

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN,
FALLAS Y DESTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS MAYAS**

Estudio realizado a través de las investigaciones Arqueológicas realizadas en la estructura 10L-16 de la Acrópolis de Copán, Honduras, y algunas de las publicaciones arquitectónicas de las estructuras de Tikal, El Petén, Guatemala.

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CRISTIAN ENRIQUE LARIOS AGUILAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 1,999

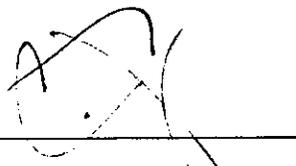
Honorable Tribunal Examinador:

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de tesis titulado

**CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN,
FALLAS Y DESTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS MAYAS**

Estudio realizado a través de las investigaciones Arqueológicas realizadas en la estructura 10L-16 de la Acrópolis de Copán, Honduras, y algunas de las publicaciones arquitectónicas de las estructuras de Tikal, El Petén, Guatemala.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 23 de agosto de 1,996.



Cristian Larios Aguilar.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería

Miembros de Junta Directiva

DECANO: ING. HERBERT RENÉ MIRANDA BARRIOS
VOCAL PRIMERO: ING. JOSÉ FRANCISCO GÓMEZ RIVERA
VOCAL SEGUNDO: ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ
VOCAL TERCERO: ING. JORGE BENJAMÍN GUTIÉRREZ QUINTANA
VOCAL CUARTO: BR. DIMAS ALFREDO CARRANZA BARRERA
VOCAL QUINTO: BR. JOSÉ ENRIQUE LÓPEZ BARRIOS
SECRETARIA: ING. GILDA MARÍNA CASTELLANOS DE ILLESCAS

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO: ING. JORGE MARIO MORALES GONZÁLEZ
EXAMINADOR: ING. JOSÉ EDUARDO RAMÍREZ SARAVIA
EXAMINADOR: ING. JOSÉ RODOLFO HERNÁNDEZ ALVARADO
EXAMINADOR: ING. FRANCISCO UBIETO BEDOYA
SECRETARIO: ING. EDGAR JOSÉ AURELIO BRAVATTI CASTRO



Guatemala, 13 de enero de 1,999

Ingeniero: Sydney Alexander Samuels M.
Director de la escuela
de Ingeniería Civil,
Facultad de Ingeniería.

Señor Director:

Tengo el agrado de informarle que he revisado el trabajo de tesis titulado:
“CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, FALLAS Y
DESTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS MAYAS” , desarrollado por el estudiante
universitario; Cristian Enrique Larios Aguilar, quien contó con la asesoría del
suscrito.

Considero que el trabajo cumple con los objetivos para los cuales fue
planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente:

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Francisco Javier Quiñonez

Asesor y coordinador, Área de Materiales



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de del Area de Materiales Ing. Francisco Javier Quiñónez, del trabajo de tesis del estudiante Cristian Enrique Laríos Aguilar, titulado CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO, CONSTRUCCION, FALLAS Y DESTRUCCION DE ESTRUCTURAS MAYAS, da por este medio su aprobación a dicha tesis.

Ing. Sydney Alexander Samuels Milson



Guatemala, abril de 1, 999



FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, Ing. Sydney Alexander Samuels Milson, al trabajo de tesis CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO, CONSTRUCCION, FALLAS Y DESTRUCCION DE ESTRUCTURAS MAYAS, del estudiante Cristian Enrique Larios Aquilar, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

ING. JOSÉ FRANCISCO GÓMEZ RIVERA

DECANO INTERINO



Guatemala, mayo de 1,949

ACTO QUE DEDICO A:

Ingrid, con todo mi corazón, por ser el empuje y ayuda idónea, de mi vida.

Mis dos lucitas, Ingrid Nohemi y Cristian David, que son el motivo de mi superación.

Samuelito, que no pudo verme nunca, pero a quien espero conocer, mostrándole el fruto de mi esfuerzo.

Mi padre, que puso en mi ser el amor a mi nación, su cultura y todo lo que ella representa.

Mi madre, por todos los dolores que le he causado desde el día de mi nacimiento.

Mi Guatemala con mucho cariño y respeto.

Agradecimientos:

Agradezco a Dios Primeramente, por su mucho amor hacia mi, y ser el dador de todas las cosas... la razón de mi existencia

Agradezco a mis Padres, que hicieron posible este trabajo.

Agradezco a las autoridades del Instituto Hondureño de Antropología e Historia, especialmente a la Doctora Olga Joya, Gerente General del Instituto, por su colaboración, al permitir el acceso y toma de muestras de los distintos materiales componentes de las estructuras mayas de Copán.

Agradezco al Señor Arqueólogo Ricardo Agurcia F. por su fina atención y colaboración para que se pudiera llevar a cabo un estudio más profundo de los estratos de construcción, y los materiales utilizados en las distintas etapas de construcción, y además por su valioso aporte científico, de los descubrimientos de la estructura denominada Rosalila.

HIPÓTESIS:

Se puede decir que existieron personas experimentadas en el diseño, la construcción e ingeniería, que levantaron los grandes edificios mayas, y además, le dieron el mantenimiento adecuado. Por lo cual su construcción original debe haber sido suficientemente estable, y no debería colapsar en ningún momento, como está sucediendo en la actualidad; a no ser por sismos de grandes proporciones. Esto implica que, para conservar dichos monumentos, se deben consolidar todas y cada una de las partes de dichos edificios, con los mismos materiales y los mismos conceptos de ingeniería, con los que se construyeron; además aplicar las mismas técnicas de mantenimiento maya, sin desechar los adelantos modernos de la tecnología y la ciencia, ni las normas internacionales en vigor.

La ingeniería actual puede, a través del análisis estructural, colaborar en la conservación de ese valioso legado, al definir las causas de los derrumbamientos, aportando soluciones.

ANTECEDENTES:

Desde principios de siglo se han estado investigando los vestigios de los lugares precolombinos en el área del mundo maya; México, Honduras, El Salvador, Belice y Guatemala, muchas veces haciendo enormes proyectos de restauración, con fines turísticos.

Pero hasta hoy en día no se han hecho muchas investigaciones en lo que a Ingeniería civil se refiere.

La vegetación invadió todas las ciudades abandonadas, y empezó a hacer estragos en las construcciones, destruyendo y derrumbando muros de estructuras enterradas en los montículos. A medida que la civilización del siglo XX se va introduciendo en las densas selvas tropicales, que han ocultado por cientos de años, las ciudades mayas; muchos curiosos y depredadores se asomaron y también destruyeron algunos vestigios importantes.

Posteriormente muchos científicos van descubriendo e investigando por medio de sendas excavaciones, los testigos de la civilización maya; con el objetivo de conocer más de dicha civilización. Esto provoca que halla todavía más destrucción, ya que mucha de la metodología de investigación en el pasado ha sido más destructiva que conservadora, realizada también sin tomar en cuenta la estabilidad estructural de los monumentos.

El 5 de diciembre de 1956, durante la novena sesión de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, La Ciencia, y La Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés); en Nueva Delhi, se redactaron los "Principios Internacionales Aplicables a Excavaciones Arqueológicas", dichos principios reglamentaron las excavaciones arqueológicas; El 31 mayo de 1964, el Segundo Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de los Monumentos Históricos, reunidos en Venecia, aprobó 16 artículos para respetar los monumentos en el momento de su debida restauración, haciendo un balance entre los conceptos del siglo pasado, que consideraban la reconstrucción como medio de conservación y el concepto que definía a la restauración como destrucción del valor del monumento.

Es de amplio conocimiento el hecho que muchas personas se han dedicado a conservar y restaurar dichos monumentos; pero en algunos casos se han encontrado con una excesiva destrucción de los mismos. En El Petén, y en Belice; por ejemplo; la roca usada como mampostería, es altamente porosa, mecánicamente débil y de un alto grado de deterioro, según lo han determinado varios estudios, dentro de los que se pueden mencionar, los efectuados por el Instituto Getty de Conservación.

Estos factores y muchos otros, como se verá más adelante, han provocado fallas estructurales en los monumentos, las cuales se analizarán, a la luz de la ingeniería civil contemporánea.

IV. JUSTIFICACIÓN:

Por lo antes indicado nace la necesidad de introducir en la metodología actual de conservación y especialmente de restauración y estabilización, alguna base matemática, bien probada, que colabore a diagnosticar y recetar acerca de las fallas y su tratamiento.

Es necesario tener una idea clara, desde el punto de vista de la ingeniería y sus conceptos, para poder aplicar correctamente los trabajos de restauración o consolidación de monumentos, en los cuales se presentan fallas estructurales que eventualmente podrían provocar un daño mayor, o catastrófico.

Entre más se tenga conocimiento, de la forma en que se hizo y diseñó la construcción, y la razón de las fallas estructurales de determinado edificio, más capacidad se tendrá, para poder conservarlos, por lo tanto el presente trabajo puede contribuir eficazmente con aquellas personas dedicadas precisamente a la restauración y a la conservación de la arquitectura prehispánica, que tanta admiración ha causado en el mundo entero.

OBJETIVOS:

Objetivo General: Contribuir con una fuente de información a los actuales restauradores y arqueólogos, que son quienes en primera instancia manejan estos monumentos; para que su trabajo sea menos riesgoso y fundamentado en principios matemáticos y físicos que ellos puedan manejar, y en el análisis y descubrimiento, de los conceptos de diseño y estructuralidad, en la ingeniería maya.

Objetivos Específicos:

-Conocer el tipo de fallas, para determinar la mejor forma de conservar y restaurar los monumentos arquitectónicos mayas.

-Conocer las causas de la destrucción de muchas estructuras arqueológicas, para determinar también la metodología apropiada en su restauración y mantenimiento posterior.

-Determinar cómo los pueblos prehispánicos construyeron, intentando establecer la base de sus reglas de construcción, planeamiento y diseño. Con base en el análisis estructural de varias de sus edificaciones.

1) DISEÑO:

Diseño significa: la delineación de un edificio o descripción y bosquejo de carácter oral del mismo. Es decir, que se puede entender como diseño a la descripción previa de las dimensiones y formas de un elemento arquitectónico, ya sea en bosquejo o en forma oral. Es parte importante de la planificación en la construcción.

Cuando se piensa en la metodología y la forma de cómo construyeron los mayas, esos edificios, de tan enormes y equilibradas proporciones, surge una serie de interrogantes, que en esta oportunidad se intentará responder, de acuerdo a ciertos análisis, aunque muy parciales en cuanto a dimensiones del área maya, se pueden considerar, válidas, ya que la estructuralidad que ellos pusieron en práctica muestra ciertos patrones generales invariables. Dichas interrogantes son las siguientes:

- a) ¿hicieron sus edificaciones de una manera fortuita y sin planificación?
- b) ¿Sobre la base de qué lineamientos levantaron las construcciones?
- c) ¿se pueden levantar edificios de enormes proporciones sin alguna clase de diseño?
- d) ¿tuvieron normas estructurales de construcción?
- e) ¿conocían sus restricciones estructurales?
- f) ¿Había personas capacitadas y conocedoras de dichas restricciones, capaces de dirigir, supervisar, y diseñar estructuras a semejanza de lo que ahora se conoce como ingenieros?

El diseño que se haya aplicado, por supuesto carecía de perfección, ya que era basado en experiencias previas, es decir, que antes de conocer, cómo construir y diseñar estructuras, tenían que sufrir las consecuencias que les definirían sus restricciones.

Aunque, se puede decir que en la actualidad muchos diseños estructurales, se hacen relativamente de la misma manera; que basados en experimentos de laboratorio, se han definido fórmulas de diseño. Es decir, **que el laboratorio de los mayas fue su experiencia**, o la vida misma.

Esto significa que a medida que iban aprendiendo la forma de construir, algunos de los edificios fallaron, esto llevó a que los destruyeran y enterraran, en el relleno de otros edificios más tardíos, existen varios ejemplos de esto en toda el área maya.

Ellos se veían en la necesidad de apuntalar y a veces de cancelar alguna edificación por fallas en su diseño estructural; para el objeto de esta investigación, se usará la evidencia contenida en la estructura 10L-16, ubicada en la parte principal de la Acrópolis de Copán, con fachada al patio occidental, donde se encuentra enterrado un precioso edificio, al cual su descubridor, el arqueólogo hondureño, Ricardo Agurcia, llamó Rosalila (4), conviene explicar que ellos utilizan nombres como éste, totalmente arbitrarios, para designar una estructura en investigación, facilitando así el manejo de varios elementos dentro de un complejo sistema de túneles que usan para la misma.

Para los mayas era de vital importancia tener arquitectos e ingenieros conocedores y experimentados, para no tener problemas con la estabilidad de sus edificios, indudablemente los tuvieron, pues es admirable la precisión con que se construía.

Existen por ejemplo grandes drenajes, cuidadosos desniveles en patios y plazas públicas, e incluso canales monolíticos que funcionaban como gárgolas para sacar las aguas de los techos.

Es evidente, que casi toda la destrucción que ahora se conoce, se atribuye a la falta de mantenimiento causado por el abandono, y muy poco a errores de diseño, aunque como se verá más adelante si los tuvieron.

Existen varios tipos de diseño que pudieron haber usado, y es a saber:

Diseño arquitectónico

Diseño estructural

Diseño hidráulico

1.1) **Diseño Arquitectónico:**

Este es el diseño de la forma y tamaño de las estructuras a construir.

Es evidente que cuando ya se había construido una superficie de sustentación, sobre ella se dibujaba el trazo de la construcción, ya sea con una línea incisa, como en Tikal, o con una línea de color rojo como en Copán, incluso existen ejemplos de maquetas hechas de piedra que muestran algunos conjuntos constructivos.

El diseño arquitectónico precolombino, como toda la arquitectura, surgió de la necesidad de tener un techo y protegerse del clima y la naturaleza, y llegó a desarrollarse de tal manera que también ocupa un lugar importante en el arte, que se pone de manifiesto principalmente. En los centros cívicos y ceremoniales de las grandes ciudades, el objetivo principal era lo religioso, aunque también se manejaba lo político. En las grandes ciudades también había palacios, observatorios astronómicos y viviendas.

Sus ciudades contienen normalmente tres áreas determinadas por su uso: los barrios residenciales de la población en varios niveles sociales; una o varias Acrópolis o centro cívico, político-religioso, y el área ceremonial, en donde se construían los edificios más grandes e importantes, distribuidos alrededor de las plazas públicas.

El proceso evolutivo que llevó a que los mayas construyeran sus edificios de las proporciones conocidas, tanto en la ciudad de Tikal como en Copán y en otras del área de Yucatán, es bastante interesante.

En cierta época ellos comenzaron a construir casas basados en la necesidad de cubrirse de las inclemencias del tiempo, dichas casas las construyeron primordialmente con un techo de paja, guano u otro tipo de planta especial de cobertura, con estructura de madera y paredes de arcilla o bajareque.

Durante mucho tiempo dicho tipo de construcción, fue el único que predominó en las ciudades mayas, hasta el momento en que se domina la técnica de la mampostería y se decide traer los ritos religiosos, que generalmente se hacían en las afueras del poblado, en la naturaleza misma, hacia adentro de la ciudad, para tener más comodidad, pues se habían vuelto totalmente sedentarios. Se tuvo que simbolizar la montaña, los árboles y el valle sagrados, por medio de la piedra.

La montaña pasó a ser la pirámide, el valle simbolizado por la plaza, y los árboles los representaban las estelas. Con esto, la vida del maya, empezó a tener otro tipo de matiz.

La forma o arquitectura de los edificios vino a ser una copia de las construcciones ya conocidas, es decir; las casas de habitación.

Las casas se construían sobre el nivel del suelo por medio de un pequeño basamento, con el fin de evitar que la escorrentía del agua de lluvia inundara el interior, su techo era de dos aguas, fuertemente inclinadas, para drenar la precipitación y además tenía su respectivo vano de acceso o puerta.

Cuando la ciudad crecía, los edificios hechos de piedra o mampostería, tuvieron muy similar imagen arquitectónica pero con diferente ingeniería; se construyeron enormes plataformas sobre las cuales asentaron varias estructuras, dejando siempre patios o plazas rectangulares, al basamento inicial le añadieron otros de menor tamaño, alcanzando así la forma piramidal escalonada y aún se hicieron, más y más altos con el fin de llevar más cerca del cielo al edificio, convirtiéndose, dicho conjunto de terrazas en un basamento escalonado, como le llaman algunos especialistas en arqueología y arquitectura per hispánica. Hay mucha evidencia del origen de las pirámides en la ciudad de Uaxactún, donde se puede apreciar uno de los ejemplares más antiguos de arquitectura maya, la pirámide E-VII-sub, la cima de la pirámide de mampostería, era tan pequeña, que claramente se ve que no tenía ningún edificio de piedra sobre ella, además se encontraron cuatro hoyos rellenos, que sin duda sostuvieron los postes de las esquinas de un edificio de

columnas de madera y paja u hojas de palma. Es posible que en este caso y en ese tiempo, no se pensaba en construir edificios de piedra sobre la pirámide, o no se tenía el dominio sobre la técnica del llamado arco maya (ref. 9).

Cuando la técnica constructiva descubre que el arco falso maya, hecho de piedra salediza, les permite construir casas y techos de piedra, también aparecen los decorados escultóricos en el cornisamento y seguidamente, gracias al sentido de lo abstracto y la riqueza iconográfica que tenían los artistas mayas, se agregó lo que se conoce como la crestería, construida sobre el techo del edificio, para poder plasmar el valor simbólico y religioso del mismo(ref. 7)(figura 1).

1.2) Diseño Estructural:

Los ingenieros mayas definitivamente se encontraron con problemas que tenían que salvar, al decidirse a construir a base de mampostería, uno de los más grandes problemas que se tuvo que idear resolver fue el construir techos de piedra, y mantener estabilizadas las estructuras que se construían. Por esto y por muchas otras razones, surge la necesidad de un concepto de diseño estructural maya.

1.2.1) Análisis estructural de cargas partiendo de la Arquitectura:

Las estructuras en forma piramidal se pueden analizar por medio de pesos y presiones internas, del suelo que se halla utilizado como relleno, y la capacidad de las distintas superficies de sustentación. En el caso de Tikal el relleno usado fue de piedra caliza aglutinado con mezcla de cal (ref. 6), por lo cual es bastante estable; en Copán el relleno fue menos estable, ya que estaba compuesto de rocas ígneas aglutinadas con arcilla, tanto en edificios como en rellenos masivos piramidales (ref.10).

Para el caso del análisis a causa de las presiones internas del relleno, se consideró que los casos críticos de las construcciones en Copán, podrían ofrecer las características adecuadas para el objetivo buscado.

Componentes de una estructura Mayor

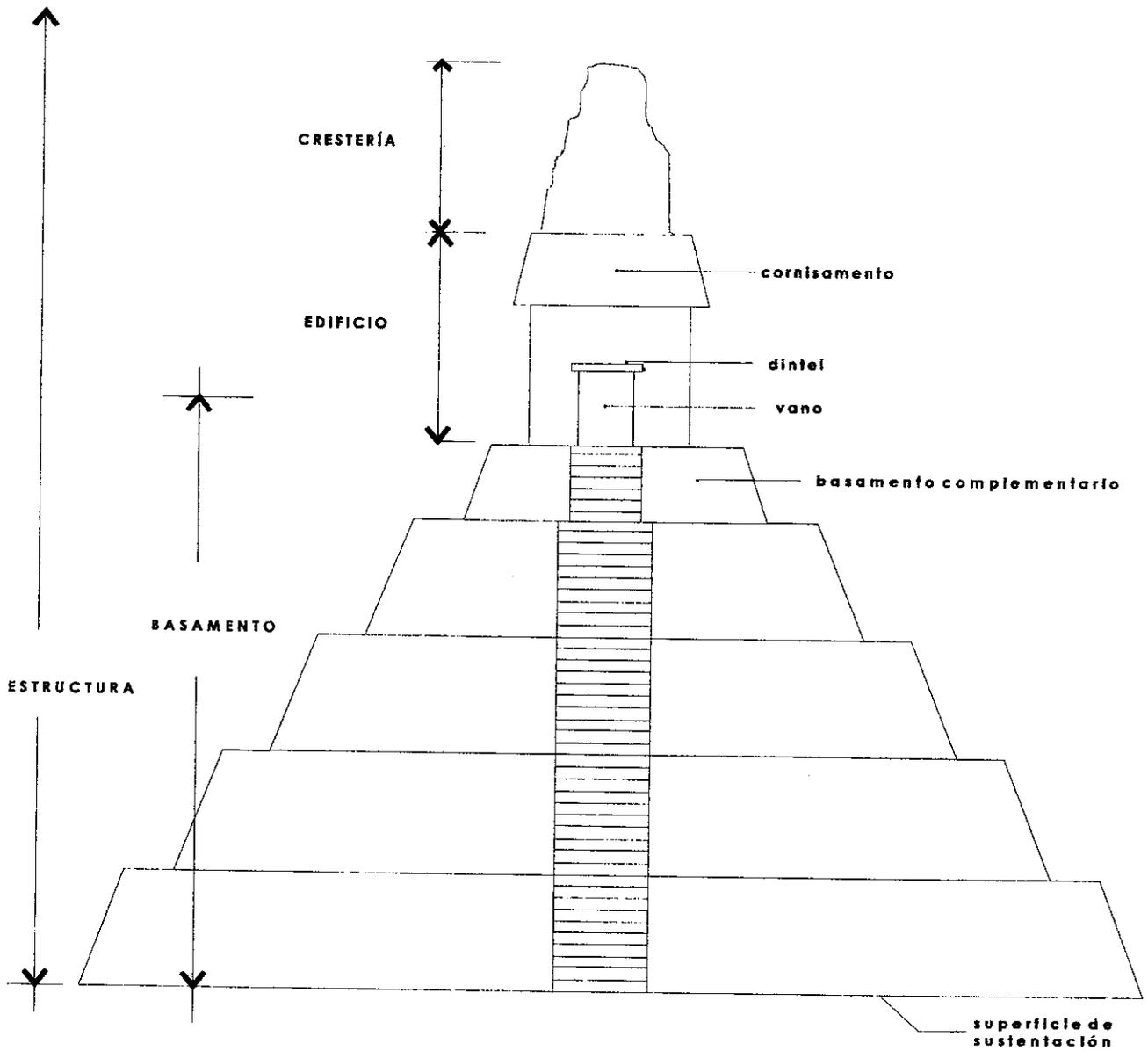


figura 1

Elevación Típica

Cuando se analizan las estructuras de plataformas, se puede notar, que bajo ningún motivo se producen grandes flexiones, ni lugares críticos de corte vertical, el único requisito es la resistencia del suelo, en caso de sismo las cargas horizontales trabajan contra el peso de la construcción y además el edificio se resiste por unidad de plataforma, proporcional a la pequeña área resistente (figura 2).

En el laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, y basados en muestras de distintos materiales componentes de unas estructuras mayas de Copán, que gracias a las autoridades del lugar, se pudo tener acceso, se obtuvo las siguientes densidades típicas, que se describen a continuación:

Mampostería, piedra caliza:	1,470 kg/m ³
Mampostería, piedra Toba:	1,870 kg/m ³
Arcilla, componente de relleno:	1,680 kg/m ³
Piedras, componente de relleno:	2,560 kg/m ³
Estucos y pisos:	1,470 kg/m ³

Deduciendo una proporción aproximada de los componentes de relleno siguientes:

arcilla =	84%
Piedras=	08%
Toba=	08%

El peso por unidad de volumen del relleno será

$pr = 0.84 \times 1,680 + 0.08 \times 2,560 + 0.08 \times 1,470$	
Relleno en Copán:	1,734 kg/m ³
Relleno en Tikal:	1,470 kg/m ³

El relleno se calculó, mediante la extracción de una muestra, en Copán, separando de la mezcla las piedras y el suelo aglutinante, y calculando su volumen aproximado.

ANÁLISIS DE CARGAS HORIZONTALES

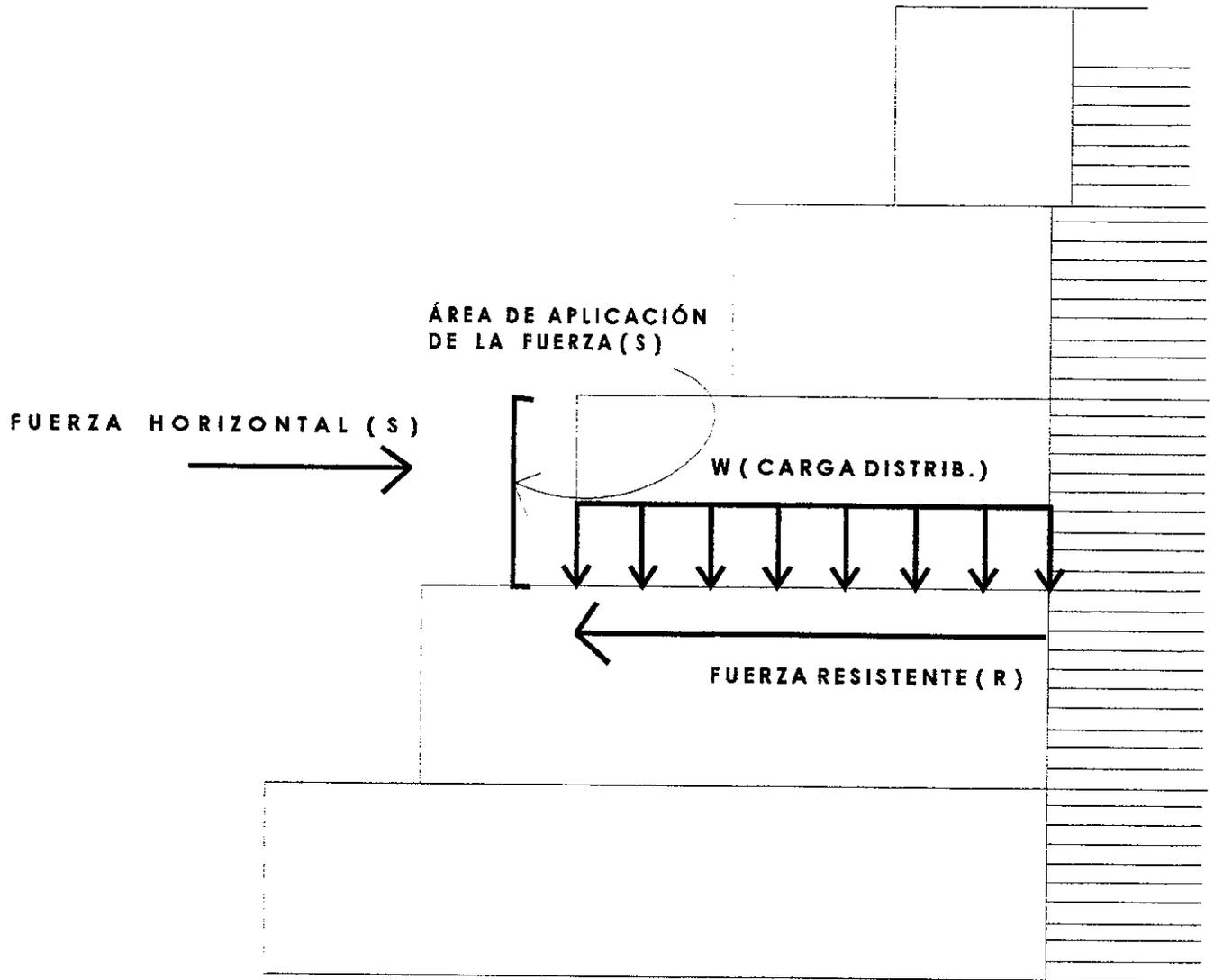


figura 2

fuerzas de Sismo

En Tikal se dedujo un valor, determinando que el peso del estuco es similar al peso de las mezclas de cal y éstas a su vez, a la piedra caliza.

Estos pesos son de vital importancia en casi todos los cálculos estructurales que se necesita hacer para el análisis de los objetivos trazados.

1.2.1.1) Muros de retención:

Partiendo del concepto de que todo edificio construido en base a cuerpos escalonados, como es el caso de las construcciones que se están analizando, su comportamiento es estable, gracias al soporte que ejercen los distintos muros (figura No 3), que se forman al hacer una línea imaginaria, desde la fachada del cuerpo superior (b), cortando internamente, el cuerpo (a) y terminando exactamente sobre el cuerpo (c).

Se podrá calcular una de las estructuras mayas por medio de muros de retención.

En la figura 3 se puede notar que los muros van haciéndose más grandes a medida que se baja de cuerpo en cuerpo, usando como base el cuerpo b, esto sucede precisamente para resistir el cada vez mayor empuje del relleno.

Como ya se dijo, para efectos de cálculo se usarán las estructuras de Copán, ya que la estabilidad del relleno es crítica en la forma de construcción de los copanecos.

Se iniciará el cálculo con la estructura 10L-16 (figura 4) de la ciudad de Copán que consiste en un basamento piramidal con un total en su parte frontal de diez cuerpos escalonados, a los cuales se ascendía por medio de una amplia escalinata que parte del patio occidental de la Acrópolis. La última terraza, evidentemente sostenía un gran edificio, que por la presencia de los restos de una escalera interior, se ha creído que era de dos niveles. Lamentablemente los restos del edificio son solamente la base de sus paredes de piedra que dibujan una distribución del espacio interior en forma de cruz (figura 5).

ANÁLISIS DE CARGAS VERTICALES

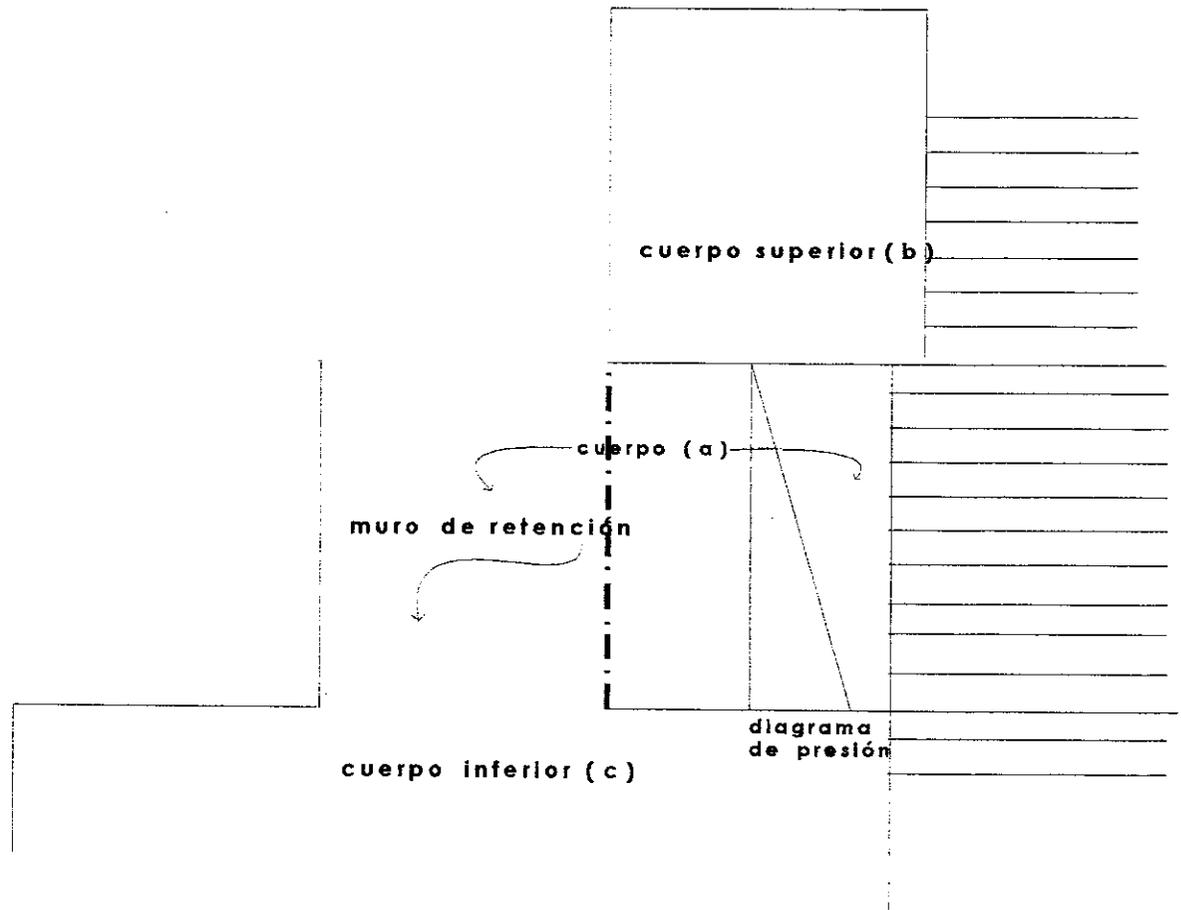


figura 3

Muros de retención

ESTRUCTURA 10-L-16

Copán

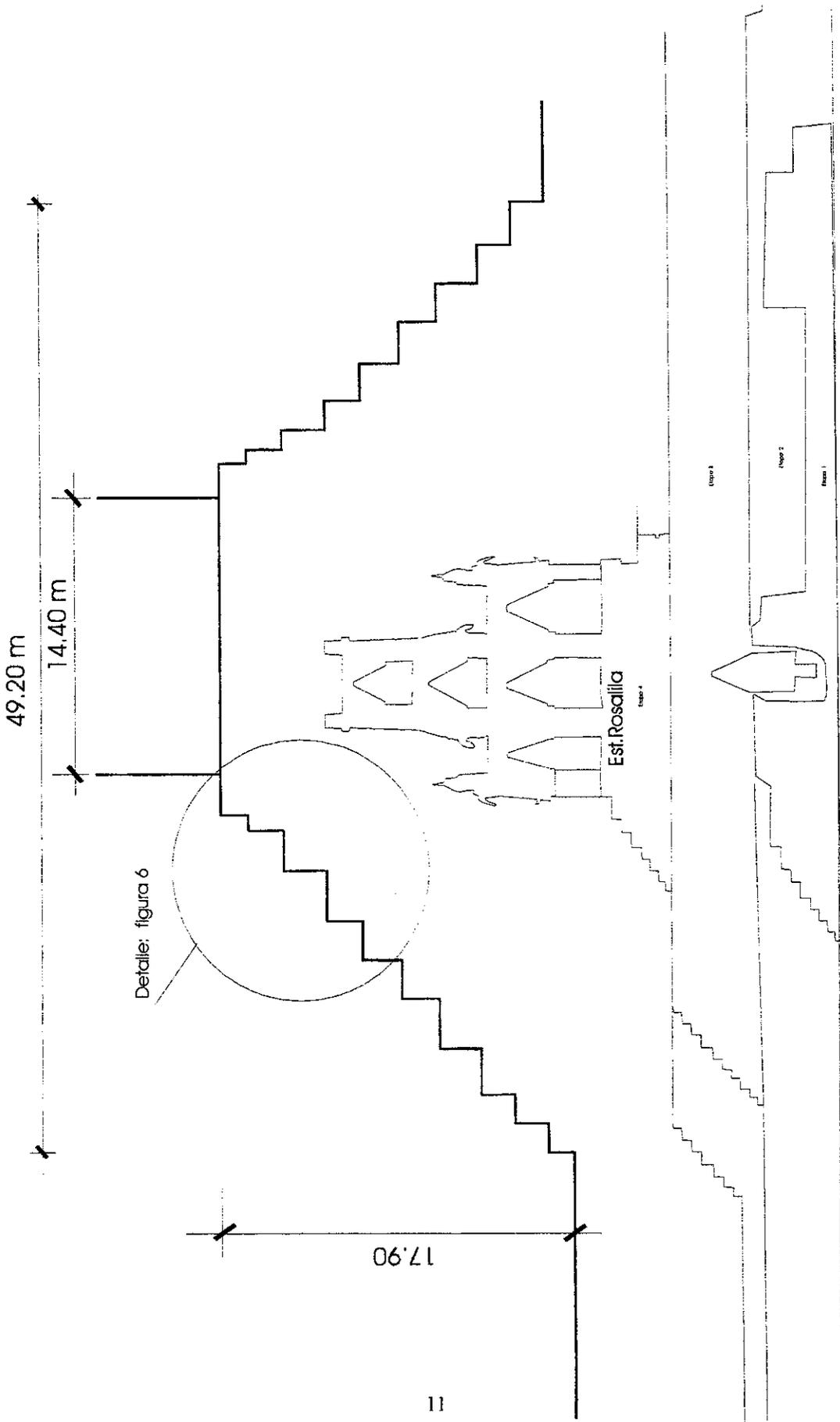


figura 4

Sección Interior (etapas de construcción)

PLANTA: ESTR. 10-L-16

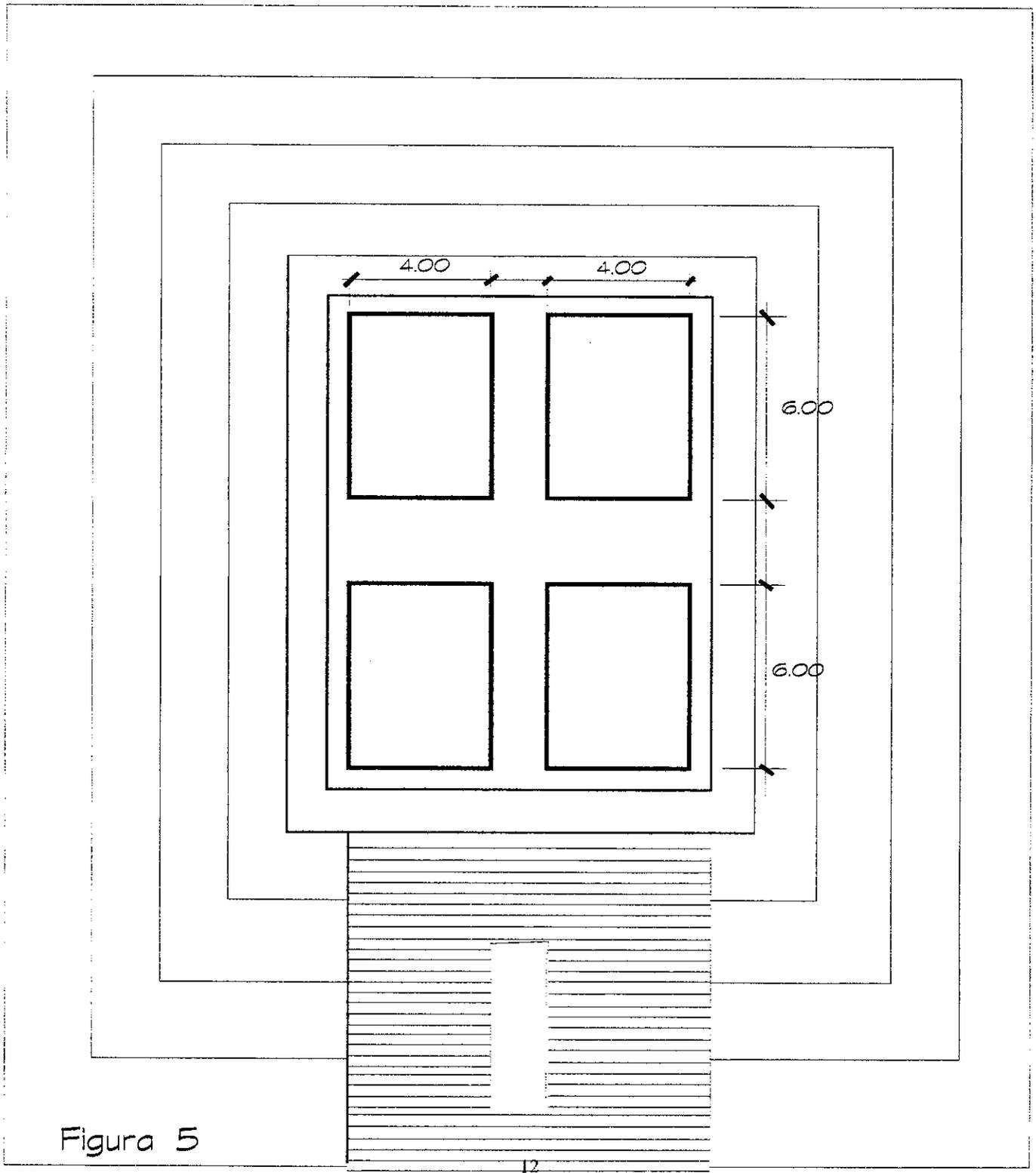
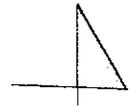


Figura 5

Última terraza (figura 4):

Cargaba un edificio que ya no existe en la actualidad, y se cree que tenía 140.00 m², y una altura aproximada de 6 m (ref. 4, pp 189).

Para calcular el peso del edificio se cubican los materiales componentes y se multiplican por su respectiva densidad, esta operación dividida dentro del área sobre la cual se levanta el edificio, dá como resultado el peso por m² del mismo.

Peso del edificio: 608,736 Kg = 4,348 kg./m²

Peso del relleno: 1,734.00 kg./m²

El primer cuerpo que se analizará es el cuerpo superior, es decir, el que soporta directa e inicialmente la carga del edificio (figura 6).

altura	$h = 1.00 \text{ m.}$
densidad relleno	$D_r = 1,734.00 \text{ kg/m}^3$
densidad muro toba	$D_m = 1,870.00 \text{ kg./m}^3$
ángulo	$\phi = 32.50^\circ$

donde, ϕ es el ángulo de fricción interna asumido

Con fines de cálculo, se deben determinar las constantes del suelo

$$k_a = \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi} \quad k_a = 0.30$$

$$k_b = \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi} \quad k_b = 3.32$$

Estr. 10-L-16

Análisis estructural de muro de retención

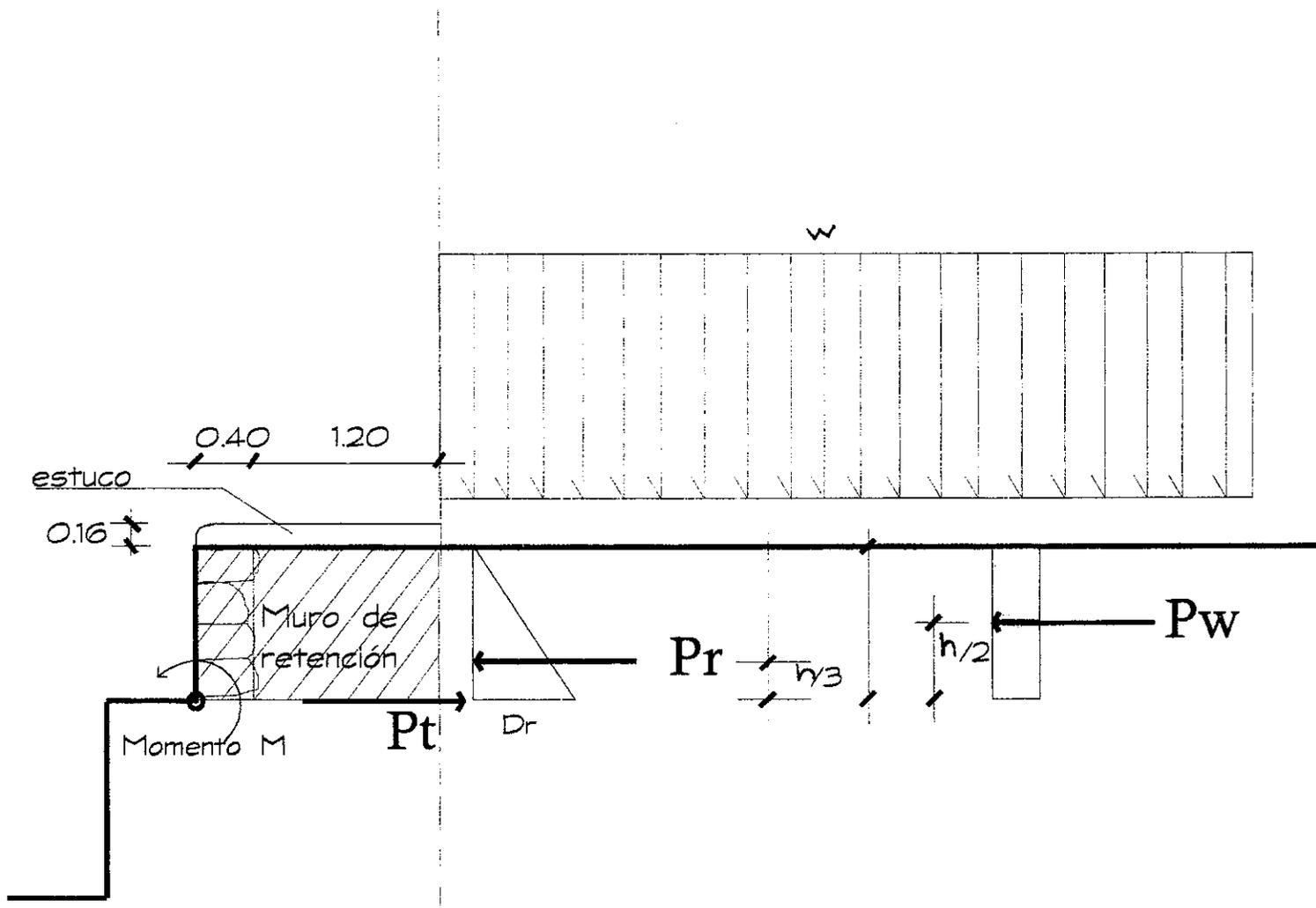


Figura 6

Parte superior de la estructura

La fuerza vertical de las cargas aplicadas, se transforma en horizontal (p_w), gracias al empuje que producen las partículas del suelo al no tener forma de movimiento. La fuerza horizontal, (p_r) natural de cualquier suelo es directamente proporcional a la profundidad del punto bajo análisis (figura 6).

Fuerza horizontal del relleno

$$p_r = k_a \times D_r \times h / 2 = 260.00 \text{ kg.}$$

Fuerza horizontal de la carga distribuida

$$p_w = k_a \times w \times h = 1,243.47 \text{ kg.}$$

Fuerza total

$$P = p_r + p_w = 1,503.47 \text{ Kg}$$

Es necesario conocer el momento producido por la fuerza (P), sobre el punto más bajo del muro estudiado, ya que es el punto crítico, que produce el momento máximo.

El momento es la reacción que produce una fuerza a determinada distancia y se calcula multiplicando fuerza por la distancia o brazo, perpendicular a la misma.

momento producido por la presión del relleno

$$m_r = p_r \times h / 3 = 86.7$$

momento producido por la presión de la carga

$$m_w = p_w \times h / 2 = 621.74$$

momento total

$$M = m_r + m_w = 621.73 \text{ Kg*m}$$

Ya que los muros que se están calculando, son muros de gravedad, es necesario analizar los pesos del mismo. Estos pesos producen la fricción que evita el movimiento del muro.

	pesos				
	área	D	peso	brazo	Momento
mampostería	0.40	1,870.00	748.00	0.20	149.60
estuco	0.16	1,470.00	235.20	0.80	188.16
relleno	1.20	1,734.00	2,080.80	1.00	2,080.80
	totales 3,064.00=W			2,418.56=M	
	peso total		Momento producido		
	$pt = \mu \times W = 2,298.00$				

Donde μ es el coeficiente de fricción interna y se asume de 0.70 por ser un relleno cohesivo, mezclado y estable.

$$Mt = 2,418.56$$

Para establecer la estabilidad de los muros, deben hacerse dos pruebas, las cuales tienen que dar resultados, mayores a 1.5, que es un coeficiente que determina el 150% para dar un margen de seguridad. Las pruebas consisten en dividir los momentos Mt / M , y las fuerzas, Pt / p

pruebas

$$f \text{ volteo} = Mt / M$$

$$= 2,465.60 / 621.73$$

$$= 3.89$$

chequea ya que $f \text{ volteo} > 1.50$

$$f \text{ deslizamiento} = Pt / p$$

$$= 2,298.00 / 1,503.47$$

$$= 1.53$$

chequea también ya que $f > 1.50$

En los análisis posteriores de los cuerpos inferiores, se notó, que tanto el f volteo como el f deslizamiento crecía a medida que bajaba el nivel, alejándose cada vez más del valor 1.50, por lo que se deduce que el muro de retención crítico es el que se encuentra soportando al edificio y es el cuerpo que se encuentra en lo más alto de la estructura.

1.2.1.2) vigas de madera:

En todos los dinteles de las puertas, era necesario completar la mampostería, por lo que se tenía que reforzar, en dichos puntos débiles.

Se utilizaron como vigas varios trozos de sección cilíndrica o rectangular según el caso, en algunos lugares, muy bien tallados, en otros como en algunas ruinas en El Petén se usaron sin labrar y en madera resistente, como el tinto, chicozapote, la madera de tinto es extraordinariamente fuerte pero con muchas irregularidades y por ello se usaba sin labrar.

El manchiche es tradicionalmente utilizado junto con el chicozapote en la actualidad, entre los nativos de El Petén, teniendo similares cualidades físicas entre sí, para el fin de cálculo se utilizaron los datos mecánicos del mismo.

En la estructura 5E-58 (figura 7) (ref.7) de las ruinas de Tikal se pueden ver varios dinteles reforzados por estas vigas de madera, de forma cilíndrica.

Basándose en los dibujos a escala correspondientes a la estructura en mención, en la puerta principal, se pueden notar las siguientes características(figura 8) (ref.7).

grueso de muro	$g=$	1.20 m.
luz de vigas	$L=$	2.30 m.
cantidad de vigas	$n=$	9 unid
diámetro	$2*r=$	0.15 m.
radio	$r=$	0.075 m

Detalles de dinteles

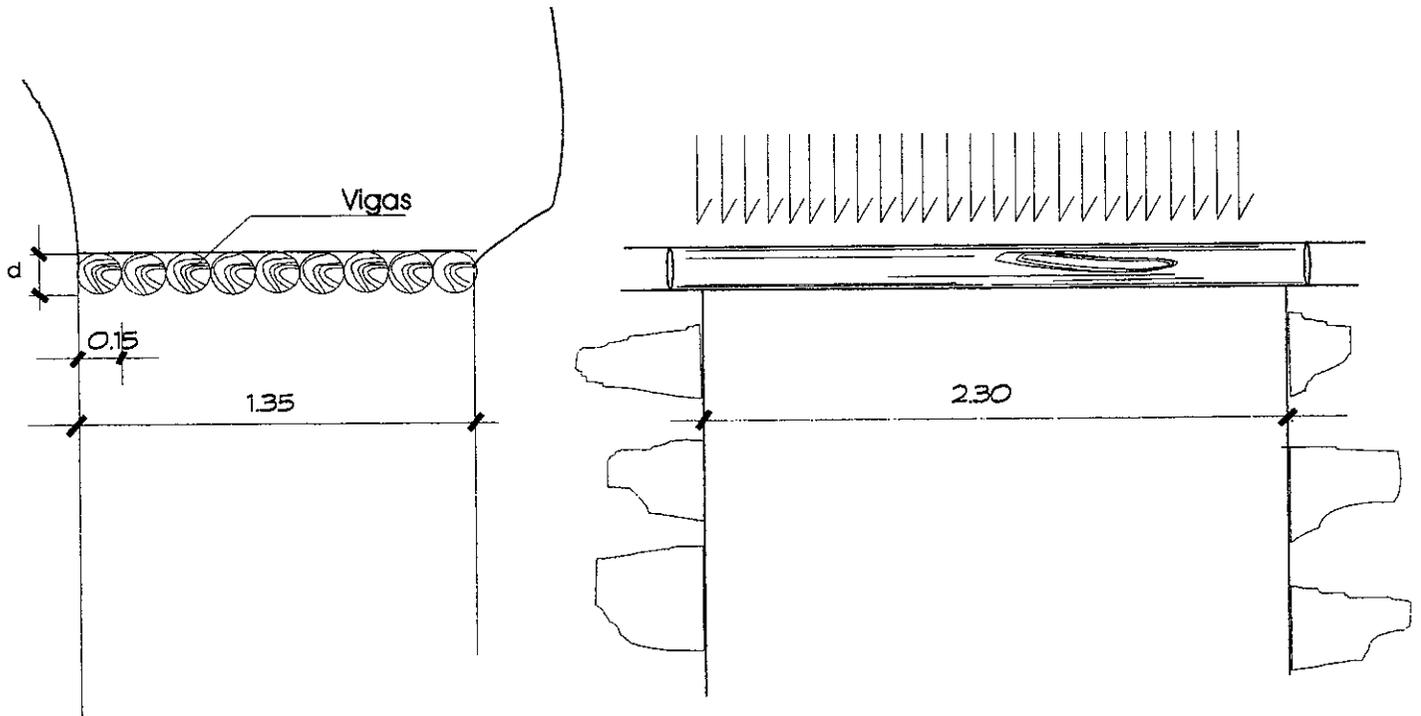


figura 8

Detalle de vigas de madera o dinteles

Análisis de cargas soportadas por las vigas bajo estudio:

Carga muerta: teniendo las densidades de cada material componente, se deben calcular las dimensiones, con el fin de encontrar los volúmenes de cada material que se encuentre sobre la línea de acción de cargas de la viga. Teniendo los volúmenes se calcula el peso del miembro cargado, ya que $W=d*V$ donde W es el peso, d , la densidad y V , es el volumen. A este peso se le denomina; Carga Muerta, que incluye todos los componentes de una construcción. El peso que se ha encontrado al momento, es el peso que se ejerce sobre todas las vigas, por lo tanto debe dividirse entre el número de vigas que halla en el dintel, $wv=W/n$, donde n es el número de vigas.

A la carga muerta se le aumenta un 40% con el objetivo de tener un margen de seguridad en el diseño.

Según la figura 7

$$V1=2.50*1.80=4.50 \text{ m}^3/\text{m} = \text{carga directa}$$

$$V2=5.00*0.90=4.50 \text{ m}^3/\text{m} = \text{compartida entre dos paredes}$$

$$V = 4.5 + 4.5/2 = 6.75 \text{ m}^3/\text{m}$$

carga del edificio

$$W=dr*V= 1500 \text{ kg}/\text{m}^3 * 6.75 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$\text{carga muerta edif.} \quad 10,175 \text{ kg./m}$$

$$\text{carga en la viga} = 10,175/9 = 1,125$$

$$\text{carga muerta última (Cm*1.4)} = 1,575 \text{ kg./m}$$

Carga Viva: el otro tipo de cargas que afectan las vigas, son las ejercidas por el movimiento de personas, de la lluvia o bien de cargas accidentales. Se calcula por medio de un valor especificado, en tablas previamente calculadas.

Para un segundo nivel se determinan cargas de 100 a 200 kg./m² (Wv), el dato multiplicado por el área definida y dividida entre el largo de la luz de la viga, dá la carga viva distribuida en la viga, $C_{viva}=W_v \cdot g/n$

$$\begin{aligned} \text{carga viva} & \quad 100 \text{ kg./m} \cdot 1.20/9 = 13.33 \text{ kg/m} \\ \text{carga viva última (} C_v \cdot 1.7 \text{)} & = \quad 22.66 \text{ kg./m} \end{aligned}$$

Se suman los resultados de las cargas últimas

$$W \text{ Carga Última (} C_u \text{)} = 1,597.66 \text{ kg./m}$$

Diseño a Flexión:

$$f = M \cdot C/I$$

Donde M es el momento flexionante, C es una variable que depende de la sección de la viga y en este caso es igual a r, f es el esfuerzo e I es el momento de inercia que es $\pi \cdot r^4/4$.

$$f = r \cdot M / (\pi \cdot r^4/4)$$

$$f = 4 \cdot M / (\pi \cdot r^3)$$

$$M = W \cdot L^2 / 8$$

$$M = 1,056.452675 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$F_{real} = 3,187,052 \text{ kg/m}$$

$$f_{permisible} = 3,568,258.93$$

$f_{permisible}$ es el esfuerzo de diseño del manchiche (ref. 5)

Diseño a Corte:

$$V = W*L/2$$

$$F_c = 3*V/(2*A)$$

$$V = 1,831 \text{ Kg}$$

$$F_c = 155,500 \text{ kg./m}^2$$

$$F_c(\text{permisible}) = 214,095.54 \text{ kg./m}^2 \text{ (ref. 5)}$$

Donde F_c es el esfuerzo a corte y V es la fuerza cortante.

Diseño a deflexión:

Debe cumplirse la siguiente fórmula, como deflexión máxima.

$$c*W*L^3 / (E*I) < 1/360$$

Donde E es el módulo de elasticidad, e I es el momento de inercia de la sección de la viga, c depende del empotramiento de la viga.

$$W = 15.9766 \text{ kg/cm}$$

$$c = 0.0208$$

$$E = 1.367*10^5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (ref. 5)}$$

$$I = \pi*r^4/4 = 2485.05 \text{ cm}^4$$

$$L = 120 \text{ cm}$$

$1/360 = 0.00277778$ este es el número utilizado en el diseño

$$c*W*L^3 / (E*I) = 0.001690393$$

Este último número es menor que $1/360$, por lo tanto sí existe una deflexión permisible en las vigas calculadas.

En los tres casos se puede notar una exactitud impresionante de diseño estructural.

1.2.1.3) Techos

La bóveda maya, se utilizó con fines de cobertura en todas las edificaciones, y consistía en un techo cargado por dos pilares inclinados de soporte, en los dos lados de apoyo, formando un triángulo.

La bóveda maya trabaja a base de compresión, por lo que el diseño es obvio, dando resultados mucho menores que la capacidad de carga (figura 9).

1.2.1.4) Construcción en base a muros de carga:

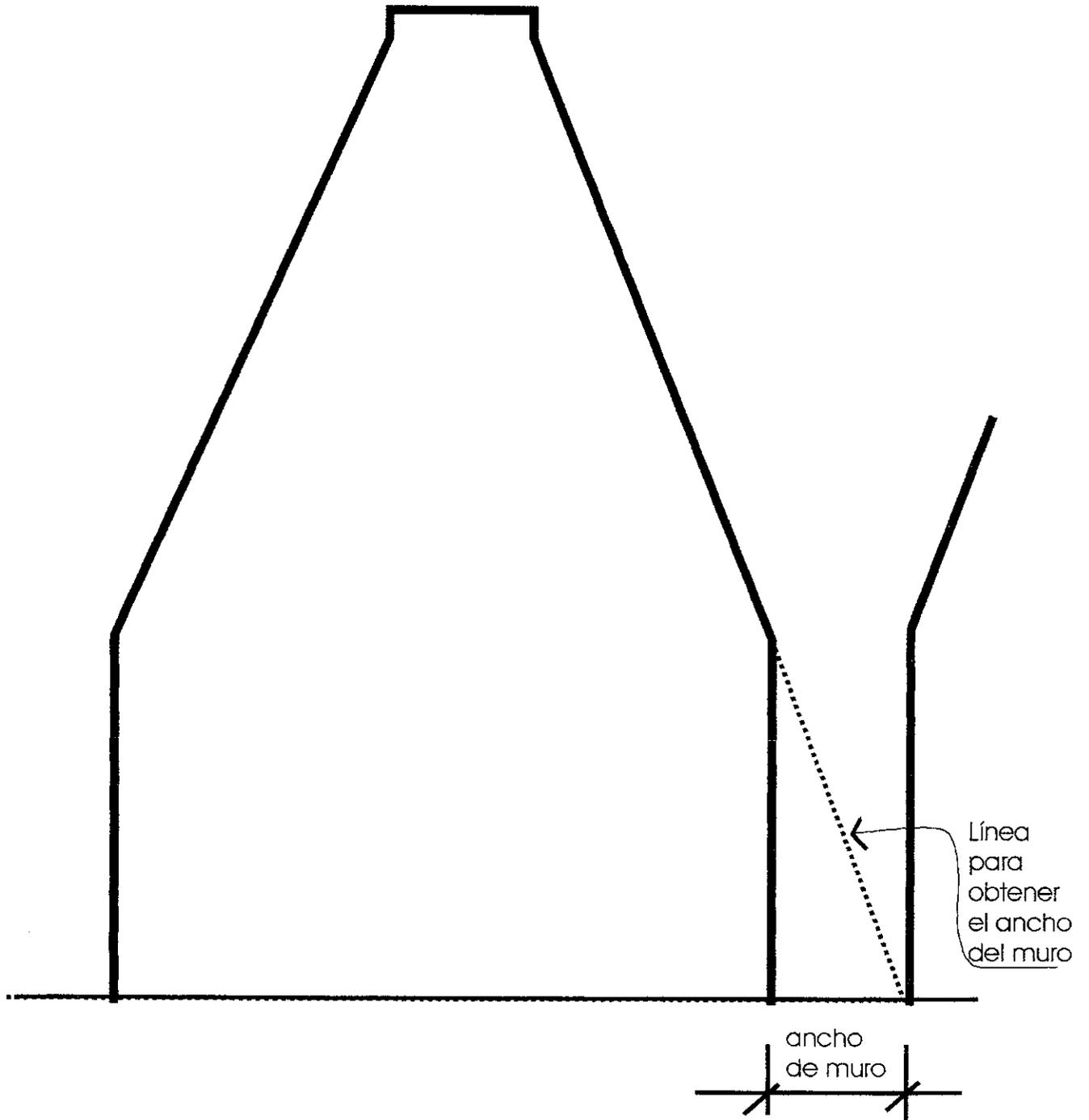
El desarrollo de la ingeniería maya llevó a la ampliación de los diseños arquitectónicos hasta la concepción de edificios de varios niveles. En Tikal, por ejemplo, existe un palacio conocido como el palacio de los cinco pisos, aunque directamente superpuestos solamente tiene tres, y en Copán, como ya se dijo, se estima que además de la estructura 10L-16,(figura 4) fotos 1,2 y 3; hubo algunos otros edificios con un segundo piso, al que se podía acceder por medio de una escalera interna.

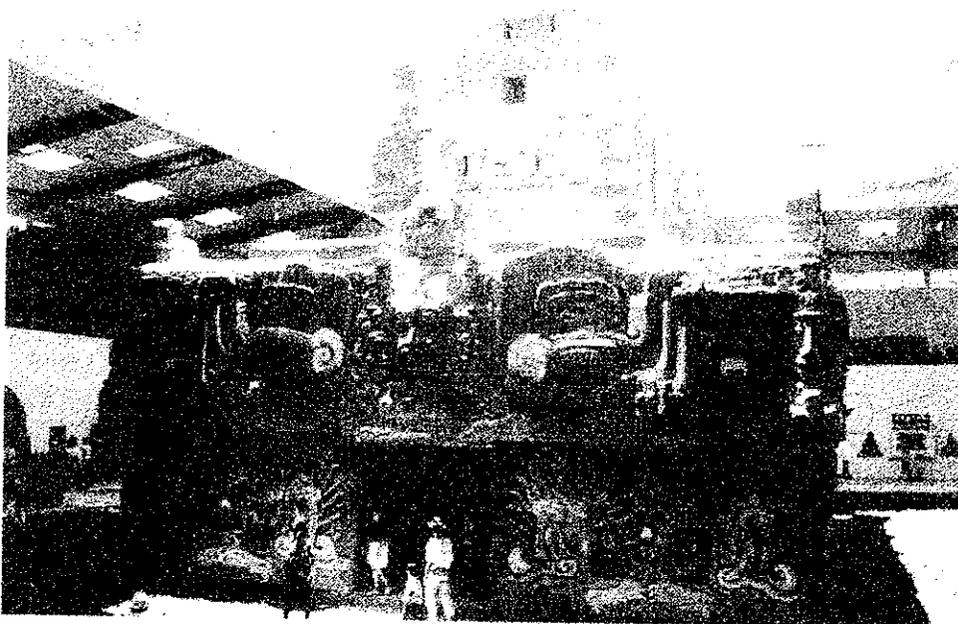
1.2.2) Cimentaciones o Nivelación:

Los mayas utilizaron un nivel de cimentación a base de nivelación rústica del suelo, cuya superficie era terminada mediante una capa de aproximadamente 2 a 5 cm. de cascajo, o pequeños pedazos de piedra, sobre la cual finalmente, extendían el piso, hecho a base de una mezcla de cal, arena, y agua, con algún agregado de grava fina (ref.7).

Figura 9

bóveda típica





Gárgolas

Foto NO 1 Rosalila

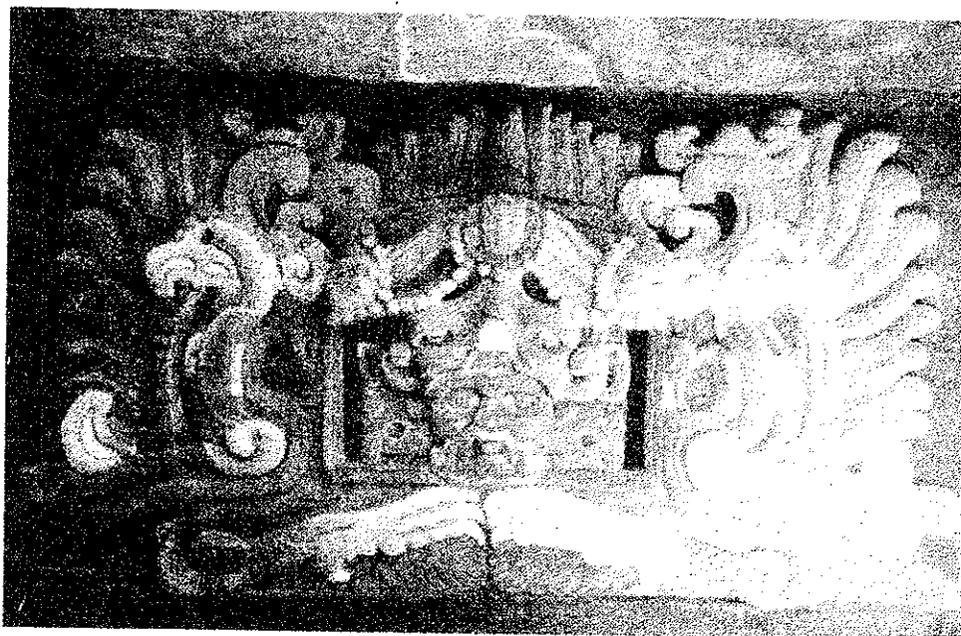


Foto NO 2 Rosalila

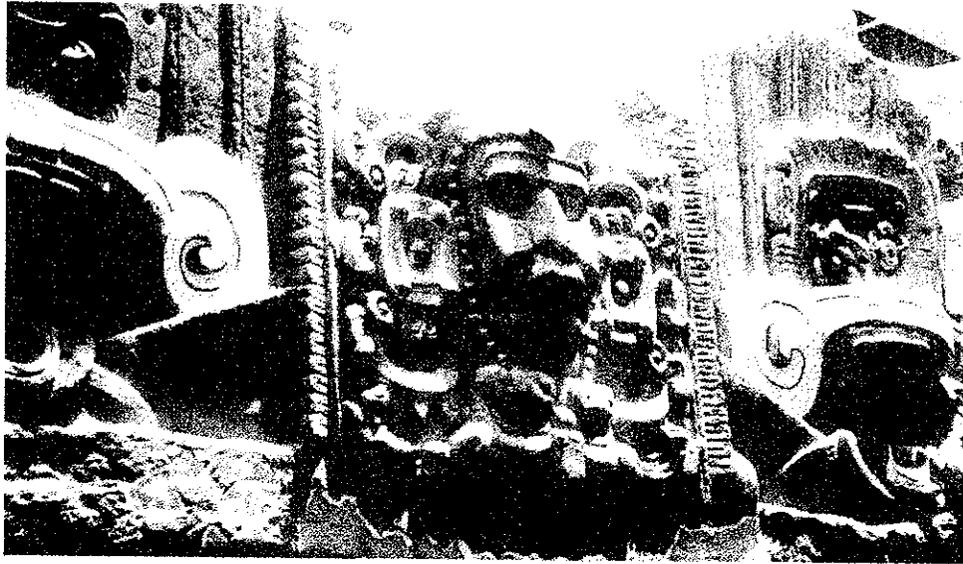


Foto No 3 Rosalila

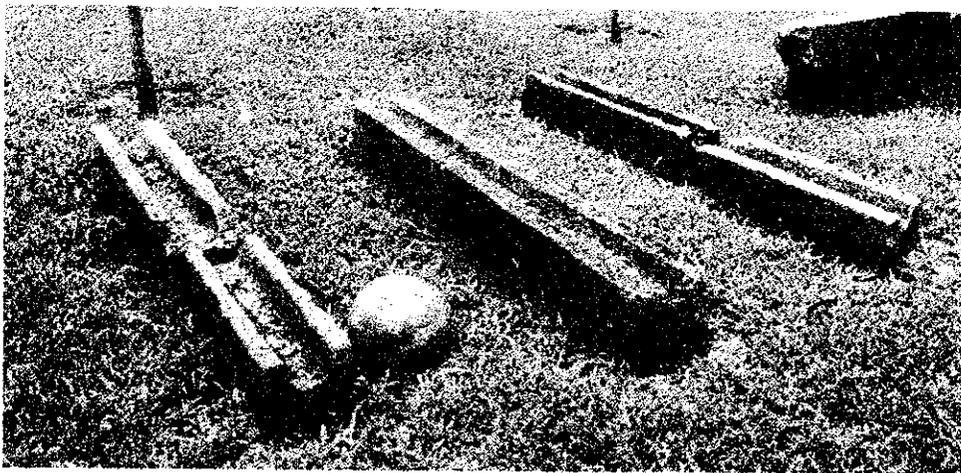


Foto No 4 canales de agua

Este piso alcanzaba entre 5 y 10 cm. de espesor, y en casos especiales hasta 20 o 30 cm. En el caso de Tikal, excavaban hasta llegar a suelo firme, o roca natural, que compone el suelo de El Petén en toda su área, solo quitando el suelo llamado humus o tierra orgánica, haciendo nivelaciones con rellenos de piedra y arcilla hasta acabar la superficie con pisos similares al descrito anteriormente. Este suelo tiene la característica que soporta grandes cargas distribuidas. En Copán, no tenían esta ventaja, ya que el suelo copaneco es arcilloso y poco apto para soportar grandes cargas, es quizá por ello que los constructores no se arriesgaron a construir edificios más altos. No así en Tikal, ciudad admirada por sus estructuras, las más esbeltas del área maya.

Es muy interesante ver los cálculos que se presentan a continuación en los que se establece la relación de peso-área de construcción en varias estructuras:

Para el efecto, se debe calcular el volumen, y luego multiplicarlo por su peso por unidad de volumen dado en la sección 1.2.1, dicho resultado se divide entre el área de la base para tener un dato aproximado de la carga unitaria que actúa sobre el suelo.

El volumen de una pirámide truncada es:

$$V = \frac{h * (A + a + \sqrt{A * a})}{3}$$

Donde h es la altura de la estructura, A es el área de la base y a es el área de la parte superior de la estructura

Edificio 10 L 4 (ver figura 11 ref. 11)

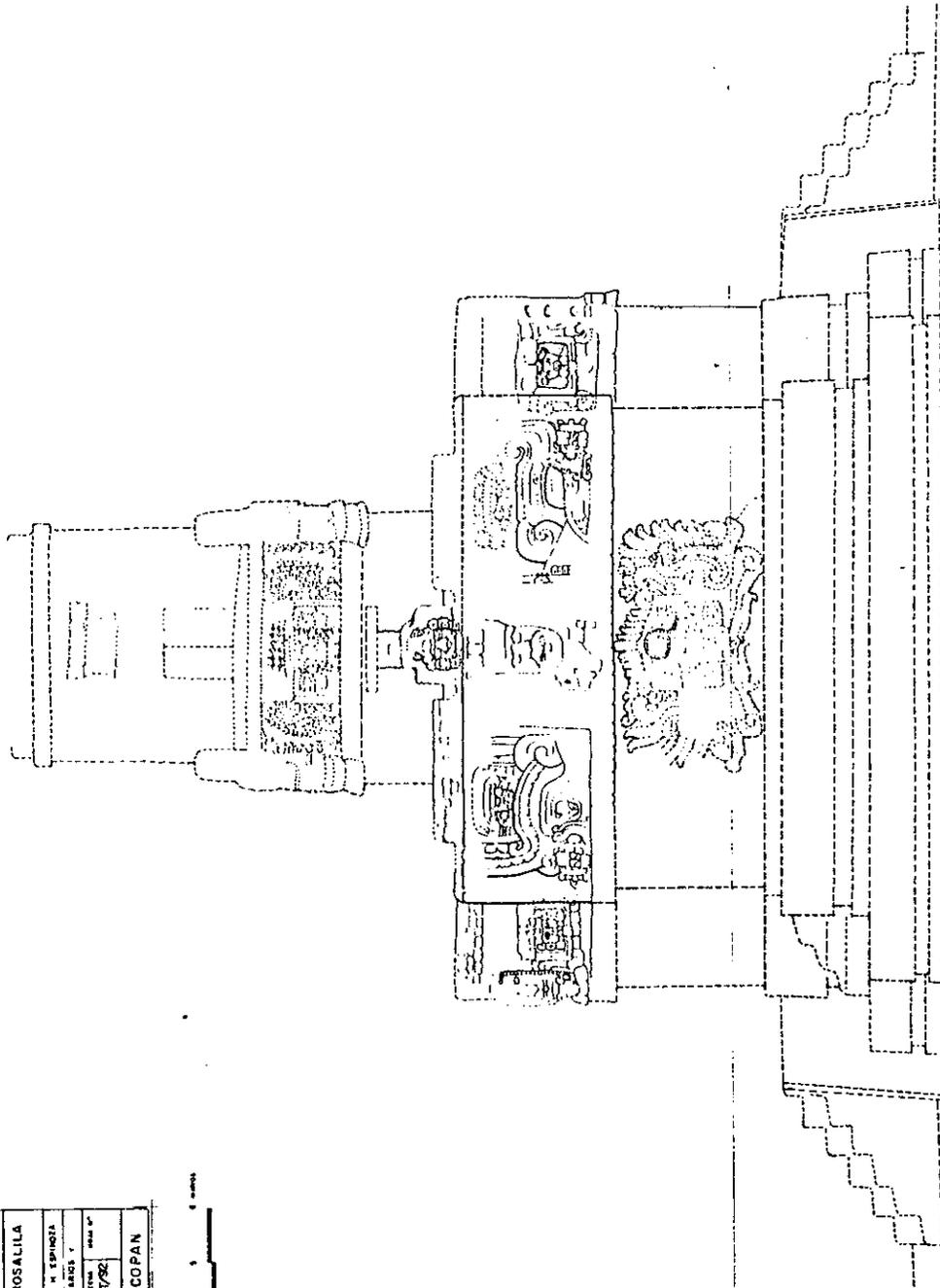
Altura (h)	7.00 m
Ancho base	17.00 m
Largo base	21.50 m
Ancho sup	6.00 m
Largo sup	12.00 m
Área base (A)	365.50 m ²
Área superior (a)	72.00 m ²
Volumen (V)	1,020.83 m ³
Peso relleno	1,734.00 Kg/m ²
Peso estruc.	1,770,125.00 Kg
Carga unit. En la base	4,843.02 Kg/m²

Edificio 10 L 16 (ver figura 10,11, y 4)

Altura (h)	18.50 m
Ancho base	50.00 m
Largo base	50.00 m
Ancho sup	10.00 m
Largo sup	15.00 m
Área base (A)	2,500.00 m ²
Área superior (a)	150.00 m ²
Volumen (V)	16,341.67 m ³
Peso relleno	1,734.00 Kg/m ²
Peso estruc.	28,336,450.00 Kg
Carga unit. En la base	11,334.58 Kg/m²

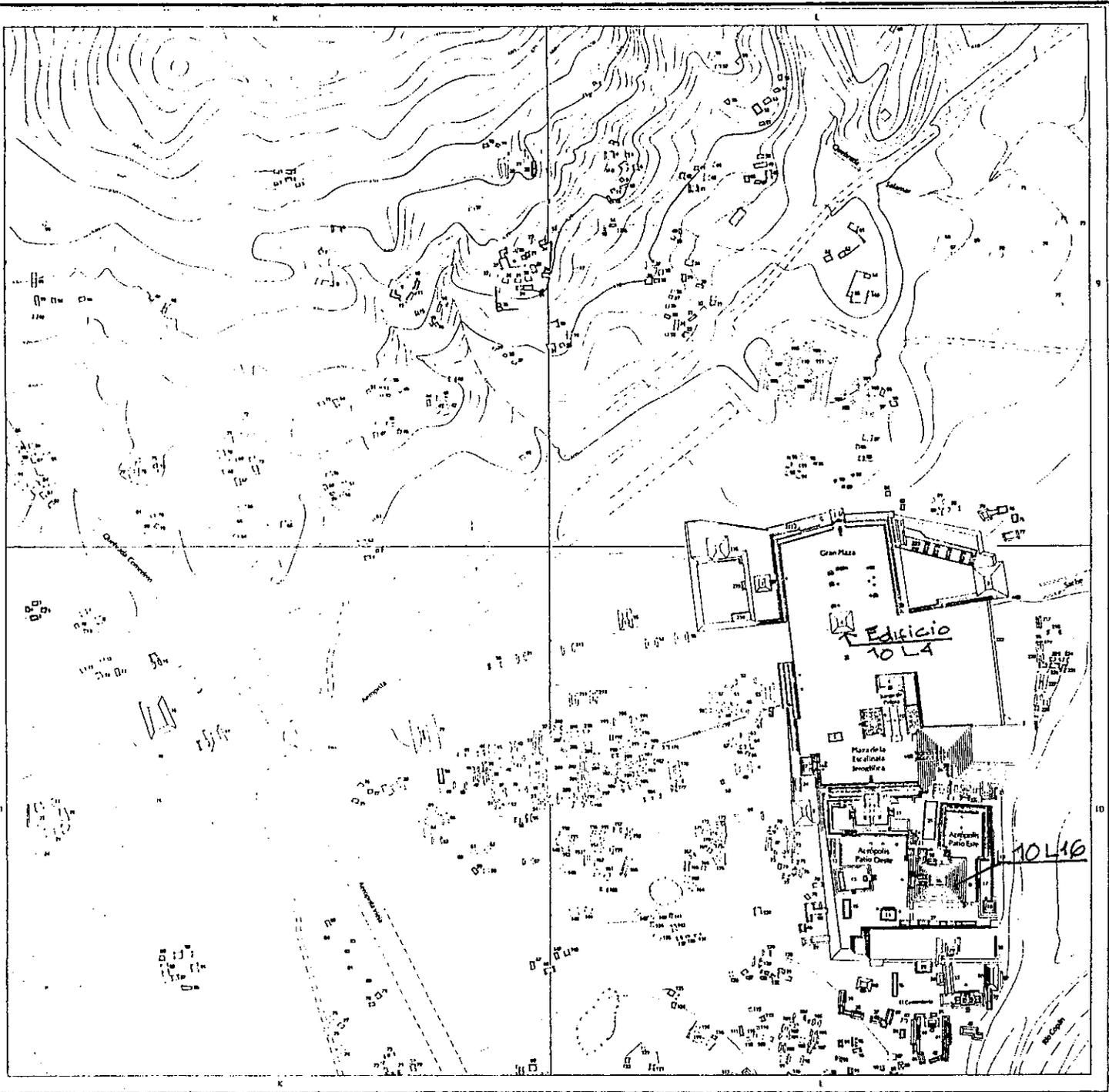
Figura 10

I. H. A. H.			
PROYECTO ARQUEOLÓGICO ACROPOLIS DE COPAN			
P. A. A. C.			
CONTENIDO ESTRUCT. 10L-16 SUB-ROSALILA			
INTELIGENCIA	R. AGUIRRE Y	MAPAS	JOSE H. ESPINOZA
ADMINISTRACION	R. LARROS	NOTAS	E. LARROS Y
LABORES	F. LOPEZ	ESCALA	1:50
FECHA	1950	FECHA	OCT/52
REVISOR	JOSÉ RAMOS		
UBICACION COPAN RUINAS, COPAN			



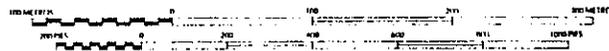
SUB. 10

06120



Mapa levantado por:
 Carnegie Institution of Washington, Director: Gustav Stromvik
 1916-1917 E.M. Shook
 Universidad de Harvard, Director: Gordon R. Willey
 1977 W.L. Fash
 Proyecto Arqueológico Copán, Directora: Claude F. Baudet
 1978 B.M. Olson R.A. Aguirre F. y D.I. Vleck
 1979 D.T. Vrecky B.M. Dixon
 1980 K.Z. Long y W.L. Fash

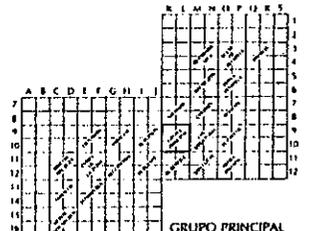
ESCALA 1:2000



CURVAS DE NIVEL CADA 2 METROS
 CURVAS DE NIVEL EN ABRAS Y BARRERAS, CADA 20 METROS
 DATOS VERTICALES: NIVEL METROS DEL MAR

Coordenadas geográficas
 Latitud 14°50' 4" Norte Longitud 87°08' 5" Oeste

INDICE DEL MAPA



SEÑALES E INVENTARIALES

Carretera moderna	Escala
Servicios modernos	Altura
Rio, huerto y campo	Curva de nivel
Edificios modernos	Curva de nivel positiva
Canchales	Edificio
Barridos arqueológicos	Edificio

Figura 11

Estas estructuras de Copán son las más características del área, por lo que se puede pensar que la carga máxima, que se aplicó al suelo de Copán debería estar aproximadamente en las 11.35 tons/m². El suelo es una marga compuesta de arena, limo y arcilla casi en el mismo porcentaje.

En Tikal se analizó el templo 1 y el templo 2, denominados así comunmente.

Edificio : templo 1 (figura 20, ref 1)

Altura (h)	39.00 m
Ancho base	33.00 m
Largo base	34.00 m
Ancho sup	2.00 m
V largo sup	7.00 m
Área base	1,122.00 m ²
Área superior	14.00 m ²
Volumen	14,768.00 m ³
peso relleno	1,470.00 Kg/m ³
peso estruc.	21,708,960.00 Kg
carga unit.	19,348.45 Kg/m²
En la base	

Edificio : templo 2 (figura 18 y 19 ref.1)

altura (h)	33.00 m
ancho base	33.00 m
largo base	34.00 m
ancho sup	2.00 m
largo sup	10.00 m
Área base	1,122.00 m ²
Área superior	20.00 m ²
Volumen	12,562.00 m ³
peso relleno	1,470.00 Kg/m ³
peso estruc.	18,466,140.00 Kg
carga unit.	16,458.24 Kg/m²

Figura 18

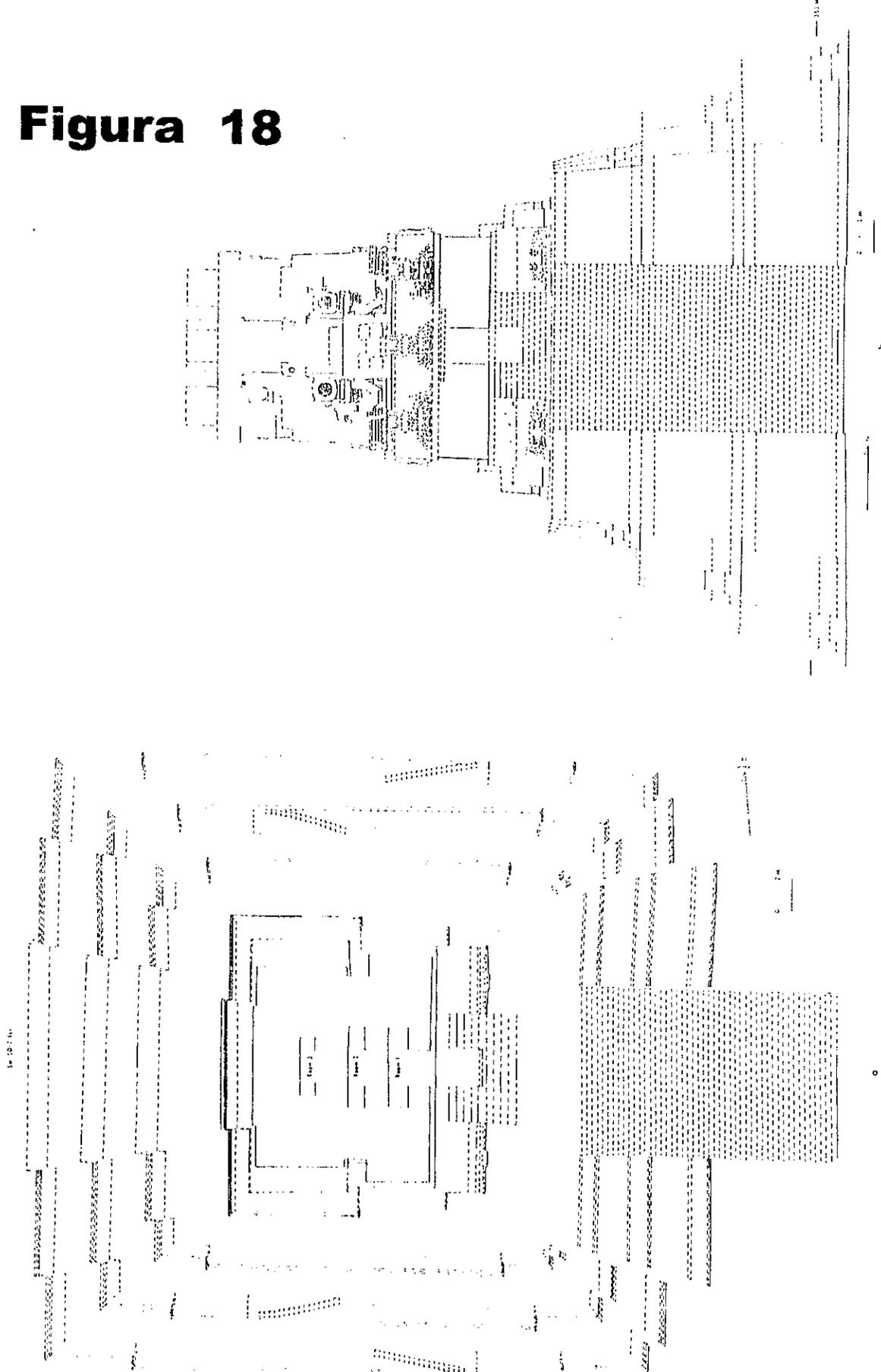


Figura 19

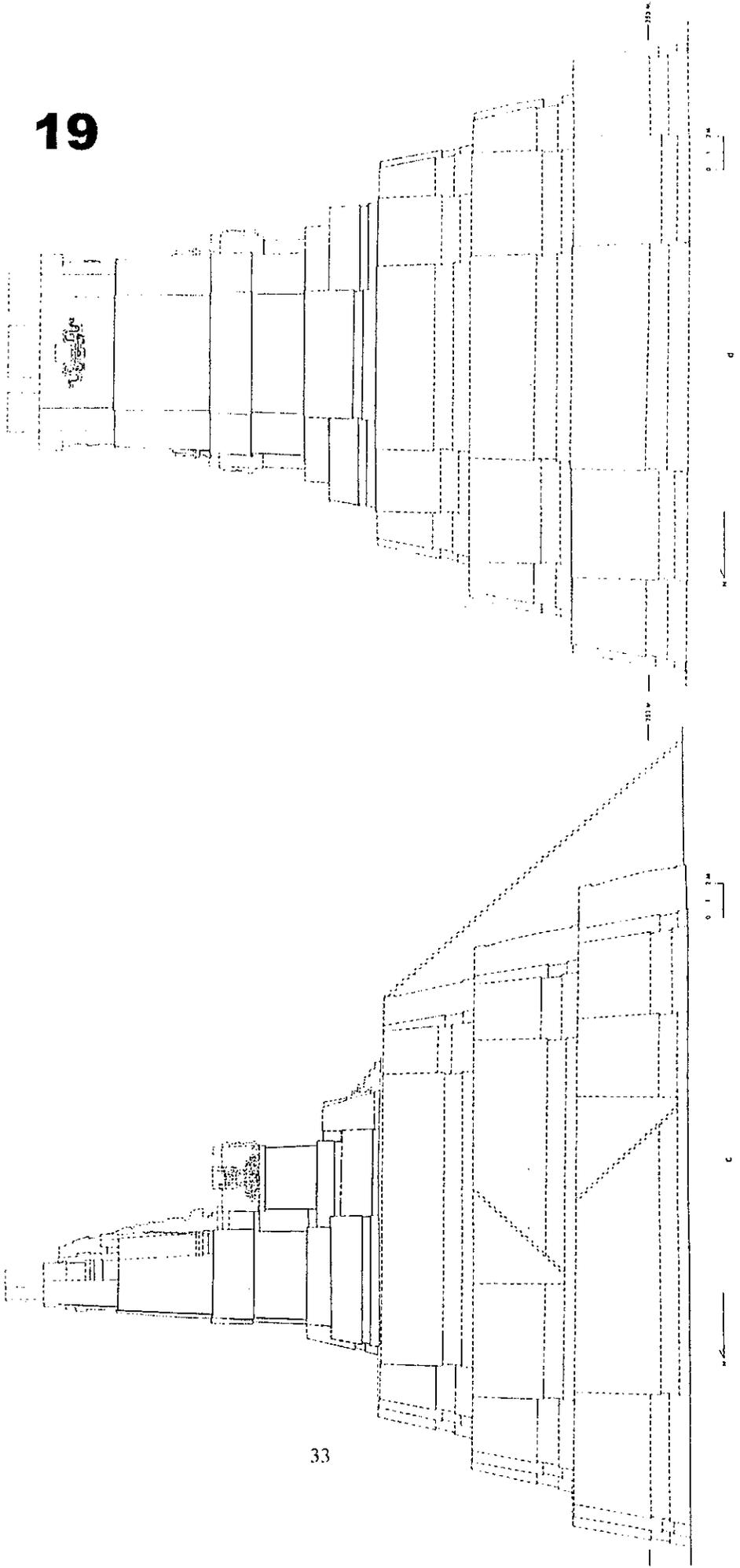
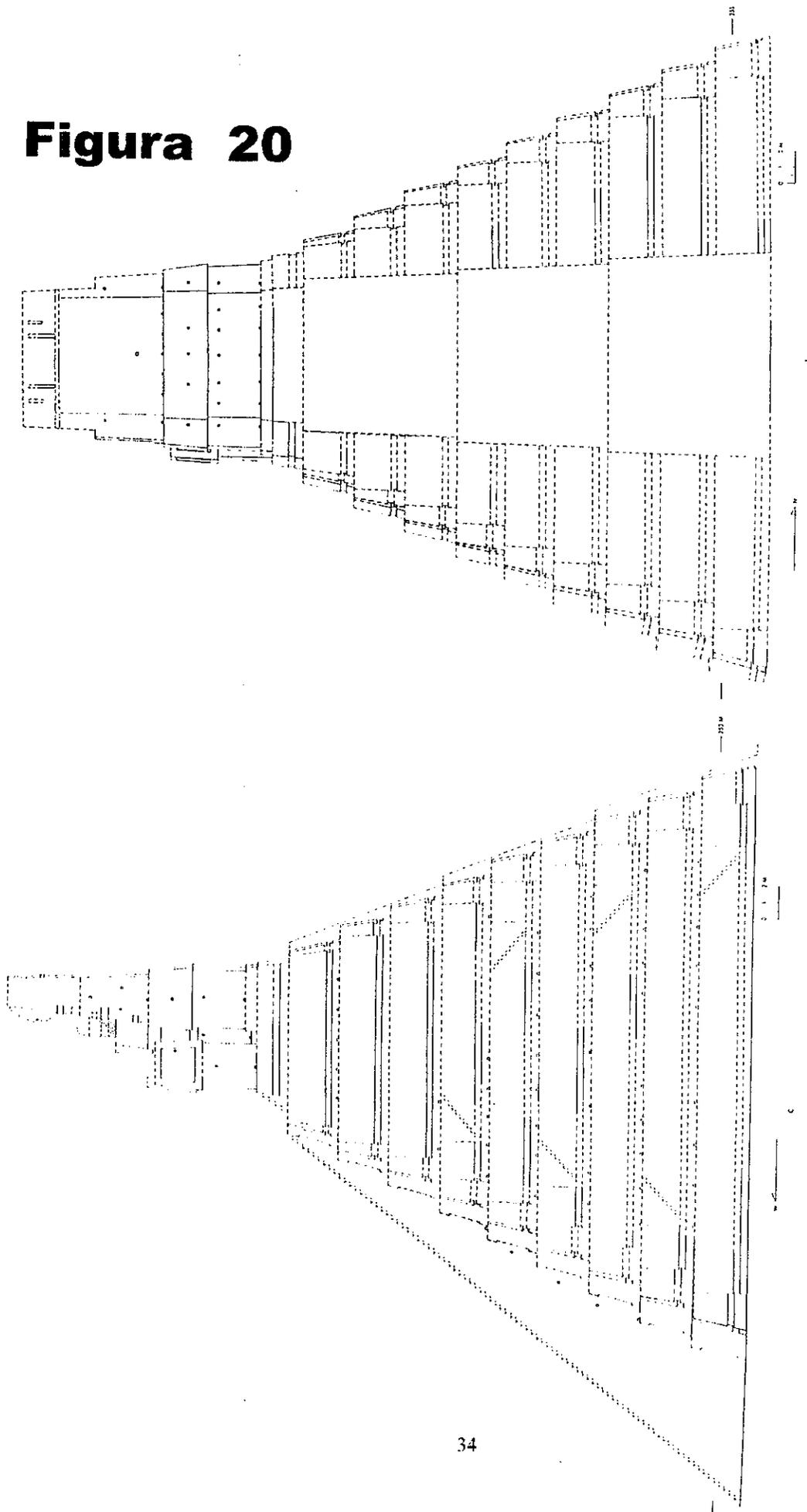


Figura 20



Estas estructuras no son las más altas de Tikal pero si las más importantes, la carga aplicada en el suelo de Tikal fue mayor que las 19.35 toneladas / metro cuadrado.

Notese que la base de las construcciones en Copán es mucho más grande que en Tikal, y las estructuras de Tikal son más altas que en Copán.

1.3) Hidráulica: (objetivo principal contra destrucción)

1.3.1) Drenajes:

A causa del tipo de materiales y especialmente por las arcillas aglutinantes en los rellenos de gran permeabilidad, los drenajes en todas las ciudades se convirtieron en una necesidad primordial, ya que las estructuras no podían correr el riesgo de permitir filtraciones de agua y sus materiales sufrir cambios volumétricos y causar presiones laterales y por supuesto su natural destrucción. Por ello, se veían exigidos de una evacuación inmediata del agua de lluvia, a través de adecuados desniveles en las gruesas capas de piso de las superficies horizontales y magníficos canales de desagüe.

En Copán, en el área del acrópolis (figura 11), existen varios drenajes de mampostería, a manera de alcantarillas (ver foto No 3), pero llama la atención muy especialmente un canal de sección rectangular que transportaba toda el agua del área de la gran plaza, y pasa por debajo de la acrópolis, llevando sus aguas hacia el sur con rumbo al río Copán. La plaza referida tiene un área libre, que corresponde a 3.6 hectáreas. Dicho canal mide 0.80 m. de ancho por 1.00 m. de alto (figura 12).

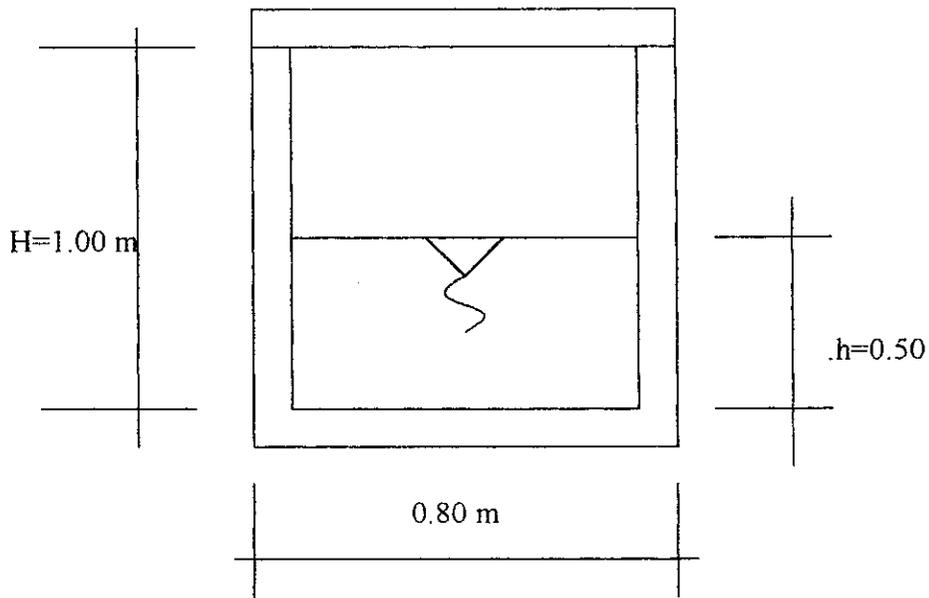


Figura 12

Canal de evacuación de agua de lluvia

Los datos para calcular el canal son los siguientes:

coeficiente de escorrentía $c = 0.90$

área = $36,000\text{ m}^2$ (figura 11)

Precipitación $I = 50.00\text{ mm/hr}$ (ref 10)

pendiente $S = 3\%$

coeficiente rugosidad: $n=0.040$ (ref 11)

perímetro mojado = $0.50+0.50+0.80+0.80 = 2.60$

sección mojada = $0.50*0.80=0.40$

$$Q = c \times I \times A = 0.45 \text{ m/sg}$$

Q = caudal

V = velocidad

c = coeficiente de escorrentía

A = área en m²

I = precipitación en m/sg

$$V = S^{1/2} \times R^{(2/3)} / n$$

R = secm/pm = sección mojada / perímetro mojado

$$R = 0.16$$

$$V = 1.27$$

n = coeficiente de rugosidad = 0.040

$$Q = V \times A_s$$

$$A_s = Q / V = 0.36 \text{ m}^2, \text{ según diseño}$$

$$A_s = b \times h$$

$$.h = A_s / b = 0.36 / 0.80 = 0.45 \text{ m}$$

La altura de agua será de 0.45 m, casi llenando el canal a la mitad (0.50 m), por lo tanto el diseño coincide con las dimensiones dadas a la construcción del canal, por los mayas.

1.3.2) Estucos o repellos

Más que un diseño arquitectónico y de decoración este material era aplicado como un método de impermeabilización de sus estructuras, evitando así la filtración de agua, pero más que eso, evitando la meteorización de la mampostería y por consecuencia la destrucción, en la actualidad los restauradores, conservadores y arqueólogos se han enfrentado a los problemas del deterioro de la piedra, causado por la intemperie o meteorización, que es el efecto de todos los fenómenos naturales y especialmente

estimulados o activados por las aguas de lluvia que disuelven los minerales componentes, deteriorando la piedra de manera irreversible. Los mayas conocieron este fenómeno, pero no tuvieron que buscar soluciones tan difíciles como en la actualidad, ya que la piedra estaba siempre cubierta por medio de repellos o estucos en las superficies verticales y pisos en las horizontales, que además eran resanados o renovados cada cierto tiempo, incluso en los restos escultóricos de piedra, se puede ver claramente que también les gustaba pintarlos y cambiarles de color de vez en cuando.

1.3.3) Nivel de cimentación hidráulico:

En la cimentación, como ya se dijo en la sección 1.2.2, se colocaba un nivel de aproximadamente 10 cm. de cascajo, es decir, partículas de desechos del tallado de las piedras, que por lo visto tenía la función de lo que se conoce actualmente como un drenaje francés. Para propiciar que la humedad capilar fuera escurrida por medio de dicho drenaje, horizontalmente, colocado exactamente bajo el piso de cimentación de estuco.

2) CONSTRUCCIÓN:

Para construir las pirámides se ha calculado que se necesitó, de la mano de obra total, que se podía conseguir en la población correspondiente, es interesante notar también que existe una relación bastante parecida y proporcional en todas las ciudades mayas, entre la cantidad de población y las dimensiones arquitectónicas de sus construcciones.

La más grande de las pirámides mayas tiene aproximadamente 50,000.00 m³ de relleno, según Silvanus Morley, unas 5,000 personas levantarían dicha pirámide en 2 años, basado en que el rendimiento de un trabajador, trabajando solo en sus horas libres equivale a 5 m³/año, en ese tiempo y con todas las restricciones que tenían para la construcción (ref. 9).

No parece una cifra imposible o exorbitante, sino mas bien lógica, el otro problema es cómo incentivaban a las personas a trabajar horas extras para construir dichos edificios.

Muchos se han preguntado, cómo construyeron las estructuras los mayas. Actualmente se puede afirmar que lo hicieron, partiendo de una gran organización, e incentivos religiosos.

Una práctica común en el levantado de edificios sobre otros, era quebrarlos y luego enterrarlos, no así Rosalila (ref. 4, pp 68), por lo tanto la construcción de nuevos y más altos edificios no cesaba.

2.1) Partes de una estructura maya (figura 1)(ref. 7)

2.1.1) Cimiento:

Se le llama en los términos de los científicos encargados de la restauración, consolidación y arqueología: superficie de sustentación.

2.1.2) Basamento:

Es la parte piramidal que servía para sostener el edificio, el basamento se puede componer de uno o varios cuerpos, su origen está, en evitar que la escorrentía destruyera las casas.

2.1.3) Edificio:

Es el objetivo de la construcción de la estructura, variaba en dimensiones dependiendo del uso.

2.1.4) Crestería:

Parte superior del edificio, generalmente de los que se les daba el uso de templo.

2.2) Rellenos:

Los rellenos son lo que le dan consistencia al edificio, normalmente se hacían como una mezcla de agua, suelo y piedras.

En el período clásico medio y en el período clásico temprano se utilizaban grandes cantidades de agua para hacer los rellenos fuertemente compactados.

En Copán se utilizaban arcillas y cantos rodados, o piedras rústicas de toba, provenientes de canteras especializadas.

2.3) Mezclas de Cal:

Las mezclas de cal han sido incluidas como parte estructural de las edificaciones mayas, ya que en la mayoría de sus construcciones, dichas mezclas son de vital importancia en lo que se refiere a estabilización y conservación.

El uso de las mezclas de cal, en el nuevo mundo aparece por primera vez en Mesoamérica, durante la época conocida como preclásico medio, siendo uno de los rasgos característicos del área, es decir, que es una invención mesoamericana. Dicha invención jugó un papel importantísimo en el avanzado desarrollo arquitectónico e ingenieril de dicha cultura.

Los mayas aprovecharon las cualidades físicas de las mezclas de cal para construir sus edificaciones; Dándole a las mismas, una muy variada y abundante cantidad de usos, logrando así un avance técnico muy importante.

La información acerca de las mezclas de cal es muy escasa.

Charlot y Morris (1931, vol 1: 220-4) reportan que el mortero de cal fue hecho con el jugo del árbol del Chocom y E.H. Thompson (1932:174) menciona el uso del Sascab en lugar de arena, al hacer el mortero, (Sascab, es un polvo de carbonato de calcio encontrado en depósitos de piedra caliza).(ref. 8)

Otras personas refirieron que los repellos y morteros fueron mezclados también con miel, además ciertos trabajadores del proyecto de restauración de Uxmal en México, bajo la dirección del Sr. Alberto Ruiz, mencionaron que en la actualidad todavía es usado un extracto de la corteza del árbol del Chocón, para humedecer el repello antes de aplicarlo.

A través de un proceso de laboratorio hecho por Edwin R. Littman, que incluyó la extracción de unas muestras de 5*5*5 cm. , Y posteriormente un análisis de calcio, magnesio y del material disoluble en ácido hidrociorhídrico; se determinó que existía una mezcla de partes iguales de cal y suelo arenoso disponible alrededor de la construcción en varias mezclas de repello.

En el ambiente arqueológico, la clasificación del uso de las mezclas de cal, puede ser un tanto variada, a continuación se definen algunas funciones de las mezclas de cal, que interesa conocer, ya que sirvieron como medio para evitar fallas en las construcciones precolombinas:

2.3.1) Mortero:

Es un material enlazante o de unión, que trabaja como pegamento entre las piedras o adobes de los muros de mampostería, y fue utilizado en ciudades como, Tikal y muchas otras en El Petén y Yucatán.

2.3.2) Repello:

Capa externa y plana, sobre el conjunto monolítico, usado como medio de protección e impermeabilización, o como base de pinturas murales.

Éste fue usado de manera general en toda el área.

2.3.3) Piso:

Capa extendida a lo largo y ancho de plazas y edificios, con mucho más espesor que el repello, con el objetivo de soportar el peso de la carga viva y el desgaste.

La terminología de Littman (1967:523) considera los pisos como unidades de construcción que se componen de cuatro elementos: la lechada (wash coat), fina capa de cal pura que sella e impermeabiliza la superficie del piso; la argamasa (Plaster); la base que recibe la argamasa; el fundamento del piso (ref. 8).

2.4) Cómo construyeron sus edificios:

La construcción se hacía por medio de la fuerza humana, el procedimiento iniciaba en la cantera de la piedra, donde se extraían los bloques de mampostería y relleno a utilizar, el transporte se hacía cargando las piedras hasta el lugar de la construcción. En el caso de grandes bloques monolíticos, se llevaban jalándolos sobre rodillos de madera auxiliados por palancas y planos inclinados. En el lugar, el levantado se hacía por medio de albañiles especializados, que como en la actualidad erigían andamios de madera, con uniones amarradas con lazos; lo mismo se hacía en las esculturas (ref.9).

2.4.1) Limpieza:

La primer actividad que se hacía al iniciar una estructura maya, era la limpieza del lugar, quitar árboles u otros obstáculos. Esto lo hacían siempre y cuando fuera una estructura que se quisiera hacer en un terreno baldío, no así cuando la construcción era una remodelación del área o sustitución de edificaciones, como cuando se quería construir sobre una acrópolis o transformar un área residencial.

2.4.2) Demoliciones:

Una de las actividades que se tornaban necesarias al ir haciendo cambios, era la de demoler estructuras ya caducas o con fallas, sobre las cuales se construía un nuevo basamento, usando los restos de la estructura demolida, como parte del núcleo de la nueva entidad constructiva.

2.4.3) Superficie de sustentación:

Al tener limpia el área sobre la que se construiría, se procedía a extraer el humus del suelo, buscando un suelo más estable. En dicha excavación como ya se dijo en la sección 1.2.2 y 1.3.3, se extendía una capa de cascajo, muy parecido al piedrín que se utiliza en la actualidad. Teniendo ya extendida la capa de cascajo, se aplicaba una capa de aproximadamente 10 cm. de mezcla de cal, como un piso, el cual se construía a nivel.

El trazo aparentemente era hecho con fundamentos astronómicos, y dado a que la trayectoria de las grandes luminarias es variante durante todo el año, se puede notar en sus respectivas estructuras, muchas diferencias en la línea de dirección del norte respectivo (figura 11).

2.4.4) Basamento:

Después de fundir el piso o el primer nivel de sustentación o cimiento; nivelado el piso; se trazaba sobre el mismo, como ya se dijo, con líneas incisas o líneas de color; la forma del basamento, y sus dimensiones, previamente diseñadas por el ingeniero constructor maya.

Se empezaba levantando por la línea trazada, el muro de contención de mampostería, pegada con mezcla de cal, en el caso de Tikal, y con arcilla en el caso de Copán; al tener terminada una o varias hiladas de piedra, se procedía a colocar el relleno, el cual se hacía mezclando suelo, con agua y piedras; apisonando hasta el nivel de las hiladas terminadas.

Este procedimiento se repetía periódicamente, y en cada cuerpo del basamento, hasta llegar al nivel dispuesto para formar un nuevo nivel de sustentación. El procedimiento se repetía en cada cuerpo hasta alcanzar la altura donde se quería levantar el edificio.

2.4.5) Levantado del Edificio:

El levantado del edificio también se hacía sobre el piso que nivelaba totalmente el área a construir que se había extendido sobre el último cuerpo del basamento, sobre el cual se trazaba el diseño de los cuartos, muros y puertas del edificio.

El constructor ya sabía qué dimensiones de vigas de madera instalaría en los dinteles de las puertas, también ya sabía qué dimensiones le daría a los muros y a qué altura iniciaría los declives de las bóvedas para techo.

3) FALLAS:

Como se dijo anteriormente el laboratorio de los mayas fue su experiencia, por lo tanto para conocer sus limitaciones en la construcción se debían cometer errores que costarían la destrucción de la obra.

Cuando un edificio fallaba, los mayas en algunas ocasiones solo resanaban las fallas; reintegrando el repello, colocando contrafuertes o rellenos de las áreas con problemas.

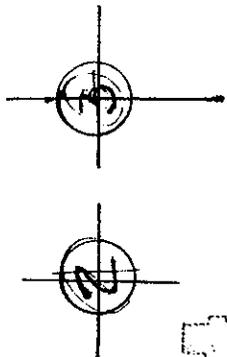
En otras ocasiones se destruía la estructura fallada, y se erigía una nueva, aprovechando en parte los restos antecesores.

3.1) En construcciones de muros de carga

Se puede notar en las secciones de la estructura Rosalila de Copán, (figuras 13 y 14) una falla de hundimiento, producida por el exceso de peso, y probablemente por una mala preparación de la superficie de sustentación. En el eje B y el eje C (figura 13) se definen los hundimientos, exactamente abajo de la línea de carga que provoca el tercer nivel, se puede notar al mismo tiempo que los mayas repararon el hundimiento solamente echando un nuevo piso a nivel. En los ejes 2 y 3 (figura 14) se ve también dicho hundimiento, provocado por la carga del edificio en los muros de carga, el eje 3 parece ser crítico, ya que dicho eje tiene muro de carga en el primero, segundo y tercer pisos.

En Copán se levantaron estructuras con un máximo de carga de 12tons/m², calculando cuál fue la carga aplicada en el muro de la estructura mencionada (figura 13 y 14). Se pueden definir dos muros de carga en la estructura, que se encuentran en los ejes B y C, respectivamente (figuras 10,13,14,15,16,17).

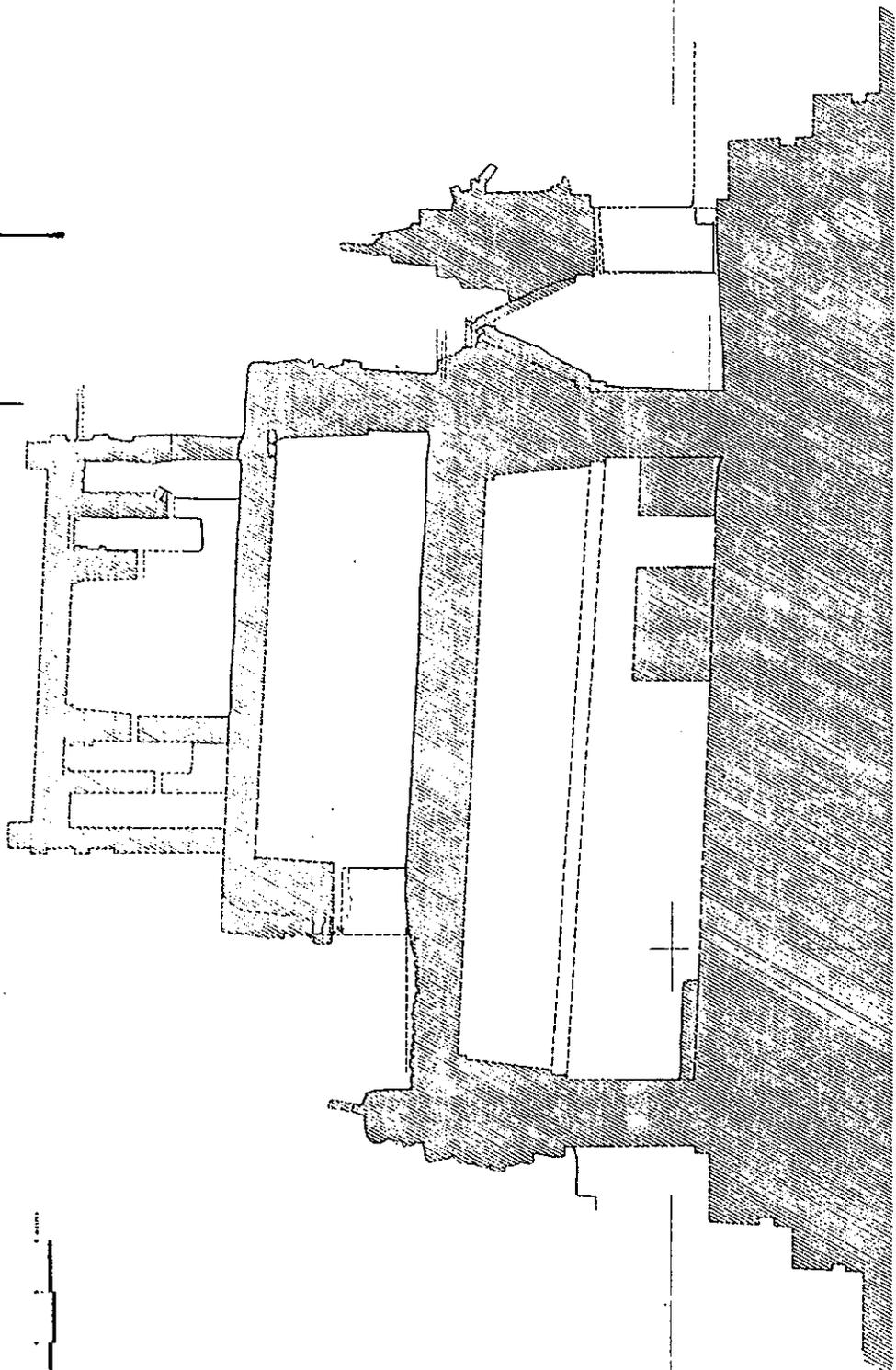
Figura 14



N 20

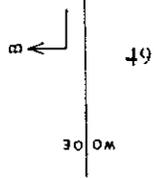
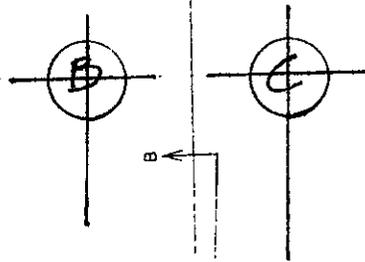
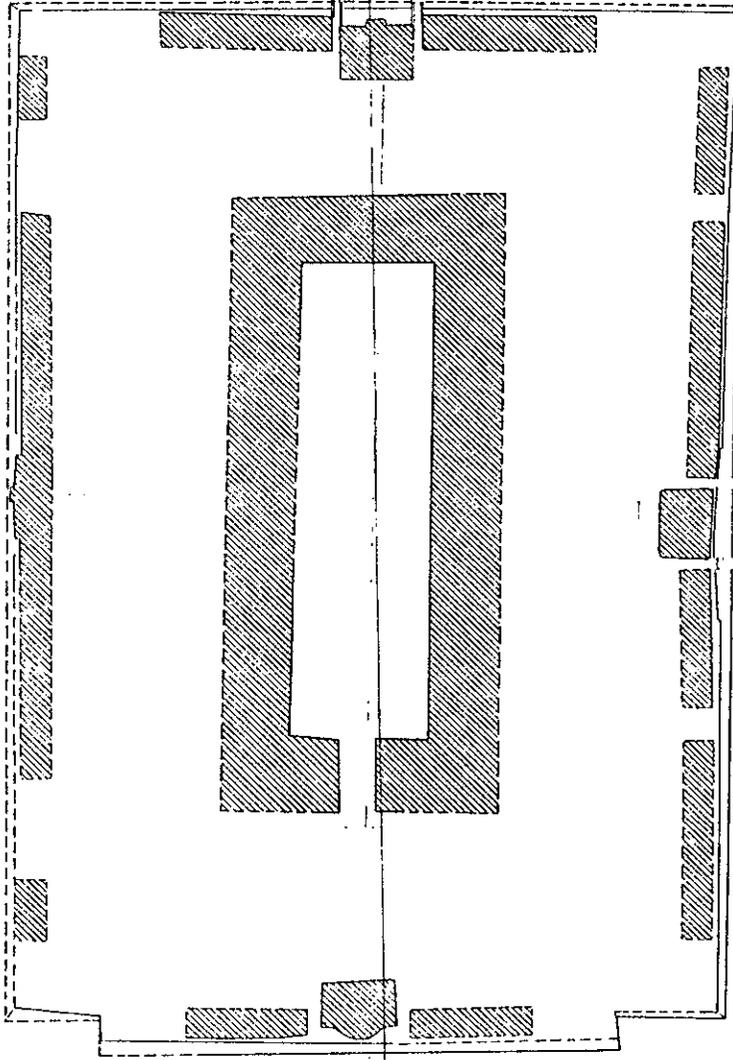
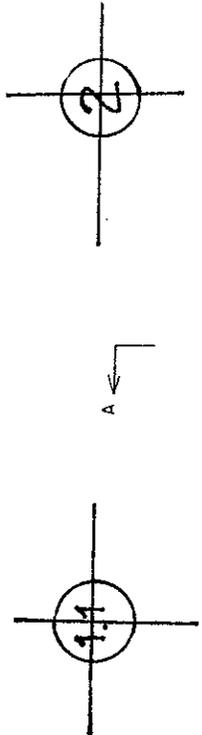
N 20

I. H. A. H.	
PROYECTO ARQUEOLOGICO ACROPOLIS P. A. A. C.	
CONTENIDO: ESTRUCT. 10L-16 SUB-ROSALILA PERFIL SECCION B-B	
INVESTIGADOR	DR. JORGE A. ESPARCEZA
COORDINADOR	DR. JORGE A. ESPARCEZA
ASISTENTE	DR. JORGE A. ESPARCEZA
FECHA	1° 50 OCT/92
LOCALIDAD: COPAN RUINAS, COPAN	



600 20

I. H. A. H.	
PROYECTO ARQUEOLOGICO ACROPOLIS DE COPAN	
CONTENIDO ESTRUCT 10 L - 18 SUB-ROSALILLA PLANTA DE SEGUNDO NIVEL	
FECHA: 1982	PROY. LARSEN V
COMANDO: E. LARSEN	REVISOR: E. LARSEN V
ELABORADO: E. LARSEN V	FECHA: 1982
REVISADO: E. LARSEN V	FECHA: 1982
UNIDAD: COPAN RUINAS, COPAN	



WO OE

69

30 OE

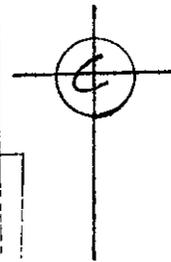


Figura 16

NO 05

N 20

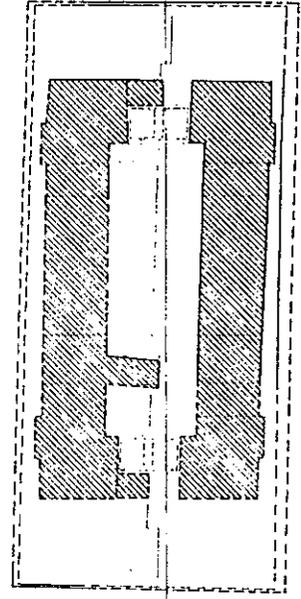
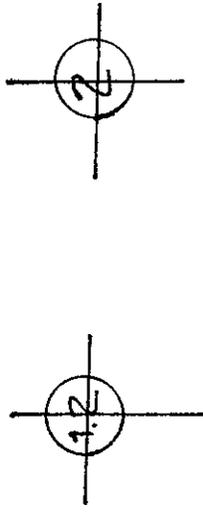


I. H. A. H.	
PROYECTO ARQUEOLOGICO ACROPOLIS DE COPAN	
CONTENIDO ESTRUCT. IOL - 16 SUB ROSALILLA PLANTA TERCER NIVEL	
INVESTIGADOR	DR. I. H. A. H.
COMPLETADO	1982
FECHA	1-30 NOV/82
UBICACION	COPAN RUIINAS, COPAN



N 20

A ←

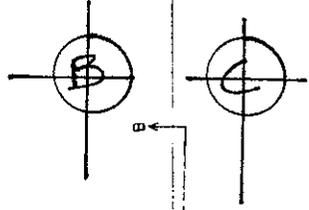


B ←

30 OM 50

N 20

A ←



30 OM

N 20

Figura 17

Para calcular, a qué carga están sometidas las bases de dichos muros se deben utilizar el largo que tiene el tercer nivel sobre dicho eje, es decir 8.20 m. (figura 17 y 14), a dicha carga se le suma el peso que hay en esa misma distancia del segundo nivel, y lo mismo del primer nivel. Ya que los 8.20 m., definen la carga crítica, porque allí se presenta el peso de los tres niveles.

Calculando...

Usando las densidades definidas con anterioridad

Cargas:

Los pesos dados a continuación son los pesos que carga específicamente uno de los dos muros críticos, con el objetivo de verificar los cálculos.

Tercer nivel:

$$\begin{aligned} \text{peso techo: } & 8.20 \times 0.30 \times 2.30 \times 1,734 \\ & =9,811 \text{ kg} \\ \text{peso muro: } & 8.20 \times 3.20 \times 1.3 \times 1,734 \\ & =59,150 \text{ Kg} \\ \text{total} & \quad P=69,000 \text{ Kg} \\ \text{peso unitario} & = p/8.20= 8,415 \text{ kg./mt} \end{aligned}$$

Segundo nivel:

$$\begin{aligned} \text{peso techo} & \quad =9,811 \text{ Kg} \\ \text{peso muro: } & 8.20 \times 3.00 \times 1.30 \times 1,734 \\ & =55,450 \text{ kg} \\ \text{total} & \quad P=65,261 \text{ Kg} \\ \text{peso unitario} & =p/8.20=7,960 \text{ kg./mt} \end{aligned}$$

Primer nivel:

$$\begin{aligned} \text{peso techo: } & 4.00 \times 0.50 \times 8.20 \times 1,740 \\ & = 28,540 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{peso muro: } & 1.30 \times 4.50 \times 8.20 \times 1,740 \\ & = 83,500 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{total} \quad 112,040 \text{ Kg}$$

$$\text{peso unitario} \quad 13.663 \text{ kg./mt}$$

Peso unitario acumulado

$$\text{peso unitario} \quad 30.038 \text{ kg./ml}$$

En un ancho de muro de 1.30 m. el peso por unidad de área sería entonces:

$$\text{peso / área} \quad 23,106 \text{ kg./m}^2$$

El dato se aproxima a 23.2 toneladas por metro cuadrado, mucho más alto que el peso soportado por la estructura más alta de copan (16 ton/m², según el análisis hecho en el capítulo 1.2.2), con esta carga aplicada, el grueso del muro debería ser:

$$B = 23,200 \text{ kg/m} = 1.45 \text{ m y no } 1.30 \text{ como se construyó}$$

3.2) Fallas exteriores:

Éstas son las fallas más visibles y frecuentes en todas las ruinas del mundo maya, y se dan por los factores climáticos del área tropical húmeda a que están sometidas las estructuras, al ser debilitadas las partes estructurales importantes, de la roca sin estuco y la destrucción de la mezcla de unión de la mampostería, produciendo muros completos caídos con su cara al suelo y hundimientos en los pisos.

4) DESTRUCCIÓN:

Cada ciudad precolombina tiene distintas características en lo que se refiere a materiales, ya que se utilizaban los materiales disponibles en el lugar. Por ejemplo; en Tikal se utilizó como mampostería, la piedra caliza; en Copán, se utilizó la piedra Toba que era más resistente al intemperismo; en otros lugares como en Kaminal juyú, se usaron bloques de adobe de arcilla, que en muchos casos fue revestida de piedra pómez y repello de arcilla con arena de río. Por lo tanto se puede ver que partiendo del material, existen distintas causas de destrucción, en cada una de las ciudades.

4.1) Rocas de mampostería:

En lugares como en Tikal, o Xunantunich se puede encontrar una mampostería mecánicamente débil y en un alto grado de destrucción, ya que la piedra caliza se va deshaciendo, mediante la intemperización.

Los materiales en el área central maya, incluyendo la piedra caliza, estuco, mortero, y repello, están compuestos de calcita mineral.

El intemperismo, se da cuando el agua de lluvia, presenta una reacción ácida, gracias a los contaminantes atmosféricos disueltos en ella, el agua es transportada a través de los poros por medio de capilaridad, hacia adentro de la piedra. En el curso de este movimiento las sales solubles se extraen de la piedra y se someten a hidrólisis. Los iones de estas sales disueltas migran hacia las partes más calientes, mientras que el agua se mueve hacia las partes más frías, dando lugar a depósitos insolubles y voluminosos.

El movimiento del agua en los materiales cementantes, tiende a empobrecer el medio cementante.

El repello es mucho más fuerte y más denso que la piedra caliza, la capa superior de repello es fácilmente distinguible de la capa inferior de cal y de la piedra caliza usando un microscopio fluorescente(ref.8).

La degradación de los materiales está relacionada al clima (especialmente está relacionada a la lluvia mediante la estación húmeda) y está relacionada también a los materiales naturalmente débiles, un área de superficie alta, así también como una significativa porosidad, el ácido carbónico en la lluvia disuelve el cemento de calcita fino que enlaza la piedra caliza, formando una suave capa exterior, cuando está mojado, el peso agregado del agua reduce la fortaleza de las sisas de la piedra caliza así también como del repello, el agua en los microporos de la piedra caliza también disminuyen la energía necesitada evitar las grietas, haciendo la piedra menos resistente al estrés físico cuando está mojada, La biodeteriorización es también un importante mecanismo de deterioro de las ruinas del área del Petén y Belice.

Las raíces de las plantas y algunos microorganismos, producen ácidos orgánicos que disuelven los cementos de la piedra.

Con el objetivo de encontrar una solución a la destrucción de la piedra caliza maya, el Instituto Getty para la conservación, de los Estados Unidos, en su informe " Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments" en 1995,(ref. 6) hizo ciertas investigaciones con sistemas de resinas epóxicas diluibles en agua, y se encontró que penetran y estabilizan la débil y húmeda piedra caliza.

Sin embargo hasta el día de hoy no se ha utilizado como medio de consolidación de edificaciones deterioradas.

En otros lugares, como en Kaminal Juyú, la mampostería es de adobe de arcilla, siendo este tipo de construcción, crítico, en lo que se refiere a destrucción por el clima, humedad, erosión y agentes biológicos. Por lo tanto se ha tenido un especial cuidado en su conservación, no exponiendo dichas edificaciones a la intemperie, y en muchos casos ni si quiera a la vista del público, e incluso dejándolas enterradas.

Esto hace que en realidad las edificaciones de El Petén, que si están expuestas a la intemperie y al público, sean las que han recibido el más alto nivel de deterioro.

4.2) A causa de suelos poco resistentes:

En los cálculos correspondientes a Copan, se definió ya la poca resistencia de carga del suelo, y las fallas que esto ocasionó a los edificios construidos en esta ciudad. Se tiene el ejemplo de la estructura Rosalila, en la cual se pudo ver que el hundimiento se debió al exceso de carga aplicada en sus muros principales.

4.3) Abandono y naturaleza

El abandono de cualquier vivienda o edificación, siempre provocara la destrucción. La falta de mantenimiento dio como resultado el nacimiento de un sin número de líquenes, y plantas y por último grandes árboles frondosos, cuyas raíces bien afianzadas crecían por el interior de los rellenos, destruyéndolos a su paso. Todo esto hizo que los grandes templos y edificios mayas se convirtieran, con el paso del tiempo, en unos montículos olvidados, en medio de la selva tropical.

4.4) Pérdida del estuco:

Los mayas tenían un mantenimiento de calidad, constantemente estaban aplicando sobre sus repellos, pintura y lechadas de cal, con el fin de conservar intactas sus estructuras, cuando una estructura ya había dado un uso prolongado, la renovaban parcial o totalmente, remodelándola o destruyéndola con el fin de levantar una nueva.

Cuando faltó el mantenimiento, a causa del abandono del sitio, se empezaron a deteriorar los repellos y los pisos, deshaciéndose los mismos.

También al excavar los montículos y penetrar en el suelo cobertor de las estructuras, se llegó directamente a la mampostería, ya que muchas veces el estuco roto se mezcla con el suelo, esto provoca también la pérdida del repello y de los pisos.

La pérdida de la cobertura de cal, de las estructuras, y la exposición a la intemperización de la mampostería, ha provocado el alto grado de destrucción de las ruinas de Tikal.

DISCUSIÓN:

Todos los datos y cálculos aquí descritos deben dar una imagen de la capacidad ingenieril de los constructores mayas.

En la sección 1.2.1.1 se lograron calcular los muros de retención, dando como resultado, el chequeo de las pruebas de deslizamiento y volteo, con lo cual se verifica la estabilidad de los muros descritos, en la sección 1.2.1.2 y 1.3.1, los resultados de los cálculos de las vigas de madera o dinteles de las puertas y las alcantarillas respectivamente, dieron una exactitud sorprendente, el diseño de los techos parece basado en la lógica y por último. el hundimiento de la estructura Rosalila y su posterior entierro dan una imagen de acercamiento a una Ingeniería desconocida, como lo es la Ingeniería maya; La destrucción de las estructuras mayas empieza cuando se deja de dar mantenimiento, al perder la cobertura de cal o estuco.

El hecho de que se hayan aplicado cargas tan grandes sobre el suelo de Copán, no puede contestarse, si no se hace un análisis de suelos, implicando grandes costos, pero teniendo gran utilidad a nivel investigativo y científico.

Un conocimiento más amplio de la Ingeniería maya, puede cimentar las bases de restauración y consolidación de las estructuras por ellos construidas.

CONCLUSIONES:

1) Viendo que todos los resultados obtenidos, están en el margen de aceptación de un diseño estructural de la ciencia actual, se puede concluir que, si existió un nivel de diseño previo a levantar cualquier estructura maya.

2) Se puede notar que; al ir construyendo y encontrando fallas en sus edificaciones, los mayas pudieron corregir errores al levantar posteriores estructuras.

Se tiene el caso de Rosalila (figura 13), en el cual se pudo descubrir que al darse por vencidos, después de tratar por todos los medios posibles de mantener estable la estructura, se levanta otra más grande pero con una presión de carga por unidad de área mucho menor, con el objetivo de evitar posteriores hundimientos.

El dato que se utilizó para levantar Rosalila (figura 13) fue de aproximadamente 23 ton/m², el dato que se usó para levantar la estructura 16, exactamente sobre Rosalila fue de 13 ton/m², esto lleva a entender que se dio 10 ton/m² de margen para evitar posteriores hundimientos, lo cual dio resultado.

Se puede ver por lo tanto, que precisamente el laboratorio de los mayas fue su experiencia

3) La causa más importantes de destrucción de las estructuras no es una falta de diseño, sino la falta de mantenimiento, del tipo proporcionado por sus constructores y la exposición a la intemperie de la mampostería componente.

4) Según los resultados obtenidos en los cálculos de deflexión de vigas en los dinteles, los ingenieros mayas se preocuparon, hasta de la no deformación de las mismas.

RECOMENDACIONES:

1) Es recomendable; con fines de la preservación de los bienes culturales que representan todas las ciudades mayas; que se aplique un repello similar al original, con el fin de evitar la intemperización, y se tenga un mantenimiento adecuado, aplicando periódicamente lechadas de cal, como lo hacían los mayas; esto por supuesto implicaría una necesaria discusión de los términos de las normas de restauración en vigor (ref. 2).

2) Es necesario un estudio de suelos, en el cual se pueda definir su respectiva capacidad de carga, además la cohesividad de los rellenos y de las argamasas, para poder lograr más información, con fines de exactitud en las investigaciones de consolidación.

3) Incentivar el estudio de la Ingeniería maya, aún más a fondo, y darle lugar a su importancia.

4) Utilizar la experiencia de los ingenieros mayas, para poder restaurar y consolidar las estructuras deterioradas.

5) Crear una comisión de profesionales de Ingeniería y afines a los valores nacionales, para seguir investigando; determinando relaciones matemáticas en la Arquitectura e Ingeniería que puedan hacer comprender más los conocimientos de construcción de los mayas. Conocer más ampliamente la Ingeniería maya, puede cimentar las bases de restauración y consolidación de las estructuras por ellos construidas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. COE, WILLIAM R.
1,990 *Tikal Report.*
The University Museum, University of Pennsylvania, USA.
2. DIAZ-BERRIO, SALVADOR
1,968 *Comentarios a la carta internacional de venecia.*
Universidad de Guanajuato, Mexico.
3. EL INSTITUTO GETTY DE CONSERVACIÓN
1,995 *Conservación y Manejo de sitios arqueológicos en climas tropicales húmedos.*
Informe de la reunión de especialistas de la región mesoamericana.
USA.
4. FASH, WILLIAM L. Y AGURCIA FASQUELLE, RICARDO
1,996 *Visión del Pasado Maya.*
Proyecto arqueológico Acrópolis de Copán, Asociación Copán,
Honduras, C.A.
5. KUKACHCA DR.B.F
1,968 *Propiedades seleccionadas de 52 especies de madera del depto de El Petén, Guatemala.*
Depto de agricultura de los Estados Unidos, servicio forestal,
laboratorio de productos forestales, Madison, Wisconsin.
Guatemala C.A.
6. KUMAR, RAKESH AND GINELL, WILLIAM S.
1,995 *Methods of evaluating products for the conservation of porous Building materials in monuments.*
The Getty Conservation Institute, Marina del Rey, California 90292,
USA.
7. LARIOS VILLALTA, RUDY Y ORREGO CORZO, MIGUEL
1,982-83 *Reporte de las investigaciones arqueológicas en el grupo 5E-11,*
Instituto De Antropología E Historia De Guatemala, Parque Nacional Tikal.

8. LITTMANN, EDWIN R.
1,959 Ancient Mesoamerican Mortars, Plasters, and Stuccos: Las Flores,
Tampico, *American Antiquity* Vol. 25
9. MORLEY, SYLVANUS
1,946 *La Civilización Maya.*
Fondo de cultura económica. México
Ministerio de Educación. Guatemala C.A.
10. POPOV, EGOR P.
1,980 *Introducción a la mecánica de sólidos*
Editorial Limusa, México
11. PROYECTO ARQUEOLÓGICO COPÁN
1,983 *Introducción a la Arqueología de Copán, Honduras*
Secretaría de estado en el despacho de cultura y turismo,
Tegucigalpa D.C. Honduras, C. A.
12. SCHOKLITSCH, A.
1,980 *Arquitectura hidráulica, tomo 1*
Editorial, Gustavo Gili, S. A., Barcelona, España
13. SOWERS, GEORGE B. Y SOWERS, GEORGE F.
1,980 *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*
Editorial Limusa, México