CAPÍTULO 1

MAMPOSTERÍA ANTIGUA

1.1 Introducción.

Fig. 1.1 Las Tres Grandes Pirámides de *Giza*, en Egipto.

Desde los tiempos antiguos hasta nuestros días, se pueden apreciar una gran variedad de ejemplos de construcciones espectaculares de mampostería, que podría ser muy difícil y extremadamente costoso el

poder duplicarlas hoy en día, aún y con nuestros avances en materia de diseno, maquinaria y técnicas modernas de producción de materiales de construcción. Al observar el uso que se le dió a la mampostería en el pasado podremos entender de una mejor manera la perspectiva del diseño actual. En ocasiones la estructuracíon de las construcciones antiguas sirve como modelo de inspiración para el diseñador, ya que desde el punto de vista analítico, los ejemplos de formas estructurales sofisticadas se establecieron hace poco más de 10,000 años.

El desarrollo de las estructuras de mamposteria a través de la historia ha sido limitado por los siguientes factores: la disponibilidad de los materiales, las habilidades del constructor, el planteamiento empleado en el diseño (intuitivo o analítico), y los costos de construcción. La importancia de cada uno de estos factores ha variado en el tiempo. Hoy en día, el factor del costo de construcción se ha convertido en el mayor limitante de las estructuras de mampostería actuales.

1.2 Historia de los materiales de mampostería.

Una gran cantidad de materiales han sido utilizados como mampostería. Cuando las civilizaciones se desarrollaban en las riveras de los ríos, los depósitos aluviales eran utilizados para formar ladrillos.

La cultura mesopotámica se ubicó entre los ríos *Tigris* y *Eúfrates*, y creó toda una arquitectura con ladrillos. Por su parte, los pueblos que existieron en las vecindades de las montañas utilizaron rocas. A lo largo de las montañas del valle del *Nilo*, los egipcios construyeron una gran cantidad de monumentos de roca. En las regiones árticas se han utilizado los bloques de hielo para formar iglúes, mientras que en las ciudades modernas el vidrio es utilizado con frecuencia para formar muros de mampostería. Ahora, los materiales comunes de mampostería se hacen con rocas, arcilla, silicato de calcio y concreto.

Fig. 1.2 Templo de roca de *Ramses II*, en Egipto.

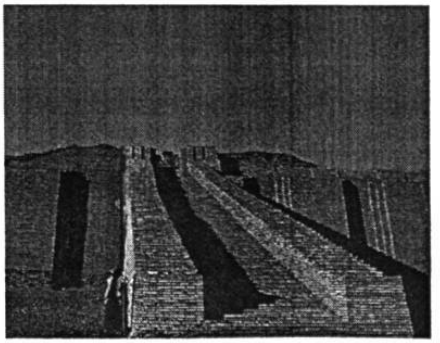


Fig. 1.3 Mampostería de ladrillo " Zigurat", en Mesopotamia.

Fig. 1.4 Mampostería de hielo. "Iglúes", en Alaska.

Fig. 1.5 Condominio moderno, en los Estados Unidos.

1.2.1 Mampostería de roca

La primera mampostería fue un conjunto de agregados naturales que eran seleccionados y se apilaban utilizando tierra como mortero entre ellos. Actualmente el uso que se da a las rocas no es de tipo estructural, sino más bien como fachada. El basalto y el granito son algunos tipos comunes de roca utilizados en las construcciones de mampostería.

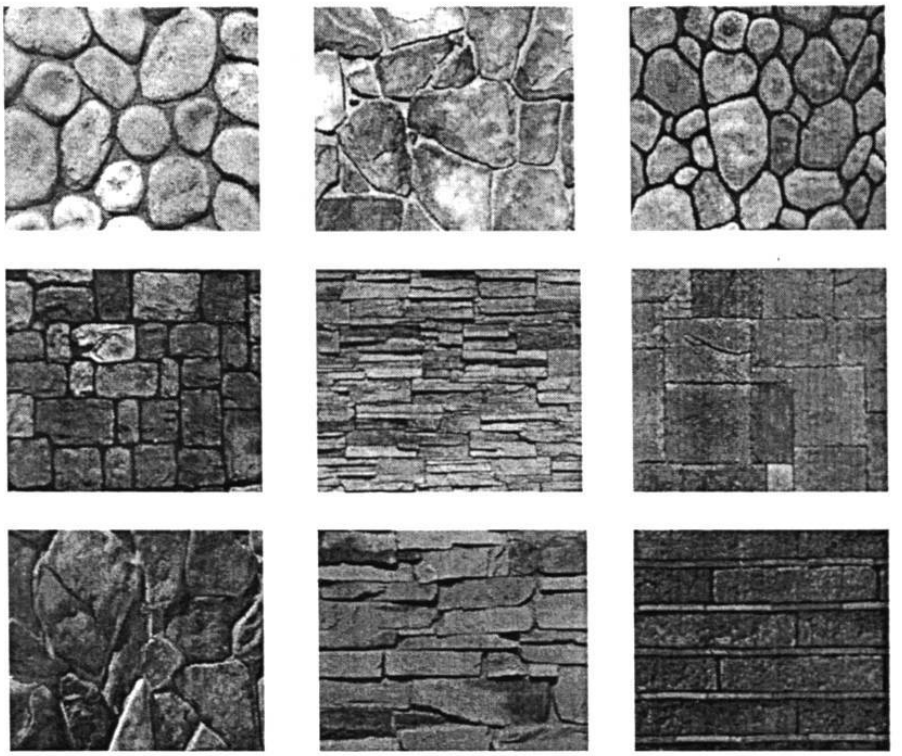


Fig. 1.6 Mampostería de roca.

1.2.2 Mampostería de arcilla.

El uso de los ladrillos de arcilla en las construcciones se inició hace poco más de 10,000 años. Los ladrillos secados al sol fueron utilizados en las ciudades de Babilonia, Egipto, España, Centro y Sudamérica, así como en las reservaciones indias de los Estados Unidos, por citar algunos ejemplos. La palabra adobe, que proviene del árabe "atob" significa ladrillo secado al sol. El proceso de fabricación de ladrillos en Europa, por lo menos en Roma, tomaba un largo tiempo, ya que se

requería que los ladrillos secados al sol tuvieran al menos cinco años antes de ser utilizados en las construcciones.

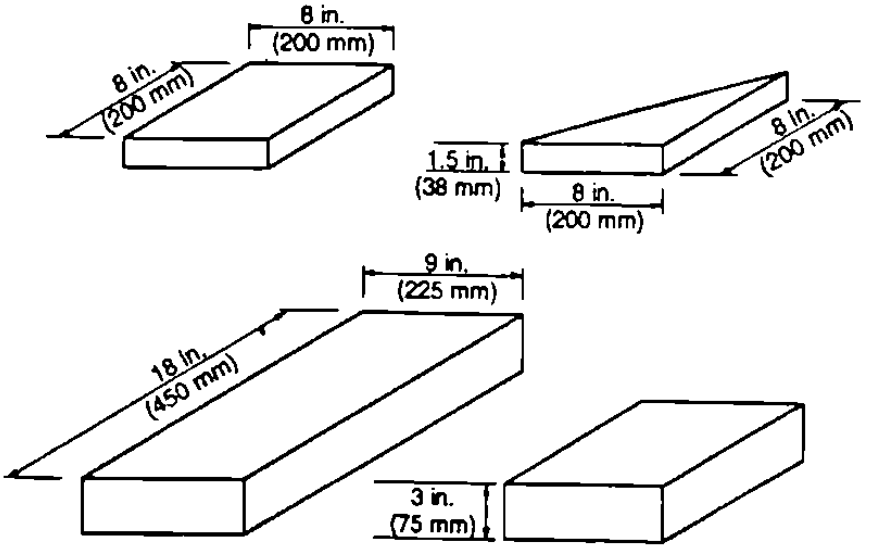


Fig. 1.7 Ladrillos romanos.

A pesar de que la primer máquina para fabricar ladrillos fue patentada en 1619, la producción mecanizada de ladrillos se inició en 1858 con la introducción del horno *Hoffmankiln*, el cual permitió que el curado de ladrillos formara parte del proceso continuo de producción. En la actualidad, el proceso completo de producción de ladrillos (mezclado, vaciado en moldes, secado, curado, almacenamiento y entrega) está altamente mecanizado, y puede realizarse en menos de una semana.

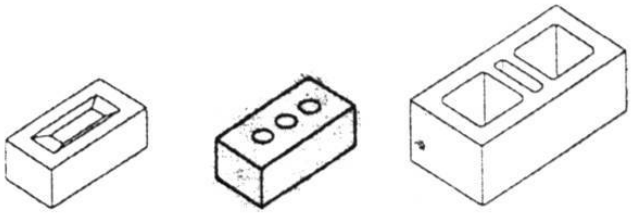


Fig. 1.8 Unidades contemporáneas de mampostería de arcilla.

1.2.3 Mampostería de silicato de calcio.

En el pasado, los ladrillos de silicato de calcio se hacían moldeando al mortero de limo en forma de ladrillo y permitiendo que se secara al sol. En los Estados Unidos, en 1866, con la introducción del vapor, el proceso de producción se aceleró grandemente, pero continuo siendo muy lento. En Alemania, en 1894, la presión de vapor fue utilizada para el curado de las unidades de silicato de calcio, y el resultado de ello fue la producción rápida de unidades modernas de mampostería de silicato de calcio.

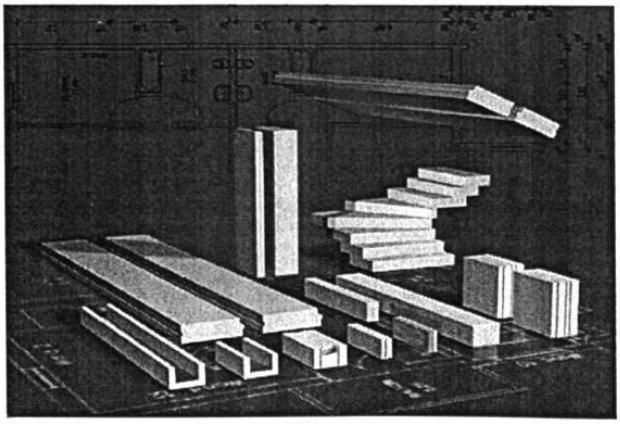


Fig. 1.9 Unidades contemporáneas de mampostería de silicato de calcio.

1.2.4 Mampostería de concreto.

Las primeras unidades de mampostería de concreto aparecieron casi al mismo tiempo que el proceso de curado a vapor de las unidades de silicato de calcio y del desarrollo de cementos de mejor calidad. Los primeros bloques de concreto no fueron muy populares, debido a que eran sólidos, y por lo tanto bastante pesados. Las técnicas para fabricar bloques de concreto con huecos en moldes de madera se desarrollaron alrededor de 1866. En 1914, el vaciado mecánico reemplazó al proceso manual y en 1924 se introdujo la primera máquina mezcladora al proceso de producción. Un avance aún mayor se logró en 1939, con la introducción del mezclado por medio de vibración. Las técnicas de curado también progresaron; se reemplazó el curado al aire con: curado con vapor de agua, curado con vapor de presión atmosférica, curado con vapor a alta presión (autoclave) y sistemas de curado con calor.

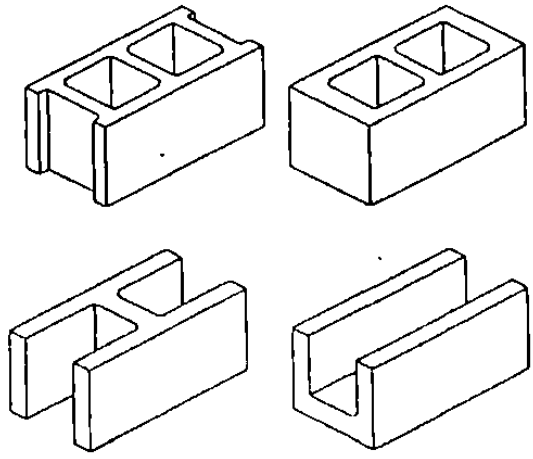


Fig. 1.10 Unidades contemporáneas de mampostería de concreto.

1.2.5 Morteros.

Los primeros morteros fueron utilizados principalmente como relleno en grietas y para proveer una superficie de contacto uniforme entre las unidades de mampostería, sus características dependían en gran medida, de las condiciones de exposición y espesor de las juntas. Los egipcios utilizaron yeso calcinado como mortero, y un par de siglos después, los griegos y los romanos añadieron limo al agua, y con la adición de arena, rocas o ladrillos, produjeron los primeros tipos de concreto. Los romanos encontraron que los morteros de limo no eran resistentes al agua, pero al mezclar el limo con ceniza volcánica produjeron lo que hoy se conoce como cemento puzolánico. El nombre puzolánico se deriva de la villa de *Pozzuoli* cerca del volcán *Vesubio*, donde se encontró la ceniza volcánica. El coliseo de Roma es un ejemplo de una estructura construida con comento puzolánico como mortero.

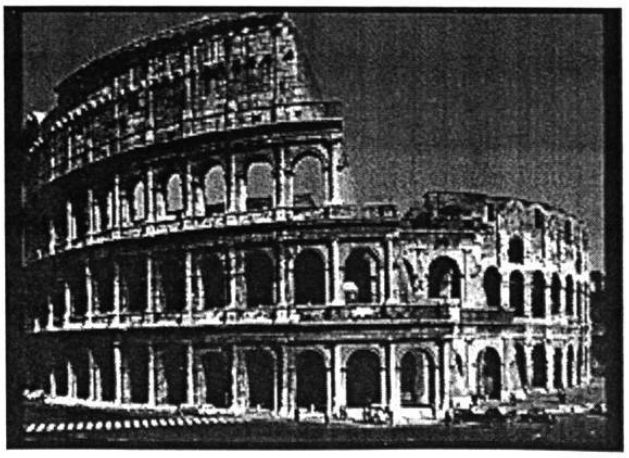


Fig. 1.11 El Coliseo, en Roma, Italia.

Los desarrollos importantes en mortero y cemento se dieron en el siglo dieciocho, cuando *John Smeaton*, durante la reconstrucción del faro de *Eddystone*, mezcló puzolana con piedras de limo que contenían una alta proporción de arcilla, hecho que produjo una mortero durable que podía pegar y endurecer aún en presencia de agua. *Smeaton* reconoció la importancia de la arcilla y fue el primero en entender las propiedades químicas del limo hidráulico. El siguiente desarrollo importante fue la patente y producción del *cemento portland* que *Joseph Aspdin* realizó en Inglaterra en la primera mitad del siglo diecinueve. *Aspdin* combinó cemento portland con arena, limo y agua, lo cual produjo un mortero mucho más resistente, que podía pegar y endurecer aún en presencia de agua.

1.3 Las primeras construcciones con elementos de mampostería.

Existen dos problemas estructurales fundamentales, cuando se construye un edificio; cómo poder mantener una altura determinada y cómo lograr librar claros entre los huecos. En este sentido, en las construcciones de mampostería, esto se logra mediante los siguientes elementos: columnas, torres, muros, dinteles, vigas y arcos.

Fig. 1.12 Detalles de elementos estructurales antiguos.

1.3.1 Pirámides.

La primer pirámide fue construida por los egipcios en el año 3000 A.C., formó parte de un conjunto de tumbas construidas con ladrillo, llamadas *mastabas*, y tenían una altura de 9 metros (ver Fig. 1.13). Otro de los primeros tipos de pirámide se encontró en Mesopotamia, llamada *Zigurat*, la cuál consistía en una pirámide artificial de ladrillo y lodo de 53 metros de altura con escaleras ceremoniales que conducían al templo en la parte superior. Otros templos con forma de pirámide también fueron construidos en ciudades de Centro y Sudamérica, desde el año 900 A.C, hasta el año 1400 D.C. Estos templos fueron construidos con ladrillo o rocas, normalmente contenían recintos en diferentes niveles y lograron alcanzar alturas superiores a los 57 metros. La gran pirámide de *Keóps* requirió alrededor de dos millones de bloques de piedra, con un peso promedio de 2.5 toneladas cada una; pero algunas de las

piedras llegaron a pesar hasta 15 toneladas. La Fig. 1.15 muestra algunos tipos de pirámides en el mundo.

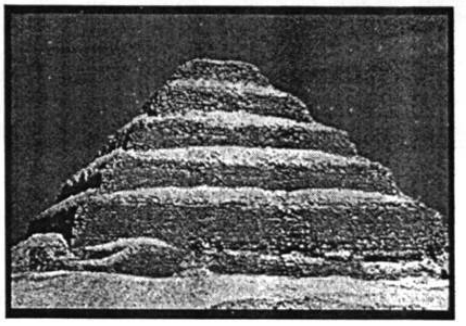


Fig. 1.13 Primer pirámide "*Mastaba*", en Egipto.

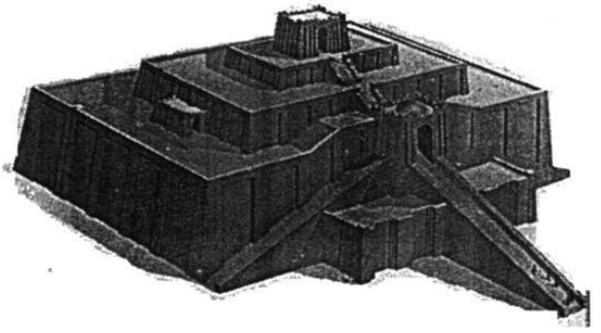
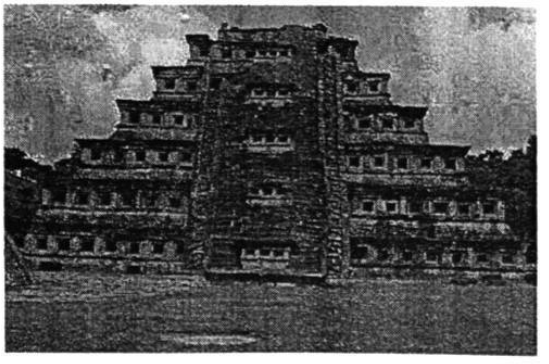


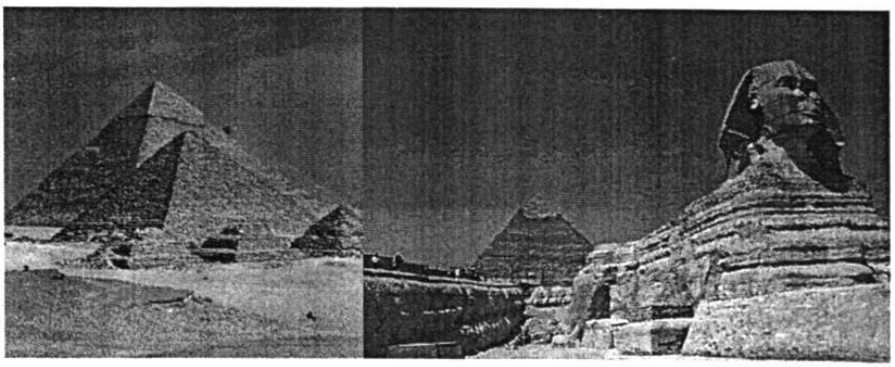
Fig. 1.14 Pirámide "*Zigurat*", en Mesopotamia.



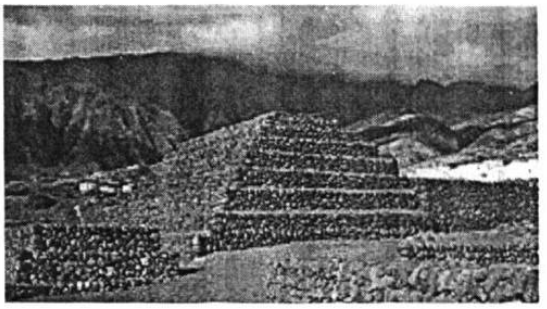
a) Templo de nichos: El *Tajín,* en México.

b) Pirámide del Sol, en *Teotihuacan,* México.

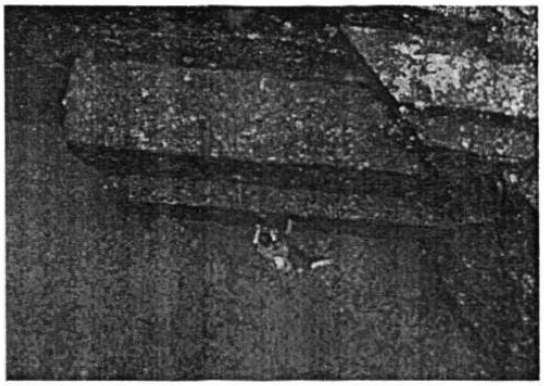
c) El Castillo de Ruinas en *Chichen Itzá*, en México.



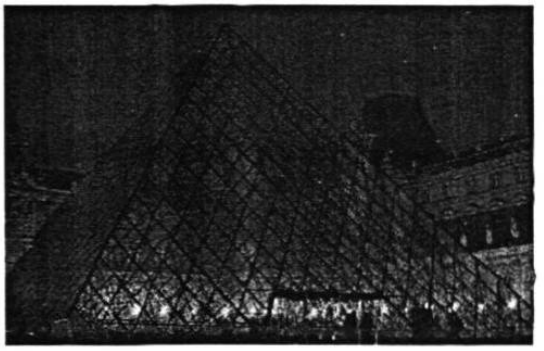
d) La "Esfinge", guardián de las pirámides de Egipto.



e) Pirámide *Guimar*, en España.



f) Pirámide Izanami, bajo el mar de Japón.

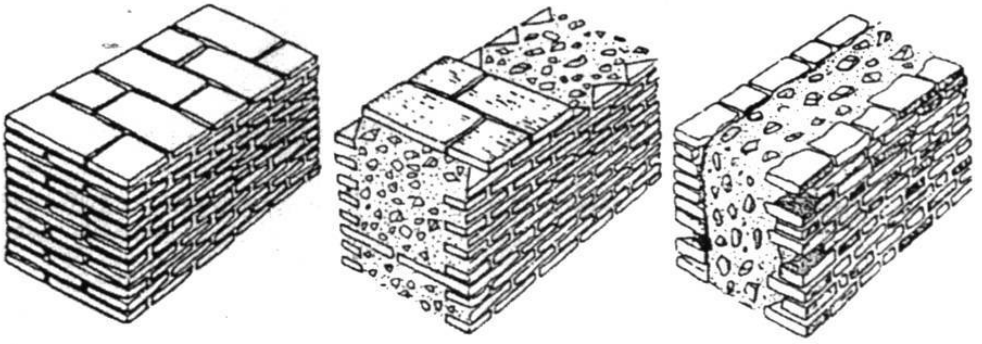


g) Pirámide del *Louvre*, en Francia.

Fig. 1.15 Pirámides en el mundo.

1.3.2 Muros.

En la construcción de muros se requiere mucho menos material que en las pirámides; sin embargo, en tiempos antiguos los muros fueron invariablemente sólidos y de un gran volumen. Los muros fueron utilizados para retener tierra, fortificar comunidades o para seccionar edificios y, en general, se construían con rocas o ladrillos secados al sol.



a) Muro de ladrillo traslapado

b) Muro de ladrillo tipo fachada y con cabezales

c) Muro de ladrillo tipo fachada

Fig. 1.16 Primeros muros de mampostería.

En el antiguo muro de mampostería se utilizaron ladrillos de barro, con juntas de lodo como mortero, de 1 a 40 milímetros de espesor, y se utilizó caña, en algunas carreras horizontales de ladrillo, para aumentar la resistencia del muro y controlar el agrietamiento. La gran masa (espesor) con el que se construían los muros tenía como objetivo aumentar la estabilidad.

Un ejemplo de un muro masivo o de gran espesor, se puede encontrar en el palacio de *Ctesiphon,* en Mesopotamia; donde un muro de ladrillo de barro de 5 metros de espesor, en su base, se levanta hasta una altura de 34.40 metros sobre la superficie.

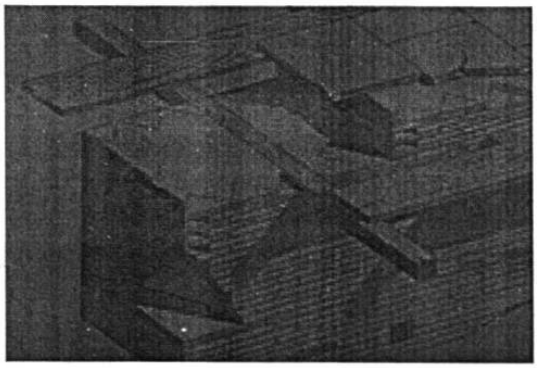


Fig. 1.17 Construcción tradicional de un muro de mampostería reforzada, en la antigua Roma.

1.3.3 Columnas y torres.

Una sección transversal es más eficiente cuando se concentra el material en sus extremos. Este principio fue utilizado en la construcción de estructuras tipo torre, donde los muros perimetrales delimitaban el espacio interior. Un ejemplo de ello se puede observar en la columna de *Trajano,* construida en Roma en el año 113 D.C. La Catedral de *Estrasburgo,* construida en Francia en 1439, fue el edificio más alto del mundo antes del siglo veinte; la construcción alcanzó una altura de 142 metros, ligeramente menor que la gran pirámide de *Keops.*

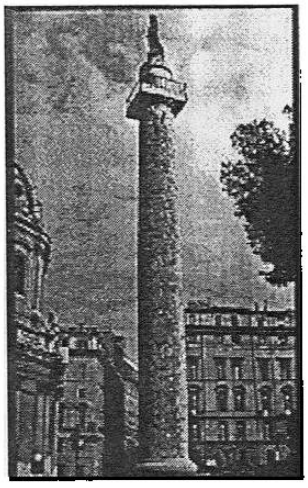


Fig. 1.18 Columna de *Trajano*, en Roma.

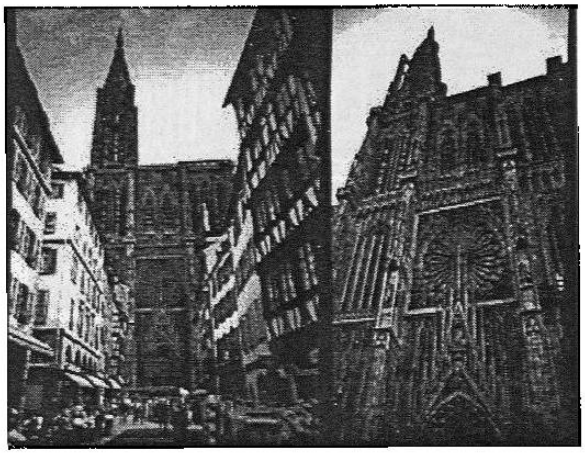


Fig. 1.19 Catedral de *Estrasburgo*, en Francia.

1.3.4 Vigas y dinteles.

Los primeros hombres colocaron rocas sobre otras dos rocas, para librar claros, utilizando el principio de balanceo de cargas. Podemos observar ejemplos de dinteles de mampostería en el círculo ceremonial de piedras de *Stonehenge*, así como en la arquitectura clásica griega del *Partenón*, en Atenas.

Fig. 1.20 Círculo de piedras ceremoniales de *Stonehenge*, en Inglaterra.

Fig. 1.21 Partenón de Atenas, en Grecia.

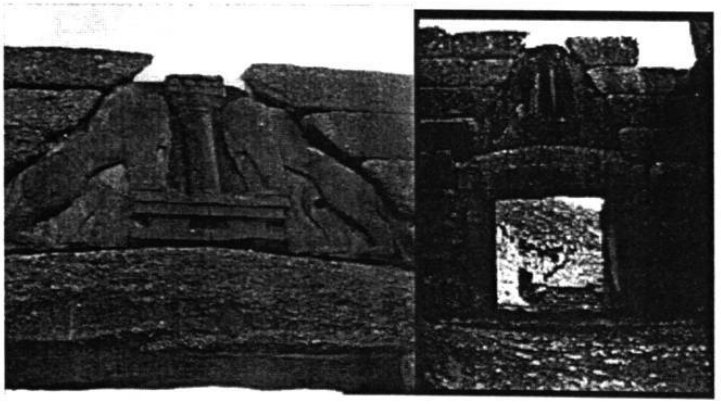


Fig. 1.22 Puerta del León de *Micenas*, en Grecia.

1.3.5 Arcos.

Siempre será posible lograr un claro mayor si se utilizan dos rocas inclinadas, una contra la otra, dando forma de un arco primitivo, en vez de un simple dintel de roca. Un ejemplo de ello se puede encontrar en el *Templo de Apolo*, en *Delfos* (426 A.C.) donde se libra un claro de 6 metros.

Fig. 1.23 Templo de *Apolo*, en Grecia.

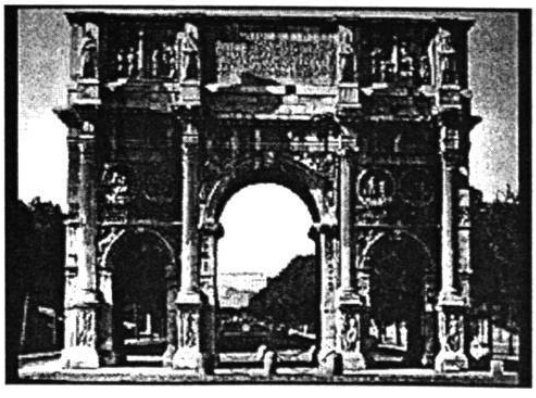


Fig. 1.24 Arco de Constantino, en Roma.

Un avance estructural más importante se logró con la introducción del primer arco verdadero, en el año 1400 A.C., construido mediante rocas o ladrillos colocados en forma de semicírculo (Dovela). Esta forma de construcción tiene la posibilidad de cubrir grandes claros, debido a que la mampostería se encuentra bajo esfuerzos uniformes de compresión. Un ejemplo de construcción de un arco de forma parabólica se encuentra en el palacio de *Ctesiphon,* en Irak, construido en el año 550 D.C., con ladrillos de barro de 7.3 metros de espesor en su base; el arco tenía una altura de 36.7 metros y cubrió un claro de 25.3 metros. En Europa, en 1598 se terminó de construir el arco gótico más grande, que cubría un claro de 22 metros, sobre la Catedral de Gerona en España.

Fig. 1.25 Palacio de *Ctesipohon, Taq-i-Kisra,* en Iraq.

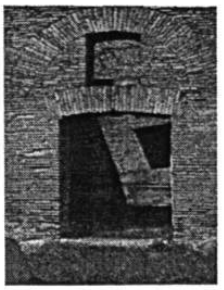


Fig. 1.26 Arco romano construido con ladrillos.

1.3.6 Bóvedas y domos.

La construcción de bóvedas o arcos verdaderos se realizó colocando rocas o ladrillos en carreras horizontales, con sus juntas de mortero radiando desde un centro. Se requería de soportes temporales, hasta que la bóveda estuviera terminada. Los romanos emplearon con frecuencia este método, utilizando una combinación de ladrillo y concreto. Un impresionante ejemplo de ello se terminó en el año 313 D.C., el cuál consistió en una bóveda semicircular, con un claro de 25 metros, en la Basílica de Constantino, en Roma. Otro método de construcción de bóvedas consistía en colocar las unidades de mampostería de roca o ladrillo de barro como una serie de anillos o arcos longitudinales. De esta forma, no se requerían soportes temporales. La primer construcción de este tipo se encontró en el palacio de Sargos, en Persia, construida en el año 720 A.C.

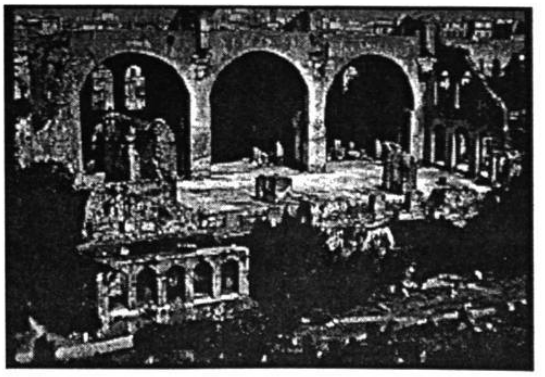


Fig. 1.27 Basílica de Constantino, en Roma

La construcción de un domo consiste en carreras horizontales de unidades de mampostería, con juntas más o menos radiales. También requieren soportes temporales, principalmente durante la construcción de la corona. Los anillos de refuerzo en la parte inferior de los domos semiesféricos fueron utilizados por primera vez en el domo gótico de la Catedral de Florencia, en Italia, que fue terminada en 1462. Un gran número de casas con forma de domos parabólicos hechos con ladrillos de barro fue construido por los romanos en la isla de *Chipre,* alrededor del año 565 D.C. Durante los siglos quince al diecinueve, en Europa, fue común el uso de domos góticos. Un ejemplo de ello es el domo de la Catedral de San Pedro, en Roma, terminada en 1590.

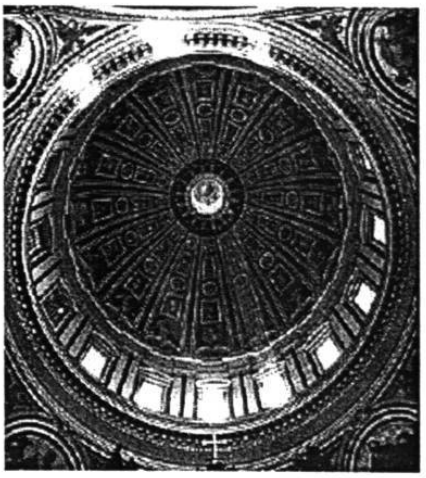


Fig. 1.28 Domo de la Basílica de San Pedro, en Roma.

1.4 Desarrollo histórico de las estructuras de mampostería.

El adobe, una mezcla de arena y arcilla más un agente estabilizador, es uno de los materiales de mampostería más antiguos que ha sido utilizado en la construcción de casas, desde el comienzo de la civilización. A pesar de que generalmente se asocia con las culturas indias hispánicas de Centro y Sudamérica, este material también se ha encontrado en algunas construcciones monumentales de Grecia y Roma. Existe un gran número de ejemplos de construcciones de varios niveles hechos de abobe, como los pueblos de *Taos* y *Acoma,* en Nuevo México.

Fig. 1.29 Palacio *Cliff* en el Parque Nacional Mesa Verde, en Colorado.

El uso de la mampostería de ladrillo apareció con el florecimiento de los primeros pueblos egipcios, romanos y griegos. La pirámide de *Keops* en Egipto, por citar un ejemplo, se eleva a una altura de 145 metros y

continúa siendo la estructura de mampostería simple más grande que ha sido construida por el hombre. La gran muralla China es otro coloso de las construcciones de mampostería. Uno ejemplo de construcción más espectacular, de gran utilidad y que ocupó un espacio importante dentro de las maravillas antiguas del mundo, fue el faro de Alejandría, la estructura tenía una altura de 167.50 metros (similar a la del monumento de *George Washington*) , y llegó a tener una vida de 1500 años antes de ser destruido por un sismo, en el siglo trece.

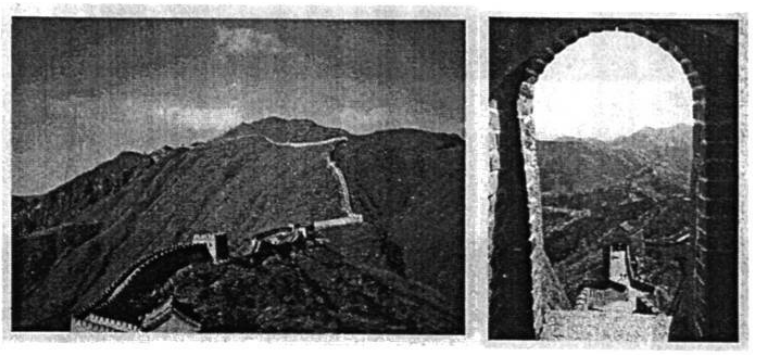


Fig. 1.30 La Gran Muralla China.

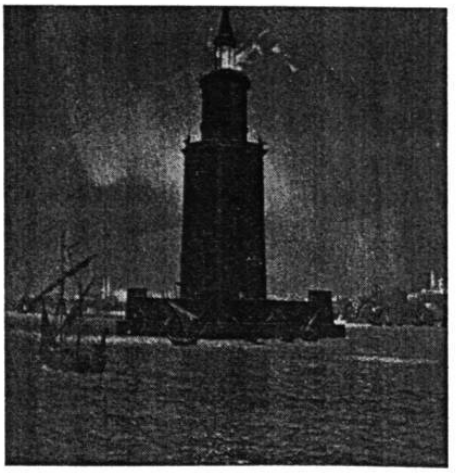


Fig. 1.31 El Faro de Alejandría, en Egipto.

Durante la edad media, las civilizaciones del occidente desarrollaron una gran cantidad de castillos y catedrales que fueron verdaderas construcciones de mampostería. El domo de Hagía Sofía, en Estambul fue construido con ladrillos de 50 milímetros de espesor.

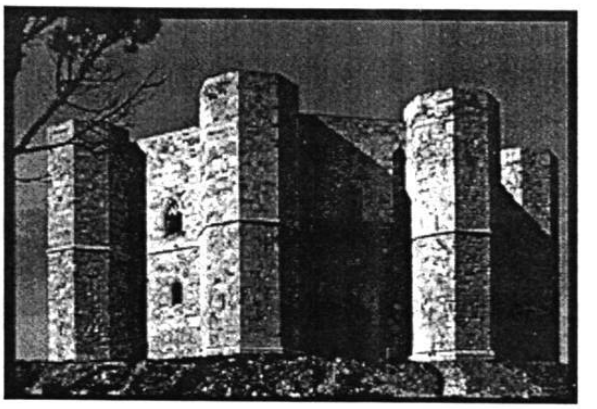


Fig. 1.32 Castillos medievales.

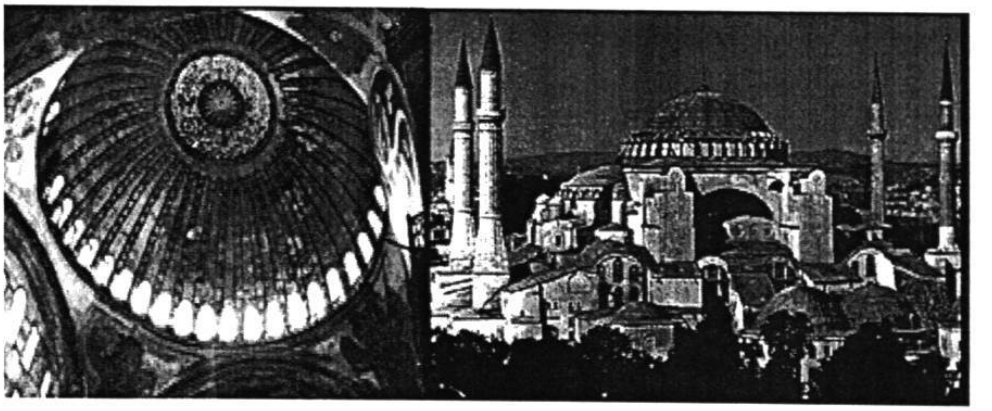


Fig. 1.33 Domo de Hagía Sofía, en Estambul.

Algunos ejemplos de mampostería de roca, aún en pie hoy, se encuentran en algunas regiones de los Estados Unidos (Nuevo México, Colorado y Arizona). La civilización *Anasazi*, en el período comprendido entre los siglos cinco y trece, construyó dos tipos de muros de

mampostería; muros simples y muros dobles. En sus construcciones utilizaron bloques de forma rectangular, y crearon un mortero fabricado con suelo limoso de color rojo, del cual, conocieron que disminuía la tendencia de contracciones excesivas por secado, si añadía arena o suelo arenoso a la mezcla del mortero. Después de realizar varias mezclas con el mortero, encontraron que podían producir diferentes colores de mezcla y dar una apariencia distinta al muro; además, notaron que al colocar pequeñas piedras entre las juntas de mortero se contribuía a disminuir los efectos de la contracción del muro por secado.

No cabe duda de que estas aplicaciones de la mampostería indican que aún durante aquellos días, los constructores y diseñadores comenzaban a entender, al menos de una forma intuitiva, cómo se transmitían las cargas desde los elementos estructurales, hacia el suelo de desplante. Recordemos que fue *Aristóteles* quien explicó correctamente cómo se resistirían las fuerzas de gravedad por medio de un arco. *Leonardo da Vinci* abundó en esta teoría, explicando la acción de mecanismos internos entre los elementos de un arco. El planteamiento actual de una carga triangular sobre dinteles de mampostería tiene su origen en esta explicación clásica. Los arcos y las columnas fueron los dos elementos principales de las construcciones antiguas de mampostería. La capacidad de soportar carga de estos

elementos fue de los primeros conceptos que se definieron matemáticamente, y fue *Euler*, un matemático suizo, quien a mediados del siglo dieciocho definió la capacidad de carga de una columna, en términos de su capacidad última de pandeo. A pesar de la mayoria de los esfuerzos posteriores por obtener un modelo más complejo, esta simple definición matemática representa hoy la expresión elástica fundamental, para la capacidad de carga de una columna de cualquier clase de material. Las ciudades amuralladas del siglo doce, que todavía se mantienen en pie, ciertamente demuestran la buena apreciación que tenían las civilizaciones antiguas del comportamiento de la mampostería. En la ciudad amurallada de *Rotenburgo*, estos primeros constructores de roca utilizaron otro elemento estructural, que es conocido actualmente como "contrafuerte", iniciando con esto, la idea de espaciar los muros de mampostería entre elementos verticales de soporte. Es importante observar que las relaciones de altura y espesor del pasado, son las mismas que se recomiendan actualmente, para los muros de mampostería no reforzada.

Los antiguos constructores le dieron a la mampostería un uso aún más sorprendente; desarrollaron lo que hoy se considera una técnica moderna de construcción, el pre-esfuerzo. Hicieron trabajar a las carreras inferiores de mampostería en los muros como arcos planos, es decir, la carga de la parte superior del muro generaba fuerzas de

compresión en el arco plano, produciendo esfuerzos verticales de compresión, debido a las cargas verticales así como esfuerzos de compresión horizontal dentro del plano debido a la acción de arco de las carreras inferiores. Esta condición proveía al muro una gran resistencia a las fuerzas de impacto de los enemigos. Esta técnica fue el principio del pre-esfuerzo biaxial, que hoy comenzamos a entender.

Fig. 1.34 Edificio *Monadnock*, en Chicago.

El ladrillo es actualmente uno de los materiales de mampostería de uso común. El edificio *Monadnock*, que fue construido en 1891 en Chicago, representa, por lo menos en los Estados Unidos, el uso de la mampostería simple en sistemas de muros cargadores.

El desarrollo posterior de la mampostería reforzada se le acredita a *Marc Brunel*, un ingeniero de la ciudad de Nueva York. Aparentemente, *Brunel* concibió la idea, en 1813, pero no la puso en práctica hasta 1825. En aquellos días, *Brunel* participó en el proyecto del túnel del rio *Támesis*, que consistía en la construcción de dos túneles de 15 metros de diámetro, 21 metros de alto y con muros de 30 centímetros de espesor. *Brunel* le integró al muro de ladrillo un refuerzo vertical con varillas de hierro de 2.54 centímetros de diámetro, adheridas entre las juntas de mortero. *Brunel* inició los trabajos del programa de pruebas que investigaron la influencia del refuerzo en el comportamiento monolítico de los muros de mampostería. Poco tiempo después, algunos de los resultados de estas pruebas obtuvieron tal publicidad, que las condujeron a la gran exposición de Londres en 1851, y tal publicidad no fue por otra cosa que por el hecho de haber realizado las pruebas utilizando un nuevo tipo de cemento, conocido como *cemento portland.* A partir de ese momento se obtuvieron los esfuerzos de tensión para mampostería sin refuerzo y sobre las bases de estos resultados, se recomendaron valores permisibles de esfuerzo de tensión, para el diseño de dinteles de mampostería.

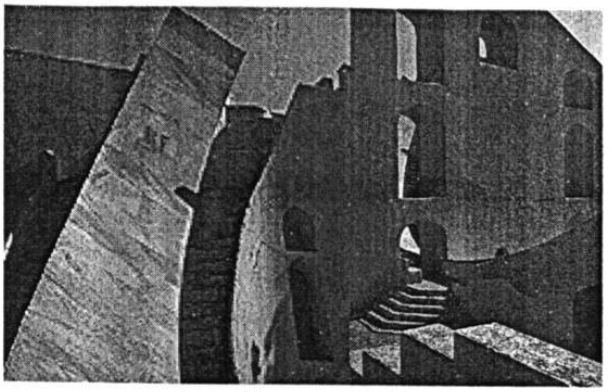
En los Estados Unidos, el inicio de la aventura de la investigación del comportamiento de las vigas reforzadas se debe a los trabajos desarrollados por *Hugo Filippi*, en 1913. Poco tiempo después, *Filippi*

formalizó sus descubrimientos en un pequeño manual de diseño que sirvió de referencia para las construcciones de los años treinta (1930). Durante ese mismo lapso apareció la mampostería de ladrillos con huecos, hecho que facilitó la colocación de acero de refuerzo en su interior; antes de ello, el refuerzo se colocaba en las juntas de mortero.

En 1923, bajo la secretaría de *A. Brebner*, el Departamento de Obras Públicas del Gobierno de la India publicó una serie de pruebas que tomaron dos años en su desarrollo, hecho que marcó el verdadero comienzo del desarrollo moderno de la mampostería de ladrillo reforzada.

Los ingenieros de países como la India y Japón, encontraron que la mampostería reforzada ofrecía una excelente resistencia a las fuerzas sísmicas. *Brebner* indicó que cerca de 287,709 metros cuadrados de mampostería de ladrillo reforzada fueron colocados en los tres años anteriores a 1922. *S. Kanamori*, ingeniero civil del gobierno del imperio japonés, publicó en 1930 un reporte que decía: " No hay duda de que la mampostería de ladrillo reforzada debería ser usada en lugar de la mampostería simple (sin refuerzo) cuando se tiene conocimiento de que algún esfuerzo de tensión estará presente en el muro durante su vida útil."

A mediados de 1930, comenzó el legado de construcciones de mampostería reforzada en los Estados Unidos, esto se debió a la promoción que se dio en aquellos días al desarrollo del uso de la mampostería reforzada por parte de algunas agencias como: La División de Arquitectura de California (*California Division of Architecture*), La Asociación de Productores de Ladrillo del Sur de California (*Associated Brick Manufacturers of Southern California*), y la Asociación de Mampostería de Concreto (*Concrete Masonry Association*), seguida unos años más tarde por el Instituto del Ladrillo de América (*Brick Institute of America*). La mayoría de los ejemplos de construcciones de mampostería aún pueden ser vistos en California. La planta de energía de la Compañía de Gas y Electricidad del Pacífico (diseñada por Walter Dickey) se construyó en 1951, en *Antioch*, California. El Hospital Sepúlveda de Veteranos de la Administración, un complejo de 26 edificios, se construyó en Los Ángeles en 1952, y se debe notar que los edificios del complejo sobrevivieron al sismo de San Fernando, de 1971, sin presentar daños estructurales apreciables. La Fig. 1.35 muestra algunas construcciones antiguas de mampostería en el mundo.

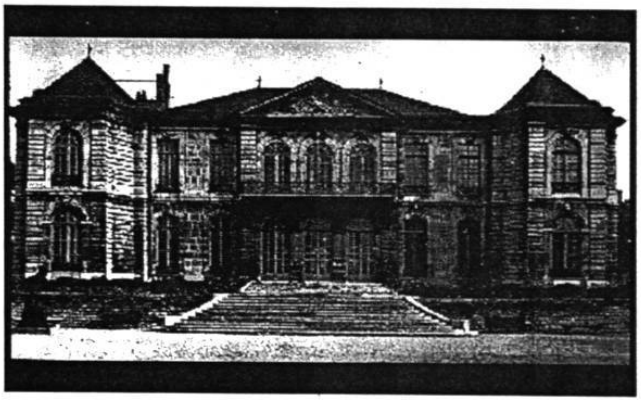


a) Observatorio astronómico *Maharajá Sawai Jai Singh II*, en Jaipur India.

b) Catedral de Milán, en Italia.

c) Torre *Dongón*, en Francia.

d) Catedral de Florencia, en Italia.



e) Hotel de *Biron*, en París.

f) *Residencia Whitehall*, en Londres.