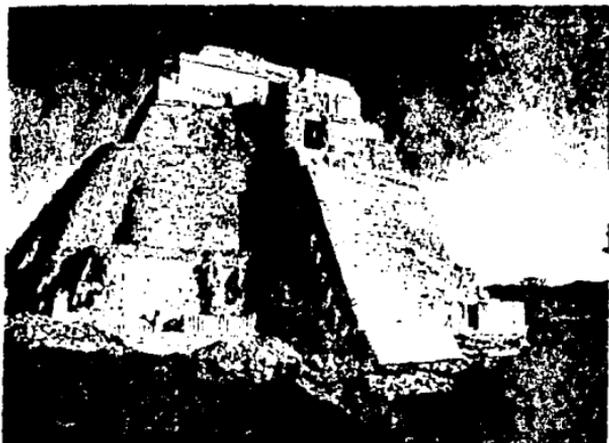


Fig. I.6 Pirámide del Adivino, lado Pontante

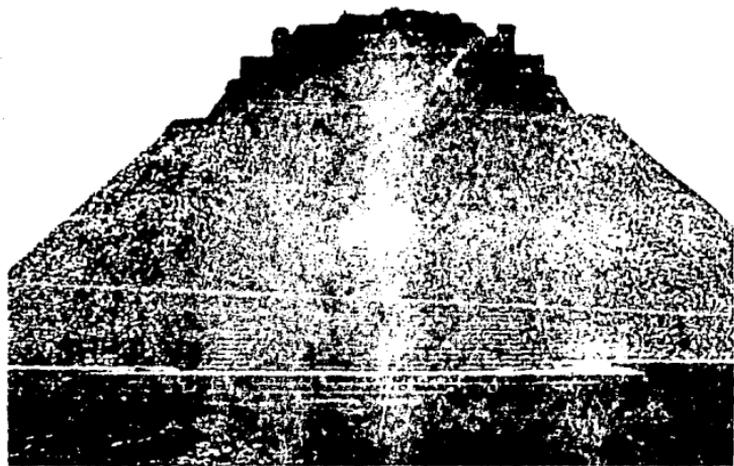


Fig. I.7 Pirámide del Adivino, lado Oriente

II ANTECEDENTES

"...es inaceptable desconocer el valor que tiene la imaginación y el libre discurrir en todo proceso creativo ..."

Martha Foncerrada

II.1 Generalidades.

La reparación de una estructura es el conjunto de acciones necesarias para devolver a dichas estructura sus características de funcionalidad, seguridad y estética, cuando éstas se han visto afectadas de una manera importante.

Una estructura dañada lo manifiesta a través de alteraciones aparentes que permiten apreciar, por lo menos inicialmente, la gravedad de un problema (1.2.3).

La primera etapa debe consistir en realizar un estudio detallado y preciso de los daños visibles, tratando de determinar tanto las causas que los han provocado como la resistencia que la estructura puede tener en estas condiciones. De este modo podrán tomarse las medidas de seguridad convenientes en tanto se decide la solución definitiva.

La siguiente etapa contempla un estudio más específico que determine las acciones que permitan restituir o proporcionar, según el caso, la resistencia necesaria al conjunto.

En general, los daños que presentan las estructuras pueden estar en alguna de las siguientes categorías:

- Daños relacionados con la geometría de la estructura, en especial asentamientos y desplazamientos que se manifiestan como agrietamientos en el concreto, fisuración y corrosión en el acero, fisuración y agrietamiento en las piezas de una mampostería, etc.

-Daños concernientes a los materiales de la obra, siendo estos materiales concreto, acero (en armaduras, en placas, como refuerzo, como material preforzado, etc.), mampostería, madera y materiales plásticos. Cuando los daños están relacionados con ellos puede ser:

a) Por su naturaleza:

- Resistencia insuficiente
- Características físico-químicas o mecánicas inapropiadas
- Dosificación incorrecta

b) Por no haber recibido la protección adecuada:

- Aceros de refuerzo sin protección o insuficiente
- Cables de prefuerzo incorrectamente aislados por errores en la inyección
- Estructuras de madera sin protección contra insectos o contra la intemperie
- Mamposterías desprotegidas y sometidas a condiciones atmosféricas

Como resultado, los daños se traducen en deformaciones exageradas, fisuramiento, corrosión, falla total (especialmente en madera), degradación del material, pérdida de adherencia, etc.

Una estructura agrietada permite la penetración de agentes agresivos que atacan los materiales, debilitándolos. Cuando el daño se encuentra en elementos estructurales también produce insuficiencias mecánicas. A medida que las grietas son de mayor abertura, el daño es más grave y puede llegar a modificar de tal modo la distribución de cargas y esfuerzos, que se originen condiciones distintas de las proyectadas y por lo mismo, no consideradas. Por otra parte, se alteran también las características estáticas de la estructura.

Las causas más frecuentes de daños en una estructura son:

- Estimación incorrecta de las solicitaciones
- Errores de cálculo o de disposición de los elementos resistentes
- Errores o descuidos durante la etapa de construcción, así como modificaciones en las especificaciones
- Fallas en la protección de materiales, fallas de sustentación y fallas relacionadas con el funcionamiento propio de la estructura

La importancia de los daños se mide con un análisis en el cual resultan de particular importancia tres indicadores:

- Características geométricas de las fisuras, es decir, abertura y profundidad
- Actividad de las fisuras

- Evolución de las fisuras. Que una fisura se mantenga estable indica que la estructura ha encontrado un nuevo estado de equilibrio, caso en el cual lo importante será determinar si lo mantendrá a largo plazo

En estructuras de mampostería, los daños más frecuentes son hundimientos, fisuramientos y pandeo. Los hundimientos responden a confinamiento o compresión excesiva; la aparición de fisuras, a un movimiento general de la estructura o la cimentación; el pandeo, a un equilibrio estático insuficiente.

Una vez determinados los daños y las causas que los provocaron, es posible decidir el tipo de reparación conveniente:

- Protección de la estructura
- Recubrimiento de elementos estructurales
- Reconstrucción o sustitución de elementos
- Introducción de elementos resistentes complementarios, como por ejemplo armaduras, elementos de refuerzo, anclajes, revestimientos y otros

La reparación de estructuras es un proceso que se ha realizado desde épocas antiguas, tratando siempre de proporcionarles las características adecuadas sin tener que recurrir a procesos de demolición y reedificación. Con el paso del tiempo se han aplicado diversas técnicas para estabilizar y proteger estructuras. Entre ellas destacan:

a) Uso de materiales plásticos, particularmente compuestos epóxicos

b) Colocación de anclajes

c) Aplicación de concreto lanzado

d) Colocación de muros de retención

II.2 Métodos de reparación y estabilización de estructuras.

II.2.1 Resinas epóxicas

Las resinas epóxicas son materiales plásticos a los cuales se han encontrado múltiples aplicaciones gracias a la amplia variedad de formulaciones que existen. Una de esas aplicaciones ha sido en el área de las reparaciones, donde han tenido una excelente acogida (4,5,6,7,8).

Las primeras experiencias en reparaciones se realizaron durante los años cincuenta, en inyección de grietas estructurales, para devolver integridad a elementos de concreto. Durante los años sesenta se desarrollaron los primeros sistemas de inyección a presión. Después, en Estados Unidos y en los Países Bajos se usaron los primeros morteros epóxicos para reparar carreteras muy transitadas. A la fecha los usos que se les da son muy variados. Indudablemente su gran aceptación se debe, entre otras características, a la rapidez con que se realizan tanto la etapa de aplicación como la de fraguado (también conocida como curado) y a la extensa gama de fórmulas posibles.

Un sistema epóxico consta principalmente de dos componentes:

- La parte A, constituida por una resina epóxica (polímero obtenido de la reacción entre un bisfenol-A y epícloridrina)
- La parte B, que es un agente endurecedor (agente de curado)

Ambos componentes son estables individualmente por periodos largos. En general ambos son líquidos, con variación en su viscosidad. La resina (parte A) puede ser suavizada si se calienta o endurecida si se enfría.

Para mezclar ambos componentes es necesario respetar la proporción señalada por el fabricante. A partir del momento en que se les mezcla, se produce una reacción exotérmica (generación de calor de reacción) que da lugar a un incremento en la temperatura. Esta elevación de temperatura depende de la fórmula y de la masa de la mezcla. Para evitar al máximo que la temperatura se eleve es conveniente que la relación área superficial/volumen sea alta y que se incluya la máxima cantidad posible de fillers.

El proceso de endurecimiento se inicia al mezclar ambas partes; su duración depende de la reactividad entre resina y endurecedor, y de la temperatura ambiental, que es uno de los factores más importantes en el proceso y debe controlarse al máximo: las bajas temperaturas retardan la reacción, en tanto que las excesivas pueden dañar al sistema, induciendo esfuerzos térmicos.

Una vez iniciado, el proceso de curado es irreversible. El tiempo transcurrido entre el momento de mezclado y el momento en que la mezcla ya no es utilizable porque su viscosidad ha aumentado demasiado

se llama vida trabajable (pot life).

Los sistemas epóxicos raras veces consisten exclusivamente en resina y endurecedor. Por motivos económicos en especial, se agregan algunos productos que permiten obtener las propiedades requeridas a menor costo y sin alterar la calidad. Entre estos productos se tienen:

- Diluyentes.- Reducen la viscosidad de la mezcla y mejoran su trabajabilidad, permitiendo una penetración más profunda.

- Acelerantes y retardantes.- Aumentan o disminuyen la velocidad de reacción, variando el tiempo de curado.

- Fillers.- Aumentan el volumen del producto, ayudando así a reducir costos sin alterar la calidad.

- Flexibilizadores.- Proporcionan cierta flexibilidad al sistema; se emplean especialmente cuando se tienen esfuerzos mecánicos o térmicos.

- Modificadores.

- Refuerzos.

Entre las propiedades más características de los compuestos epóxicos en general pueden mencionarse:

1) Propiedades de adhesión.

- Se unen satisfactoriamente a casi todos los materiales.

- Son excelentes adhesivos, debido a su estabilidad dimensional a largo plazo, a una muy baja contracción por endurecimiento, a la resistencia que tienen tanto a la compresión como

a la tensión, y, en muchas formulaciones, debido a su resistencia a la acción del clima, la humedad, la acción de ácidos y álcalis, etc.

2) Efectos de la temperatura.- Al combinarse las partes de un compuesto epóxico se forma un plástico termoendurecible (requiere una temperatura específica para que se produzca la reacción) que, una vez curado, no puede licuarse para ser retrabajado.

Sus propiedades se mantienen hasta una temperatura de 65°C. Temperaturas mayores pueden provocar cambios adversos y si se alcanzan los 300°C la resina se volatiliza, llegando en ocasiones a ser tóxica.

3) Resistencia al ataque químico

4) Resistencia a la abrasión severa

5) Elasticidad.- Los epóxicos son plásticos capaces de soportar deformaciones considerables y recobrar su forma original, si su límite elástico no es excedido.

6) Fluidez y relajamiento.- Ante cargas de magnitud aplicadas constantemente por un lapso de tiempo y según la temperatura, los epóxicos llegan a sufrir deformaciones no recuperables, tendiendo a fluir. Esta propiedad es ventajosa cuando se aprovecha para relajar esfuerzos.

7) Compatibilidad térmica.- Los epóxicos tienen un coeficiente de expansión térmica muy diferente del de los demás materiales usados en la construcción, pero si se les añaden fillers, se logra que su comportamiento sea más congruente con ellos.

8) Contracción.- Las resinas sufren una contracción inicial al endurecerse, generando esfuerzos que después se relajan debido a que son capaces de fluir (creep).

9) Resistencia al fuego.- Las resinas no resisten el fuego, que causa severas alteraciones a sus propiedades mecánicas.

10) Viscosidad.- Regularmente la viscosidad es baja, facilitando la inyección a bajas presiones y/o velocidades altas. Dos factores son fundamentales:

- La temperatura.- A mayor temperatura la viscosidad disminuye; a menor temperatura, la mezcla se va espesando.

- El tiempo transcurrido después de mezclar la resina y el endurecedor.- Cuanto más tiempo pasa y la reacción avanza, la viscosidad se incrementa, hasta que llega un momento en que la mezcla ya no es trabajable.

El uso adecuado de un compuesto epóxico contempla varias etapas:

- Tratamiento de la superficie de aplicación.- Es necesario que la zona donde se usará el compuesto esté libre de polvo, aceites, materiales grasos y materiales contaminantes. Además debe estar seca para evitar que la humedad ascienda por capilaridad, y tener una temperatura adecuada según las especificaciones de la resina. Esto garantiza una buena adherencia.

Los métodos de limpieza más comunes son el uso de aire comprimido o de chorros de agua, aspirado y otros.

- Preparación del compuesto.- Previamente al preparado las partes deben mantenerse a la temperatura apropiada para su colocación durante un periodo mínimo de 24 horas.

El mezclado debe respetar las proporciones indicadas por el fabricante. Generalmente se considera una tolerancia máxima de $\pm 5\%$

para garantizar las propiedades del compuesto, pero es preferible aceptar un margen de $\pm 2\%$.

Para inyección existen dos tipos de mezclado:

- Por etapas.- Se realiza en contenedores pequeños, empleando una espátula para cantidades hasta de 5 kg. Para mayores, es preferible el uso de algún dispositivo mecánico (por ejemplo, una revoladora).

- Mezclado continuo.- Se requiere equipo especial que bombee los componentes a una cabeza, donde son mezclados (Fig. II.11).

Los morteros epóxicos por su parte pueden mezclarse manual o mecánicamente y sólo deben aplicarse cuando los agregados estén completamente humedecidos por el aglutinante epoxico.

- Colocación.- Para el caso de reparaciones, lo más común es aplicar la mezcla con pistolas especiales que la inyecten a presión. Los morteros se colocan manualmente o por bombeo, según el caso.

Cabe mencionar que los compuestos epoxicos presentan algunos inconvenientes que pueden agruparse en dos aspectos generales: aplicación deficiente del compuesto y selección inapropiada de la fórmula. Adicionalmente debe mencionarse como inconveniente su alto costo, en especial en nuestro país, donde su empleo aun no es muy extendido.

A la fecha, las resinas epóxicas se han aplicado en el mundo en la reparación de túneles (ferroviarios, carreteros, mineros), presas (cortinas, vasos de almacenamiento, estructuras varias), almacenamientos, puentes, carreteras y edificios. También se han

empleado en la estabilización de suelos y en general en estructuras de todo tipo, incluyendo varios monumentos históricos. En algunas ocasiones se han aplicado individualmente, en especial cuando se trata de estructuras de concreto. La mayoría de las veces su uso se combina con alguna otra técnica: anclajes, presfuerzo, elementos prefabricados, etc.

II.2.2 Anclajes

La estabilización de estructuras por medio de anclajes o tirantes es una técnica relativamente reciente que ha ido ganando importancia a medida que su aplicación ha resultado efectiva, especialmente en sustitución de ademes en túneles angostos o cuando se requiere dar soporte sólo a algunos bloques aislados; así mismo, en la estabilización de taludes, muros de retención y superficies potenciales de falla (Figs. II.2a y II.2b). (10,11,12)

Entre sus ventajas destacan:

- Pueden aplicarse tanto en roca como en suelos
- La resistencia obtenida, en suelos, se encuentra en un rango entre 30 y 50 t_f (entre 295 y 490 kN)⁴; en roca varía entre 15 y 1 500 t_f (entre 147 y 14 700 kN). En ambos casos son básicamente las condiciones naturales las que determinan la resistencia.
- Se les puede dar la inclinación necesaria para que queden en

⁴NOTA: A lo largo de este trabajo se han usado las unidades más comunes en la práctica; los valores que aparecen entre paréntesis corresponden a sus equivalentes en Sistema Internacional.

la dirección de los esfuerzos principales.

- Cuando son presforzados, evitan desplazamientos.

Un tirante está constituido por tres partes principales (Fig II.3 y II.4):

- Parte pasiva.- Es la zona de anclaje al terreno. La forma un cilindro a través del cual los cables o barras transmiten los esfuerzos al terreno de empotramiento, ya sea directamente, mediante un mortero, o indirectamente, empleando una funda metálica.

- Parte libre.- En esta zona el cable debe quedar libre, de modo que transmita la misma tensión de un extremo al otro del tirante sin fricción (anclajes de tensión).

Cuando la calidad de la roca es baja, es necesario que las anclas tengan contacto con la roca a todo lo largo del barrenado en que se instalan. Por tanto, el barrenado se rellena con mortero de cemento, o con una lechada, o bien empleando resinas. Estos anclajes se conocen como anclajes de fricción.

- Parte activa.- Es la cabeza del tirante. En esta sección se tensan los cables o barras (apoyándose en la superficie exterior) con ayuda de gatos hidráulicos, hasta obtener la tensión y el alargamiento suficientes. Entonces se sustituye el gato por un dispositivo que inmovilice el sistema.

Los tirantes pueden ser presforzados o no: Cuando se requiere evitar desplazamientos, es conveniente el presfuerzo.

Según la posición en que se colocan, los anclajes son verticales,

horizontales o inclinados.

II.2.3 Concreto lanzado

El concreto lanzado consiste básicamente en una mezcla de cemento y agregados pétreos que se proyecta con ayuda de aire comprimido (13).

El concreto lanzado puede ser de dos tipos, de acuerdo con el momento en que se incluye el agua en un proceso que consta de tres etapas: mezclado, transporte y proyección.

Cuando se mezclan cemento y agregados, se les transporta por una tubería y finalmente se añade el agua en el momento de la proyección, se trata de un concreto lanzado por vía seca. En cambio, si el agua se incluye cuando se hace la mezcla cemento- agregados, es un concreto lanzado por vía húmeda. [Fig. II.5]

Concreto lanzado por vía seca. - Permite obtener un material de elevada resistencia que se adhiere excelentemente al soporte. Dadas las condiciones de transporte (en seco) los agregados usados pueden ser de mayores dimensiones y la cantidad de cemento puede reducirse. Por su parte, la cantidad necesaria de agua puede limitarse al mínimo, logrando una baja relación agua-cemento.

La velocidad con que los agregados son lanzados propicia una compactación energética de la capa proyectada, mejorándose así la resistencia, al tiempo que se disminuye el material desperdiciado por rebote [Fig. II.6].

Uno de sus inconvenientes es que se requiere protegerlo de las

condiciones del medio ambiente.

Concreto lanzado por vía húmeda. - Mientras el concreto lanzado por vía seca puede presentar problemas por falta de mezclado o por mezclado irregular, en el concreto lanzado por vía húmeda ese riesgo se reduce pues durante la etapa de transportación se logra una mezcla uniforme. Sin embargo, se requiere usar dosis de agua y cemento más elevadas para que el concreto tenga suficiente plasticidad y sea transportable. Generalmente se añade algún fluidificante.

Este concreto no requiere de protección ambiental. La velocidad de proyección produce una compactación más débil que en el otro método, pero la profundidad de penetración en juntas y fisuras es mayor.

El campo en que tiene mayor aplicación esta técnica es el de la estabilización de túneles (Fig. II.7). En el área de reparaciones, se emplea en mamposterías, generalmente asociado a algún otro método (Fig. II.8); anclajes, inyección, etc.

II.3 Casos particulares de reparación

Para ilustrar la aplicación de los métodos anteriormente descritos, a continuación se presentan algunos casos:

II.3.1 Túneles

Durante la última etapa de construcción del Túnel Diamond Hill,

perteneciente al Sistema de Transporte Masivo de Hong Kong, se descubrieron extensos agrietamientos en la parte superior y en los paneles laterales, cuyas aberturas variaban entre 0.1 y 3 mm. La causa era que el elevado nivel freático de la zona estaba provocando una presión de agua de gran intensidad e importantes cantidades de agua se estaban filtrando por dichas grietas, amenazando con provocar corrosión en el acero de refuerzo del túnel. El problema logró resolverse al aplicar resinas epóxicas especiales para superficies húmedas (14).

La línea ferroviaria que une Castellamare di Stabia con Sorrento, en Italia, fue construida poco después de la Segunda Guerra Mundial. Consecuentemente, cuando se realizó una inspección en 1969 se encontraron tramos que requerían reparación, especialmente en un túnel que forma parte de la línea. Los desperfectos se debían esencialmente a presión del terreno sobre el revestimiento de concreto y a resistencia mecánica insuficiente, que y se traducían en desprendimientos tanto de recubrimiento como de fragmentos de roca. Los trabajos sólo podían realizarse durante las 5 horas de interrupción nocturna del servicio, pues siendo un túnel de vía única era imposible cerrarlo completamente al tránsito. La reparación consistió en igualar el revestimiento existente, aplicando una capa de mortero pulverizado; se aplicó después una capa de resina epóxica reforzada con laminado de vidrio (mat); finalmente, se fijó el laminado a la roca mediante tirantes de anclaje (Fig. 11.9).

El trabajo requirió cerca de 130 noches de trabajo a lo largo de

casi 3 Km, equivalentes a una superficie total de 40 000 m² (300 m² por noche durante 8 meses). (19)

La construcción de un túnel ferroviario entre Nocera y Salerno (Italia) de 10.2 km de longitud debía realizarse en un terreno con abundantes grietas y fisuras (producto de las condiciones geológicas de la región), por las cuales fluían cantidades importantes de agua (en algunos puntos se registraron gastos de 0.325 m³/s). La solución consistió en emplear secciones de concreto prefabricado sujetas con anclas de acero, para formar un arco de soporte. Los espacios vacíos entre el terreno y el arco se rellenaron con arena colocada a presión de aire. A continuación se aplicó una capa de resinas para sellar y finalmente un segundo arco de concreto reforzado (Fig. II.10). (20)

La estación subterránea de Hongrin, en Suiza, se encuentra en una caverna de aproximadamente 105 m de longitud, con un ancho de 30 m y una altura máxima de 27 m. La caverna, de calizas y calizas esquistosas dispuestas en estratos horizontales, presenta ondulaciones y varios grupos de fracturas verticales, así como cantidades importantes de arcilla. Los problemas en una excavación tan larga estaban relacionados básicamente con el comportamiento de la roca. Además, el periodo destinado a las obras de excavación dentro del programa general de obra era muy corto. Por tanto, se decidió emplear anclas presforzadas que estabilizaran la excavación. (Fig. II.11) Este método crea, gracias al presforzado, un arco activo en la roca que lo hace actuar como soporte estructural propio y se adapta a las deformaciones sufridas por la roca en tanto se estabiliza. Se

distribuyeron 650 anclas de acero de alta resistencia entre bóveda y paredes laterales. A continuación se aplicó una capa de concreto lanzado de 15 cm de espesor, reforzado con malla de alambre. De este modo se logró estabilizar el túnel prescindiendo de andamios y ademes, y reduciendo tiempo y costos (17).

La aplicación de concreto lanzado reforzado es una práctica cada vez más frecuente en la estabilización de túneles, en particular en los países nórdicos, donde se aprovecha para controlar temporalmente la roca "explosiva" y los materiales expansivos (especialmente arcillas), y para evitar daños por desprendimientos de bloques (Figs. II.12 y II.13). (18).

En México, en el Emisor Central del Drenaje Profundo (lumberras 20 y 21) se utilizaron anclajes para tramos en los que se presentaron desprendimientos a pesar de que se habían empleado arcos de acero como soportes. Dichos desprendimientos generaron una cavidad en la roca que, por ser suave y con altos contenidos de agua, significaba un gran riesgo. El anclado estabilizó totalmente la cavidad (19).

II.3.2 Presas

En diciembre de 1967 se registró en la India un temblor de 7.5 grados de intensidad en la escala de Richter. El epicentro se localizó a 3 km de la presa Koyna. El área de influencia del movimiento cubrió

un área de 800 km a la redonda.

La cortina logró resistir gracias a que el concreto ciclópeo empleado en su construcción era de excelente calidad. Sin embargo, resultó seriamente dañada, presentando agrietamientos importantes, muchos de los cuales atravesaban la presa transversalmente. Aguas arriba, la extensión de las grietas sumaba 100 m; aguas abajo, casi 150 m. La solución empleada para repararla fue la aplicación de resinas epóxicas que se inyectaron en todas las fisuras (20).

En Argelia la presa de Erraguene, generadora de 160 millones de kWhora al año, comenzó a mostrar agrietamientos en los primeros años de funcionamiento. Se trata de una presa de arco con contrafuertes, de 86 m de altura y con una capacidad de 200 millones de metros cúbicos. Para su construcción se emplearon 280 000 m³ de concreto. Los agrietamientos no comprometían la estabilidad de la estructura pero las filtraciones generadas amenazaban con afectar a largo plazo tanto la calidad del concreto como la del acero de refuerzo y los cables presforzados de los arcos. Las acciones de reparación llevadas a cabo incluyeron la aplicación de un mortero epóxico en la parte baja de la cortina, que detuviera las filtraciones, y la inyección de resinas epóxicas en la parte superior de la cortina, donde estaban localizadas las grietas más activas. Se inyectaron cerca de 1 500 m de grietas aguas arriba y 2 000 m aguas abajo (21).

Por otra parte, para la presa de Cheurfas, en Argelia, se utilizaron tirantes verticales presforzados (Fig. II.14) que atravesaban la cortina de mampostería y quedaban anclados a la roca

subyacente. Del mismo modo, se emplearon tirantes presforzados verticales en las presas de Allement y de Argetant para mantener estables las ataguías y proteger las excavaciones durante la construcción de la cortina.

En la presa Saint Michel de Braspars, el uso de anclajes inclinados hizo posible corregir la dirección de la resultante general en los contrafuertes (Fig. II.15). (21).

II.3.3 Almacenamientos

El abastecimiento de agua a la zona norte de la República Africana de Togo se logra a través del Proyecto Hidráulico Lama-Kura. La toma de agua es una torre cilíndrica de 20 m de altura que está situada en la parte más baja del almacenamiento. Tiene 3 válvulas de entrada, a 3 distintas alturas (según el nivel de agua se acciona alguna). Estas válvulas, comunicadas con el resto de la instalación, se sellaron durante la construcción con una mezcla de concreto. Sin embargo, con la obra ya en funcionamiento, pudo observarse que una cierta cantidad de agua circulaba a través de las juntas frías formadas alrededor de la entrada de la torre, provocando pérdidas. Con la presión del agua exterior se generaron más agrietamientos y daños. Gracias al uso de resinas epóxicas la reparación pudo efectuarse en 5 días sin que fuera necesario vaciar el almacenamiento. Por sus características, la resina desplazó al agua que se hallaba en las grietas, dió nuevamente unidad al concreto y selló completamente la zona alrededor de la toma de agua. (22)

En Nueva Zelanda, en las cercanías del poblado de Mataura, el nivel del río subió durante una avenida, elevándose cerca de 4 m sobre el normal y provocando una gran inundación. El oleaje que se originó llegó a generar ondas de 1.3 m de altura. Al llegar al poblado, las olas se estrellaron contra un tanque de almacenamiento de 1 300 m³. Desgraciadamente, en esos momentos estaba casi vacío y con el impacto el muro lateral sufrió desplazamientos de cerca de 33 cm, originando más de 800 m de grietas con espesores de hasta 1.6 cm. Con el tratamiento de resinas aplicado se logró restablecer el uso normal del tanque en 2 semanas y se evitó la demolición y reconstrucción de la estructura, con el consecuente ahorro de tiempo y costos (24).

II.3.4 Puentes

El puente Evripos, en Grecia, comunica la parte continental del país con la isla de Evia. La estructura tiene una viga de arco que es levadiza. En 1979 un barco de grandes dimensiones chocó contra esta viga, provocando agrietamientos serios tanto en la intersección de las vigas guía del sistema como en las paredes del túnel que se forma. En total se descubrieron casi 12 000 m de fisuras. Aunque fue necesario cerrar el puente a la navegación se pensó que reemplazar las partes dañadas implicaba altos costos y pérdidas por el tiempo excesivo de interrupción del servicio. Con resinas epóxicas la reparación se llevó a cabo en 28 días (25).

El puente Kochertal es el más alto de Alemania Occidental: se eleva 150 m sobre el valle del Río Kocher. Su longitud es de 130 m y su ancho de 30 m. Es un puente de concreto, colado in-situ, construido con un sistema de cimbra deslizante. Durante una inspección (junio 1970) se descubrieron aproximadamente 900 m de grietas, en especial entre los segmentos de la viga. Para agosto de 1970, el puente pudo ser reabierto a la circulación, después de haber sido inyectado con resinas (26).

II.3.5 Carreteras

Las pistas de aterrizaje y despegue de los aeropuertos se deterioran con frecuencia pues el uso que se les da es continuo y las sollicitaciones a que son sometidas son de gran magnitud. Su reparación es muy costosa; además, provoca suspensión del servicio y retrasos en las actividades de un aeropuerto. Traducidas a términos económicos, las pérdidas son importantes. En el aeropuerto de San Francisco, Estados Unidos, se presentaba este cuadro y era necesario reparar la pista lo más rápido posible. Se decidió emplear resinas inyectadas que devolvieran al concreto su continuidad y evitaran nuevos agrietamientos. El objetivo se logró en 4 días, laborando únicamente cuando la pista quedaba desocupada. Se espera que transcurra un periodo largo de tiempo antes de que requiera un nuevo tratamiento de importancia (27).

Por otra parte, en la estabilización de suelos las resinas han

constituido también una alternativa de solución: En la construcción de la estación Auber, para la línea 6 del metro de París. Se trataba de una estación importante pues serviría de enlace entre varias líneas. El túnel correspondiente debía tener 230 m de longitud, 30 m de ancho y 10 m de altura. Además debía quedar ubicado bajo la red principal de alcantarillado de la ciudad, y en la superficie había estructuras importantes, como la Ópera, que no debían sufrir ninguna alteración por la nueva obra. El terreno estaba constituido principalmente por arenas finas, con una permeabilidad de 10^{-6} cm/s, de modo que no era posible inyectar productos tradicionales sin el riesgo de producir abultamientos, vibraciones y otras alteraciones.

Una vez tratado con resinas epóxicas, el terreno alcanzó una resistencia mínima de 20 kg/cm^2 (1 960 kPa), suficiente para permitir una excavación completamente segura y sin desórdenes notables en la superficie. (20)

II.3.6 Edificios y otras estructuras

Los edificios son estructuras que generalmente se construyen con concreto, por lo que en su reparación la técnica más extendida es la inyección de resinas. Estas reparaciones son particularmente necesarias en zonas sísmicas, como Filipinas, Japón, Guatemala, México, etc. En ocasiones se emplea también concreto lanzado, especialmente en las mamposterías.

Con respecto a otras estructuras que han requerido reparaciones, puede mencionarse el monumento a Jefferson Davies, en Kansas, Estados Unidos. Construido en 1925, es un obelisco de concreto de aproximadamente 105 m, lo que lo convierte en el cuarto monumento por su altura en Estados Unidos. Tanto los agentes del clima (congelamiento, en especial) como el tiempo provocaron que se generaran grietas de hasta 13 mm de abertura y más de 1.8 m de longitud. Fue necesario inyectar más de 1 000 m de grietas para devolver al concreto su continuidad y dar al monumento un mejor aspecto (20).

El estadio Palais des Sports Arena, en Tesalonia, Grecia, se construyó en 1963. Tiene un diámetro de 90 m y el techo lo forma un domo soportado por vigas preforzadas. En 1978, a causa de un temblor moderado, se generaron cerca de 200 m de agrietamientos, tanto en el techo como en las vigas de soporte. La reparación se realizó en 2 semanas, empleando resinas epóxicas para restablecer la integridad del conjunto (20).

II.3.7 Monumentos históricos

Se considera que son monumentos históricos aquellas estructuras que, habiéndose edificado en una época anterior, tienen características arquitectónicas y estéticas o importancia histórica

tales que forman parte del patrimonio cultural de un país. (2)

Expuestos a diversas condiciones a través de su existencia (factores climáticos, descuido, abandono, destrucción parcial, cambio de las condiciones circundantes, etc.), los monumentos generalmente requieren algún tratamiento de protección, restauración, reconstrucción o estabilización.

La reparación de monumentos es uno de los aspectos más delicados debido entre otras razones a que los conceptos de rigidez actuales son distintos a los que pudieron haber tenido los diseñadores y constructores originales. Introducir nuevos materiales implica tomar muy en cuenta la capacidad que tiene la estructura para interactuar con ellos.

Así pues, cualquier estructura sometida a una reparación debe tomar en cuenta dos puntos centrales:

- Si la apariencia original debe conservarse, es preferible el empleo de inyecciones, placas, varillas y elementos disimulables.
- Si es necesario introducir nuevos elementos de carga, es fundamental buscar la compatibilidad de comportamiento con los originales (3).

En 1976 un terremoto sacudió Guatemala, dejando múltiples daños en la generalidad de las estructuras, pero particularmente en los edificios coloniales. La iglesia de Santo Domingo, construida hace casi 200 años, fue una de las estructuras severamente dañadas. Sus 64 arcos y 58 domos mostraban agrietamientos de gran variedad de aberturas que alcanzaban los 25 mm. Para resanar las grietas más

abiertas se empleó pasta epóxica adhesiva, inyectada; para las demás se usaron adhesivos estructurales de baja viscosidad. Con este tratamiento se logró devolver a la estructura su estabilidad ras.

El acueducto de Segovia, en España, fue construido por los romanos alrededor del año 60 D.C. Su finalidad era abastecer de agua a la ciudad. Es una estructura de 28 m de altura en su punto máximo y se forma con 2 hileras de arcos. Tiene una longitud total de 812 m, que incluye alrededor de 170 arcos. Como otras estructuras romanas, se construyó con piedras cuidadosamente cortadas y sin usar mortero, aunque el canal superior fue impermeabilizado.

Con el paso del tiempo el acueducto comenzó a mostrar problemas y daños que amenazaban su estabilidad. Su reparación se trabajó principalmente con resinas epóxicas. Durante una primera etapa se retiró la tubería que se le había instalado a principios de siglo y se limpiaron tanto el acueducto como sus estructuras adyacentes. A continuación se consolidaron los apoyos de los arcos inferiores inyectando mortero de cemento; se repararon y consolidaron los bloques rotos o defectuosos, y una columna que estaba en pésimas condiciones. Después se hizo una limpieza especial al canal abierto que corre a lo largo del acueducto, procurando que todas sus partes quedaran bien aseguradas. Como se advirtiera que las juntas entre los bloques de piedra que formaban el canal no eran impermeables se aplicó una resina que sellara. Debido al clima extremoso de Segovia (temperaturas medias de -10°C en invierno y 30°C en verano) se empleó una fórmula que resistiera los cambios de temperatura, que impidiera además el paso

del agua y que resistiera la presión que llega a ejercer el hielo. Se trataron cerca de 1 000 juntas, aplicando la resina con brocha para asegurar que los bloques quedaran empapados de ella. Las aberturas que se encontraron fueron rellenas con mortero. Una vez tratadas las juntas se aplicó, en el último centímetro, un mortero de cemento, para ocultar el material sintético.

Por otra parte, se emplearon resinas para unir bloques de piedra rotos en partes a consecuencia de asentamientos, erosión y otras alteraciones de tipo mecánico. Casi todas las claves y apoyos de los arcos superiores estaban en estas condiciones. A la mezcla inyectada se le dió un color rojo a fin de distinguir el camino que iba recorriendo.

Finalmente se inyectó mortero en las 44 columnas principales del acueducto, protegiendo previamente con estopa los espacios entre bloques para evitar que la mezcla saliera a la superficie. De este modo se logró mantener el aspecto típico del monumento: piedra sobre piedra, sin mortero. (84)

La construcción de la Presa del Alto Aswan, en Egipto, constituyó una obra esencial para la agricultura de ese país. Implicó, por otra parte, la inundación de una gran extensión territorial dentro de la cual se encontraban cerca de 20 templos y tumbas antiguas, y entre ellas, Abu Simbel. Este templo faraónico se caracteriza por sus pinturas al fresco, por sus bajorrelieves y por sus 4 monumentales esculturas de Ramsés II. Construidas alrededor del siglo XIII A.C., las estatuas fueron talladas directamente sobre la roca de la montaña

formando 2 templos-caverna: uno dedicado a Ramses II y el otro a Nefertiti.

La operación general de salvamento arqueológico, patrocinada por la UNESCO, decidió que la única opción era desplazar los 20 templos y reubicarlos a lo largo de los 500 km que recorre el Rio Nilo. En el caso particular de Abu Simbel, la labor se complicaba por tratarse de cavernas de dimensiones considerables. (El gran templo, por ejemplo, tiene 75 000 m³ interiores).

El proyecto consistió en desensamblar todo el monumento en bloques cuyo peso variaba entre 15 y 30 t_f (entre 147 y 205 MN), trasladarlos usando una grúa y re-ensamblarlos en una planicie 180 m más atrás del sitio original y 64 m más arriba.

Las operaciones efectuadas consistieron en:

- Construir una ataguía que protegiera al templo de las avenidas del Nilo durante los trabajos.

- Sostener el techo del templo durante el periodo de trabajos, con ayuda de vigas soportadas por gatos planos fijos.

- Recortar y enrasar la montaña arriba del templo hasta que quedara a 80 cm sobre el techo actual, lo que significó retirar aproximadamente 300 000 t_f (2 950 MN) de material de escombros.

- Cortar las estatuas frontales y las paredes del templo, desplazar los bloques y reconstruirlos en el nuevo sitio. Entre ambos templos el total transportado fue de 15 000 t_f (147 MN): 11 500 t_f (113 MN) por el de Ramsés II y 3 500 t_f (35 MN) por el de Nefertiti.

Aunque teóricamente las operaciones no implicaban mayores dificultades, considerando que los templos estaban originalmente

construidos sobre roca dura (granito), la realidad mostró que el material rocoso era extremadamente poroso y estaba muy fisurado. En estas condiciones, las operaciones de corte y transportación resultaban muy riesgosas: si el corte para separar el bloque se llegaba a realizar sobre algún plano de fisuración, la pieza se rompería; por otra parte, si la tensión de los cables de transportación era excesiva para la resistencia de la pieza, se dañaría. Inicialmente se pensó en aplicar una mezcla de cemento, pero la alternativa se desechó porque la mezcla difícilmente penetraría en las fisuras y en el material a baja presión y porque, al contener agua, se corría el riesgo de que el material de roca se disgregara. Para solucionar el problema se recurrió a la unión e inyección con resinas. Las fisuras principales se sellaron previamente y la roca se inyectó antes de sujetar los bloques con los cables. Además de ello, en el empotramiento de los cables al suelo también se aplicaron resinas (Fig. II.18) (3).

Del resto de los templos que se movilizaron durante la construcción de la Presa del Alto Aswan, uno que recibió especial atención fue el Templo de Amada. Por su decoración interior era imposible seccionarlo y re-ensamblarlo, de modo que la solución adoptada fue desplazarlo íntegramente.

El recorrido al nuevo sitio era de 2 800 m en distancia horizontal, elevándolo casi 65 m sobre el nivel del sitio original. El peso del templo era de 800 t, (7 850 kN)

El procedimiento de desplazamiento de una estructura consiste

generalmente en mover la construcción rígida sobre un sistema convencional de vías férreas (flexibles y compresibles). Las cargas se transmiten de la estructura a los gatos hidráulicos y a la plataforma ferroviaria por medio de una especie de malla muy rígida, formada por una viga de concreto o perfiles metálicos. En el caso del templo de Amada, se colocaron gatos hidráulicos como soportes de la construcción, que al mismo tiempo funcionaban como suspensión, compensando automáticamente cualquier movimiento tendiente a provocar desnivelaciones. Para la transmisión de cargas se empleo una viga de concreto presforzado colocada bajo los muros y en el exterior del templo.

Las piezas que forman el templo tuvieron que ser tratadas previamente con un mortero que se inyectó en las juntas, pues originalmente no las unía ningún material, y era necesario evitar todo posible movimiento relativo entre piezas. A continuación se colocaron presfuerzos en las 3 direcciones. Además se rodeó al templo con dos cadenas, una en la parte superior y otra en la inferior de los muros, para darles confinamiento y cohesión durante el traslado, que duró dos meses y medio (1960).

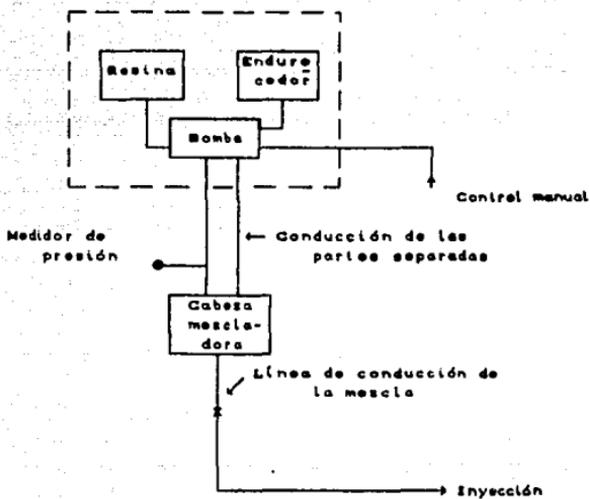
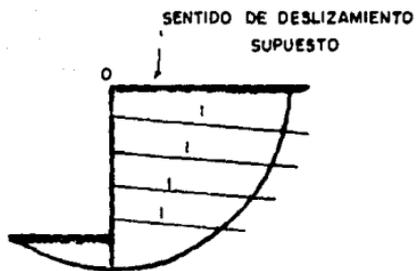


Fig. II.1 Inyección de resinas. Equipo para mezclado continuo



(A)



(B)

Fig. II.8a y 8b Estabilización de taludes con anclajes,
para 2 sentidos de deslizamiento distintos

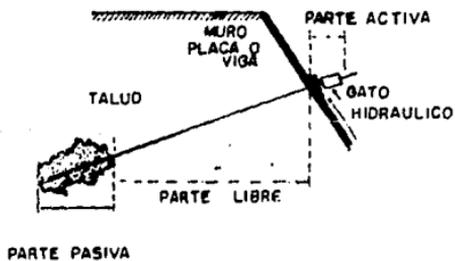


Fig. II.9 Partes principales de un tirante

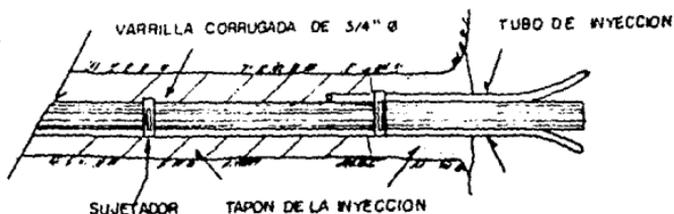
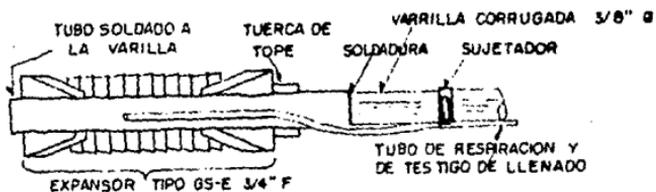
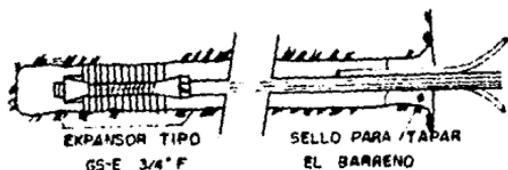
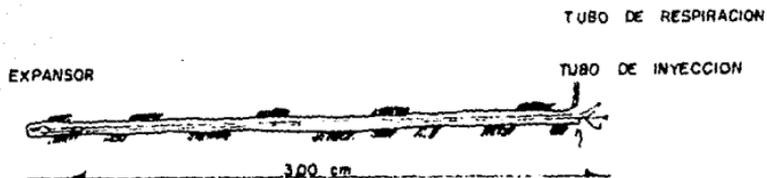
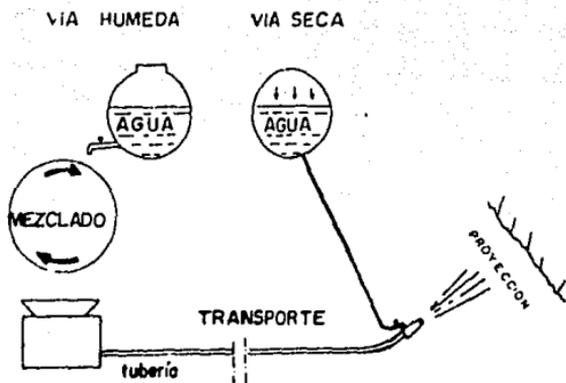


Fig. 11.4 Ancla de fricción tipo GS-E 3/4" F



INTRODUCCION DEL AGUA EN EL CONCRETO LANZADO:

POR VIA HUMEDA POR VIA SECA

Fig. 11.5 Preparación de concreto lanzado

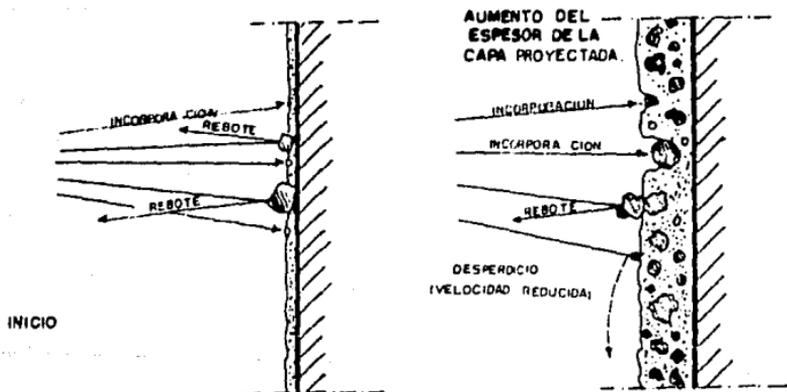
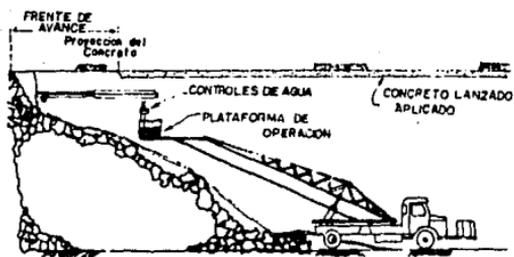


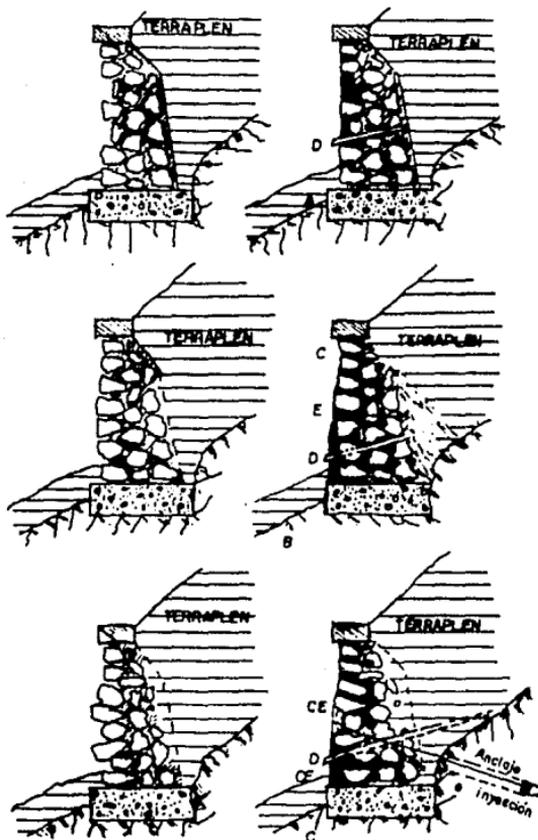
FIG. 11.6 PROCESO DE COLOCACION DEL CONCRETO LANZADO

POR VIA SECA.



ESTABILIZACION DE TUNELES
APLICANDO CONCRETO LANZADO.

Fig. II. 7 Concreto lanzado

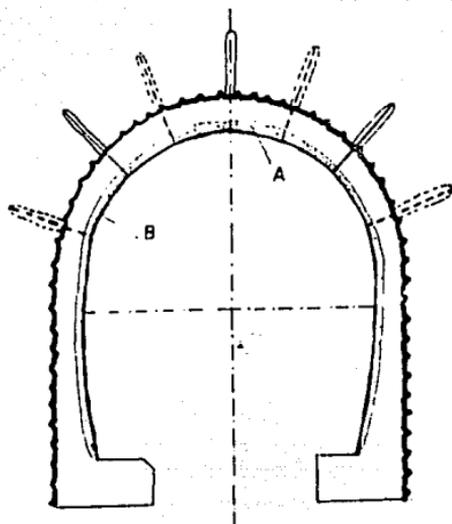


REPARACION DE MAMPOSTERIAS
CON TECNICAS DIVERSAS:

- A) CONCRETO LANZADO
- B) CONCRETO LANZADO, GRAPAS
E INYECCION.
- C) CONCRETO LANZADO, ANCLAJE
E INYECCION

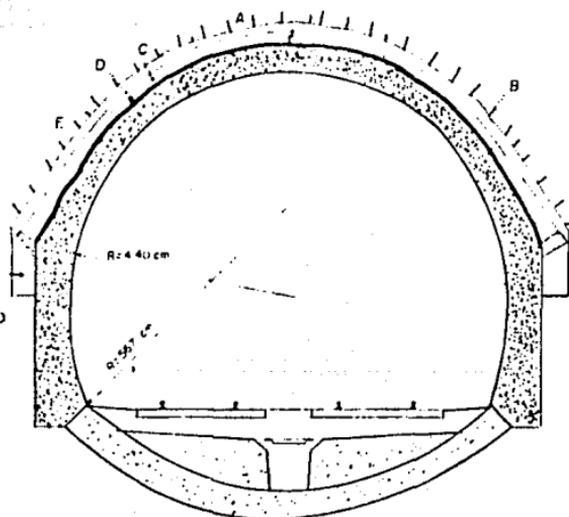
Fig. II. 8 Concreto lanzado

Fig. II.9 y II.10 Reparación de túneles ferroviarios



LÍNEA FERROVIARIA CASTELLA MARE
DI-STABIA-SORRENTO DISTRIBUCION
DE TIRANTES DE ANCLAJE
A) CAPA DE MORTERO
B) REVESTIMIENTO: RESINA EPOXICA
Y LAMINADO DE VIDRIO.

SECCION TRANSVERSAL
TUNEL FERROVIARIO NOCERA-
SALERNO, ITALIA
A) ROCA
B) RELLENO DE ARENA
C) ARCO PRIMARIO FORMADO
POR SECCIONES DE CONCRETO
PRE-FABRICADO
D) CAPA SELLADORA A BASE DE
RESINAS
E) ARCO SECUNDARIO DE
CONCRETO REFORZADO



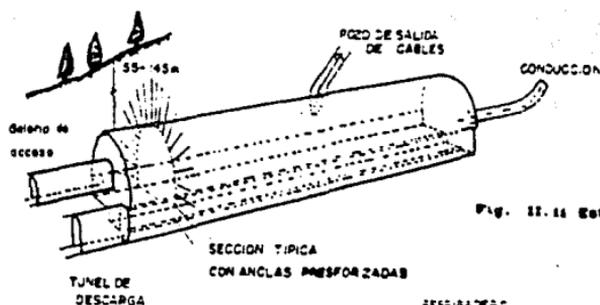


Fig. II.15 Estación subterránea Montgrit

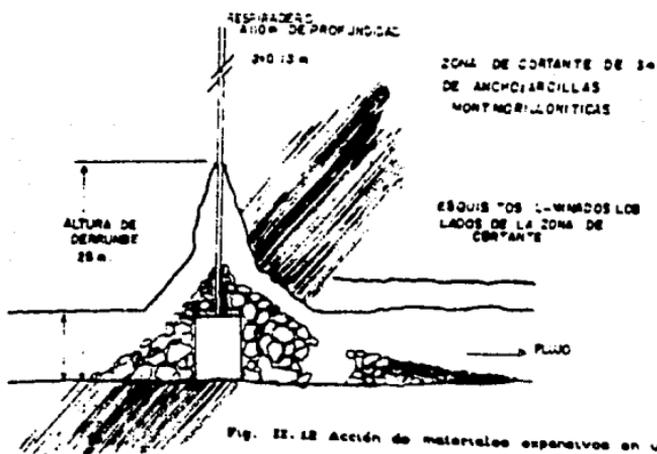


Fig. II.16 Acción de materiales expansivos en un túnel

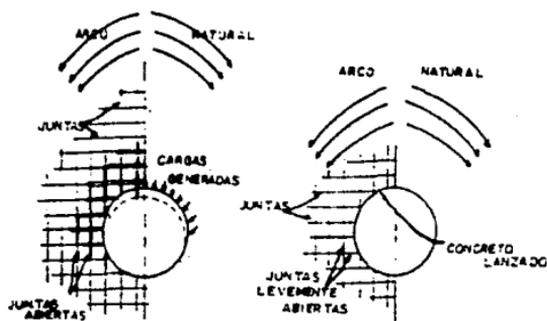


Fig. II.17 Estabilización de un túnel en roca con concreto lanzado

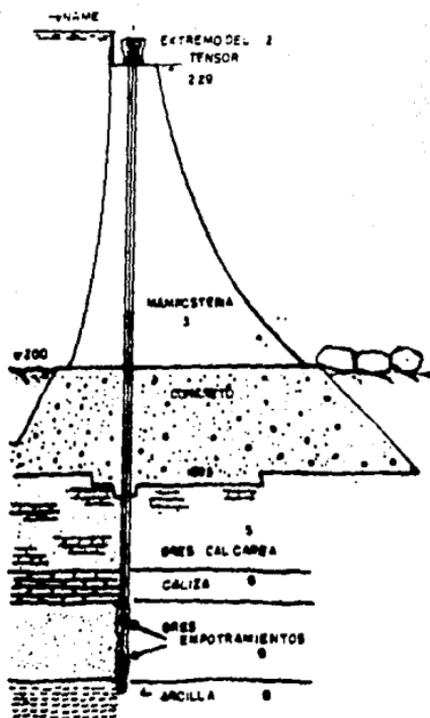
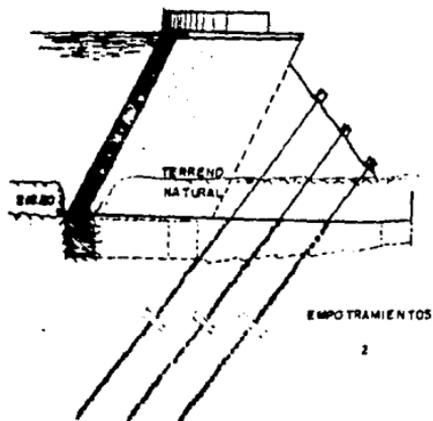


Fig. II.16 Proca Cheurfae, Argelia

Fig. II.18 Proca Saint Michel de Broasars



EMBOTRIAMIENTOS

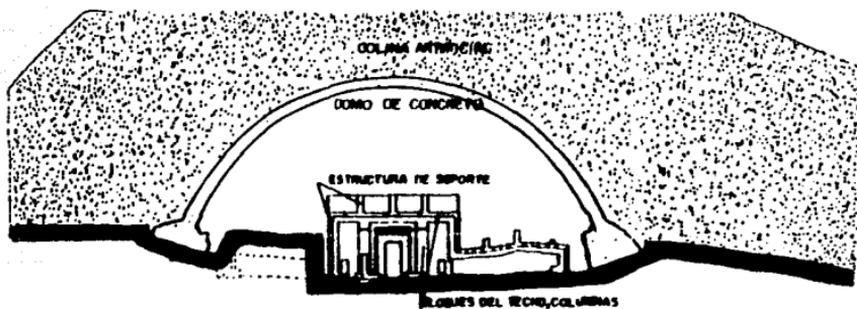
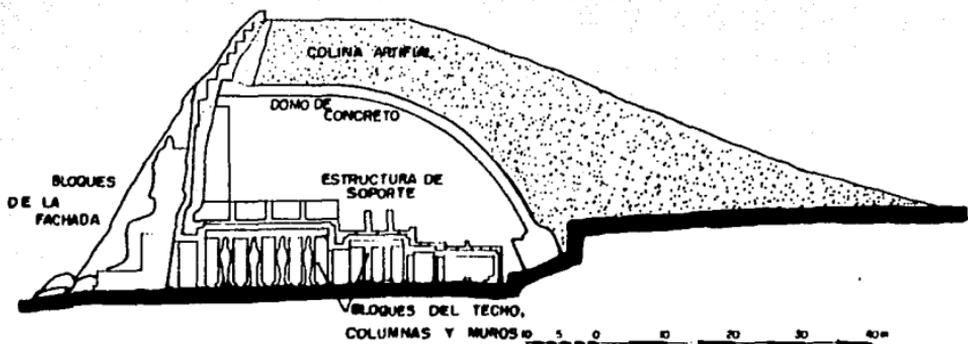


Fig. 11.16 Trabajos realizados en Abu Simbel

III ANALISIS DE DAÑOS

*"... Varios siglos de presencia
extranjera ...no han podido ahogar
la nobleza nativa y altiva de los
mayas..."*

Henry Stierlin.

III.1 Descripción de la Pirámide del Adivino.

La Pirámide del Adivino se localiza al este de la antigua ciudad de Uxmal. Su altura, poco común en una región donde predominan las construcciones de un solo nivel, así como su imponente aspecto, y la evolución que presenta, la convierten en un monumento de gran importancia. (S.S., 4, 9)

Es una estructura de base rectangular con esquinas redondeadas, por lo que parece elíptica (Fig. III.1). En ella se distinguen dos cuerpos superpuestos y una plataforma. El primer cuerpo tiene una altura aproximada de 18 m; el segundo mide casi 6 m de altura; la plataforma y el templo que hay sobre ella sobrepasan los 2 m de altura. En consecuencia, la altura total del monumento es de 27 m (Fig. III.2a).

Según explica el arqueólogo Alberto Ruz L'huillier, apoyándose en sus exploraciones (1951), la pirámide es el resultado de la superposición de 5 edificios construidos en diferentes épocas:

Templo Interior Poniente (Templo I). - Considerado como el templo más antiguo (569 ± 50 D.C., según estudios de radiocarbono), es un edificio de proporciones alargadas constituido por una doble cruzía paralela con 5 cuartos cada una y uno más en cada extremo, perpendicular a los otros (Fig. III.2b). Posteriormente se superpondrían a esta construcción otras más altas.

El templo se caracteriza por tener muros que alternan secciones lisas con secciones formadas por grupos de 3 columnillas paralelas. Estas columnillas no son monolíticas sino que están formadas por varios cilindros empotrados en el muro de la fachada.

Actualmente pueden verse restos de las cámaras 1 y 2, las cámaras 4 y 5, aún rellenas con material tipo mampostería (Fig. III.3a), y la cámara central, situada bajo la escalera poniente y de la cual fue retirado el material que la rellena. También se pueden ver restos de la cámara perpendicular norte (Fig. III.3b).

Templo Interior Oriente (Templo II). - Se considera que en una segunda época los mayas decidieron rellena el templo I y superponerle uno nuevo, cuya entrada diera al oriente (Fig. III.2a). Este templo, de proporciones reducidas, se caracteriza por haberse desplantado sobre una plataforma a la que se accedía por una escalinata que en la actualidad no es visible, pues toda la estructura fue cubierta en una época posterior. Para entrar a él es necesario penetrar unos metros en la pirámide por el lado oriente. Lo que puede verse de la fachada es un pórtico de 2 columnas monolíticas y sobre ellas una viga, actualmente de concreto (Fig. III.4a). El templo tuvo, además, una

crestería apoyada sobre su muro posterior.⁴

Templo Interior Poniente (Templo III). - Se piensa que este templo, que se encuentra en la parte posterior del Templo II, tuvo su acceso en el lado poniente, mediante una escalera que actualmente debe estar cubierta por las estructuras superpuestas sobre él. (Fig. III.2a)

Templo Superior Chenes (Templo IV). - Este templo tiene su entrada en el lado poniente (Fig. III.2a). Es de una sola crujía, muy alta, y se destaca por la decoración de su fachada (Fig. III.3a). La escalinata poniente que permite el acceso a él fue construida con una pronunciada pendiente; un pasillo la atraviesa en la base y es el que permite tener acceso a la cámara central del Templo I. El pasillo es de forma abovedada, mostrando el uso de la tradicional bóveda maya.

Templo Superior (Templo V). - En la última etapa se añadió un nuevo cuerpo a la pirámide, que ocultó los Templos II y III, pero dejó visible en cambio el Templo IV (Fig. III.2a). Sobre este cuerpo se edificó un templo con 3 cuartos: uno central, al que se entraba por el lado poniente mediante dos escalinatas angostas que ascendían a los lados del Templo IV; dos laterales, para los cuales se construyó la gran escalera del lado oriente.

III.2 Generalidades de la técnica constructiva maya

La choza maya es el punto de partida de las edificaciones importantes de la región. Los mayas pretendieron mantener las mismas

⁴La crestería es un elemento decorativo de la arquitectura maya que consiste en un muro de piedra o mampostería en que se alternan secciones macizas con vanos rectangulares.

características, cambiando sólo el tipo de materiales por otros más duraderos que aseguraran su permanencia a largo plazo.⁶

Comparativamente, las construcciones tienen como rasgos característicos los siguientes:

- La choza está fincada sobre un basamento provisto de un pequeño escalón de acceso cuya finalidad es proteger a las habitaciones de inundaciones. En los edificios prehispánicos mayas, este basamento se convirtió en una plataforma que requería por lo menos 3 escalones para su acceso, y, con el paso del tiempo, en un basamento elevado, de forma piramidal, revestido con estuco², de mayor altura a medida que se logró el dominio de la estabilidad.

- La vivienda, que se construye sobre el mencionado basamento, es de base rectangular o cuadrada, con las esquinas redondeadas, y sus dimensiones más comunes son de 5 m por 3 m. Tiene únicamente una puerta, sobre el lado largo. En la construcción de recintos importantes estas características se reprodujeron de la misma manera.

- Para las viviendas, los "muros" se forman con un armazón de ramas entrelazadas sostenido por estacas verticales y recubierto de tierra apisonada blanqueada con cal. Construir para un largo tiempo de permanencia implicó el uso de materiales resistentes a las lluvias, a los efectos de los ciclones, al calor y las altas temperaturas y al paso del tiempo: El armazón de ramas fue sustituido por muros de mampostería. La técnica consistía en formar 2 muros con bloques de

²El estuco era una mezcla que se hacía con yeso o cal particularmente fina, amasada con agua, para obtener un revestimiento; al secar, adquiría una dureza similar a la de la roca. El estuco se altera con la humedad, razón por la que los monumentos han perdido este recubrimiento.

piedra (generalmente rectangulares) y vaciar entre ellos una mezcla de material aglutinante, a la cual se le llama en la región "sahcab" o "sascab".

El sahcab es en realidad un conglomerado de calizas que se usa en Yucatán en vez de arena, para preparar morteros. Es un polvo compacto cuya coloración varía entre blanco y rojizo, según su composición. Frecuentemente contiene fragmentos de roca de variados tamaños e inclusive cantos redondeados. Se le encuentra dentro de "bolsas" o cavidades que se han formado en la roca caliza. Se piensa que el sahcab es producto de procesos de intemperización o erosión de la roca y que fue transportado por corrientes subterráneas hasta las cavidades donde quedó depositado, razón por la cual se le encuentra en estado suelto y no sufrió procesos severos de consolidación m. Sin embargo, se da comúnmente el nombre de sahcab a la mezcla de este conglomerado con fragmentos de roca (y a veces cal). En este trabajo se ha adoptado este segundo concepto cuando se hace referencia al sahcab.

- En las casas no se usan las ventanas. En consecuencia, tampoco se introdujeron en los templos. Por ello, tanto unas como otros conservan cierta oscuridad y humedad, así es como los interiores se mantienen frescos, condición de particular importancia en una región donde se registran altas temperaturas.

- El techo en una casa-habitación se forma con troncos delgados y una viga de sostenimiento que corre en el sentido largo. Sobre este armazón se coloca una cubierta de hojas de palmera, formando un techo de 2 aguas.

La necesidad de imitar esta techumbre dió como resultado la

aparición de la conocida bóveda maya, de piedra y mampostería (Fig. III.5). Cabe mencionar que ésta no fue en realidad un descubrimiento tecnológico, sino "la petrificación de una forma preexistente" (6). Así pues, las estructuras mayas son sistemas en los que no se aprovechan los arcos y bóvedas como elementos estructurales y por ello no se logra el desarrollo de grandes claros cubiertos.

La Pirámide del Adivino se ciñe, en la construcción de sus diversas etapas, a estos patrones, de los cuales cabe resaltar dos:

- Los muros construidos como dos hileras de mampostería unidas entre sí con material aglutinante (sahcab). Ellos constituyen la parte estructural de cada templo; fueron concebidos únicamente como parte de construcciones de un solo nivel.

- Las bóvedas, que no se concibieron nunca con una función estructural.

III.3 Evolución

Los estudios realizados con radiocarbono han permitido establecer que el templo más antiguo (Templo I) data del año 569±50 D.C. Entre esta fecha y el año 900 D.C. (fin del Período Clásico mesamericano) se sitúan las diversas modificaciones que produjeron las 5 etapas conocidas de la pirámide. La ciudad de Uxmal continuó ocupada por mayas hasta una época muy cercana a la de la Conquista, lo que hace pensar que durante este tiempo recibió aún cierto mantenimiento.

En 1585, el fraile español Fray Antonio de Ciudad Real visitó la región. Se encontró con edificios en mal estado e inclusive algunos ya desplomados. Durante la época de la Colonia, el abandono de la zona fue total.

Durante el siglo XIX la arqueología mesoamericana, y en especial la maya, despertaron gran interés en Europa. Así, en 1841 los ingleses Stephens y Catherwood realizaron uno de los primeros recorridos serios a Uxmal, que en aquel momento pertenecía a una gran hacienda yucateca. Sus crónicas (escrita la de Stephens y gráfica la de Catherwood) mostraron una ciudad en completo abandono, con abundante vegetación cubriendo los edificios, numerosos dinteles de madera podridos, secciones completas desprendidas o desplomadas, etc.

En la segunda mitad del siglo pasado y principios del actual varias expediciones, en su mayoría extranjeras, visitaron la zona. Sus testimonios escritos manifiestan tanto de la monumentalidad del conjunto como su estado de abandono. Destacan la presencia de los arqueólogos Bancroft, Charnay, Holmes y Selser. (10)

El primer informe de las condiciones de la zona realizado bajo la responsabilidad del gobierno se efectuó en 1913 (11). Tanto en éste como en algunos posteriores se asentaba repetidamente el gran abandono de la pirámide, cubierta de vegetación, y se remarcaba la necesidad de colocar un cercado para impedir el paso de ganado por la zona, ya que hasta entonces circulaba libremente, llegando inclusive a treparse en la pirámide. Se mencionaba además el derrumbe de muros. Durante esta

época se conocía únicamente la existencia de los Templos Chenes y Superior (Templos IV y V). La escalera poniente era casi inaccesible por el estado de destrucción en que se hallaba (Fig. III.6). «2, 13, 14, 15, 16.

En 1928 se registró una intensa etapa de lluvias que ocasionó múltiples daños ("... bóvedas (que) presentan derrumbes y desplomes. Además, cuarteaduras que pasan de un lado a otro de los muros... grandes claros de la pirámide que han perdido su revestimiento de piedra"). La única acción emprendida fue el apuntalamiento de las estructuras que corrían mayor riesgo «7). Para 1933, los ciclones continuaban provocando derrumbes en las fachadas y daños generales en el monumento sin que se actuara para protegerlo (Fig. III.7). «8)

Finalmente, durante el primer semestre de 1935 se llevó a cabo la primera temporada de trabajos arqueológicos, a cargo de la dependencia que a partir de 1930 sería el Instituto Nacional de Antropología e Historia. El responsable directo de los trabajos fue el arqueólogo Manuel Cirerol Sansores, quien dirigiría también los trabajos de temporadas posteriores hasta 1942.

Las actividades correspondientes a 1935 «9,10) incluyeron:

- Estabilización de los muros de los templos hoy conocidos como IV y V.

- Consolidación⁸ del basamento de la pirámide en su lado sur, pues amenazaba con desplomarse.

- Colocación de 2 abrazaderas de concreto (grapas) sobre el

⁸ Consolidar es un término empleado por los arqueólogos para denominar al conjunto de acciones tendientes a asegurar la estabilidad de un edificio prehispánico o de alguna de sus partes en peligro de desplomarse o sufrir daños.

techo del edificio superior, con objeto de impedir que se desprendiera el revestimiento de piedra de las fachadas, problema que ya empezaba a presentarse. Se aplicó además un aplanado de concreto en el techo del mismo templo, puesto que se habían localizado grietas importantes por las que podía circular agua que posteriormente debilitara el edificio.

En 1936, en una nueva temporada de trabajos, se continuó con los trabajos de restauración (13, 22, 23):

- Consolidación de todo el basamento de la pirámide, que estaba en muy malas condiciones. [Fig. III.8]

- Reconstrucción del Templo Superior: Considerando la inestabilidad que presentaba, se retiraron todos los bloques de piedra, se consolidó el material y se acomodaron las piezas, una por una, en su sitio original.

- Impermeabilización en varias partes del monumento, con mortero de cal y sahcah, a fin de evitar filtraciones.

Cuando se retiraban los escombros del lado suroeste se descubrió la puerta de una de las cámaras correspondientes al Templo Inferior Poniente (hoy Templo I). La cámara estaba rellena con material tipo mampostería de la época prehispánica.

Durante 1937 y 1938 los trabajos se dedicaron principalmente a restaurar la escalinata oriente y a explorar a su alrededor (24, 25). Con este motivo se excavó un túnel (de oriente a poniente) en la parte correspondiente a los escalones más cercanos a la base. A muy corta distancia de la entrada del túnel se localizó una escalinata interior.

que correspondía a una etapa anterior de la pirámide [Fig. III.9]. Se le fue siguiendo por medio de calas hasta que, a la altura "...del peldaño 77, terminó la escalera de la subestructura y se encontró la plataforma del templo sepultado. En este punto...se continuó la exploración mediante un túnel" que corría de oriente a poniente y que pretendía "...encontrar la fachada del edificio. El túnel, debidamente consolidado", llegó a su objetivo: Se encontró la fachada de una cámara interna "... No fue posible vaciar este frente y penetrar al interior por falta de material para hacer la debida y segura consolidación".

Por otro lado, en la parte central del Templo Superior se abrió un pozo [Fig. III.10] para localizar el resto del edificio sepultado: Se encontró parte de la crestería que descansaba sobre el techo del recién descubierto templo.

En 1939 se terminó la restauración de la escalinata exterior oriente [Fig. III.11], que tiene 28 m de altura. La conforman 118 escalones cuyo ancho es de 15.05 m. (sa, 27)

Los trabajos de 1940 se concentraron principalmente en continuar la exploración del templo descubierto (sa, 28). La fachada mostraba 2 columnas al frente. Prolongando la excavación hacia el norte se descubrió la existencia de una segunda cámara. La primera cámara encontrada (central) fue vaciada totalmente. Para poder efectuar estos trabajos se utilizó el pozo abierto anteriormente en el Templo Superior, cuyo avance se llevó hasta encontrar el cierre de la cámara sepultada. Por este conducto fue posible ir sacando el material de relleno. "... Bóveda, paredes y piso de la cámara se encontraron en

magníficas condiciones". Sin embargo el recubrimiento de estuco (mezcla de cal y arena) estaba muy agrietado y fue necesario afianzarlo con una mezcla de yeso. Se construyó además un dintel de concreto para sustituir al original (de madera de zapote) que no pudo encontrarse. Se piensa que pudo haberse desintegrado con el paso del tiempo o bien que pudo haber sido retirado intencionalmente por quienes rellenaron las cámaras.

Las dimensiones de la cámara son de 2.74 m por 2.69 m y su altura es de 3.66 m. Actualmente se considera que este templo correspondió a la segunda época de la pirámide (Templo II).

A continuación se realizó una exploración a partir del pozo, abriéndolo hacia el poniente; se pretendía encontrar el otro frente del Templo II. Efectivamente, se encontró una nueva cámara que compartía el muro posterior del Templo II. Al vaciarla se reportó en buenas condiciones. Esta cámara quedaba entre los Templos II y IV y posteriormente Ruz la consideraría como el templo de la tercera época (Templo III) (Fig. III.10).

Terminadas las exploraciones, se decidió cerrar el pozo, considerando que ya no era necesario; únicamente se dejó un tramo que permite ver parte de la crestería; el túnel por el que se entra a las cámaras del Templo II sí quedó abierto.

Por otra parte, en el lado poniente de la pirámide se trabajó en la reconstrucción de la escalinata (Fig. III.11a). Para 1942 se concluyó con esta tarea, de modo que por esta escalera (55 escalones) se podía llegar hasta el segundo descanso (Fig. III.11b). (30, 31)

Durante los siguientes años la Pirámide del Adivino no fue

trabajada pero se procuró mantenerla (sz, ss).

La siguiente temporada se realizaría en 1951, bajo la dirección del arqueólogo Alberto Ruz L'huillier (sa). En esta ocasión, los trabajos se concentraron en el templo más antiguo, hoy Templo I.

Los trabajos comprendieron principalmente:

- Retiro de escombros de los alrededores.
- Estabilización del basamento del templo, de 1m de altura, cuyo revestimiento estaba formado con bloques de piedra.
- Colocación de un dintel de concreto en la puerta de la cámara central.
- Restauración general de la fachada poniente del templo, que quedó como actualmente se le conoce. (Fig. III.12a,b)

Las últimas temporadas de trabajos relevantes ocurrieron entre 1968 y 1971 y estuvieron a cargo del arqueólogo César Sáenz (ss, ss), quien realizó una restauración intensiva y trabajos de exploración en la pirámide:

- Durante la excavación de las áreas laterales del Templo IV se encontraron los peldaños de 2 escaleras adyacentes a él, que fueron reconstruidas.

- Se recubrió totalmente la pirámide, en sus dos cuerpos, con una chapa de piedra.

- Se impermeabilizaron techos y plataformas, pasillos y la banqueta que circunda la pirámide, empleando una mezcla de cemento y

agua.

- En el Templo V se colocó un dintel de concreto y además se reconstruyó su basamento y la esquina norte.

- La parte central de los trabajos sería, indudablemente, la excavación de un túnel en el extremo norte (Fig. III.13), en la base del primer cuerpo. Este túnel, avanzando de norte a sur dentro de la pirámide, permitió descubrir la fachada posterior del Templo I, que estaba en excelentes condiciones de conservación. Cuando el avance del túnel era de 18 m. se encontró una escalera interna. Sin embargo, la excavación se suspendió en ese punto pues aparecía un pasillo muy angosto que impedía continuar. Desde allí se pudo notar que había habido destrucción intencional de algunas estructuras, posiblemente al edificar las posteriores.

El túnel quedó protegido por una puerta de lámina.

En 1988 se realizó una serie de trabajos en Uxmal; entre ellos, se retiró el relleno de la cámara central del Templo I, en la que sólo quedó la porción correspondiente a la esquina sureste del cuarto, como muestra de las condiciones originales en que se encontraba.

En septiembre de 1988 el ciclón "Gilberto" azotó la península de Yucatán, dejando múltiples daños en toda la región. En diciembre del mismo año, la nueva administración del INAH consideró fundamental realizar una inspección general de las zonas arqueológicas, para evaluar tanto el estado en que se recibían los monumentos como los efectos causados por el ciclón. Gracias a esta medida quedó manifiesta

la alarmante situación en que se encontraba la Pirámide del Adivino.

III.4 Análisis y estudios previos.

El recorrido de diciembre de 1988 estuvo a cargo del Arq. Pablo Chico Ponce de León, de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Yucatán. (27)

Su reporte dejó constancia de los principales deterioros observados:

- Grietas y fisuras de magnitud variable, alojadas en su mayoría sobre los costados norte y poniente de la pirámide, siguiendo dos ejes principales de agrietamiento.

- Debilitamiento de la cohesión entre materiales puesto que los morteros, expuestos a filtraciones, precipitaciones y otros fenómenos, habían perdido su capacidad de aglutinante.

- Desprendimiento de piezas de recubrimiento en muros y en el núcleo de los taludes, causado por la pérdida de cohesión mencionada.

- Generación de desajustes de tipo estructural que originaron empujes laterales y desprendimientos.

- Hundimientos del edificio y deslizamiento de rampas y taludes. En este punto, resaltaba la preocupante situación del ángulo noroeste y sus consecuencias en el resto de la estructura: dado que el talud norte no continúa hasta el suelo, el riesgo de desgajamiento era considerable.

- Aplastamiento de los muros de la doble cruja del templo

I. en la cámara central del Templo I, localizada bajo la escalera, y graves daños en el túnel abierto por el arqueólogo César Sáenz en 1970, donde se registraron derrumbes parciales.

Las sugerencias y soluciones presentadas consideraban 3 etapas:

1. - Intervenciones de emergencia.

- Ademado y apuntalamiento en la cámara central.
- Ademado del túnel, hasta llegar a la zona de derrumbe; reposición de las secciones dañadas, previa colocación de una estructura de resguardo para los trabajadores.
- Apuntalamiento de los muros de la esquina noroeste del Templo I.
- Relleno y sellado de las aberturas principales en plataformas y azoteas, para evitar mayores filtraciones.
- Sellado preventivo de las grietas en las partes planas. En los taludes se sugería la conveniencia de mantener las grietas sin sellar por un tiempo, para poder realizar observaciones y mediciones con respecto al comportamiento estructural.

2. - Estudios necesarios para el proyecto de reconstrucción:

- Estudios de la composición, estructura y resistencia del suelo en que está desplantado el edificio, especialmente en relación con la posible existencia de cavidades.
- Estudio arqueológico por medio de túneles, calas, etc., para conocer las condiciones estructurales de la pirámide y poseer más datos.

3. - Algunas ideas para desarrollar en el proyecto de reconstrucción y restauración arqueológicas:

- Restitución volumétrica en:

a) El Templo I, donde además se sugería alojar elementos de refuerzo dentro de muros y bóvedas.

b) El talud del primer cuerpo, esquina noroeste.

- Refuerzos estructurales, probablemente de concreto reforzado: Marcos de descarga, columnas inclinadas y elementos perimetrales.

Atendiendo a estos señalamientos se procedió, en primera instancia, al apuntalamiento del pasillo bajo la escalera poniente, apoyándolo sobre la rampa de ésta (Fig. III.14). Dentro de la cámara se colocó un adernado de madera. En el túnel también se introdujo apuntalamiento.

Además se solicitó la colaboración de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, quedando a su cargo la realización de un estudio geofísico y uno estructural.

El estudio geofísico se consistió en realizar 10 sondeos eléctricos verticales (SEV) distribuidos de manera que circundaran la pirámide (Fig. III.15). Se pretendía localizar la presencia de cavidades de disolución y definir la continuidad de la roca caliza del subsuelo en el área. Para ello se usó el método de resistividades.

La resistividad es la medida de la resistencia que opone un material al flujo de una corriente eléctrica.

El método de resistividades consiste en generar una corriente eléctrica desde la superficie del terreno y transmitirla por el subsuelo. La corriente fluye de un electrodo positivo hacia uno negativo, generando un gradiente de potencial (Fig. III.16). Esta corriente tiende a fluir a través de los espacios intergranulares que

encuentra. El volumen de material atravesado es proporcional a la distancia entre los electrodos. Cabe señalar que las propiedades eléctricas de la roca están en función de la composición mineralógica, la porosidad efectiva y la concentración de sales en disolución contenidas en el agua embebida en la roca.

Los resultados obtenidos en este estudio permitieron saber que el suelo en el área de la pirámide está conformado por 3 estratos de roca caliza con diferentes propiedades cada uno. El primero tiene un espesor que oscila entre 0.80 m y 5 m; el espesor del segundo varía entre 1 m y 18.5 m. No se localizaron cavidades de disolución. Considerando que la pirámide reposa sobre un lecho rocoso de alta resistencia, puede afirmarse que los desórdenes que ha sufrido no son producto de fallas ni asentamientos del suelo.

Por otra parte, para el estudio estructural se empleó el método de elemento finito. La finalidad era determinar el estado de esfuerzos en los muros de la fachada poniente (bajo la escalera) y en los muros que forman el túnel entre la parte posterior del Templo I y la subestructura del Templo II. (Fig. III.17)

Dado que los muros de mampostería y los rellenos de piedra y arena calcárea (sahcab) presentan características mecánicas heterogéneas, fue necesario establecer varias hipótesis para generar el modelo:

- Los templos II, III y IV y sus respectivos basamentos se supusieron formados por materiales homogéneos e isotrópicos sin oquedades.

- Para el Templo I se consideraron 2 tipos de material, ambos homogéneos e isotrópicos: mampostería de piedra y relleno de piedra y

mortero.

El modelo generado con base en lo anterior tuvo las siguientes características:

Total de nudos : 95

Total de elementos : 76

Total de ecuaciones : 180

Se realizaron 3 cálculos diferentes [Fig. III.18]:

- a) Considerando las cámaras internas rellenas.
- b) Considerando túnel, cámara central y arco vacíos.
- c) Considerando túnel, cámara central, cámara posterior y arco vacíos.

Fue debido a que no se sabe si las cámaras de la cruzía posterior están rellenas o no, que se consideró necesario realizar el tercer cálculo señalado.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

1) En el caso (a), el nivel de esfuerzos se encuentra dentro de los límites de resistencia aparente de la mampostería.

2) En el cálculo (b) se encontró una fuerte concentración de carga en el muro que separa la cámara central y el arco; aparecen además esfuerzos de tensión transversal en los mismos muros, y si bien son de baja intensidad, a largo plazo podrían producir grietas.

3) Para el tercer cálculo los esfuerzos alcanzan magnitudes muy superiores a los permisibles; se generan fuertes tensiones transversales y altos niveles de esfuerzos cortantes al nivel de los rellenos de las bóvedas. Estos resultados indican la poca probabilidad

de que la cámaras posteriores se encuentren vacías.

Este análisis lleva a la conclusión de que las cargas actuantes principales sobre los muros longitudinales de la cámara central son de compresión vertical y que, en cambio, los empujes laterales son menos importantes.

Atendiendo a estos resultados, el estudio remarcaba la urgencia de descargar los muros o reemplazarlos por elementos de mayor resistencia, por ejemplo, concreto reforzado: "... Se recomienda como medida de urgencia reemplazar los núcleos de mampostería de los muros en compresión que separan la primera cámara del arco bajo la escalera por muros o columnas de concreto y dejando aparente el recubrimiento arqueológico original". Además se aconsejaba vigilar estrictamente el apuntalamiento de la bóveda de la cámara central durante los trabajos de reestructuración. Se comentaba también la importancia de estudiar más detalladamente el proceso constructivo, de modo que la transmisión de cargas entre el muro antiguo y el nuevo de concreto no presentase asentamientos que hicieran peligrar la bóveda maya.

En marzo de 1969, paralelamente a los estudios de la Universidad de Yucatán, el INAH solicitó la opinión del Ing. Roberto Heatley Cortés. Su informe (6) expone las que, a su juicio, son las causas del problema (en esencia, el huracán "Gilberto" y sus efectos sobre la pirámide, así como las exploraciones arqueológicas que han modificado las dimensiones de la pirámide, de modo que las actuales no corresponden a las de ninguna etapa prehispánica)

Las sugerencias a corto plazo eran:

- Resanar las grietas en taludes, alfardas y escalones.
- Evitar el acceso de agua por los vanos de los templos y por los registros de iluminación (en Uxmal se ofrece un espectáculo de "Luz y Sonido" para el cual se colocaron estos registros, cableados y otras instalaciones)
- Limpiar los drenes naturales en la base de la pirámide.
- Colocar tramos pequeños de poliducto en las grietas, para facilitar la salida del agua.
- Aumentar "... el apuntalamiento bajo el pasillo, así como en el túnel entre el Templo I y la plataforma del Templo II, usando arrastres de viga de madera (para repartir el peso de los puntales); troquelar con cuñas de madera el espacio entre los arrastres y la estructura; usar contravanteos en los marcos ya colocados". De modo especial, aumentar el apuntalamiento en la cámara central.
- Hacer un seguimiento periódico del comportamiento de la estructura y sus agrietamientos, colocando testigos de yeso fechados.

A largo plazo, proponía dar a la pirámide la configuración física más cercana a la que tuvo en su última etapa, de modo que fuera más fácil mantener su estabilidad y a un menor costo, "...esto es, que podrá hacerse con materiales y procedimiento constructivo similares a los utilizados en su construcción. Si se pretende mantener los pasillos que actualmente existen será necesario hacer una estructura interna de concreto armado que encarecerá la solución". Meses más adelante, Heatley sostendría en una reunión en la Dirección General del INAH, que la solución más adecuada era rellenar totalmente la

cámara central y el túnel, para que la pirámide regresara a las condiciones de su última etapa prehispánica.

III.5 Descripción de daños

Para junio de 1989 se consideraba que la solución más conveniente, apoyada en la opinión de Heatley, era rellenar la cámara central del Templo I, el pasillo bajo la escalera poniente, el túnel y, posiblemente también el resto de las cámaras abiertas (Templos II, III y IV). Con objeto de tener una alternativa distinta de reparación, recibí una invitación del Instituto Nacional de Antropología e Historia para realizar una visita al sitio, acompañando al Consejo de Arqueología de la institución.

Los datos recavados en el recorrido se presentan en la siguiente descripción de daños:

III.5.1 Lado Norte

a) Sobre el primer cuerpo de la pirámide se distinguen las trayectorias de agrietamientos importantes que inclusive llegan a prolongarse sobre el segundo cuerpo. Estas grietas habían sido rellenadas recientemente con lajas de piedra mezcladas con mortero, previendo la época de lluvias y a la necesidad de evitar nuevas filtraciones. [Fig. III.10]

La densidad de las grietas es mayor en la base; las principales, que son las que corren a lo alto del primer cuerpo, muestran señas de haber tenido mayor abertura en las proximidades de la base, tendiendo

a disminuirla paulatinamente hacia arriba. Con respecto a su profundidad cabe mencionar el siguiente hecho: Previa al relleno de las grietas se llevó a cabo una operación de limpieza de las mismas. Esta limpieza, penetró más de 50 cm; sin embargo, las grietas aún continuaban profundizándose. El relleno aplicado fue "superficial" y cubrió los primeros 40 cm.

Por otra parte fue necesario, antes de trabajar en el túnel, desalojar la gran cantidad de murciélagos que se encontraban adentro. Para ello se generó humo en el interior del lugar (el túnel). El humo al parecer encontró su salida a través de las grietas formando columnas de humo. Este hecho ilustra lo agrietada que debe estar internamente la parte norte de la pirámide y la intercomunicación que debe existir entre los agrietamientos.

b) El túnel, de 18 m de longitud y más de 8 m de altura, tiene un ancho variable: A la entrada es de 1.5 m aproximadamente; sin embargo, a medida que se avanza, esta dimensión se reduce. A la mitad del trayecto tal reducción y la presencia de puntales dificultan notablemente el paso. Quienes conocen el sitio comentan que el túnel se ha ido "cerrando" a través del tiempo, haciéndose más angosto. El lugar no tiene iluminación, por lo que se requiere usar lámparas y no existe la posibilidad de una observación detallada.

Dentro del túnel se siente una fuerte humedad, cuya intensidad aumenta con la profundidad. El túnel separa el Templo I (parte oriente) del Templo II. De este modo, los bloques del templo se sienten húmedos y resbalosos; el material de la subestructura, un

relleno, ha perdido cohesión y resistencia por la humedad y es fácilmente disgregable. Prueba de su inestabilidad y falta de resistencia es que, meses antes, se registraron derrumbes. Sin embargo, los arqueólogos encargados realizaron algunas excavaciones nuevas dentro del túnel, con objeto de obtener nuevos datos de la pirámide. Estos trabajos, en las condiciones de inestabilidad de la pirámide, pusieron en grave peligro no sólo la conservación del monumento, sino también la vida de las personas que los efectuaban, por lo que no debieron haberse autorizado.

Actualmente, la puerta de lámina que protegía la entrada al túnel se ha desprendido totalmente; por lo mismo, el lugar queda desprotegido contra los agentes naturales y la fauna del lugar.

c) La cámara norte del Templo I, originalmente rellena como el resto del templo, en la actualidad exhibe sólo parte de ese relleno. Aunque se ha perdido la bóveda del techo, queda en pie el muro en el que estaba la entrada (Fig. III.20). El dintel del acceso es de concreto, pero el resto del muro está formado con los materiales originales: bloques de piedra y relleno interno. Este muro muestra un desplome hacia adelante (Fig. III.21) y al mismo tiempo, una inclinación hacia el lado oriente, como si una fuerza de tensión estuviera actuando sobre él. Los bloques que forman el marco de la entrada se han separado del resto del muro, perdiendo el mortero que los unía, y donde aún existe, se han generado fisuras.

La parte interior de la cámara, como se mencionó ya, está rellena parcialmente y también allí se detectaron agrietamientos y

desprendimientos de piezas, superficialmente resanados, según lo demuestran los trabajos de sellado y restauración visibles, similares a los del lado norte.

III.5.2 Lado Poniente

Es en este sector donde se han presentado los daños más alarmantes, concentrándose en 3 sectores: la esquina noroeste, el Templo I en su cámara central (cámara 3) y, en menor escala, las cámaras 1, 2 y 4 (Fig. III.20).

a) Con respecto a la esquina noroeste, aparecen 2 grietas verticales, paralelas entre sí, que parecen indicar una falla de talud (Fig. III.22). Corresponden a la zona del túnel y parecen continuarse hacia la base, en las del relleno de la cámara perpendicular norte, previamente descrita.

b) Las cámaras 1 y 2 del templo I aún conservan parte de su relleno. Se aprecian fisuras y agrietamientos que aún no han sido sellados, y cuyas aberturas son, en promedio, de 1 a 2 mm, aunque existe una sección en que las aberturas llegan a ser de 5 mm, permitiendo inclusive el crecimiento de plantas. En esta zona, el relleno comienza a desprenderse de los muros. (Fig. III.23) Generalmente estos agrietamientos siguen la dirección del mortero, de menor resistencia que los bloques de piedra.

Los deterioros se hacen más notables en las cercanías de la cámara central bajo la escalera.

c) La cámara central (cámara 3) se encuentra en un estado muy

avanzado de deterioro que resulta impresionante tanto por lo evidente de la falla como por el apuntalamiento colocado como apoyo y protección. (Fig. III.24)

Los muros fueron construidos originalmente usando la técnica clásica (enchapado unido por un relleno de sahcab y fragmentos de roca, de modo que conformen una unidad). Los daños se han reflejado, en primer lugar, en la excesiva deformación de esos muros y su consiguiente falla, en especial en el lado de la entrada (Fig. III. 25). La falla se aprecia en la separación entre enchapado y relleno. Las chapas exterior e interior han sufrido aplastamiento y en consecuencia, se han curvado (Fig. III.26). El relleno se ha debilitado; debido a ello ha perdido sus propiedades cohesivas y se disgrega fácilmente. Esto mismo ha provocado que algunas piezas hayan quedado sueltas o puedan desprenderse sin gran esfuerzo. El resto de los muros de la cámara han sufrido daños similares: En el caso del muro que divide las cámaras 2 y 3, además de la separación de piezas y las deformaciones, los agrietamientos han atravesado a los propios bloques. Con respecto al muro longitudinal, los daños son proporcionalmente menores, mientras que en el muro que divide las cámaras 3 y 4, no se aprecian porque aún se mantiene una parte de relleno. En el resto de la cámara se había colocado un ademado de madera, aunque evitando el contacto directo con la bóveda. En el exterior se colocaron puntales para detener el movimiento de los muros y reforzarlos.

El dintel de la cámara central y el de la cámara 4, ambos de concreto (el de la cámara 4 combinado con madera), muestran grietas en

los apoyos [Fig. III.27]. En la cámara 4, sobre el lado que colinda con la cámara central, se perciben ya deformaciones y pérdida de mortero. El muro exterior fue apuntalado como medida preventiva.

El arco bajo la escalera ha perdido mortero en algunas partes y se han generado desprendimientos.

El resto del lado Poniente (Templos III, IV y V) presenta pocos daños. Existen agrietamientos menores y pérdida de mortero en algunas partes, y se aprecia una humedad constante, especialmente en el Templo III. Sin embargo, no constituyen aún problemas graves; son en realidad, reflejo de muchos años de falta de mantenimiento. Es necesario señalar, por otra parte, que en el Templo V se mantiene abierta parte de la excavación que permitiera encontrar la crestería del Templo II y hacer exploraciones en ese lado; en ella se acumula fácilmente gran cantidad de agua en la temporada de lluvias, que después se infiltra paulatinamente en la pirámide.

III.5.3 Lado Sur

En esta parte, la pirámide parece mantenerse sólida y estable pues no manifiesta daños de ningún tipo.

III.5.4 Lado Oriente

Sobre este lado, el acceso al Templo II, un pasillo de 2m de longitud, refleja también que el contenido de agua de la pirámide es excesivo. Sin embargo, el material en esta parte se conserva sin daños

ni pérdida de cohesión. Dentro de la cámara sí se aprecian agrietamientos sobre los muros.

Finalmente, en la parte noreste de la pirámide, sobre el primer cuerpo, han aparecido esporádicos agrietamientos que se sellaron con la misma técnica que los del lado norte. Son grietas de 1 a 2 mm de abertura y se extienden de la base a la mitad del primer cuerpo de la pirámide.

En julio de 1989, el Instituto Nacional de Antropología e Historia decidió, a pesar de múltiples protestas, rellenar las cámaras dañadas, según la sugerencia de Heatley. Esta solución resultaba conveniente (según Heatley) por ser fácil, rápida y de bajo costo, y fue aceptada por el Consejo de Arqueología de la institución. La resolución se comunicó al Centro Regional del INAH en Yucatán, para que la llevara a efecto. Heatley no asumió ni la responsabilidad de especificar el procedimiento ni la de encargarse de la supervisión: ambas tareas se encargaron a la Universidad de Yucatán, con el propósito principal de que hubiera un responsable.

Esta tesis pretende demostrar que la ingeniería civil sí ofrece alternativas económicas y efectivas diferentes del relleno que garanticen la estabilidad y la conservación de la estructura.

III.8 Análisis de daños

Los daños que se han manifestado en la Pirámide del Adivino son, indudablemente, el resultado de las diferentes etapas y alteraciones

que ha sufrido a lo largo de más de 1000 años: 5 etapas constructivas; 4 siglos de total abandono (Epoca Colonial, siglo XIX y principios del XX); trabajos de exploración arqueológica, la mayoría de las veces sin cuidar la estabilidad del monumento, ni a corto ni a largo plazo; finalmente, la constante acción de los elementos naturales. Ante cada alteración, la tendencia de la pirámide, como la de cualquier estructura, ha sido buscar un nuevo estado de equilibrio, lo que implica redistribuir esfuerzos.

De este modo, los daños de la cámara central del Templo I obedecen a una redistribución de esfuerzos que se generó al retirar el material de relleno. Este material ocupaba un área de aproximadamente 3 m por 5 m (y 3 m de altura) y estaba colocado en la base de la pirámide. El peso del material que estaba sobre él, hasta entonces uniformemente repartido sobre un área, de pronto recayó tan sólo sobre los muros, que nunca fueron pensados como elementos estructurales y que, consecuentemente, no ofrecían suficiente resistencia. Las columnillas exteriores, originalmente elementos decorativos, se han visto obligadas a trabajar como elementos de carga. Gracias a su presencia y a los bloques que forman el enchapado, el monumento no sufrió un colapso total.

Las descargas sobre los muros los han sujetado a una compresión excesiva, provocando su aplastamiento. De allí que se hayan presentado deformaciones importantes en las zonas donde no hay elementos que restrinjan el movimiento. El muro M1 (Fig. III.28) ante la compresión, perdió la cohesión entre la chapa exterior, el relleno y la chapa interior: cada chapa se abultó, mientras el relleno se disgregaba

(Fig. III.28b) . Lo mismo habría sucedido en todo el muro longitudinal M3 a no ser porque la parte que se dejó de relleno original confinó el muro e impidió el movimiento. Así, sólo la mitad del muro no restringida sufrió deformaciones. La misma explicación es válida para el muro M4. El muro M2, por su parte, también se deformó, pero, confinado por los muros longitudinales, no pudo expandirse lateralmente, razón por la cual se generaron entonces los agrietamientos que presenta.

Ahora bien, el resto de los agrietamientos importantes de la pirámide se han concentrado en las partes norte y poniente, y en especial, en la esquina noroeste. Es decir, los daños están en el área alledaña al túnel. No hay que olvidar que al desalojar este túnel (en 1970), cuyas dimensiones eran de 1.50 m de ancho, 6 m de altura y 19 m de profundidad, se retiró un volumen de aproximadamente 170 m³, cantidad nada despreciable; sin embargo, no se colocó ningún elemento que garantizara la estabilidad del túnel ni la de la pirámide.

Es válido entonces pensar que en este espacio abierto esté el origen de los problemas; los agentes naturales y las filtraciones no son los causantes de los daños, aunque su acción agrava los que existen. Con base en el tiempo que el túnel ha estado abierto y la tendencia a cerrarse que ha mostrado, puede suponerse que se han gestado empujes laterales, provocando movimiento en la pirámide, que intenta reducir el espacio abierto y tiende, a largo plazo, a recobrar la continuidad (Fig. III.28b) .

La dirección y distribución de las grietas indica que el movimiento es de oriente a poniente. También lo comprueba el hecho de que, dentro

del túnel, es más fácil que se movilice al relleno a que lo haga el templo. De esta forma, el movimiento ha provocado la aparición de las grietas que, en 20 años, se han profundizado cada vez más, intercomunicándose.

En la esquina noroeste, las 2 grietas más importantes parecen indicar una falla de talud (Fig. III.29). La suposición se refuerza si se considera que esta zona de la pirámide carece de un apoyo que impida que se desgaje. En su tendencia a deslizarse, sólo una sección sobre el túnel ha detenido el movimiento (Fig. III.30). Sin embargo, el empuje del talud está presionándola, y el reflejo es que el muro de la cámara perpendicular del Templo I sufre, más que un despiome, un empuje hacia el frente. Al ir cediendo, esta parte del muro ha atraído consigo al resto del muro.

La mayoría de las cámaras de la pirámide tienen actualmente dinteles de concreto. Sobre los apoyos de todos ellos también han aparecido agrietamientos; su causa, la diferencia de rigidez que existe entre el material de los muros y el de los dinteles.

Por otra parte, el agua ha participado también en los daños que se registran en la pirámide, pues se infiltra por grietas y vanos, circulando después internamente. En la búsqueda de una salida, esta agua ha provocado daños de magnitud importante en el relleno: en el material aglutinante ha reducido la capacidad cohesiva, llegando a anularla en numerosas ocasiones; en los fragmentos de roca y en los bloques, la penetración del agua ha provocado la disminución de la resistencia. Siendo materiales calcáreos, el debilitamiento ha sido mayor. A ello se debe que el material sea actualmente disgregable en

las zonas donde ha estado expuesto a la humedad por largos periodos. En este sentido, el huracán "Gilberto" cobra importancia, pues la cantidad de agua infiltrada durante su presencia aceleró los procesos antes descritos: se incrementó el peso de la estructura y se redujeron los esfuerzos resistentes. El agua debilitó de tal manera los materiales que, a un año de distancia, la humedad aún se mantiene.

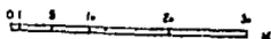
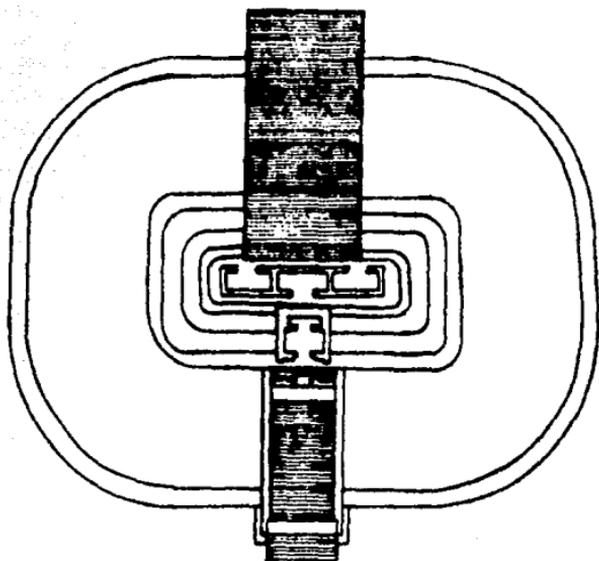
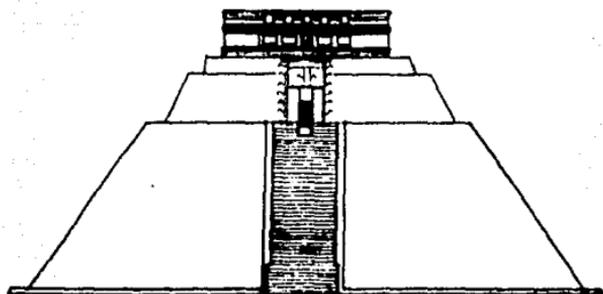


Fig. III. 6 Pirámide del Adivino. Elevación y planta

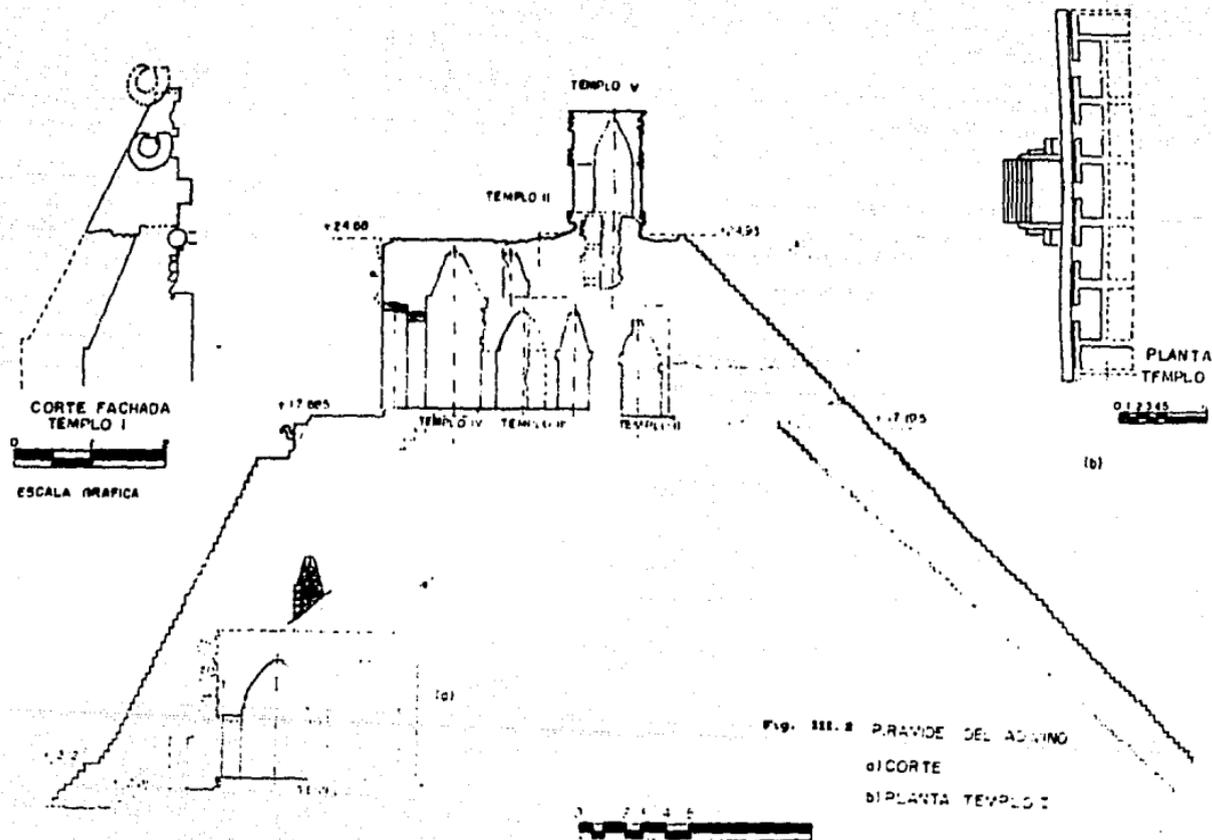


Fig. III. 2 PIRAMIDE DEL AQUINO
 a) CORTE
 b) PLANTA TEMPLO I

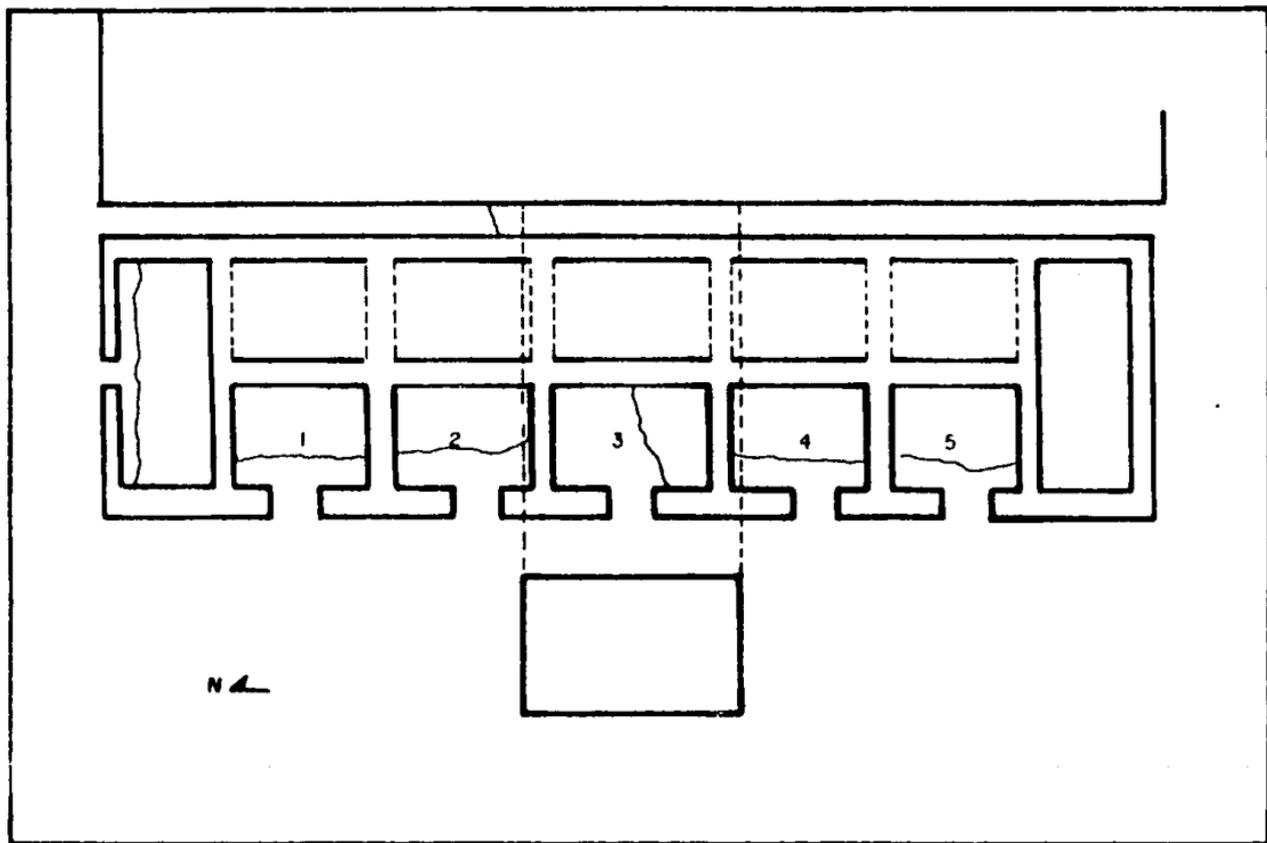


Fig. III.3 CAMARAS DEL TEMPLO I



133

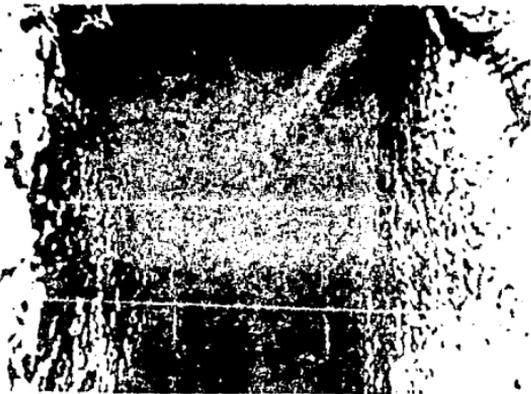


(b)

Fig. III.3 Lado Poniente
a) Templo I. Cámaras 1 a 5
b) Cámara perpendicular del Templo I



Ca)



Cb)

Fig. III. 4 Lado Oriente
a) Templo II. Entrada
b) Pasillo que introduce al Templo II

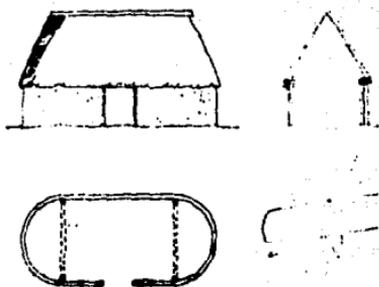


Fig. III.9a Características de la casa maya

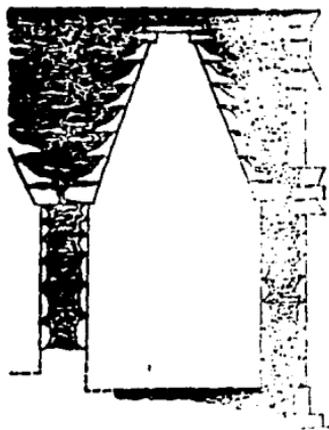


Fig. III.9b Bóveda maya

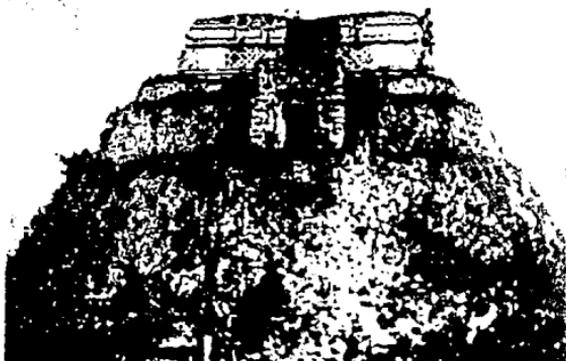


Fig. III.6 Lado Poniente 1953

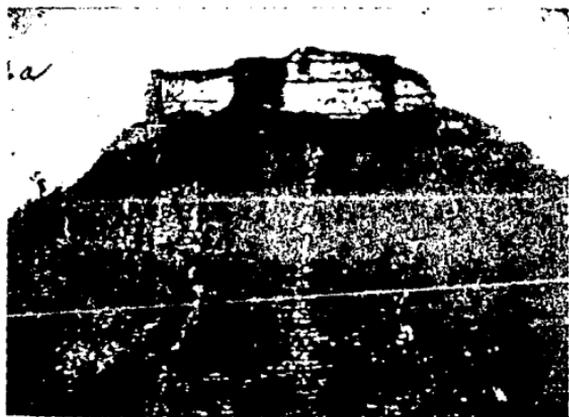


Fig. III.7 Lado Oriente 1955



Fig. III.8 Trabajos de 1960



Fig. III.9 Reconstrucción de la escalera oriente y descubrimiento de la escalera del Templo II.

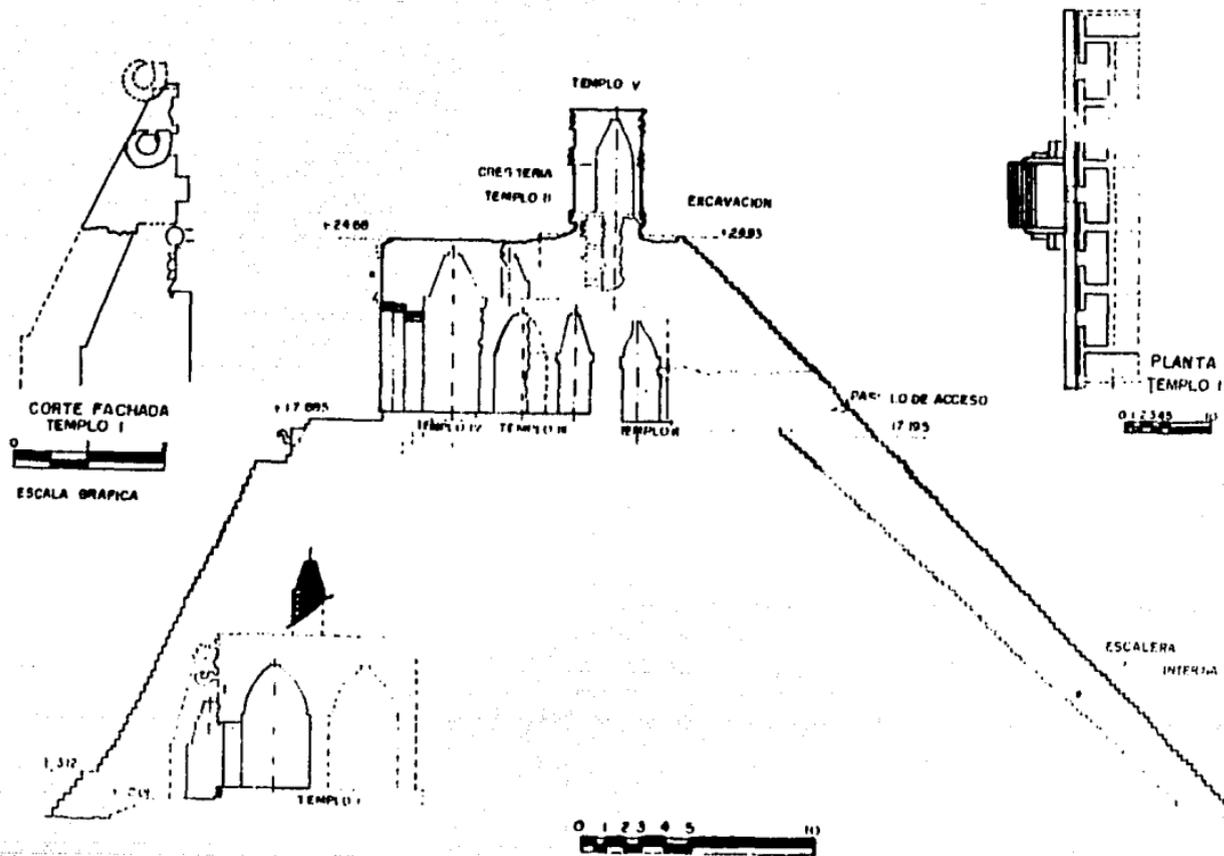


Fig. 111. 60 Exploraciones arqueológicas 1986-1990

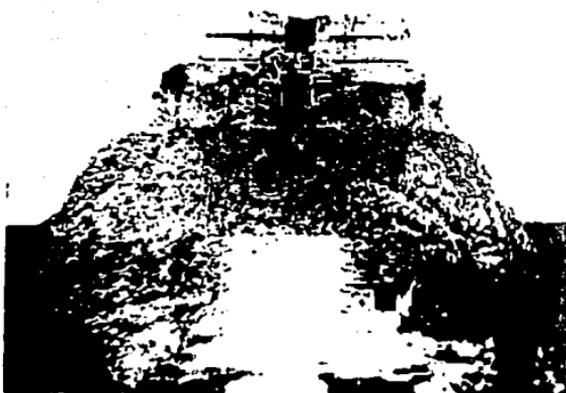


Fig. III. 11 Escalera Oriente: restauración concluida en 1989

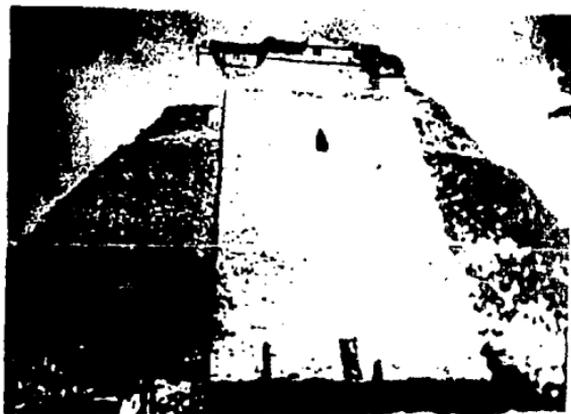


Fig. III. 11a Escalera Poniente: Restauración de 1940



Fig. III.11b Escalera pontica
Trabajos durante 1942

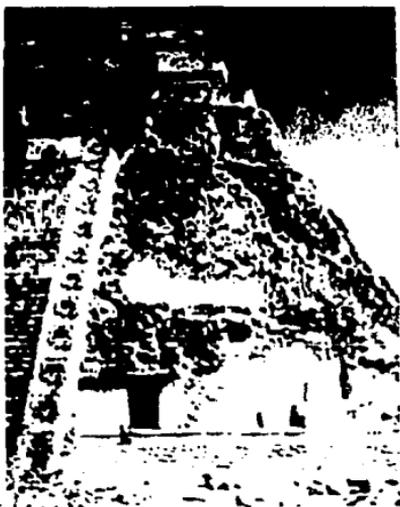
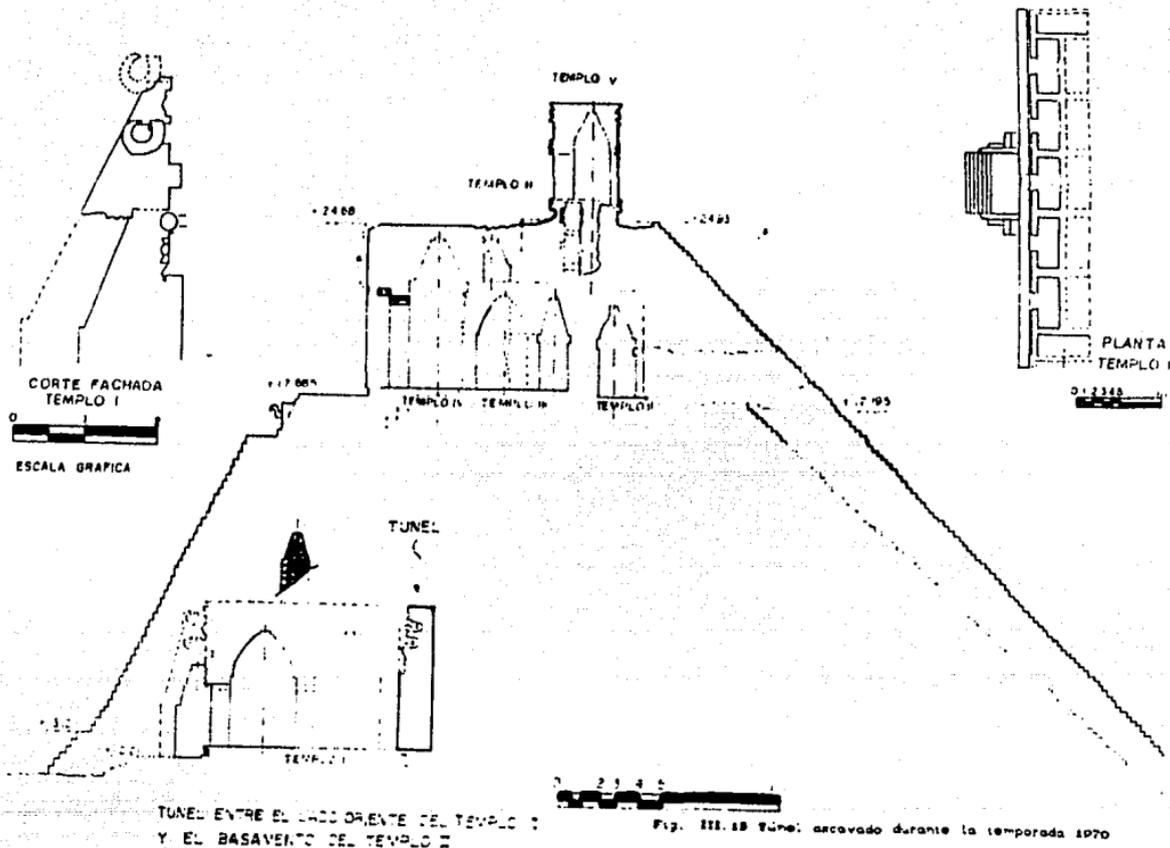


Fig. III.12a lado pontico. Trabajos
en el Templo I, en 1931

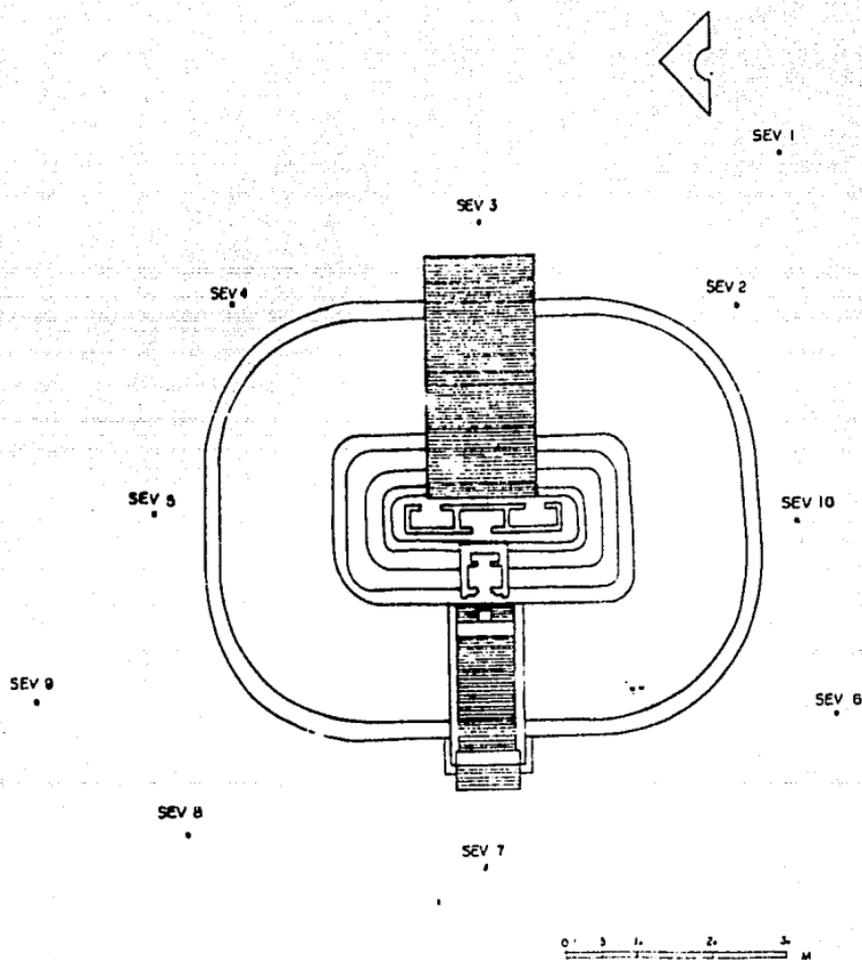


TUNEL ENTRE EL LADO ORIENTE DEL TEMPLO I Y EL BASAMENTO DEL TEMPLO II

Fig. 122. 10 Túnel excavado durante la temporada 1970

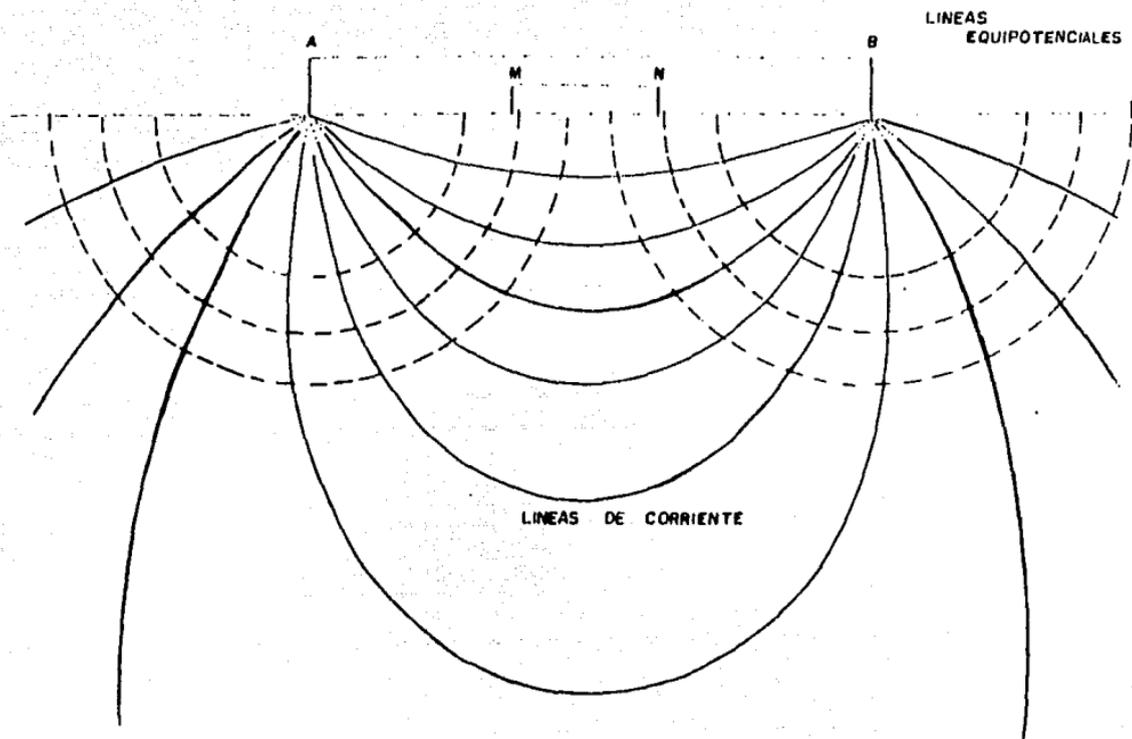


Fig. III.14 Apuntalamiento en el póssilo bajo la escalera



PIRAMIDE DEL ADZINO ELEVACION Y PLANTA

Fig. III. 13 Ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV)



A, B: ELECTRODOS DE CORRIENTE (Sondas)
 M, N: " " " (Testigos)

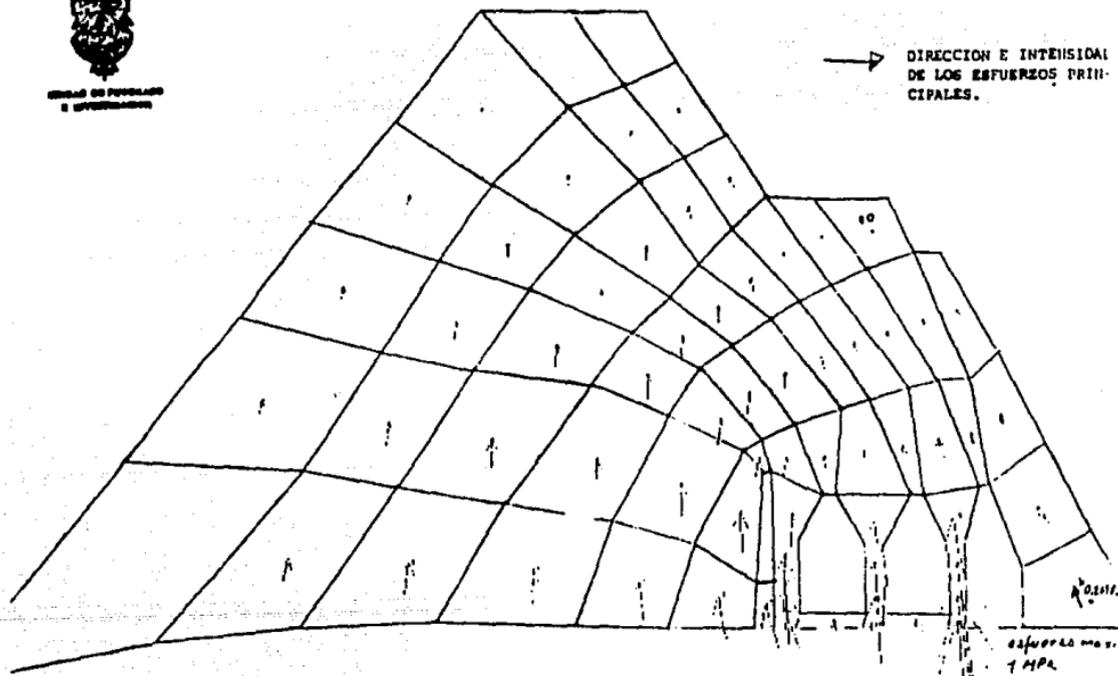
Fig. III.14 Método de las resistividades

Fig. III.17 Análisis estructural realizado en la Universidad Autónoma de Yucatán

FACULTAD DE INGENIERIA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN



ESTADO DE ESFUERZOS PRINCIPALES EN LA FACHADA OCCIDENTAL BAJO LA ESCALERA PRINCIPAL

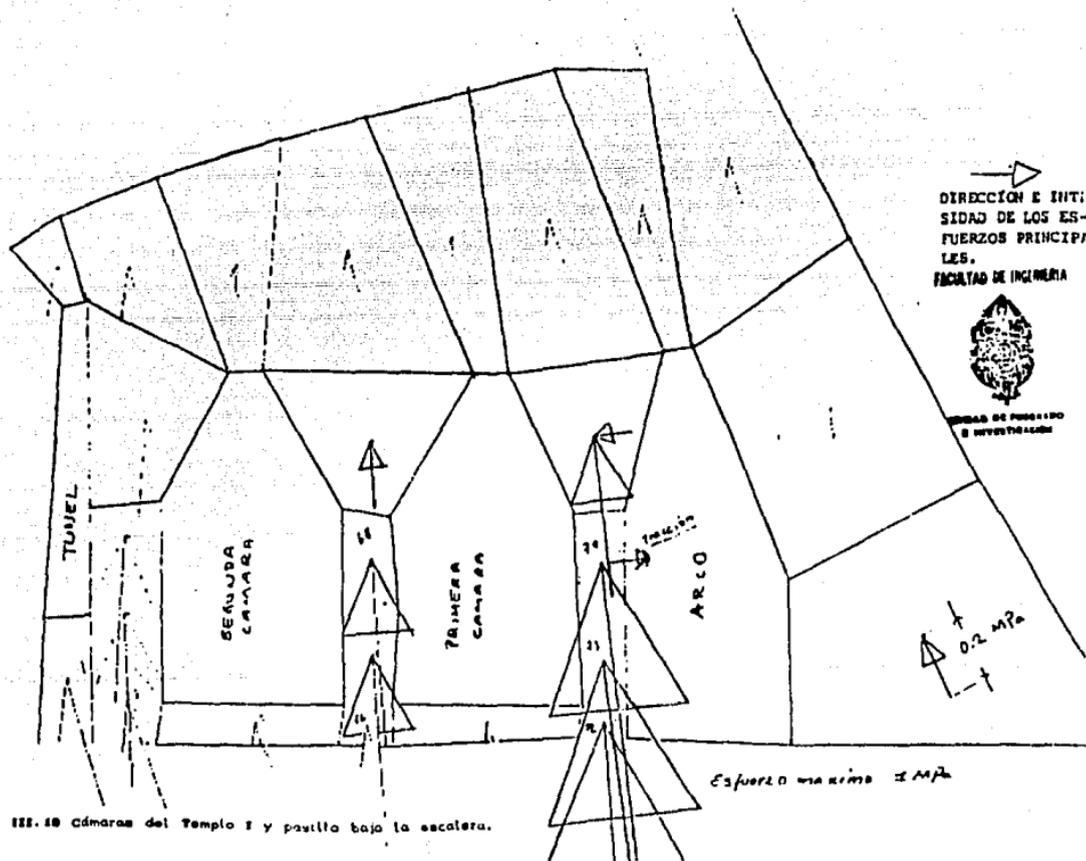
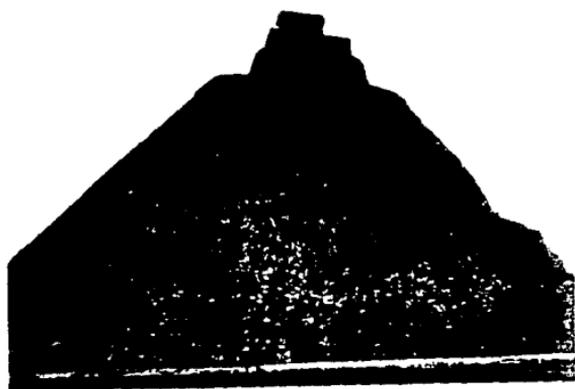


Fig. 122.18 Cámaras del Templo I y pasillo bajo la escalera.



ca)



cb)

Fig. III. 19 Agrisamientos en el lado Norte

a) Vista general

b) Vista del lado Norte, línea y esquina noroeste



Fig. III. 20 Cámara perpendicular norte. Muro frontal.
Atrás se aprecia parte del relleno



Fig. III. 21 Muro frontal desplomado en la
cámara perpendicular norte



Fig. III. 22 Esquina noroeste



Fig. III. 23 Agrietamientos entre relleno y muros
Cámara I, Templo I



Fig. III.24 Templo I. Daños aparentes y apuntalamiento



Fig. III.25 Deformación de los
muros

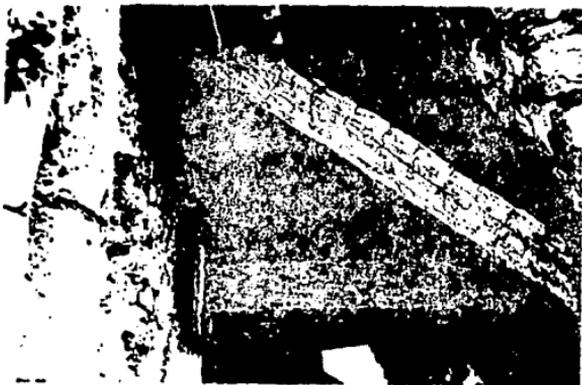


Fig. III.26 Muros deformados por aplastamiento



Fig. III.27 Agrietamientos en el dintel de la cámara 4

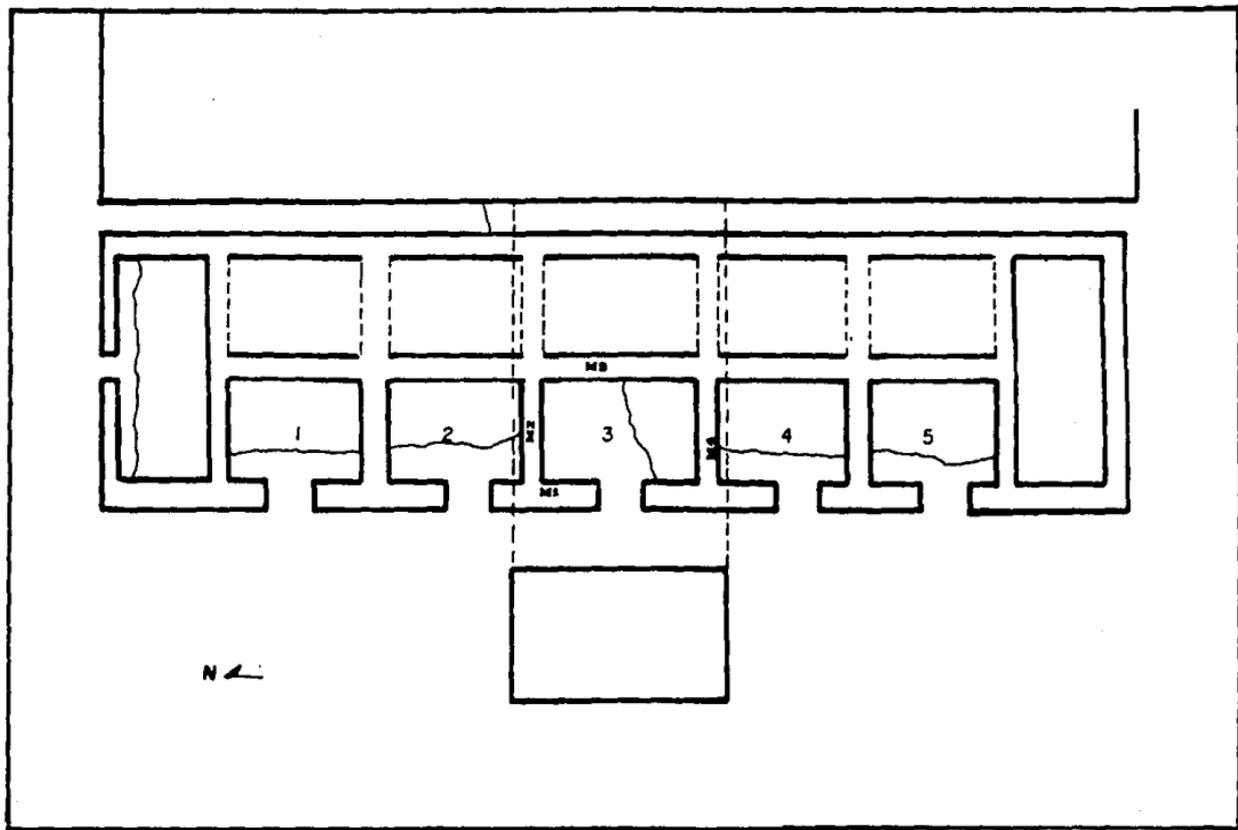


Fig. III.28a CAMARAS DEL TEMPLO I

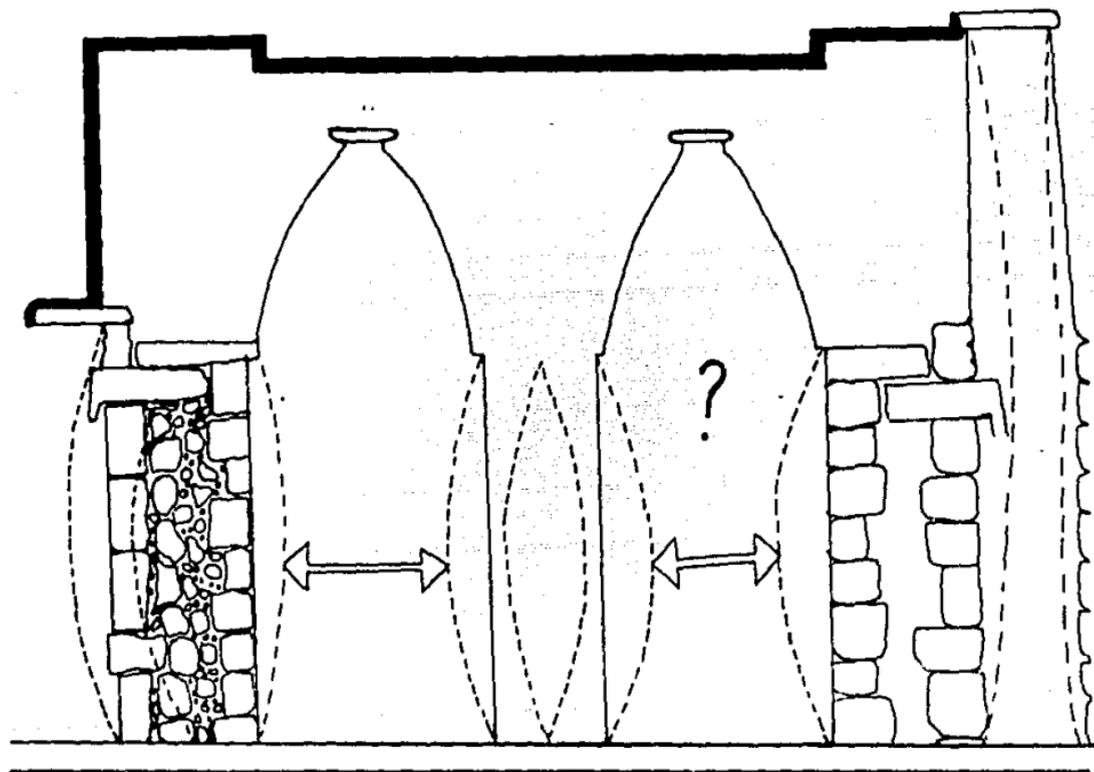


Fig. III. 26b Cámara central, Templo I. Corie



Fig. III. 29 Esquina noroeste. Vista general



Fig. III. 30 Esquina noroeste.
Acercamiento

IV PROPUESTA DE REPARACION

"... La historia de una forma plástica es cambiante e imprevisible, como lo es, también, la historia emocional del hombre ..."

Martha Poncecarrada

IV.1 Generalidades

El análisis de daños expuesto en el capítulo anterior hace necesario un estudio del estado de esfuerzos de la pirámide. Se ha utilizado para ello el paquete de análisis estructural SAP80 (Structural Analysis Programs).

El paquete SAP80, realizado en lenguaje FORTRAN-77, puede ser usado en una computadora con 256K de memoria que cuente con un disco duro de 10 MB; su límite son aproximadamente 3000 ecuaciones. (1)

SAP80 tiene opciones de análisis estático y dinámico, en dos o tres dimensiones. Pueden incluirse varias condiciones de carga diferentes para una misma estructura.

La determinación de la geometría básica de la estructura se realiza usando nodos. Cada nodo tiene un número de identificación único asociado a tres coordenadas que lo sitúan en el espacio. Es necesario además especificar sus grados de libertad (desplazamientos y giros) con respecto a un sistema coordenado de ejes. Se considera que un

grado es inactivo cuando es nulo; en caso contrario, es un grado de libertad activo.

Los nodos se relacionan definiendo elementos estructurales que los conectan. Cada uno de estos elementos debe tener un número de identificación único.

El programa considera básicamente 2 tipos de elementos: los elementos tipo BARRA y los elementos tipo PLACA.

Los elementos tipo BARRA se usan para modelar armaduras y marcos, bidimensionales o tridimensionales. Los elementos tipo PLACA modelan losas, cascarones, membranas. Ambos tipos de elementos pueden combinarse.

El análisis estático realizado por SAP80 soluciona un sistema de ecuaciones lineales de la forma

$$K U = R$$

donde:

- K = Matriz de rigideces
- U = Vector de desplazamientos
- R = Vector de cargas aplicadas

Para los elementos BARRA pueden analizarse condiciones como:

- Cargas por peso propio
- Cargas uniformemente repartidas
- Cargas concentradas
- Cargas por efectos de temperatura
- Cargas por efectos de presfuerzo

En elementos tipo PLACA pueden incluirse las condiciones siguientes:

- Cargas por peso propio
- Cargas distribuidas por unidad de área
- Cargas por efectos de temperatura

En ambos casos se pueden además establecer fuerzas o desplazamientos específicos.

Adicionalmente es necesario proporcionar ciertos parámetros que indiquen las características de los materiales como el peso volumétrico, el módulo de elasticidad, etc.

Con respecto al sistema de unidades, el programa no tiene ninguno predeterminado, por lo que los datos pueden ser proporcionados en las unidades que se consideren más adecuadas, siempre y cuando se mantenga congruencia entre ellas.

El paquete SAP80 es un conjunto de programas que se ejecutan siguiendo una secuencia predefinida, por bloques. Están relacionados mediante archivos internos que constituyen una base de datos y son ejecutados uno por uno.

La secuencia de ejecución se muestra en la fig. IV.1. Cada bloque cumple con funciones específicas:

BLOQUE

FUNCIONES

1) SAP80

- Inicialización del sistema

- Procesamiento de datos relacionados con nodos
- 2) PLOT - Graficación del modelo
- 3) FRAME - Rigidez de los miembros tipo BARRA
- 4) QUAD - Rigidez de los miembros tipo PLACA
- 5) SOLVE1 - Bloque de rigideces
- Ensamble de rigideces y cargas
- 6) SOLVE2 - Solución de ecuaciones
- 7) SOLVE3 - Obtención de desplazamientos
- Obtención de reacciones
- 8) EIGEN - Solución de valores característicos
- 9) SPEC - Dinámica del espectro de respuesta
- 10) FORCES - Obtención de esfuerzos en los elementos tipo BARRA
- 11) QUADF - Obtención de esfuerzos en los elementos tipo PLACA
- 12) RECALL - Reinicio
- 13) SAPOUT - Impresión de resultados

IV.2 Datos de alimentación del paquete

En el caso de la pirámide del Adivino, se optó por un análisis de tipo estático plano para una sola condición de carga: peso propio. Se utilizaron elementos tipo PLACA, generando una malla con 90 nodos y 83 elementos. Se restringió cualquier giro o desplazamiento en la base, permitiéndolos en cambio en el resto de la estructura.

Con respecto a las unidades, se utilizaron el kilogramo-fuerza ($1 \text{ kg}_f \approx 9.81 \text{ N}$) para las dimensiones de fuerza y el metro (m) para las dimensiones de longitud.

La falta de un estudio de mecánica de suelos se ha hecho patente en la carencia de datos relacionados con las propiedades de los materiales. Por ello, el análisis que se presenta a continuación pretende proponer una metodología; los resultados son válidos sólo como órdenes de magnitud. Para que tales resultados sean más cercanos a la realidad es imperativo realizar estudios que determinen, entre otras propiedades, el peso volumétrico de los materiales, su grado de saturación, su contenido de humedad, su relación de vacíos; así mismo, su resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, etc.

De acuerdo a información obtenida de modo personal en la Universidad Autónoma de Yucatán, el peso volumétrico del material de relleno de la pirámide es de $1.7 \text{ t}_f/\text{m}^3$ ($\approx 16.7 \text{ kN/m}^3$) según pruebas realizadas sobre muestras de ese material. Sin embargo, este valor es bajo si se toman en cuenta las condiciones de humedad en que se encuentra la estructura. Por tanto, es probable que el dato corresponda al peso volumétrico seco del material, y debe entonces ser incrementado para tomar en cuenta también el peso del agua.

El material de la pirámide puede considerarse como un suelo compacto. En un suelo, se distinguen 3 fases constituyentes: una sólida, una líquida y una gaseosa, como se muestra en la figura IV.2 (2). La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo; la fase líquida, por el agua libre; la fase gaseosa, por el aire. Aunque en la fase líquida pueden existir otros líquidos además

del agua, y del mismo modo, en la fase gaseosa pueden estar presentes otros gases, su proporción suele ser mínima y, para fines prácticos, se desprecian.

En Mecánica de Suelos, a partir de pesos y volúmenes obtenidos en laboratorio se establecen relaciones volumétricas, es decir, relaciones entre el peso y el volumen de las distintas fases del suelo. Con este objeto, una muestra de suelo se representa como en la fig. IV.2.

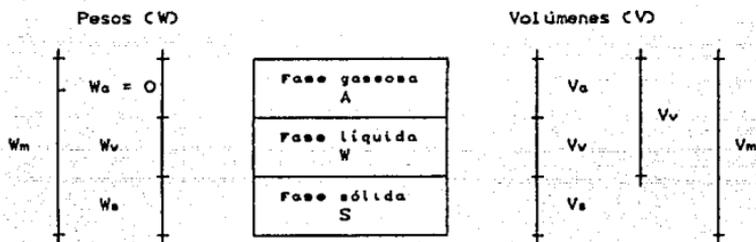


Fig. IV.2 Partes constitutivas de un suelo

Donde:

V_m = Volumen total de la muestra de suelo (Volumen de la masa)

V_s = Volumen de la fase sólida de la muestra (Volumen de sólidos)

V_v = Volumen de los vacíos de la muestra de suelo (Volumen de vacíos)

V_v = Volumen de la fase líquida contenida en la muestra (Volumen de agua)

V_a = Volumen de la fase gaseosa de la muestra (Volumen de aire)

W_m = Peso total de la muestra del suelo (Peso de la masa)

W_s = Peso de la fase sólida de la muestra de suelo (Peso de los sólidos)

W_w = Peso de la fase líquida de la muestra de suelo (Peso del agua)

W_a = Peso de la fase gaseosa de la muestra de suelo (Convencionalmente considerado como nulo en Mecánica de Suelos)

Entre las relaciones fundamentales establecidas es importante destacar:

a) Relación de vacíos (e)

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \dots (1)$$

b) Grado de saturación (G_v)

$$G_v = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad \dots (2)$$

c) Contenido de agua o humedad (w)

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

d) Peso específico relativo de sólidos (S_e)

$$S_e = \frac{\gamma_s}{\gamma_o} \quad \dots (3)$$

donde

γ_s = Peso específico de la fase sólida

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

γ_o = Peso específico del agua destilada, a 4 °C de temperatura y a la presión atmosférica correspondiente al nivel del mar. Su valor es de $1 \text{ t}_f/\text{m}^3$ ($9.8 \text{ kN}/\text{m}^3$)

Para un suelo seco, la fase líquida no existe:

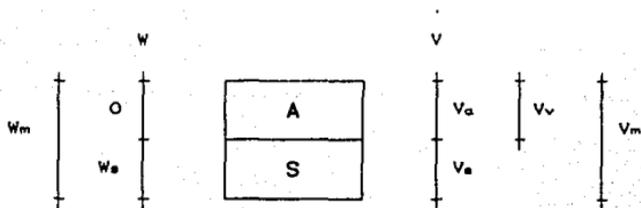


Fig. IV.3 Partes constitutivas de un suelo seco

Entonces.

$$\gamma_m = \gamma_d = \frac{W_s}{V_s + V_v} \quad \dots (5)$$

γ_d = Peso volumétrico seco

Dividiendo entre V_s .

$$\gamma_d = \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}}$$

Sustituyendo (1) y (3).

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

Dividiendo ahora entre γ_o .

$$\gamma_d = \frac{\frac{\gamma_s}{\gamma_o}}{\frac{1 + e}{\gamma_o}}$$

Pero $S_a = \frac{\gamma_s}{\gamma_o}$ y entonces.

$$\gamma_d = \frac{S_a \gamma_o}{1 + e} \quad \dots (6)$$

En un suelo parcialmente saturado,

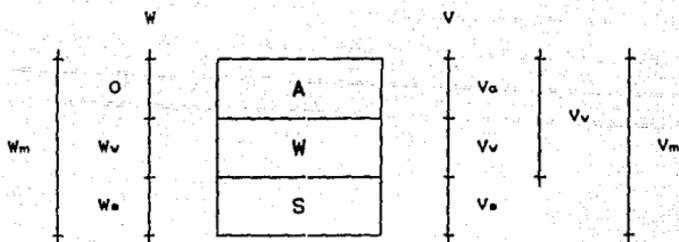


Fig. IV.4 Partes constitutivas de un suelo parcialmente saturado

Del esquema,

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} = \frac{W_v + W_s}{V_s + V_v} \quad \dots (7)$$

Pero

$$\gamma_v = \frac{W_v}{V_v} \quad \rightarrow \quad W_v = V_v \gamma_v$$

donde

γ_v = Peso específico del agua en las condiciones reales de trabajo. En general se usa un valor de $1 \text{ t}_f/\text{m}^3$ ($9.81 \text{ kN}/\text{m}^3$).

Sustituyendo esta expresión en (7),

$$\gamma_m = \frac{V_v \gamma_v}{V_s + V_v} + \frac{W_s}{V_s + V_v}$$

De (5) y (6),

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_v + V_s} = \frac{S_s}{V_s + V_v}$$

Dividiendo ahora entre V_v ,

$$\gamma_m = \frac{\frac{V_v}{V_v} \gamma_v}{\frac{V_s + V_v}{V_v}} + \frac{S_s + \gamma_o}{1 + e}$$

Sustituyendo (1) y (2) en la expresión anterior,

$$\gamma_m = \frac{G_v \gamma_v}{\frac{1}{e} + 1} + \frac{S_s \gamma_o}{1 + e}$$

$$\gamma_m = \frac{G_v \gamma_v e}{1 + e} + \frac{S_s \gamma_o}{1 + e}$$

$$\gamma_m = \frac{G_v \gamma_v e + S_s \gamma_o}{1 + e} \quad \dots(8)$$

Para el material de la pirámide,

$$\gamma_d = 1.70 \text{ t}_f/\text{m}^3 \text{ (16.68 kN/m}^3\text{)}$$

$$e = 0.35 \text{ (correspondiente a una arena compacta)}$$

$$\gamma_o = 1.00 \text{ t}_f/\text{m}^3 \text{ (9.81 kN/m}^3\text{)}$$

De la expresión (8) puede despejarse el valor de S_s :

$$\gamma_d = \frac{S_s \gamma_o}{1 + e}$$

$$S_s = \frac{\gamma_d (1 + e)}{\gamma_o}$$

$$S_e = \frac{(1.7)(1.0 + 0.35)}{1.0}$$

$$S_e = 2.3$$

Considerando que el material está saturado al 50%, y aplicando la expresión (8):

$$\gamma_m = \frac{G_v \gamma_v e + S_e \gamma_o}{1 + e}$$

Con

$$G_v = 50\% = 0.50$$

$$\gamma_v = 1.00 \text{ t}_f/\text{m}^3 \text{ (9.81 kN/m}^3\text{)}$$

$$e = 0.35$$

$$S_e = 2.30$$

$$\gamma_o = 1.00 \text{ t}_f/\text{m}^3 \text{ (9.81 kN/m}^3\text{)}$$

$$\gamma_m = \frac{(0.50)(1.00)(0.35) + (2.3)(1.00)}{1 + 0.35}$$

Por tanto,

$$\gamma_m = 1.833 \text{ t}_f/\text{m}^3$$

$$\gamma_m = 17.98 \text{ kN/m}^3$$

De este modo, en el paquete de análisis SAP80 se ha usado el valor $\gamma_m = 1833 \text{ kg}_f/\text{m}^3$ ($\gamma_m \approx 17981 \text{ N/m}^3$) como peso volumétrico de la pirámide.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

IV.3 Resultados

Los resultados del análisis de la pirámide se muestran en las figuras IV.5 y IV.6. En la primera aparece la configuración de la estructura antes de sujetarla a carga. En la siguiente se aprecian las deformaciones bajo la condición de peso propio. Las zonas más afectadas corresponden a la cámara bajo la escalera y al túnel, donde se concentran los mayores esfuerzos y, consecuentemente, las máximas deformaciones (Fig. IV.7, IV.8 y IV.9). El comportamiento general obtenido del análisis estructural concuerda con los daños detectados en el monumento: empujes laterales en el túnel, que han disminuido sus dimensiones y compresiones excesivas en la cámara central, que han afectado los muros del recinto, particularmente el que separa la cámara del pasillo.

Reuniendo estos resultados con los del análisis de daños, la atención se centra en 4 zonas de la pirámide:

- La cámara central del Templo I
- El túnel en la parte posterior del Templo I
- La esquina noroeste
- El lado norte

IV.4 Propuesta de reparación

En el caso de la cámara, se requiere proporcionar a los muros la resistencia suficiente para que puedan soportar las descargas que

reciben. Para ello, se sugiere introducir muros de concreto rigidizados con barras de acero. Al trabajar a tensión, las barras impiden deformaciones laterales, mientras que los muros toman las compresiones y además distribuyen uniformemente los esfuerzos (Fig. IV.10). El uso de elementos prefabricados de concreto permitiría una mayor velocidad en la ejecución del trabajo. Un recubrimiento de concreto lanzado es recomendable para proteger la bóveda. Como complemento, es necesario colocar puertas de madera en los accesos al pasillo bajo la escalera, de manera que los muros no sean visibles al público y se altere lo menos posible el aspecto general del monumento. Considerando que el Instituto Nacional de Antropología está dispuesto a rellenar la cámara e impedir la circulación por el pasillo, las puertas pueden cumplir tal función, como ya ha ocurrido en alguna etapa de la vida de la pirámide.

En el túnel, la introducción de armaduras de acero contraventeadas es una alternativa que permite proporcionarle el soporte que requiere y restringir el movimiento provocado por los empujes, funcionando como lo hacen los ademes en los túneles convencionales (Fig. IV.11). Resulta conveniente además colocar una puerta en el acceso que proteja el interior del túnel de la acción de los agentes naturales.

La colocación de los elementos de refuerzo antes descritos deben lograr que disminuya e inclusive llegue a desaparecer la inestabilidad de la esquina noroeste, por el soporte que le proporcionarán las armaduras. En caso de que esto no sucediera, sería necesario introducir posteriormente algún elemento de refuerzo adicional.

Finalmente, en el lado norte de la pirámide se requiere aplicar inyecciones de mortero que sellen los agrietamientos de manera definitiva, devolviendo a la estructura su continuidad. Cabe remarcar en este punto la importancia de mantener el aspecto del monumento, tratando de que los últimos centímetros de inyección, que serán los aparentes, tengan un acabado similar al del resto de la pirámide.

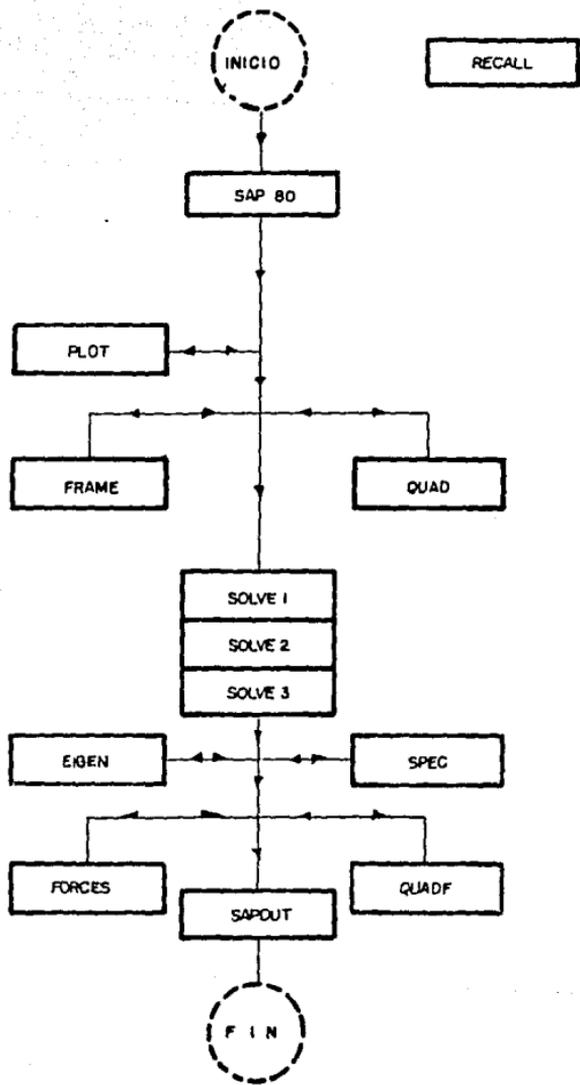


Fig. IV.4 Estructura del programa SAP80

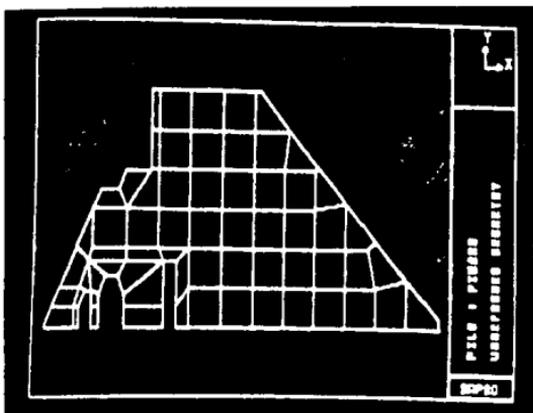


Fig. IV.5 Pirámide del Adivino. Configuración inicial

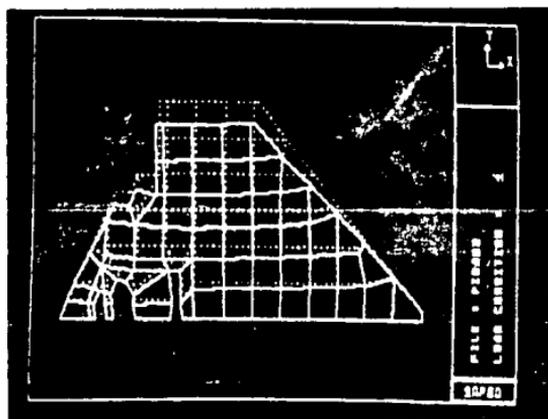


Fig. IV.6 Pirámide del Adivino. Comportamiento bajo carga

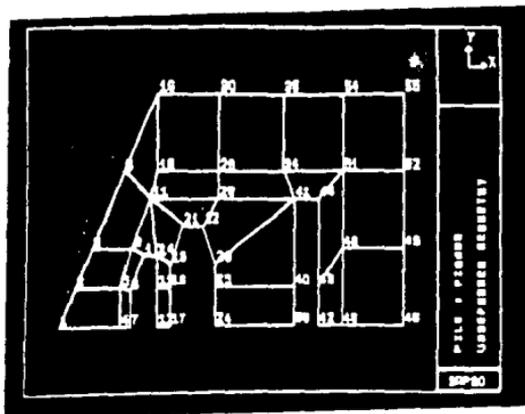


Fig. IV.7 Pirámide del Adivino. Lado Puente

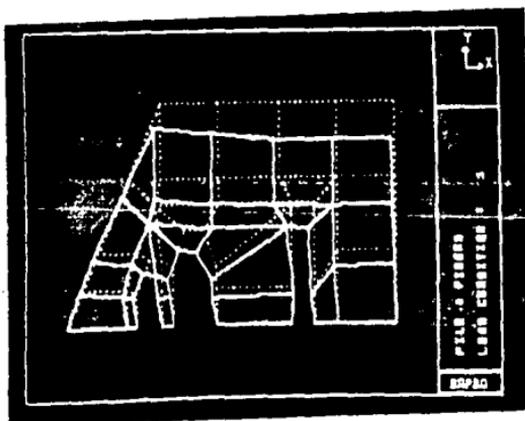


Fig. IV.8 Lado puente. Deformaciones bajo carga por peso propio

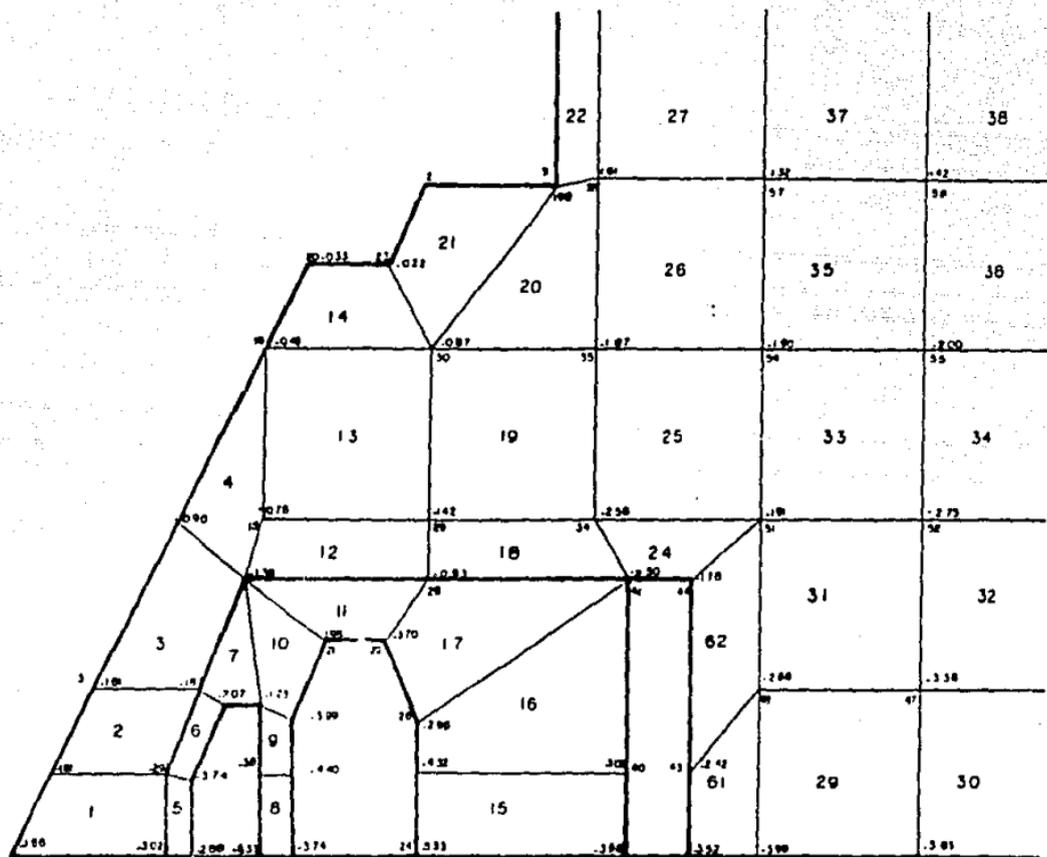


Fig. IV. P Esfuerzos máximos, dirección Y

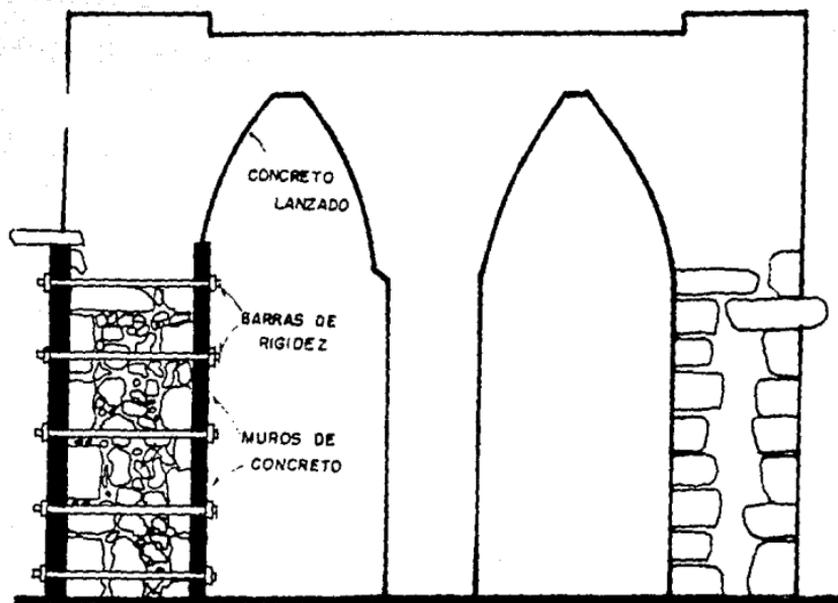


Fig. IV.10 PROPUESTA DE REFUERZO PARA MUROS
CAMARA CENTRAL TEMPLO I

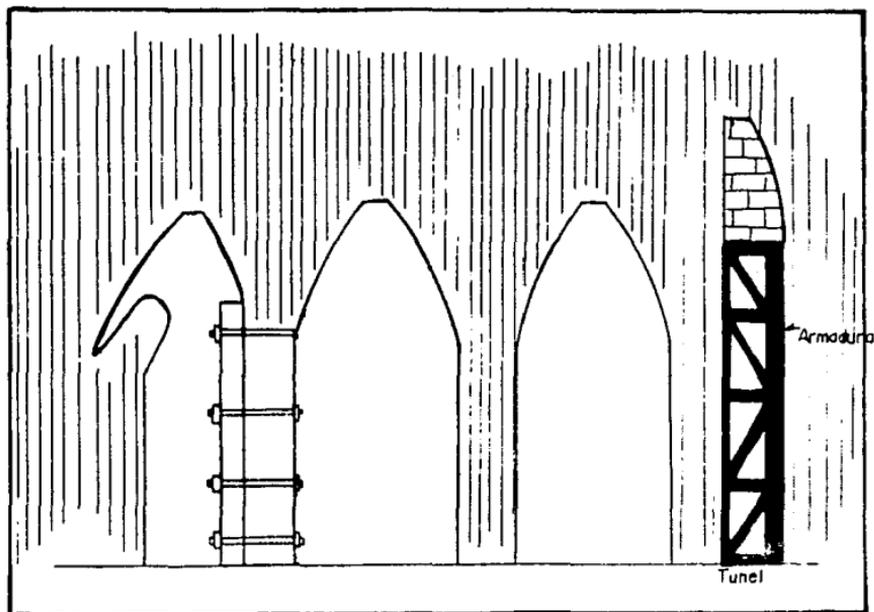


Fig. IV.11 PROPUESTA DE REPARACION PARA EL TUNEL

V DISEÑO DE ELEMENTOS DE REFUERZO

"... La estructura formal de la realidad tiene significación válida si el hombre la pasa por el tamiz de su propia conciencia afectiva, y la devuelve al mundo exterior transformada en símbolo artístico".

Martha Foncerrada

La propuesta de solución que se ha planteado contempla la introducción de muros y barras para la cámara central, y de armaduras de acero en el túnel. En la fig. V.1 se señala la distribución sugerida de tales elementos, misma que se discute a continuación.

V.1 Cámara central, Templo I

Los muros a, b y c de la cámara (Fig.V.1) son los más dañados, por lo que resulta indispensable adosar muros de concreto sobre ellos, de modo que sean estos últimos los que reciban las descargas. En los casos a y c, pueden colocarse a ambos lados del muro original. Dado que se tiene el propósito de impedir el paso bajo la escalera oriente, los muros no serán visibles. De cualquier manera debe pensarse en procurar un recubrimiento de tipo prehispánico.

En el caso del muro b sólo puede colocarse un elemento de

concreto, por el lado interior de la cámara, pues el otro lado da al exterior de la pirámide. El muro d, por su parte, ha quedado relativamente protegido de los daños porque una parte del relleno original de la cámara no fue retirado y le sirvió como refuerzo. Sin embargo, se aprecian algunas alteraciones en la cámara contigua, y sería preferible retirar el relleno y colocar un muro. Por el otro lado (en la cámara contigua) también resulta conveniente extraer el relleno, o al menos una parte, y colocar un muro de concreto, de manera que se establezca toda la zona aledaña al problema. Con respecto a los muros f y g, los elementos de concreto deben colocarse sólo en el interior de la cámara por la misma razón que el muro b (preservación de la estética general del monumento).

Las barras de acero tienen la finalidad de rigidizar los muros, por lo que deben colocarse perpendiculares a ellos. Es necesario que se introduzcan como elementos de refuerzo en todos los muros originales, aún cuando sólo se les haya adosado muro de concreto por un lado.

Para la bóveda, cuyos principales daños estructurales consisten en agrietamientos y separación de piezas, la solución más conveniente es la aplicación de una capa de concreto lanzado (cabe considerar un recubrimiento de este tipo también en la cámara vecina a la central). El proceso, comentado en el capítulo II, consiste en lanzar concreto a presión sobre una superficie, de modo que quede adherido y firmemente compactado por la velocidad y fuerza con que es expulsado y porque es un material sin revenimiento. Esta técnica es especialmente adecuada en secciones relativamente delgadas (cascarones, muros, tanques) y, en

términos generales, en recubrimientos y reparaciones. En general se aplica en capas de 2.5 a 4 cm de espesor que se colocan sucesivamente hasta obtener el espesor total, que puede llegar a ser de 10 cm. Según el equipo empleado pueden colocarse entre 2 y 6 m de concreto por día. El proporcionamiento de una mezcla normal es de una parte de concreto por 3 de arena con tamaños máximos de $\frac{1}{4}$ " (0.65 cm) a $\frac{3}{8}$ " (0.95 cm), aunque también se utilizan relaciones de 1 a 4, con agregados máximos de $\frac{3}{4}$ " (1.90 cm). La proporción más común de agua es de 22 litros (0.022 m³) por saco de cemento. (1)

V.1.1 Diseño de muros

El muro está sometido básicamente a carga axial, ya que los tensores que se colocan perpendicularmente lo rigidizan.

El diseño consiste entonces en determinar el espesor, dada la resistencia del concreto y la carga axial actuante.

Sea

Fig. V.2 Muro

donde

$$A = B t$$

$$P_u = FR f'_c A \dots (1)$$

A = Area transversal

P_u = Carga última

FR = Factor de reducción

Si

$$P_u = FC P_n \dots (2)$$

$$f'_c = 0.85 f'_c$$

$$f'_c = 0.80 f'_c$$

P_n = carga determinada en el análisis

FC = factor de carga

f'_c = resistencia a compresión del concreto

Del análisis se obtuvo un estado de esfuerzos promedio de 4.54 kg_f/cm^2 (445 kPa) actuando en la base. Por tanto, P_n estará dada por:

$$P_n = (4.54 \text{ kg}_f/\text{cm}^2)(80 \text{ cm})(100 \text{ cm})$$

$$P_n = 36\,300 \text{ kg}_f$$

$$P_n = 36.3 \text{ t}_f (\approx 356 \text{ kN})$$

Iguando (1) y (2).

$$FR f'_c A = FC P_n$$

$$FR f_c'' B t = FC P_n$$

Despejando t se tiene

$$t = \frac{FC P_n}{FR f_c'' B}$$

Considerando

$$FC = 1.4$$

$$FR = 0.7 \text{ (falla por aplastamiento)}$$

$$f_c' = 200 \text{ kg}_f/\text{cm}^2 \text{ (}\approx 19.62 \text{ MPa)}$$

$$f_c'' = 136 \text{ kg}_f/\text{cm}^2 \text{ (}\approx 13.34 \text{ MPa)}$$

$$B = 100 \text{ cm}$$

se tiene que

$$t = \frac{(1.4)(36\ 300)}{(0.7)(136)(100)}$$

$$t = 5.34 \text{ cm}$$

El muro deberá llevar el refuerzo mínimo especificado en el RCDF-87 (2), que señala que para el caso de muros las cuantías de refuerzo horizontal y vertical en cada dirección no serán menores que 0.0025. El refuerzo se coloca uniformemente, con separación no mayor de 35 cm. Si se supone un recubrimiento de 5 cm a cada lado de la malla, el

espesor t final del muro será

$$t = 10 \text{ cm}$$

V.1.2 Barras de rigidez del muro

En este caso es necesario calcular la separación entre barras, dada por el pandeo en el muro:

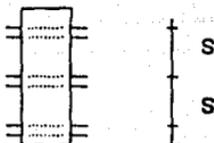


Fig. V.2 Barras de rigidez

$$SI \quad \frac{k S}{r} < 22 \quad \Rightarrow \quad S = \frac{22 r}{k}$$

donde

k = factor de longitud efectiva. En este caso, suponiendo articulación en los extremos, $k = 1.0$

r = radio de giro = $0.3 t$

S = longitud

$$\frac{k S}{r} = \text{relación de esbeltez}$$

Entonces

$$r = 0.3 t = 0.3 (10 \text{ cm}) = 3 \text{ cm}$$

Por tanto,

$$S = \frac{(22)(3)}{1} = 66 \text{ cm} \approx 60 \text{ cm}$$

$$S = 60 \text{ cm}$$

Las barras se pueden tensar hasta $0.6f_y$, con $f_y = 2500 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ ($\approx 245 \text{ MPa}$).

V.2 Túnel

En esta parte es necesario impedir que continúe el movimiento y se requiere proporcionar estabilidad a la zona: Una armadura contraventeada puede cumplir ambas funciones; las condiciones del clima hacen que sea recomendable usar acero.

V.2.1 Diseño de la armadura

Del análisis se pueden obtener las fuerzas que actúan sobre

la armadura (fig. V.4). En este caso $\sigma_x = 1.5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ (147 kPa)

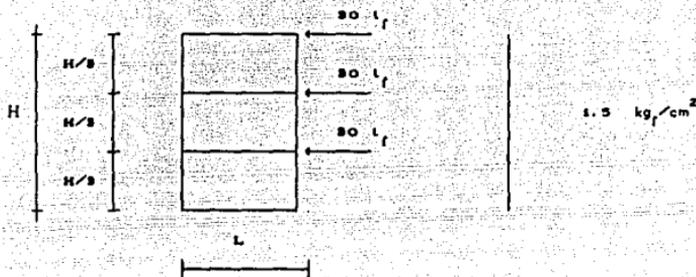


Fig. V.4 Armadura

$$P = \sigma_x H (500 \text{ cm})$$

$$P = (1.5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2)(500 \text{ cm})(500 \text{ cm})$$

$$P = 45 \text{ 000 kg}_f$$

$$P = 45 \text{ t}_f (\approx 441 \text{ kN})$$

El diseño consiste en dimensionar los elementos para las fuerzas laterales actuantes puesto que es el empuje lateral de la material el que provoca la tendencia de la pirámide a cerrarse.

Para $H = 6.0 \text{ m}$ y $L = 1.5 \text{ m}$, y considerando un esfuerzo permisible en tensión y compresión de $0.6f_y$, se requerirían áreas de aproximadamente 21 cm^2 , mismas que podrían solucionarse con ángulos de acero de $4 \times 7/16''$.

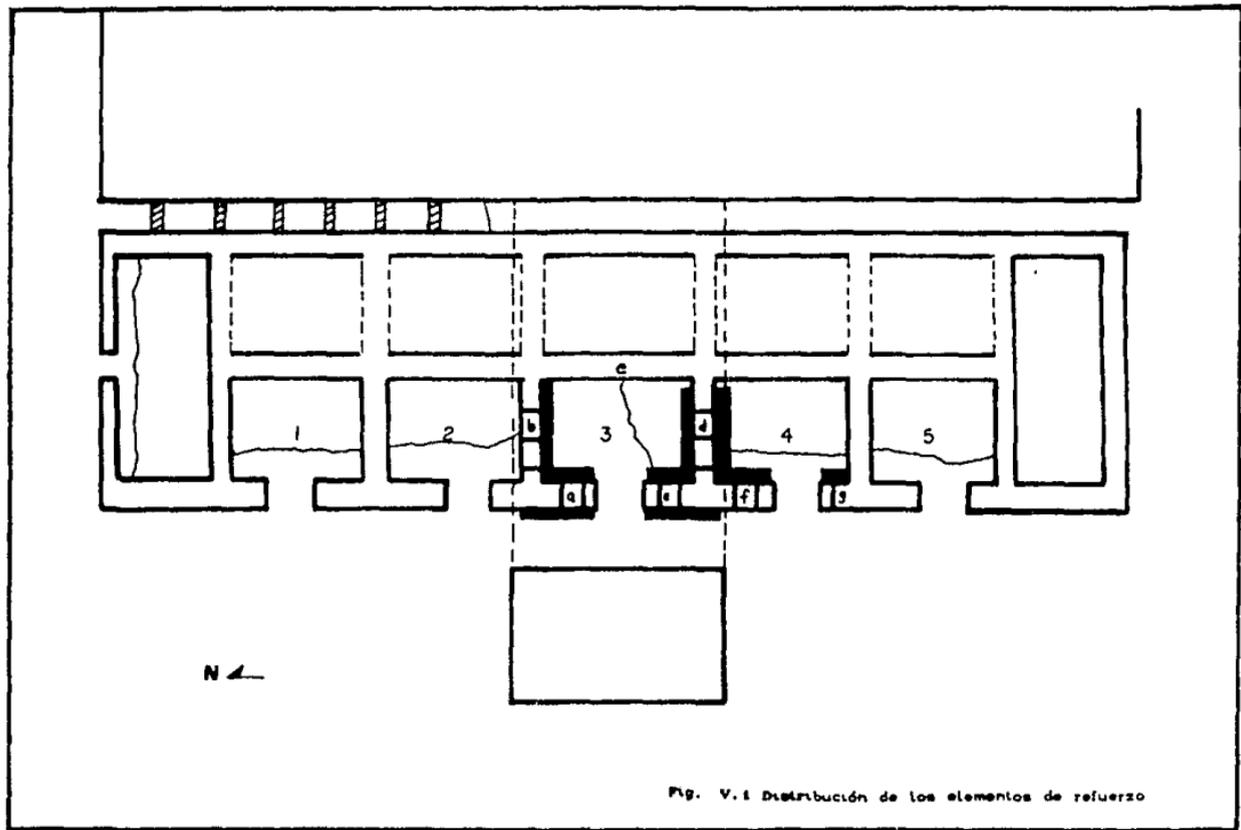


Fig. V.1 Distribución de los elementos de refuerzo

143

CAMARAS DEL TEMPLO I

VI CONCLUSIONES

"... La forma plástica no es fórmula matemática, símbolo preciso y práctico que el hombre construye para organizar su actividad conceptual.

La fórmula plástica está vinculada a un aspecto más profundo, vital y totalizador de la conciencia: el de su sensibilidad".

Martha Focerrada

A través del desarrollo de esta tesis ha sido posible llegar a las conclusiones siguientes:

1) La reparación de estructuras es un proceso que consta de varias etapas:

- Revisión visual de la estructura y selección de medidas de emergencia.
- Estudios de campo y laboratorio.
- Análisis de daños.
- Planteamiento de una solución.

2) Las técnicas comúnmente utilizadas por la ingeniería civil para la reparación de estructuras son:

- Aplicación de resinas epóxicas.
- Uso de anclajes.

- Introducción de elementos de concreto.

- Concreto lanzado.

En el mundo existen ejemplos de aplicación de cada una de estas técnicas con variantes propias según la estructura y las condiciones generales del problema (factores climáticos, económicos, sociales; importancia de la estructura, etc.). Se han empleado en túneles, presas y almacenamientos en general, en puentes, carreteras y otras estructuras, siendo especialmente interesantes las reparaciones de monumentos históricos como el acueducto de Segovia, en España, y las operaciones de salvamento arqueológico de los templos de las márgenes del río Nilo, en particular para Abu-Simbel y Amada.

3) La pirámide del Adivino, majestuoso monumento ubicado en la prehispánica Uxmal, es una de las principales manifestaciones arquitectónicas mayas de la península de Yucatán. Es el resultado de la superposición de 5 etapas constructivas, de las cuales la más antigua (Templo I) corresponde al año 569 ± 50 D.C.

El medio natural circundante está constituido esencialmente por formaciones geológicas de tipo calizo. El paso de corrientes subterráneas a través de ellas ha generado un número considerable de cavernas que, en algunos casos, han servido como depósitos naturales de "sahcab". Tanto este material, de tipo arcilloso, como las rocas calizas son los materiales de construcción característicos de la zona.

En cuanto al clima, es cálido (temperaturas mayores de 18°C) con lluvias escasas pero intensas (800 mm de lámina de agua anuales).

provocadas generalmente por huracanes y cisiones.

4) Los templos y edificios mayas se construyeron siguiendo los mismos lineamientos que en la edificación de las casas, pero cambiando los tipos de materiales por otros que fueran perdurables. De este modo, los muros se realizaban colocando un relleno aglutinante entre dos hileras de bloques tallados. Por su parte, las bóvedas nunca se aprovecharon como descubrimiento tecnológico, solamente se concibieron como la petrificación del típico techo de 2 aguas.

Antes de realizar modificaciones a un templo, o de superponerle una nueva etapa, los mayas cuidaron de rellenar las cámaras que ya no serían utilizadas.

5) Los daños que presenta la pirámide del Adivino son el reflejo de:

- Casi 400 años de total abandono (desde algunos años antes de la llegada de los españoles hasta la tercera década de nuestro siglo).
- Las temporadas de exploración arqueológica (a partir de 1936), que, si bien han permitido la realización de importantes descubrimientos, no siempre han cuidado la estabilidad de la estructura, provocando que se generen redistribuciones de esfuerzos. Así, en 1942 se abre un pasillo en el lado oriente para mostrar la etapa II que se encontraba oculta por las posteriores superposiciones mayas. Para que la crestería de este templo quedara visible, se deja abierta una excavación

de 1 m de profundidad a partir del nivel del piso en el Templo V; así se ha conservado hasta ahora. En 1971 se realiza una excavación de aproximadamente 19 m de longitud por 8 m de altura y 1.50 m de ancho, misma que permite realizar algunos descubrimientos, pero no es reforzada en modo alguno. En 1988 se retira el material de la cámara central del Templo I, una vez más sin introducir ningún tipo de refuerzo.

- Los efectos de los agentes naturales, en particular las altas temperaturas y la acción de ciclones y huracanes, que se traducen, por una parte, en fatiga de los materiales por cambios de temperatura, y por otra, en alteración de esos materiales y sus propiedades ante la acción corrosiva del agua.
- La falta de mantenimiento, en especial durante los últimos años.

6) De acuerdo con el punto anterior, las alteraciones que sufre la pirámide, detectadas por el Instituto Nacional de Antropología e Historia a fines de 1988, no pueden haber sido ocasionadas tan sólo por el huracán "Gilberto", aunque sus efectos sí empeoraron las precarias condiciones de la estructura, poniendo en riesgo su estabilidad.

7) Los estudios realizados por la Universidad Autónoma de Yucatán dejan claramente establecido que no existen cavernas bajo el área en

que se asienta la pirámide, descartándose así esta circunstancia como posible causante de las alteraciones.

B) Los fenómenos que se observan en la estructura son:

- Redistribución de esfuerzos en la cámara central del Templo I, generada al retirar el material de relleno y manifestada en la falla de los muros; dado que nunca fueron pensados como elementos de carga, su resistencia resultó insuficiente para las condiciones impuestas. Como reflejo de tal situación, los muros se han agrietado y han sufrido aplastamiento.
- Movimiento lento pero constante de la pirámide, mostrando tendencia a cerrar el túnel. En consecuencia, las paredes de la excavación se han curvado. El alto contenido de agua por su parte, ha provocado derrumbes en el interior.
- Deslizamiento de la esquina noroeste, a causa de la inestabilidad que le produce la falta de un apoyo, anteriormente proporcionado por el material que rellena el túnel. El talud deja ver ya su posible superficie de falla.
- Abundantes agrietamientos en el lado norte del monumento, cuyas longitudes (del orden de 15 m), aberturas (alrededor de 10 mm) y profundidades (más de 1 m) son de magnitudes considerables. Se generan con el movimiento de la pirámide, y la acción del agua contribuye a extenderlas.

C) Después de consultar a varios especialistas, el Instituto Nacional de Antropología e Historia decidió aceptar la sugerencia de

rellenar tanto la cámara central como el túnel. Esta solución resulta inconveniente porque:

- No responde a un análisis que haya determinado las causas de los daños contemplando el problema de manera global, sino que, por el contrario, se consideró a cada área en forma particular, sin relación con el resto de la estructura. Tampoco se consideró su evolución histórica, esto es, las transformaciones sufridas por la pirámide a lo largo de casi 1 500 años de vida.
- Al cerrar completamente los espacios, se hace imposible un seguimiento de la evolución de la estructura; cualquier posible problema posterior sólo se detectará cuando su avance sea considerable y llegue a manifestarse externamente.

10) Conocer la magnitud de los esfuerzos en diferentes puntos de la pirámide es posible a través de un análisis estructural y contando con un estudio de mecánica de suelos que determine propiedades de los materiales.

Para este caso se ha empleado un paquete de computadora, el SAP80 (Structural Analysis Programs). Sin embargo, la reducida información respecto a las propiedades de los materiales obliga a aclarar que el análisis presentado sólo debe considerarse como una propuesta del procedimiento a seguir, y los resultados son válidos como órdenes de magnitud más que como valores reales.

11) El análisis comprobó que las descargas sobre la cámara central

del Templo I son excesivas y que a ellas se deben las deformaciones y alteraciones ocurridas. En cuanto al túnel, la magnitud de los empujes laterales identificó la causa del movimiento de la pirámide. En ambos casos, la configuración de la estructura deformada del análisis fue cualitativamente similar a la real.

12) Para la reparación del monumento, se propone como solución alternativa la introducción de elementos de refuerzo:

- En la cámara central:

- Muros de concreto

- Barras de acero

- Concreto lanzado

Los muros de concreto (que podrían ser prefabricados para reducir el tiempo de ejecución), rigidizados por las barras de acero, deben adosarse a los muros originales (por ambos lados), tanto en la cámara central como en la contigua. Aunado a esto, deben colocarse puertas de madera que impidan el paso bajo la escalera y eviten que los muros (de 10cm de espesor) sean visibles. De este modo, no se altera el aspecto del monumento y además se protege a los muros. Las barras deben separarse 60 cm entre sí. Finalmente, un recubrimiento de concreto lanzado dentro de la cámara tiene la finalidad de proporcionar continuidad, al tiempo que protege y refuerza la bóveda.

- En el túnel:

- Armaduras de acero

Las armaduras de acero tienen la función de un ademe, es

decir, proporcionan soporte al tiempo que restringen el movimiento, hasta detenerlo.

- En el lado norte:

- Inyección con mortero convencional.

Mediante este procedimiento de inyección de las grietas se pretende devolver a la estructura su continuidad. Es necesario, naturalmente, poner especial atención en que se dé un acabado conveniente al trabajo, para conservar unidad en el aspecto general de la pirámide.

13) La solución adoptada por el Instituto Nacional de Antropología e Historia no resulta la más apropiada, ni la única. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que, como responsables del patrimonio a su cargo, los arqueólogos solicitaron la asesoría de personas calificadas en el área, arquitectos e ingenieros, y eligieron la propuesta que aparentaba ser la más conveniente. Quizás hubiera resultado más conveniente considerar una posible reunión de análisis entre los especialistas, de modo que se realizara una discusión técnica de las alternativas sugeridas.

14) La Ingeniería Civil tiene la posibilidad de ofrecer diversas posibilidades de reparación para los daños de cualquier estructura. La ingeniería civil mexicana, indudablemente una de las más reconocidas a nivel mundial, tiene además el compromiso de entablar, de manera urgente y a largo plazo, relaciones de trabajo interdisciplinarias con

arqueólogos e historiadores para la conservación de monumentos antiguos, patrimonio cultural del país, y uno de los más abundantes y admirados del mundo.

BIBLIOGRAFIA

I REFERENCIAS

CAPITULO I

1. - "Mérida, Yuc.". Congreso de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México.
2. -Ruz L'huillier, Alberto. "Los mayas de las tierras bajas". Salvat Mexicana de Ediciones. Historia de México Tomo 2. México, 1978. pp. 356-358.
3. -Stierlin, Henry. "Maya". Ediciones Garriga. España, 1964. pp. 47-48.
4. -Foncerrada de Molina, Martha. "La escultura arquitectónica en Uxmal". Instituto de Investigaciones Estéticas. UNAM. México, 1965. pp. 9-11.
5. -Foncerrada de Molina, Martha. Op. cit. pp. 35-43.
6. -Marquina, Ignacio. "Arquitectura prehispánica". INAH. 2a. ed. México, 1964. pp. 762-765.
7. -Foncerrada de Molina, Martha. Op. cit. p. 19.
8. -Navarrete, Carlos. "El mundo maya de Yucatán en el periodo posclásico" Salvat Mexicana de Ediciones. Historia de México, Tomo 3. México, 1978. pp. 667- 690.

CAPITULO II

1. -Chaudesaigues, Jean. "Renforcer ou reparer une structure?: pourquoi? comment?". Annales de L'Institut Technique de Batiment et des Travaux Publics. Francia. No.411 Janvier 1983. pp. 4-7. Serie: Technique Generale de la Construction 89.
2. -Logeais, Louis. "Connaissance de la structure existante: analyse"

et diagnostic; capacité portante avant et après réparation ou renforcement: Cas de bâtiment". Annales de L'Institut de Batiment et des Travaux Publics. Francia. No.411 Janvier 1983. pp. 8-18. Serie: Technique Generale de la Construction 89.

3. -Chaussin, Robert. "Eléments de décision d'acceptation ou réparation des fissures". Annales de L'Institut de Batiment et des Travaux Publics. Francia. pp.91-95.
4. -ACI Committee 503. "Use of epoxy compounds with concrete". American Concrete Institute. Estados Unidos 1973. 33 p.
5. -ASTM C-881-78 Standard Specification for epoxy-resin-base bonding systems for concrete. Philadelphia 04.02. Estados Unidos. pp. 548-572.
6. -Beemen, J.F. van. "Epoxy resins for concrete". New Zealand Concrete Construction. Nueva Zelanda. No.5 May 1980. pp.4-12.
7. -Letman, J.A. y P.C. Hewlett. "Concrete cracks- a statement and remedy". Concrete. Gran Bretaña. Vol.8 No.1 January 1974. pp. 30-34.
8. - "Araldite for injection work". CIBA-GEIGY. Inglaterra. 6p.
9. -Warner, James. "Epoxyes- 'miracle' materials don't always give miracle results". ASCE [CIVIL] Engineering. Estados Unidos Vol.48 No.2 February 1978. pp. 48-55.
10. -Fenoux, G.Y. y J.L.Portier. "La mise au précontrainte de tirants". Travaux. Francia. pp. 33-43.
11. -Cambefort, H. "Les ouvrages ancrés au sol". Travaux. Francia. Vol. 49 No.5 Mai 1985. pp. 834-847.
12. -Bello Maldonado, Arturo A. "Sistemas de soporte de excavaciones subterráneas mediante anclas de fricción". Artículo del Mes. Centro de Documentación Técnica, SCT. México. Mayo,1979. 23pp.
13. -Resse, Claude. "Utilisation de beton projeté pour les reparations et les renforcements des constructions en beton et maçonneries". Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. Francia. No.412 Fevrier 1983. pp.64-75.
14. - "Leaking Hong Kong Subway tunnel repaired by injection". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos Vol. 15 No.2 4th quarter, 1980. p.6.
15. - "Araldite. Sistemas de resina epoxi en la consolidación de túneles ferroviarios". CIBA GEIGY Aspects. España. No.3,1972. pp. 2-4.
16. - "Araldite in waterproofing a rail tunnel". CIBA GEIGY Technical Notes. Inglaterra. No.3, 1972. pp. 6-8.

17. -Buro, Michel. "Prestressed rock anchors and shotcrete for large underground powerhouse". ASCE Civil Engineering. Estados Unidos Vol.40 No.5 May 1970. pp. 60-64.
18. -Cecil, Owens S.III. "Shotcrete support in rock tunnels in Scandinavia". ASCE Civil Engineering. Estados Unidos. Vol. 40 No.1 January 1970. pp. 74-78.
19. -Bello Maldonado, Arturo A. *Op. cit.*
20. -Caron, C. "Injections spéciales: Réparation, consolidation, étanchéité". Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. Francia. Vol. 22 No.261 Septembre 1969. pp. 1308-1318.
21. -Petit, P, R. Serna, H. Navarro. "Réparation des fissures du barrage d'Erraguene (Algérie)". Francia. Vol.54 Juillet-Décembre 1971. pp. 34-37.
22. -Cambefort, H. *Op. cit.*
23. - "Reservoir tower repaired in Togo". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos. Vol. 15 No.2 4th quarter, 1980. p. 3.
24. - "Flood damaged reservoir restored by SCB Process". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos. Vol. 15 No.2 4th quarter, 1980. p. 7.
25. - "Structural concrete bonding restores ship-damaged bridge in Greece". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos. Vol. 14. No.3 4th quarter, 1979. p.4.
26. - "Cracks in Germany's tallest bridge restored by adhesive injection". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos. Vol. 15 No.2 4th quarter, 1980. p.2.
27. - "Polymer concrete achieves fast structural repair in San Fco. Airport taxiway". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos. Vol. 14 No.3 4th quarter, 1979. pp. 1-2.
28. - Caron, C. *Op. cit.*
29. -Thome, J. J. "Jefferson Davis Memorial repaired with structural concrete bonding". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos. Vol. 13 No.2 4th quarter, September 1978. p.3.
30. - "SCB injection restores integrity to stadium roof in Greece". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos. Vol. 15 No.2 4th quarter, 1980. p.4.

31. -Pizzetti, Giulio. "Restoring old buildings. Interpreting a concept of structural rigidity". Batiment International/Building Research and Practice. pp. 104-108.
32. -Suprenant, Bruce A. "Restoring old stone". The Magazine of Masonry Construction. Estados Unidos. Vol.2 No.6 June 1989. pp. 222-224.
33. - "Structural adhesives play critical role in Guatemala earthquake repairs". Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Estados Unidos. Vol. 15 No.2 4th quarter, 1980. p. 6.
34. - "Araldite in the Aqueduct of Segovia". CIBA GEIGY Technical Notes Inglaterra. No.6 1974. pp. 2-11.
35. -Caron, C. "Applications des résines synthétiques dans les travaux publics". Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. Francia. Vol.20 No.235-236 Juillet-Acut 1967. pp. 995-1018.
36. -Prevost, J. "Déplacement du Temple d'Amada". Travaux. Francia. Vol. 48 No.11 Novembre 1965. pp.596-598.

CAPITULO III

1. -Barrera Vázquez, Alfredo, Eduardo E. Ríos y otros. "Arte maya. Uxmal, Sayil, Labná, Kabah y Región Puuc". Editora del Sureste, México, 1981. pp. 94-105
2. -Foncerrada de Molina, Martha. "La escultura arquitectónica de Uxmal". Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM. México, 1985. pp. 153-163.
3. -Marquina, Ignacio. "Arquitectura prehispánica". Instituto Nacional de Antropología e Historia. 2a. ed. México, 1984. pp. 762-773.
4. -Ruz L'hullier, Alberto. "Los mayas de las tierras bajas". Historia de México Tomo 2. Salvat Mexicana de Ediciones. México, 1978. pp. 356-363.
5. -Stierlin, Henry. "Maya". Edit. Garriga. España, 1984. pp. 63-92.
6. -Stierlin, Henry. Op cit. pp. 94-98.
7. -Littmann, Edwin R. "Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos: the composition and origin of sascab". American Antiquity. Estados Unidos. Vol. XXIV No.2 October, 1958. pp. 172- 178.
8. -Stierlin, Henry. Op. cit. p. 96.

- 9.-Barrera V. Alfredo, Eduardo Ríos y otros. *Op. cit.*, pp. 37-80.
- 10.-Foncerrada de Molina, Martha. *Op. cit.* pp. 13-34.
- 11.-Informe de la visita de inspección practicada en los monumentos arqueológicos de Uxmal. Martínez H., Jorge. Informes del INAH. Tomo CLVIII (9/nov/1913).
- 12.-Informe acerca de la visita practicada a Uxmal. Martínez H., Jorge. Informes del INAH. Tomo CLVIII (31/mar/1914).
- 13.-Informe de la visita de inspección realizada en diciembre de 1917. Martínez Cantón, Jorge. Informes del INAH. Tomo CLVIII (10/feb/1918).
- 14.-Informe de la visita realizada ... Informes del INAH. Tomo CXLIV (3/dic/1919).
- 15.-Monografía de Uxmal. Noguera, Eduardo. Informes del INAH. Tomo CLVIII (18/ene/1922).
- 16.-Informe del estado actual de los principales edificios arqueológicos de Yucatán. Reygadas Vértiz, José. Informes del INAH. Tomo CXLIII (mar/1926).
- 17.-Informe de derrumbes en el edificio de 'El Gobernador', Uxmal. Martínez Cantón, Eduardo. Informes del INAH. Tomo CLVIII (1/nov/1926).
- 18.-Informe sobre desperfectos ocasionados por ciclones en los monumentos arqueológicos. Martínez Cantón, Eduardo. Informes del INAH. Tomo CXLVIII (13/oct/1933).
- 19.- Informe de las exploraciones arqueológicas en las zonas de Chichén Itzá y Uxmal. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CXLVIII (31/may/1935).
- 20.-Informe general de trabajos de exploración y conservación en las zonas arqueológicas ... del edo. de Yucatán en el año de 1935. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CXLVIII (5/jul/1935).
- 21.-Informe de trabajos. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CLVIII (8/may/1936).
- 22.-Informe de trabajos. Mayo de 1936. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CLVIII (5/jul/1935).
- 23.-Informe final. Junio de 1936. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CLVIII (27/jun/1936).
- 24.-Informe de la restauración de la zona arqueológica de Uxmal. Yuc. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CXLIX

126 feb/1936)

- 25.-Informe general de los trabajos en las zonas arqueológicas del estado de Yucatán en 1936. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CXLIII (15 ago/1936).
- 26.-Informe final de exploraciones y restauraciones en la zona arqueológica de Uxmal, Yuc. Temporada 1939. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CLIX (12/jul/1939).
- 27.-Informe final de exploraciones y restauraciones en la zona arqueológica de Uxmal. Temporada 1939. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CLIX (28 ago/1939).
- 28.-Informe previo de las reparaciones en Uxmal. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CLIX (4/jun/1940).
- 29.-Informe general de las restauraciones verificadas en la zona arqueológica de Uxmal, Yuc., en 1940. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CLIX (9 ago/1940).
- 30.-Informe de restauraciones verificadas en Uxmal, Yuc. Cirerol Sansores, Manuel. Informes del INAH. Tomo CLIX (24/sep/1942).
- 31.-Informe del estado que guardaban las restauraciones arqueológicas en Uxmal, Yuc. Erosa Peniche, Jose A. Informes del INAH. Tomo CLX. (19/nov/1942).
- 32.-Informes varios. Varios. Tomo CLX.
- 33.-Informe de la visita de inspección a las zonas arqueológicas de... Erosa Peniche, Jose A. Informes del INAH. Tomo CXLIV. (1/feb/1945).
- 34.-Uxmal. Temporada de trabajos 1951-1952. Ruz L'hullier, Alberto. Informes del INAH. Tomo CLXI (15/mar/1953).
- 35.-Saenz, Cesar. "Exploraciones y restauraciones en Uxmal, Yuc.". Boletín INAH. México. Junio 1955. pp. 6-13.
- 36.-Saenz, Cesar. "Exploraciones y restauraciones en Uxmal, Yuc. (1970-1971)". Boletín INAH. México. Julio-septiembre 1972. pp. 31-40.
- 37.-Informe de la visita efectuada a la zona arqueológica de Uxmal, Yuc., con el objeto de realizar observaciones sobre los deterioros que presenta la Pirámide de El Adivino, el día 15 de diciembre de 1988. Informe no publicado. (27/ene/1989). 18 pp.
- 38.-Estudio geofísico en la Ciudad arqueológica de Uxmal, Yuc. S. autor. S. fecha. 41 pp.
- 39.-Informe sobre el avance del estudio estructural de la Pirámide

- de. Advinco en Uxmal. Luc Gomez Mejia. México. Informe no publicado. S fecha. 6 pp.
- 40.-Informe de la visita a la Pirámide de Advinco en la zona arqueológica de Uxmal, Yuc. Informe no publicado. 24 abr 1986. 14pp.

CAPITULO IV

- 1.-Wilson, Edward L. and Ashraf Habibullah. "SAP80 Structural Analysis Programs". Computers and Structures, Inc. Estados Unidos, 1986 pp. 1-46
- 2.-Juarez Badillo, Eulalio y Alfonso Pico-Rodríguez. "Mecánica de Suelos". Editorial LIMUSA. 3a. ed. México, 1986. Tomo I: pp 51-59
- 3.- "Handbook of Concrete Engineering". Edit. Van Nostrand Reinhold. Estados Unidos, 1974.

CAPITULO V

- 1.- "Reglamento de Construcción del Distrito Federal 1987".

II BIBLIOGRAFIA

- 1.-Barrera Vázquez, Alfredo, Eduardo E. Pios y otros. "Arte maya: Uxmal, Sayil, Labna, Kabah y Región Puuc". Editora del Sureste. México, 1981. 288p.
- 2.-Foncerrada de Molina, Martha. "La escultura arquitectónica de Uxmal". Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM México, 1955. Col. estudios y fuentes del arte en México. Vol. XX. 207p.
- 3.-Handbook of Concrete Engineering. Edit. Van Nostrand Reinhold. Estados Unidos, 1974.
- 4.-Historia de México. Salvat Mexicana de Ediciones. 12 tomos. México, 1978.

- 5.-Juárez Badillo, Eulalio y Alfonso Rico Rodríguez. "Mecánica de Suelos", Edit. LIMUSA 3a. ed. México, 1986. Tomo I. 642 pp.
- 6.-Marquina, Ignacio. "Arquitectura prehispánica". Instituto Nacional de Antropología e Historia. 2a. ed. México, 1984. 1055 p.
- 7.-Médiz Bolio, Antonio. "La tierra del faisán y del venado". Ediciones Botas. 4a. ed. México, 1985. 198 p.
- 8.-Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 1987.
- 9.-Stierlin, Henry. "Haya". Ediciones Garriga. España, 1984. 192p.
- 10.-Wilson, Edward L. and Ashraf Habibullah. "SAP80. Structural Analysis Programs". Computers and Structures Inc. Estados Unidos, 1984. 163 pp.
- 11.-Congreso Nacional de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México.

III HEMEROGRAFIA

- 1.-American Antiquity. Estados Unidos. Semestral.
- 2.-Annales de L'Institut Technique de Batiment et des Travaux Publics. Francia. Mensual.
- 3.-Artículo del Mes. Centro de Documentación Técnica, SCT. México. Mensual.
- 4.-ASCE Civil Engineering. American Society of Civil Engineers. Estados Unidos. Mensual.
- 5.-ASTM Standard Specifications. American Society for Testing and Materials. Estados Unidos.
- 6.-Batiment International/Building Research and Practice. Mensual.
- 7.-Boletín INAH. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México. Trimestral.
- 8.-CIBA GEIGY Aspects. CIBA GEIGY. España. Bimestral.
- 9.-CIBA GEIGY Technical Notes. CIBA GEIGY. Gran Bretaña. Bimestral.
- 10.-Concrete. Gran Bretaña. Mensual.

11. -Construction Adhesives/Coatings/Sealants. Adhesive Engineering Company. Estados Unidos. Trimestral.
12. -Informes del INAH. No publicados. México. Tomo CXLIII. Estado de Yucatán.
13. -Informes del INAH. No publicados. México. Tomo CXLIV. Estado de Yucatán.
14. -Informes del INAH. No publicados. México. Tomo CXLVIII. Estado de Yucatán. Chichén Itzá, Tomo III.
15. -Informes del INAH. No publicados. México. Tomo CXLIX. Estado de Yucatán. Chichén Itzá, Tomo IV. 1940-1951.
16. -Informes del INAH. No publicados. México. Tomo CLVIII. Estado de Yucatán. Uxmal, Tomo I. 1913-1937.
17. -Informes del INAH. No publicados. México. Tomo CLIX. Estado de Yucatán. Uxmal, Tomo II. 1937-1942.
18. -Informes del INAH. No publicados. México. Tomo CLX. Estado de Yucatán. Uxmal, Tomo III. 1942-1947.
19. -Informes del INAH. No publicados. México. Tomo CLXI. Estado de Yucatán. Uxmal, Tomo IV. 1948-1952.
20. -Informes. No publicados, no clasificados. INAH. México, 1989.
21. -New Zealand Concrete Construction. Nueva Zelanda. Mensual.
22. -The Magazine of Masonry Construction. Estados Unidos. Mensual.
23. -Travaux. Francia. Mensual.

FOTOGRAFÍAS Y DIBUJOS DEL ARCHIVO DEL
INSTITUTO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA

- III.3 Cámaras del Templo I. *Arq. Pablo Ch'ico Ponce de León.*
- III.6 Lado Poniente, 1913. *Arq. Jorge Martínez H.*
- III.7 Lado Oriente, 1935. *Arq. Eduardo Martínez Cantón.*
- III.8 Trabajos de 1936. *Arq. Manuel Círerol Sansores.*
- III.9 Reconstrucción de la escalera Oriente... *Arq. Manuel Círerol Sansores.*
- III.11 Escalera Oriente: restauración concluida en 1939. *Arq. Manuel Círerol Sansores.*
- III.11a Escalera Poniente: Restauración de 1940. *Arq. Manuel Círerol Sansores.*
- III.11b Escalera Poniente. Trabajos durante 1942. *Arq. Manuel Círerol Sansores.*
- III.12a Lado Poniente. Trabajos en el Templo I. *Arq. Alberto Ruz L'hullier.*
- III.15 Ubicación de los sondeos eléctricos verticales. *Universidad Autónoma de Yucatán.*
- III.16 Método de resistividades. *Universidad Autónoma de Yucatán.*
- III.17 Análisis estructural realizado en la Universidad Autónoma de Yucatán. *Universidad Autónoma de Yucatán.*
- III.18 Cámaras del Templo I y pasillo bajo la escalera. *Universidad Autónoma de Yucatán.*
- III.28b Cámara central, Templo I. Corte. *Arq. Pablo Ch'ico Ponce de León.*