

El cemento y el concreto de los mayas

HORACIO RAMÍREZ DE ALBA,* RAMIRO PÉREZ CAMPOS** Y HERIBERTO DÍAZ COUTIÑO*

Recepción: 9 de julio de 1999

Aceptación: 11 de agosto de 1999

The Cement and the Concrete of the Mayas

Abstract. *It is first introduced a general description of the Maya culture. Then a summary of the data obtained from physical and chemical tests is presented. The tests were performed on stucco, mortar and concrete samples from different archaeological zones, mainly from Palenque and Yaxchilán, in Chiapas, Mexico. Observations made during two study trips to Yaxchilán are presented in relation to a probably existing bridge, in this ancient city, constructed about 1200 years ago with a span of 590 feet (180 m) to cross the Usumacinta river. Results of a structural study to know the probable characteristics of this bridge are shown. The existence of the bridge is discussed in regard to a previous work (O'Kon, 1995) in which the author stands that the bridge did exist, while, on the other hand, in this study it is claimed that the evidence available is not enough.*

Introducción

1. Antecedentes generales de la cultura maya

El origen de la cultura maya aún no está claro, pero se reconoce la gran influencia de los olmecas que se desarrollaron en las costas del Golfo de México desde el año 2500 A. C.; de hecho, existen datos que sugieren que el uso de la cal para obtener materiales cementantes lo heredaron los mayas de la cultura olmeca (Flores, 1978).

Los mayas, en aproximadamente 3 mil años, desarrollaron una de las civilizaciones prehispanicas más sorprendentes. En el cuadro 1 se presentan las principales etapas por las que transcurrió esta cultura (según lo más aceptado), además se incluyen datos referentes al desarrollo de materiales y tecnologías de construcción. En su etapa de más esplendor, el país maya llegó a abarcar 400 mil km², territorio actualmente ocupado por cinco naciones: México, Guatemala, Belice, Honduras y El Salvador; no se trataba de una nación en el sentido moderno, sino de una serie de ciudades-estado unidas por fuertes lazos culturales y comerciales, pero que en ocasiones tenían intensas disputas armadas. En el cuadro 2 se hace un

comparativo de periodos de desarrollo de ciudades mayas, así como de otras culturas prehispanicas; esto permite ubicar en el tiempo, por lo menos de forma aproximada, las partes tratadas en este trabajo.

Los adelantos mayas en astronomía, matemáticas, cerámica, orfebrería, escritura, arquitectura e ingeniería han motivado la creación de departamentos o centros de investigación sobre estudios mayas en muchas partes del mundo. Sin embargo, resultan escasos los estudios técnicos sobre los materiales y técnicas constructivas; por ejemplo, se desconocen las propiedades químicas y mecánicas de los materiales utilizados.

Después de alcanzar su máximo esplendor a fines del primer milenio, sobrevino lo que algunos autores señalan como un brusco colapso de esta cultura (Rivera, 1985; Thompson, 1985): cesa la influencia de la ciencia y la técnica. Aunque seguirían algunos resurgimientos con influencia tolteca, la decadencia fue manifiesta.

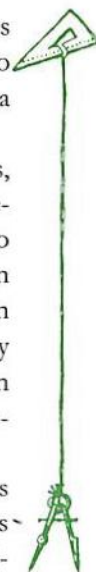
No se ha podido esclarecer la causa de ese colapso; las teorías más aceptadas señalan un posible levantamiento de las clases bajas en protesta por la explotación de que eran objeto, lo que provocó el desajuste en todos los órdenes (Von Hagen, 1960); otros señalan fenómenos naturales como pe-

*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Tel.: (7) 214 08 55. Correo electrónico: bra@coatepec.uaemex.mx

**Centro de Ciencias Físicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad s/n Col. Chimilpa. C. P. 62251. Cuernavaca, Morelos. Tel.: 5622 77 97. Correo electrónico: ramiro@thorificam.unam.mx

Agradecemos a las siguientes instituciones por el apoyo recibido: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Centro Tecnológico del Concreto, PACTO a las siguientes instancias de la Universidad Autónoma del Estado de México: Coordinación General de Investigación y Estudios Avanzados, Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería.

Sin el apoyo de arqueólogos del INAH este trabajo no hubiera podido realizarse, de manera especial agradecemos a la Lic. en restauración Haydée Orea Magaña y al arqueólogo Akira Kaneko. En la obtención y traslado de muestras, agradecemos la colaboración del M. en I. Guadalupe Roque Hernández y del estudiante Horacio Ramírez Valle. En la organización de datos y captura de la información agradecemos la participación de la Sra. Dalia Vénier y al personal del Departamento de Sistemas de la Facultad de Ingeniería, UAM



riodos de sequía; algunos más marcan la posibilidad de cambios importantes en el equilibrio ecológico por la sobrepoblación y la quema de zonas boscosas y selváticas para abrir campos de cultivo, efecto acusado, según los autores de este trabajo, por el uso de madera para alimentar los hornos que les permitían fabricar sus materiales constructivos.

Para los mayas, todo estaba regido desde el cosmos, por eso se dedicaban a observarlo con detenimiento llegando a establecer calendarios de mayor precisión que los entonces usados en Europa; calcularon las revoluciones de los planetas en su órbita y predijeron fenómenos astronómicos como los eclipses; eran frecuentes las profecías catastróficas, quizá tal forma de ver el mundo precipitó su caída. Afortunadamente dejaron suficientes vestigios para conocer su grandeza.

CUADRO 1

PRINCIPALES ETAPAS DE LA CULTURA MAYA

PERIODO	ETAPAS	CARACTERÍSTICAS
PRECLÁSICO 1500 A.C.-150 A.C.	TEMPRANO	SOCIEDAD CAZADORA Y RECOLECTORA. PRINCIPALMENTE ASENTADA EN LAS COSTAS DEL PACÍFICO.
	MEDIO	DESARROLLO DE LA AGRICULTURA. INICIOS DE LA ARQUITECTURA. SURGIMIENTO DE LAS PRIMERAS CIUDADES-ESTADO COMO TIKAL Y DZIBICHALTÚN.
	TARDÍO	CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO. INICIO DE LAS GRANDES OBRAS DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA.
PROTOCLÁSICO 150 A.C.-300 D.C.	ÚNICA	CONSOLIDACIÓN DE LA RELIGIÓN Y LA CIENCIA; ALEJAMIENTO DE LAS INFLUENCIAS OLMECAS. ESTRATIFICACIÓN SOCIAL.
CLÁSICO 300 - 900 D.C.	TEMPRANO	APARICIÓN DE LA ESCRITURA Y DEPURACIÓN DE LAS CIENCIAS Y TÉCNICAS. IMPRESIONANTE DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA Y LA INGENIERÍA. USO PROGRESIVO DE LOS MATERIALES CEMENTANTES. INVERSIÓN DE LA BÓVEDA SALEDIZA. POSIBLE CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE DE YAXCHILÁN.
	TARDÍO	MÁXIMO APOGEO, AUGE DE LAS CIENCIAS Y LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS. BRUSCO COLAPSO DEL ÁREA CENTRAL.
POSTCLÁSICO 900-1500 D.C.	TEMPRANO	INVASIONES DE PUEBLOS DE MESOAMÉRICA. DESARROLLO DE LA CULTURA MAYA-TOLTECA, CON PRINCIPAL EJEMPLO EN CHICHEN-ITZÁ.
	TARDÍO	CAÍDA DE CHICHEN-ITZÁ; DESARROLLO DE MAYAPÁN, BASADO EN LO ECONÓMICO MÁS QUE EN LO CULTURAL O SOCIAL. SU CAÍDA EN 1441, MARCA EL FIN DE LA CIVILIZACIÓN MAYA.

ADAPTADO DE DIFERENTES FUENTES, PRINCIPALMENTE COE (1971), SOUSTELLE (1990) Y THOMPSON (1985).

2. Antecedentes constructivos

Sus adelantos tecnológicos en el uso de materiales y métodos constructivos permitieron a los mayas construir edificios de grandes dimensiones (Kubler, 1986; Marquina, 1951), largos caminos (Díaz-Bolio, 1992), sistemas de riego y drenaje, así como depósitos de agua (Rivera, *op. cit.*). Para ello utilizaron, principalmente, la piedra caliza abundante en la región, con lo que iniciaron el uso progresivo de los materiales cementantes a base de cal que les permitió elaborar estucos, morteros y concretos. Los estucos se emplearon para decoración interior y exterior, particularmente mediante espectaculares bajorrelieves, muchos de ellos han sobrevivido a las condiciones ambientales tan severas de la zona. Ejemplos notables del uso de estucos se encuentran en Palenque, Toniná y Yaxchilán (la figura 1 muestra detalles donde se observa el uso de estucos).

Los morteros se utilizaron sobre todo para juntar piedras en la construcción de muros, bóvedas, alfardas, gradas, etcétera. El concreto, una mezcla de cemento con agregados graduados, fue utilizado con fines estructurales para construir basamentos y muros de contención, además de, probablemente, pilas y estribos para puentes, así como obras de protección, caminos, puertos y cisternas. Al observar en diferentes zonas arqueológicas el uso del concreto, se puede decir que inicialmente era usado como material de relleno: una especie de concreto ciclópeo agregando piedras de diferente tamaño, se trataba de un material muy poroso y heterogéneo. Se supone que, al darse cuenta de sus ventajas constructivas (más rapidez en el proceso), los ingenieros mayas depuraron sus procedimientos y seleccionaron sus agregados para lograr un material denso y resistente que, en muchos casos, conserva sus propiedades a pesar del intemperismo (en la figura 2 se muestran fotografías que ilustran el uso de morteros y concretos).

I. Los materiales usados por los constructores mayas: estucos, morteros y concretos

En julio de 1998 se realizó el primer viaje de estudio, durante el cual se visitaron las zonas arqueológicas de Palenque, Yaxchilán, Toniná, Comalcalco, Uxmal y Kabáh. Con la valiosa colaboración del Instituto Nacional de Antropología de Historia (INAH), se obtuvieron muestras de materiales constructivos, correspondientes a estucos y morteros de todos los sitios y concretos de Palenque y Yaxchilán. Una segunda visita se realizó en marzo de 1999, principalmente a Yaxchilán, con el fin de obtener muestras adicionales de concreto, así como hacer observaciones sobre los restos de un puente que se supone existió en este sitio. Se realizaron

pruebas físicas y químicas a estos materiales; los resultados hasta ahora obtenidos se resumen a continuación.

1. El cemento maya

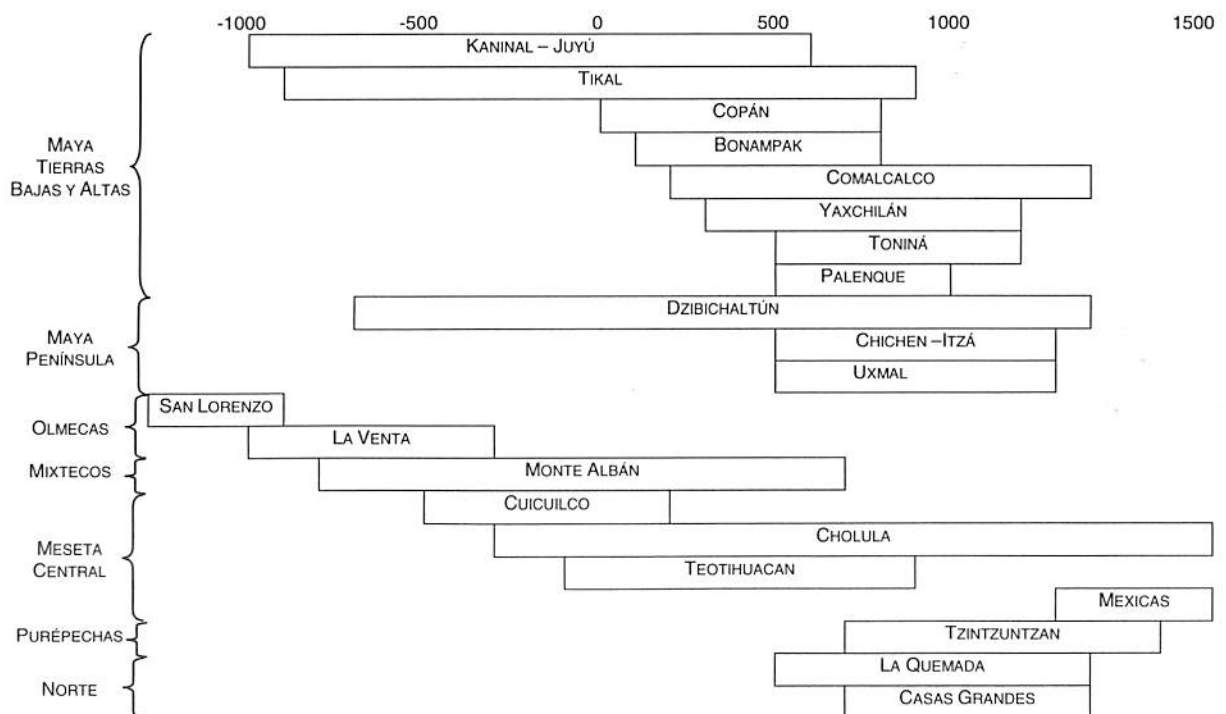
Con la valiosa colaboración del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) se realizaron ensayos de microscopía, difracción de rayos X y espectrografía. En la figura 3 se presenta un difractograma típico obtenido de una muestra de estuco que ilustra esquemáticamente el espectro de composición (EDS) del material, el cual resultó similar a los obtenidos en otras muestras de estucos y morteros, independientemente de su procedencia.

Se realizaron microanálisis químicos utilizando un espectrómetro de rayos X (EDS) acoplado a un microscopio electrónico de barrido. Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en el cuadro 3; se concluyó que no existen diferencias químicas apreciables entre las matrices cementantes de los estucos, morteros y concretos mayas; en este mismo cuadro se incluyen también los resultados del análisis químico en gravas calizas representativas de las rocas utilizadas para la obtención de la cal; se observa en estas gravas casi el mismo porcentaje de los componentes que los contenidos en la matriz cementante maya. En la última columna del cuadro 3 se muestra la composición de un cemento Portland moderno, se nota correlación con el

calcio y alguna relación en cuanto a cantidades de silicio y aluminio; sin embargo, no se detectó un patrón concluyente, es por ello que se decidió determinar los óxidos presentes con la utilización de un espectrómetro de arco y chispa, con lo que se encontraron diferencias apreciables entre los materiales antiguos y modernos en cuanto a los contenidos de óxidos de silicio, aluminio y fierro. Principalmente en el caso de óxido de silicio, cuyo contenido es muy bajo en las matrices cementantes mayas en comparación con el cemento Portland.

Esto indica que los compuestos de silicio y aluminio responsables de las propiedades de los cementos modernos no están presentes en los materiales mayas, lo cual se ilustra más claramente en la figura 4, donde se muestran tres patrones de difracción; el primer caso (A) fue obtenido a partir de muestras de cemento Portland tipo I moderno; los otros dos espectros (B y C) fueron obtenidos a partir de las matrices cementantes de muestras de estucos provenientes de Palenque y Yaxchilán. El patrón de difracción mostrado en la figura 6A indica la presencia de silicatos cálcicos (Ca_3SiO_5) cuyos principales picos están marcados con el número 2. Los espectros mostrados en las figuras 6B y 6C indican principalmente la presencia de calcita ($CaCO_3$), cuyos picos correspondientes están marcados con el número 1. Estos resultados indican que la principal diferencia está relacionada con la presencia de compuestos de silicio (silicatos) en el

CUADRO 2
PERIODOS DE PRINCIPAL DESARROLLO DE ALGUNAS CULTURAS PREHISPÁNICAS



ADAPTADO DE VON HAGEN (1960).

FIGURA 1. FOTOGRAFÍAS QUE MUESTRAN EL USO DE ESTUCOS CON FINES DECORATIVOS.



cemento Portland y la ausencia de estos compuestos en las matrices cementantes de los materiales provenientes de las zonas arqueológicas mayas.

Se concluye que en el cemento maya predominan las calcitas, pero no se registran silicatos y aluminatos cálcicos, por lo que se caracteriza como un aglutinante con poderes cementantes, con una composición semejante a un cemento natural crudo, según la nomenclatura usual.

CUADRO 3

PORCENTAJE DE LOS ELEMENTOS COMPONENTES					
ELEMENTO	ESTUCO	MORTERO	CONCRETO	GRAVA	C. PORTLAND
C	23.59	20.02	13.17	19.22	12.66
O	39.64	23.73	38.42	42.72	44.24
NA	-	-	-	-	3.31
Mg	5.75	1.57	5.48	3.48	1.37
AL	4.11	3.84	1.17	1.67	2.70
Si	4.2	6.65	2.82	3.07	9.59
S	-	-	-	-	1.30
K	-	0.99	-	-	0.92
CA	19.06	36.98	38.01	28.44	22.66
FE	3.65	4.87	-	0.71	1.25
P	-	1.35	-	0.69	-
Y	-	-	0.93	-	-
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS POR LOS AUTORES.

Se infiere que el método de fabricación del cemento maya fue el molido y quemado de rocas calizas de la región con cantidades variables de intrusiones arcillosas a temperaturas no mayores de 900°C. Además, los resultados indican que se trata de un solo tipo de cemento, ya que la matriz cementante de los estucos, morteros y concretos resultó tener las mismas características generales para todas las muestras, independientemente de su procedencia. Estos resultados concuerdan con lo que apuntan algunos estudiosos de esta cultura, por ejemplo, en un estudio previo (Bargalló, 1966) se describe, dentro de la cultura maya, la fabricación de estucos y cementos a base de cal, así como sus aplicaciones. Otro autor (Thompson, *op. cit.*) menciona que los mayas utilizaron cemento y concreto fabricados mediante la cochura de la piedra caliza.

Los cementos modernos se obtienen calcinando rocas calizas con intrusiones arcillosas a temperaturas mayores de 1100°C, que son las necesarias para la formación de silicatos y aluminatos (Lea, 1993); aparentemente, la tecnología maya no comprendía hornos que generaran este nivel de temperatura. Puede resultar interesante comentar qué tecnologías similares se desarrollaron en forma independiente por varias culturas en diferentes épocas. De forma simplificada, en el cuadro 4 se muestra el lugar que ocupa la tecnología del cemento y del concreto maya en la historia de los materiales cementantes.

2. Análisis de los morteros y concretos mayas

Las muestras de concreto obtenidas en Yaxchilán indican que los agregados estaban bien graduados, con tamaño máximo de 40 mm y con una buena compactación, ya que se tienen

porcentajes de vacíos normales y los pesos volumétricos son mayores de 1.8 gr/cm^3 (17.6 kN/m^3). Estas observaciones indican que se conocían técnicas para el mezclado transparente, colocación y compactación del concreto con resultados similares a los que se obtienen con técnicas modernas (Neville, 1977). En la figura 5 se presentan fotografías de fragmentos de concreto de Yaxchilán obtenidas del núcleo de un coronamiento colapsado del edificio 6 durante la primera visita. En la figura 6 se presentan fotografías de muestras de concreto de Yaxchilán conseguidas durante la segunda visita; las muestras corresponden a los restos de una edificación destruida a la orilla del río Usumacinta, posiblemente se trataba de una estructura de protección contra los efectos de las avenidas del río, o bien parte de un puente, como se explicará más adelante.

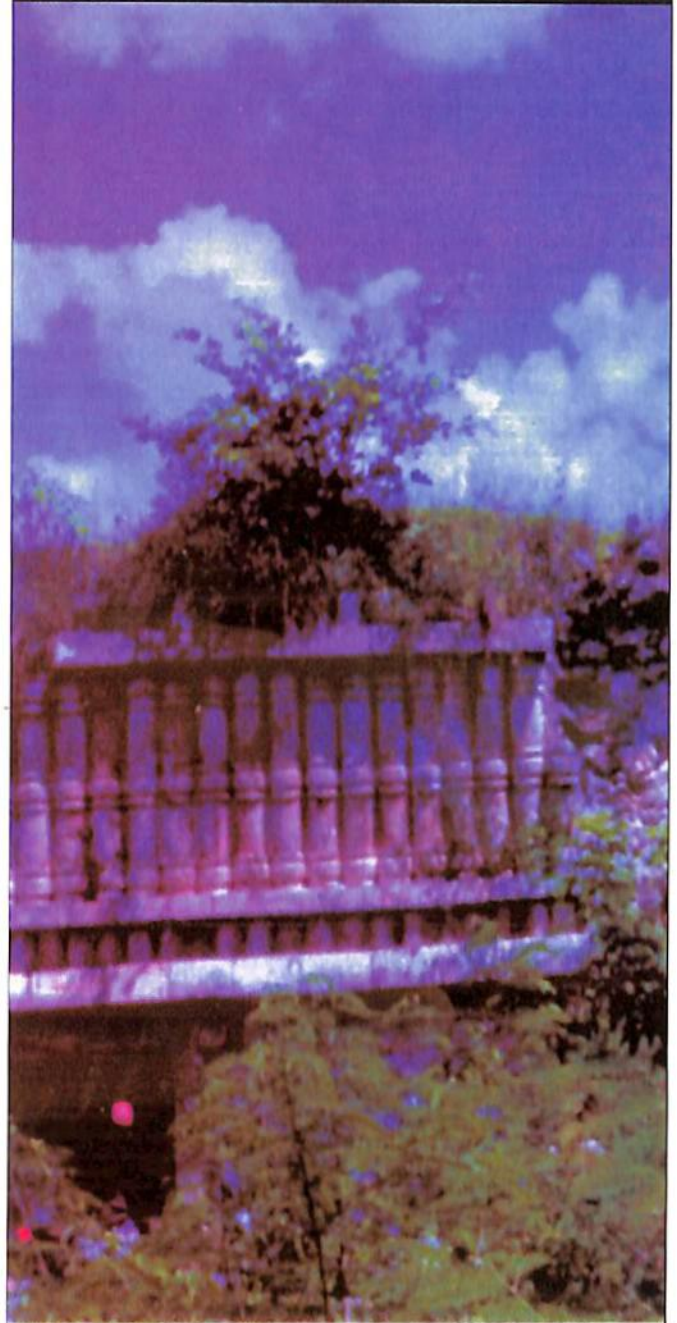
Las restricciones reglamentarias que existen por parte del INAH impidieron tomar muestras de las partes visibles y sanas de las construcciones por lo que, hasta ahora, son pocas las probetas que se han podido obtener, ya que las muestras están alteradas por los efectos de la intemperie, con fisuramientos internos. Los resultados que se presentan en el cuadro 5 corresponden a las probetas que se han podido obtener de las muestras de la zona de Yaxchilán en el primer viaje de estudios, sin embargo, las probetas no tienen las dimensiones que marcan las normas. En el segundo viaje se localizaron muestras más sanas cuyo procesamiento se realiza actualmente.

De los resultados del cuadro 5, se tiene un promedio de resistencia de 66 kg/cm^2 (6.5 MPa), que resulta bajo por las razones ya comentadas y, sin embargo, resulta suficiente para los fines estructurales que no exigen esfuerzos mayores de 25 kg/cm^2 (2.4 MPa); es de esperarse resistencias mayores en las condiciones originales, lo cual puede resultar aparente una vez que se ensayen probetas de las muestras más sanas. De hecho, esto ya se ha comprobado con ensayos recientes en muestras de mejor consistencia con resistencias de 140 a 170 kg/cm^2 (13.7 – 16.7 MPa); un reporte completo de estos ensayos está en preparación. Es importante señalar que los materiales cementantes, en particular el concreto, fueron utilizados por los mayas en forma variada y en cantidades masivas; se ha estimado que $1/16$ (6.2%) de la masa construida en las obras mayas corresponde a estos materiales (Soustelle, *op. cit.*). Si se toma en cuenta, por ejemplo, la zona arqueológica de Tikal en Guatemala donde existen 3000 edificios repartidos en un área de 16 km^2 y cuya altura alcanza hasta 72 m , se tiene una idea de la importancia que tuvieron estos materiales.

3. Aplicaciones estructurales

Los morteros y concretos tenían, en las construcciones ma-

FIGURA 2. FOTOGRAFÍAS QUE MUESTRAN EL USO DE MORTEROS Y CONCRETOS.



yas, un uso estructural. Los morteros se utilizaban como material de liga en las mamposterías para construir muros en los edificios y para revestir cisternas, caminos, arcos y bóvedas (construidas éstas a base de losas saledizas; también llamadas “arcos falsos”). La importancia de estos materiales en el desarrollo de la arquitectura maya es minuciosamente analizada por Kubler (*op. cit.*), quien señala a la bóveda (arco falso) como uno de los tres rasgos distintivos de la tradición

FIGURA 3. DIFRACTORAMA TÍPICO DE UNA MUESTRA DE MORTERO.

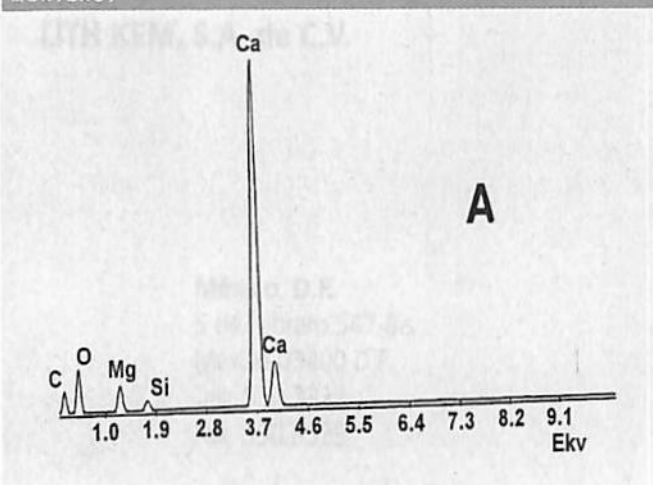


FIGURA 4. DIFRACTORAMA DE MATRIZ CEMENTANTE MAYA Y CEMENTO PORTLAND MODERNO.

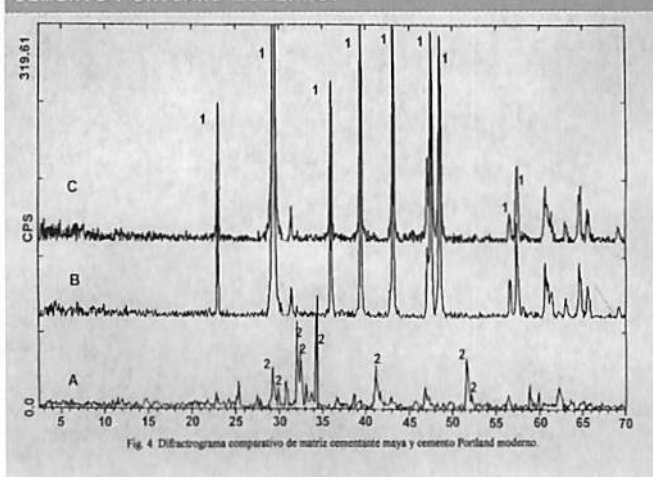


Fig. 4 Difractograma comparativo de matriz cementante maya y cemento Portland moderno.

maya clásica; además, asegura que, en el aspecto estructural, la arquitectura maya se basa en cuatro elementos: las piedras, la argamasa (estucos, morteros y concretos), los soportes y las bóvedas.

El concreto se utilizó para la construcción de losas de techo y entrepisos, también en la construcción de muros de carga y, muy probablemente, de columnas y pilas de puentes. Para la construcción de las losas (viga-losa), Morley (1972) menciona que el método que se utilizaba consistía, una vez que se tenían listos los muros laterales, primero en colocar un sistema de vigas de madera como elementos de apoyo. En seguida, se construía un entramado de madera, que funcionaba como cimbra, y después se vaciaba el concreto. Esperaban el tiempo necesario y retiraban entonces el entramado de madera, con lo que el piso de concreto quedaba terminado.

En la ciudad-estado de Yaxchilán existen vestigios de lo que algunos autores identifican como el puente más largo de su época a nivel mundial. James O'Kon (1995) realizó un trabajo notable sobre esa estructura y asegura haber demostrado que los mayas lograron en Yaxchilán, en el siglo VII, el puente de mayor longitud en el mundo, marca que perduró por más de 700 años, según este autor. Se plantea la hipótesis de la estructura del puente colgante a base de cables hechos con fibras vegetales (probablemente henequén) y calzada de madera, con dos apoyos extremos (estribos) y dos intermedios (pilas) hechos de mampostería de piedra con núcleo interno de concreto. El puente servía para cruzar el río Usumacinta, entre lo que hoy es México y Guatemala (en la figura 7 se muestra un esquema de la localización de la ciudad de Yaxchilán, así como de otros sitios arqueológicos visitados).

Se realizó un estudio estructural del puente a fin de estimar sus probables dimensiones a partir de la tecnología existente

CUADRO 4

DATOS DE LA HISTORIA DE LOS MATERIALES CEMENTANTES

AÑO	LUGAR, DESARROLLO	OBSERVACIONES
5000 A.C.	KORSO-BRDO (RÍO DANUBIO). PISOS Y SENDEROS.	EVIDENCIA MÁS ANTIGUA DEL USO DE UN CEMENTANTE ARTIFICIAL.
4000 A.C.	EGIPTO. PRODUCCIÓN DE YESO PARA PRODUCIR ENLUCIDO.	UNIR PIEDRAS PARA FORMAR MAMPONERÍA.
2000 A.C.	CRETA. PRODUCCIÓN DE CAL VIVA A PARTIR DE LA CALCINACIÓN DE PIEDRA CALIZA.	UTILIZACIÓN DE MORTEROS DE CAL.
300 A.C.	GRECIA Y ROMA. MORTEROS DE CAL-PUZOLANA.	PRIMER PASO HACIA LA PRODUCCIÓN DEL CONCRETO U HORMIGÓN.
14 D.C.	ROMA. DESARROLLO DEL CONCRETO ROMANO: CAL+PUZOLANA+ÁRIDOS.	CONCEPTO MODERNO DE LA ARQUITECTURA (EN FUNCIÓN DEL ESPACIO).
120 D.C.	ROMA. DOMO DE 44 M DE DIÁMETRO. IGLESIA DE SANTA MARÍA DE LOS MÁRTIRES (ANTES PANTEÓN).	EDIFICIO TECHADO MÁS ANTIGUO.
300 A.C.-1000 D.C.	DESARROLLO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO MAYA.	DESARROLLO DE FORMA INDEPENDIENTE. ESTUCOS, MORTEROS, CONCRETOS.
1756 D.C.	INGLATERRA. REDESCUBRIMIENTO DE LAS TÉCNICAS ROMANAS.	CONSTRUCCIÓN DEL FARO DE EDYSTONE.
1884 D.C.	INGLATERRA. PRIMERA PATENTE DEL CEMENTO PORTLAND.	J. ASPDIN.

ORIGINAL DE LOS AUTORES CON DATOS DE DIFERENTES REFERENCIAS, PRINCIPALMENTE ESQUEDA (1989) Y RAMÍREZ (1991).

en la época de su construcción. Con ello, se estimó que la calzada del puente pudo estar compuesta de varas o duelas de madera soportadas y rigidizadas por traviesas del mismo material, todo unido con cables de henequén; este sistema es utilizado en la actualidad por los lugareños; se estima que el peso muerto de este sistema resultó ser de aproximadamente 82 kg/m^2 (804 N/m^2). En el artículo mencionado (O'Kon, 1995), se establece que el puente pudo tener hasta 6 m de ancho, por lo que la carga muerta por metro de longitud de puente resulta de 490 kg/m (4.8 kN/m). Por otra parte, se estima que la carga viva, consistente de personas cargando mercancías y bienes, pudo ser como máximo de 150 kg/m^2 (1470 N/m^2), lo que resulta en 900 kg/m (8.8 kN/m). Los cálculos hechos indican que es factible sostener estas cargas con cables verticales de henequén de 50 mm de diámetro distanciados de 3 a 4 metros a cada lado de la calzada. Estos cables se amarraban a cada una de las traviesas de madera, mientras que en su extremo superior eran soportados, a su vez, por el cable principal que debió tener de 120 a 150 mm de diámetro; el cable principal, posiblemente, estaba formado por un haz de cables de menor diámetro; en el claro principal, el cable así calculado pudo tener 64 m de longitud y 11 m de flecha. Por otro lado, considerando el peso del puente y sus usuarios así como el peso de las pilas, el esfuerzo máximo en las pilas debió ser de 10 kg/cm^2 (0.98 MPa) y el mínimo de 0.5 kg/cm^2 (0.05 MPa), ambos de compresión. La magnitud de estos esfuerzos son compatibles con la resistencia obtenida mediante el ensaye de las muestras de material (la figura 8 muestra la forma general del puente según los resultados del análisis estructural realizado).

II. Discusión de resultados

Estos resultados soportan la hipótesis de que el puente sí pudo ser construido por los mayas con los materiales y las técnicas disponibles. Sin embargo, aún no puede asegurarse la existencia de ese puente, como lo hace O'Kon en su artículo. Estas dudas se fundamentan en las observaciones hechas durante un reciente viaje a Yaxchilán (marzo 1999), en donde el nivel del río Usumacinta se encontraba suficientemente bajo para observar de cerca los restos de lo que se supone, fue una de las pilas del puente (en la figura 9 se muestran fotografías del promontorio que es la supuesta pila). Los siguientes argumentos resumen el punto de vista de los autores en relación con el supuesto puente.

Los restos de la pila son de mampostería de piedras; algunas de ellas muestran restos de lo que pudo ser mortero para juntar. No se observó un núcleo de concreto (como lo asegura O'Kon); sin embargo, se debe apuntar que varias

FIGURA 5. FOTOGRAFÍAS DE MUESTRAS DE CONCRETO. EDIFICIO 6, YAXCHILÁN.



CUADRO 5

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO MAYA

PROBETA	VEL. DE PULSO		PESO VOLUMÉTRICO	RESISTENCIA	
	(CM/S)			GR/CM ³ (KN/M ³)	COMPR. SIMPLE
	DIR. X	DIR. Y	KG/CM ² (MPa)		
I	5.3×10^5	3.49×10^5	1.87 (18.3)	58	(5.7)
II	5.28×10^5	3.26×10^5	1.82 (17.8)	73	(7.2)
III	5.12×10^5	3.1×10^5	1.804 (17.7)	60	(5.9)

RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS POR LOS AUTORES.

pedras muestran restos del material de junteo que, por la acción química del agua, se ha endurecido. Es posible que en sus orígenes estas piedras estuvieran rodeadas de mortero para formar concreto ciclópeo; se puede suponer que la acción del agua desgastó la mayor parte de este material, aunque el restante se endureció progresivamente. Cabe aclarar que estos restos no muestran una forma rectangular como se representa en los dibujos del mencionado artículo.

Se localizó la piedra que O'Kon supone fue el sostén del cable del puente; esta piedra está aguas abajo del río (aproximadamente 300 metros), muy lejos en relación con el punto

donde se supone existió el puente. En las proximidades se encuentran otras piedras con textura similar producto de la acción del agua, por lo que es probable que esta peculiaridad sea producto de la erosión del agua y no de alojar un cable. Además, la abertura de la piedra (el autor del artículo no muestra escala en la fotografía que presenta) es de unos 50 mm, mientras que el cable debió tener más del doble (en la

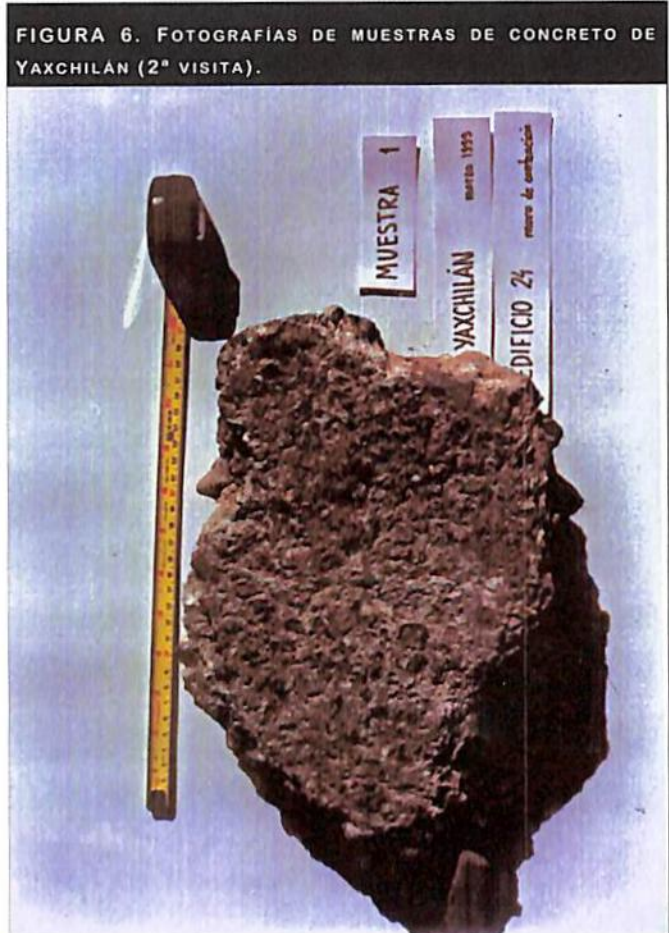


FIGURA 6. FOTOGRAFÍAS DE MUESTRAS DE CONCRETO DE YAXCHILÁN (2ª VISITA).

FIGURA 7. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE YAXCHILÁN.

figura 10 se muestran fotografías de dicha piedra tomadas en marzo de 1999).

Existen otras explicaciones para el promontorio que sobresale del río. Algunos arqueólogos mencionan que pudo ser un faro o señalamiento porque el río hace amplia curva en esa zona, o bien una especie de retén o aduana para los que entraban o salían de la ciudad por la vía fluvial. Otra posibilidad es que el puente sí existiera, pero fuera del tipo flotante y no colgante; en este caso el promontorio serviría como anclaje de la estructura flotante.

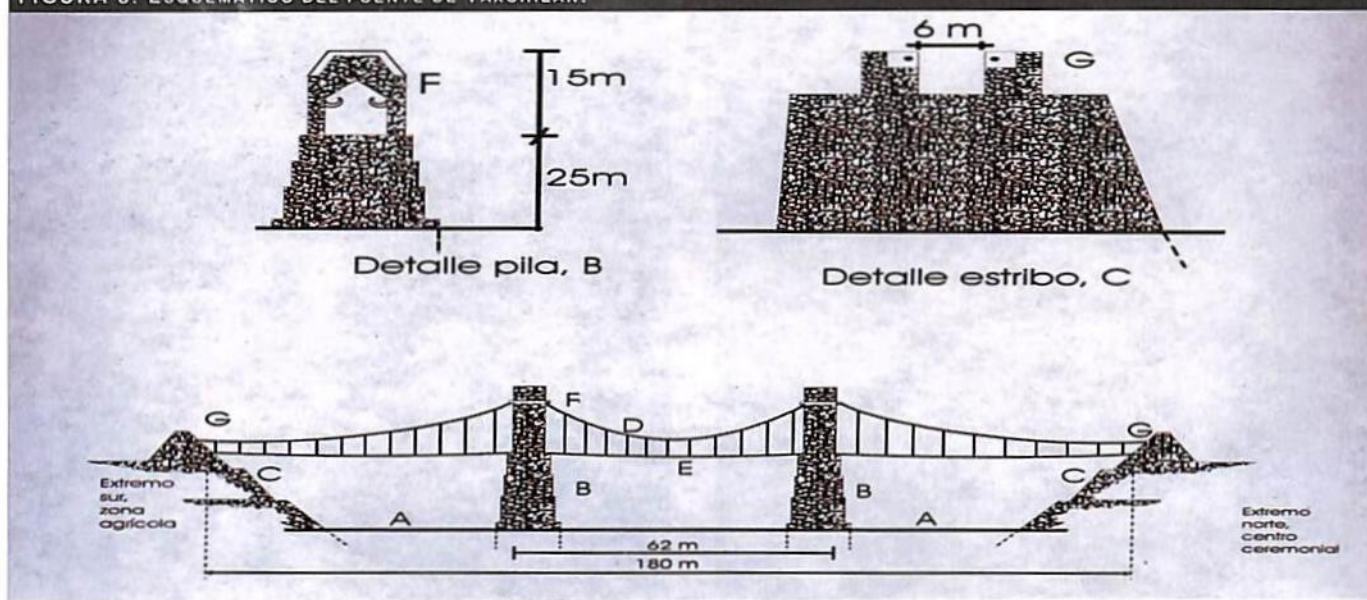
Sin embargo; debe mencionarse que existen otros indicios a favor de la existencia del puente, como la presencia de restos de estructuras en ambos márgenes alineados con el montículo citado. En el extremo colindante con la antigua ciudad, los restos indican que se trataba de una estructura importante por sus dimensiones y por estar hecha de concreto (de hecho, de esta parte se tomaron muestras para continuar el estudio). Desafortunadamente, esta estructura se encuentra muy deteriorada por la acción de las crecientes del río y no muestra una geometría definida a primera vista (en la figura 11 se muestran fotografías de los restos de esta estructura). Respecto a los restos en la margen opuesta, no se pudieron observar con detalle por estar del lado de Guatemala, pero sus dimensiones son más reducidas y aparentemente es sólo un montículo de piedras encimadas. La ubicación de varias ciudades mayas cercanas a ríos caudalosos hace pensar que la construcción de puentes era frecuente; es posible que existan restos, por lo menos de sus apoyos, en otros sitios como Piedras Negras y Copán.

Conclusiones

Con los resultados de los estudios realizados se pudo caracterizar el cemento maya como un aglutinante con poderes cementantes; en los términos técnicos actuales se le define como un cemento natural crudo. Aparentemente, los hornos en que se producía este material no lograban temperaturas superiores a los 900°C, insuficiente para formar los compuestos presentes en los cementos modernos. La matriz cementante de los estucos, morteros y concretos resultó tener las mismas características generales para todas las muestras independientemente de su procedencia. Esto parece indicar que los mayas desarrollaron una tecnología que logró un alto grado de estandarización que se expandió a las principales ciudades-estado.

Al tener en cuenta la gran cantidad de edificios y demás obras de ingeniería que realizaron los mayas, sorprende el gran volumen de materiales constructivos que produjeron sin contar con los medios para la industrialización como los

FIGURA 8. ESQUEMÁTICO DEL PUENTE DE YAXCHILÁN.



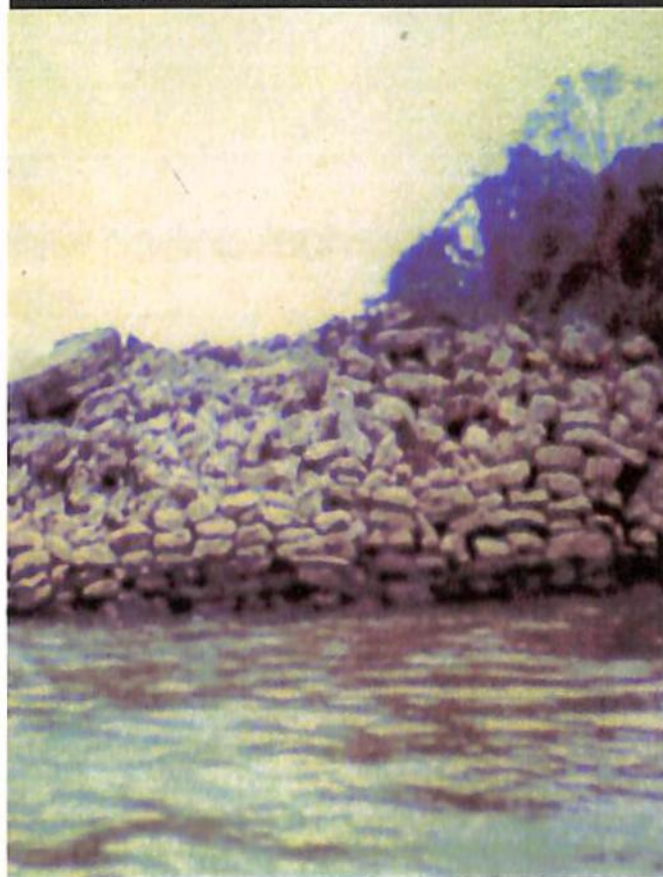
de otras culturas de su tiempo (vehículos con ruedas y animales de carga).

Se aportan datos de resistencia a compresión, de la velocidad de pulso y del peso volumétrico de muestras de concreto. Las muestras obtenidas no son representativas de las condiciones originales, sin embargo, los indicadores obtenidos son compatibles con las aplicaciones dadas a este material, principalmente en muros, bóvedas, cimentaciones y pisos de edificios, así como obras hidráulicas, caminos y muelles. Todo ello permitió el avance tan notable que se reconoce a los mayas en urbanismo y arquitectura, además de otros adelantos científicos y tecnológicos. Debe aclararse que son relativamente pocos los sitios arqueológicos estudiados, así como también pocas las muestras de materiales muestreados. Por lo tanto, deben realizarse más estudios de este tipo si se desea profundizar en los adelantos constructivos de los mayas.

Se continuará con este trabajo con la posibilidad de realizar ensayos triaxiales así como más ensayos de compresión y la obtención de la variación del esfuerzo en función de la deformación. Se espera establecer un modelo de comportamiento y desprender recomendaciones para la fabricación y uso de materiales semejantes con propósitos de restauración.

Finalmente, la hipótesis de un puente de gran claro construido por los mayas en Yaxchilán resulta muy atractiva, sin embargo, con la información disponible, no se puede asegurar que realmente existió. Se considera que el caso amerita atención, pero se requerirá la participación del INAH para hacer exploraciones en los restos que se supone pertenecieron al puente, a fin de definir sus dimensiones y posibles usos. De comprobarse la existencia del puente, sería viable reali-

FIGURA 9. FOTOGRAFÍAS DEL PROMONTORIO QUE, SE SUPONE, FORMÓ LA PILA DEL PUENTE.

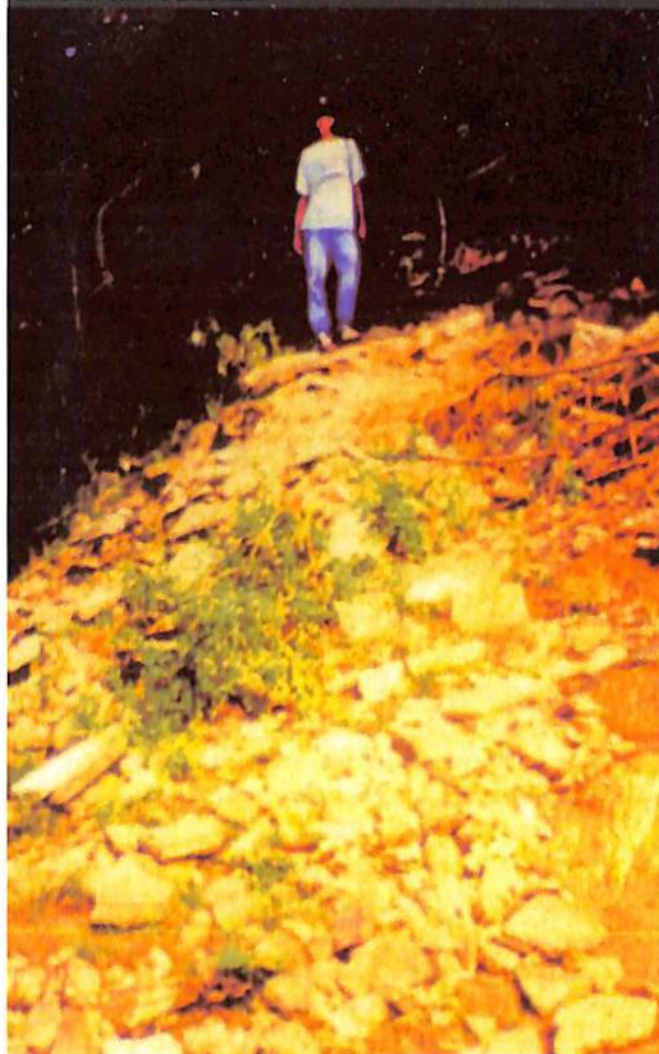


zar un proyecto conjunto para su posible reconstrucción que, seguramente, resultaría un atractivo turístico único. 🏛️

FIGURA 10. FOTOGRAFÍAS DE LA PIEDRA QUE SUPUESTAMENTE ALOJÓ EL CABLE.



FIGURA 11. FOTOGRAFÍAS DE LA ESTRUCTURA EN LA MARGEN OESTE DEL RÍO.



BIBLIOGRAFÍA

- Bargalló, M. (1966). *La química en México*. Tomo 1. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Coe, M. (1971). *The Maya*. Penguin Books, Great Britain.
- Díaz-Bolio, J. (1992). *The Mayan Magnificent Ancient White Roads*. Area maya. Mérida, Yucatán.
- Esqueda, H. (1989). *El concreto en la historia. Construcción y tecnología*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. No. 16, Vol. II, septiembre.
- Flores Jiménez, R. (1978). *Cultura maya*. Biblioteca Nacional de Antropología e Historia, INAH.
- Kubler, G. (1986). *Arte y arquitectura en la América precolonial (Los pueblos mexicanos, mayas y andinos)*. Editorial Cátedra, S. A. Madrid, España.
- Lea, (1993). *The Chemistry of Cement and Concrete*. Mc. Graw Hill.
- Marquina, I. (1951). *Arquitectura prehispánica*. INAH, México.
- Morley, G. S. (1972). *La civilización maya*. Fondo de Cultura Económica. 2ª ed. México.
- Neville, A. M. (1977). *Tecnología del concreto*. Volúmenes I y II. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.
- O'Kon, J. (1995). "Bridge to the Past", en *Civil Engineering*. January.
- Ramírez, H. (1991). *La construcción en el Estado de México: un estudio técnico con referencia histórica*. El Colegio Mexiquense, Zinacantepec, México.
- Rivera Dorado, M. (1985). *Los mayas de la antigüedad*. Alhambra, Madrid.
- Soustelle, J. (1990). *Los Mayas*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Thompson, J. (1985). *Grandes y decadencia de los mayas*. ICF, México.
- Von Hagen, V. (1960). *El mundo de los mayas*. 5ª Edición, Diana, México.