

## CAPITULO 1

### 1. Aspectos generales de los monumentos históricos

#### 1.1. Materiales estructurales

En años recientes la ingeniería estructural se ha dedicado al estudio del comportamiento de los templos históricos ante las acciones de peso propio y sismo, para conocer mejor el comportamiento de sus materiales, y de sus elementos estructurales, así como la modelación de su conjunto para análisis estructural, y de esta manera contribuir en las tareas de conservación y restauración de estas construcciones.

Los avances en la tecnología permiten que los procesos de análisis numéricos se vuelvan más refinados y permiten obtener resultados cada vez más aproximados a la realidad.

Un aspecto importante que hay que resaltar de estos templos se encuentra en sus materiales que los constituyen. En su mayoría son construcciones a base de mampostería, cuyo material predominante es la piedra y el ladrillo, unidos con morteros de cal y arena, con elementos de madera y metal, todos en su conjunto forman magníficas construcciones. A continuación se da una pequeña descripción de los materiales que constituyen un templo histórico colonial.

##### 1.1.1. Barro

Se comenzó a usar en las construcciones como tierra apisonada o como recubrimiento de entramados de madera o caña. Sus principales debilidades son la degradación por intemperie y el agrietamiento por secado.

Con la finalidad de reducir el problema de contracción, se evolucionó hacia la preparación de piezas de tamaño manejable que previamente eran secadas al sol, y de esta manera completar su contracción por secado antes de ser colocadas en los elementos constructivos definitivos. Los bloques o ladrillos de barro secado al sol se conocen como adobes y se emplean principalmente en la construcción de muros, unidos con mortero del mismo lodo.

Su resistencia a compresión puede variar entre 5 y 20  $\frac{Kg}{cm^2}$ , y la resistencia a tensión entre 0.25 y 1.0  $\frac{Kg}{cm^2}$ . Las resistencias bajas no suelen ser críticas para la capacidad estructural de las construcciones, como lo son el problema de degradación del material y las dificultades de conectar las paredes de estos materiales entre sí y con los techos.

Un avance importante se dio con la aparición del ladrillo, resultado de la cocción de piezas similares a los adobes, a una temperatura cercana a los 1000 °C, con lo cual se logra una mejor estabilidad dimensional y una mayor resistencia al intemperismo. El ladrillo se utilizó primordialmente para la construcción de muros, arcos y bóvedas.

Las propiedades del ladrillo cocido varían en relación al tipo de suelo usado, el procedimiento de fabricación y la temperatura de cocción. Pueden encontrarse resistencias a la compresión desde 20 hasta  $150 \frac{Kg}{cm^2}$ .

### 1.1.2. Mortero

El mortero surge por la necesidad de llenar los huecos entre piedras y para proporcionar adherencia y continuidad entre ellas. El más elemental fue el barro cuya debilidad es la degradación ante la intemperie. Posteriormente el mortero de cal y arena permitió la construcción de elementos más resistentes y más durables, debido a su mayor capacidad como cementante.

La cal adquiere resistencia debido a un proceso de carbonatación, al entrar en contacto con el aire; el proceso es lento y actúa de afuera hacia dentro del material, requiriendo de años para que el proceso llegue a su fin.

Los morteros de cal y arena llegan a alcanzar resistencias de compresión de 5 y  $20 \frac{Kg}{cm^2}$ . Aunque son mucho más durables que los morteros de barro, son también afectados por el intemperismo.

Los romanos lograron un gran avance al agregar puzolana al mortero de cal, con ello se facilitó el desarrollo del primer concreto, antecesor del actual con el que se construyen grandes obras como: puentes, acueductos, bóvedas con grandes claros, etc.

### 1.1.3. Mampostería

La mampostería es la combinación de ladrillos o piedras unidas con mortero, además de lo que ya sea dicho sobre el mortero, cumple con la función de transmitir adecuadamente la distribución de cargas en el elemento constructivo y permite el posicionamiento adecuado de las piedras.

Es importante mencionar aquí que las propiedades estructurales dependen en gran medida del arreglo de los materiales que componen la mampostería, además de las propiedades mecánicas de los mismos.

La mampostería tiene un intervalo amplio de variación en sus propiedades mecánicas, las cuales dependen en gran medida de la calidad de la piedra y del mortero. Ahora bien la interacción de ambos materiales depende del aparejo, o la distribución interna de los mismos. Además hay que tomar en cuenta que el deterioro también afecta su comportamiento.

Una manera simple de analizar el comportamiento de la mampostería sometida a compresión es visualizando el llamado efecto de Poisson, por el cual al ser la mampostería sometida a un estado de esfuerzos de compresión, el conjunto experimentará un acortamiento en la dirección en que se le aplica la fuerza y además un alargamiento en la dirección transversal.

La interacción entre los dos materiales produce una contracción transversal del mortero y una expansión de la piedra, lo cual implica la aparición de esfuerzos de compresión en el mortero y de tensión en la piedra. Recordando que la resistencia de la piedra a esfuerzos en tensión es muy baja, el resultado será un agrietamiento que aumentará en proporción a la carga aplicada, siendo esta resistencia a la tensión la que gobierna la capacidad del conjunto para resistir cargas axiales. Esto nos arroja como consecuencia que la resistencia del conjunto es menor a la de la piedra.

Existe una gran dificultad para proponer valores típicos de sus propiedades mecánicas, debido a que existe una amplia gama de condiciones en estos elementos. Únicamente para la mampostería de ladrillo la información de su resistencia a compresión puede variar entre 5 y  $50 \frac{Kg}{cm^2}$ .

Por otro lado la resistencia en tensión es muy baja, por lo que para cálculos se suele considerar igual a cero, sin embargo puede alcanzar valor entre 1 y  $2 \frac{Kg}{cm^2}$ .

La fuerza cortante que se presenta en los muros introduce esfuerzos de tensión en dirección diagonal. Por tanto la resistencia de los muros, y de las construcciones, ante las fuerzas laterales que se presentan en los sismos dependerá de la resistencia a tensión de la mampostería que como se ha dicho es muy baja.

La mampostería tiene un comportamiento estructural frágil, lo que quiere decir que el material falla bruscamente una vez que alcanza su capacidad de carga, sin presentar deformaciones visibles antes del colapso.

Para fines de cálculo de este tipo de estructuras es de suma importancia conocer el módulo de elasticidad del material, que tiene un intervalo amplio de variaciones. Su módulo de elasticidad lo podemos encontrar entre valores que van de 5,000 a 20,000  $\frac{Kg}{cm^2}$ , para mamposterías irregulares con altos contenidos de mortero y para mamposterías con piedras de buena calidad con juntas de mortero muy delgadas, respectivamente.

La mampostería sufre cambios volumétricos debido a los siguientes fenómenos.

- Por contracción.
- Por flujo plástico

Las deformaciones por flujo plástico son proporcionales al volumen de mortero presente en la mampostería, por lo cual las mamposterías irregulares son las de menor módulo de elasticidad, y pueden llegar a tener hasta 60% de mortero, por lo que experimentan deformaciones diferidas mucho mayores.

En elementos de mampostería la condición más común de cargas es la carga axial combinada con el momento flexionante (debido a la excentricidad con que actúa la carga). Para determinar su capacidad se deben considerar factores de reducción con el fin de considerar los fenómenos de excentricidad y de esbeltez.



**Figura 1.0. Iglesia de San José, Oaxaca**

### 1.1.4. Madera

La madera ha sido desde tiempos remotos un material utilizado con mucha frecuencia en la construcción. Su bajo peso y buena resistencia a esfuerzos de tensión, así como su disponibilidad han hecho de este un material muy demandado, principalmente como elemento estructural de techos y pisos.

Fue empleada en columnas, como elemento rigidizante de paredes, y como refuerzo en estructuras de mampostería. Su principal función en estos casos es permitir la liga entre los elementos estructurales. Ya que la mampostería no puede lograr la continuidad por su baja capacidad de resistencia a tensión, ésta se puede tener en la madera con uniones apropiadas.

Los inconvenientes que la madera presenta, son su poca durabilidad, los incendios, el intemperismo y el ataque biológico. Estas condiciones han causado que pocas construcciones con este material hayan logrado sobrevivir al paso del tiempo. Esto se puede evitar con un mantenimiento constante y reposición de los elementos dañados.

Al estar hablando de un material natural, se nos presenta automáticamente el problema de las propiedades ya que son muy variables, dependen de muchos factores; desde la especie de madera, las condiciones climáticas, y la forma en que se da su desarrollo.

Las propiedades que definen la calidad estructural de la madera están en función del peso específico, el cual varía entre 600 y  $1,000 \frac{Kg}{m^3}$ . La resistencia a tensión para la dirección de las fibras es típicamente entre 100 y  $120 \frac{Kg}{cm^2}$ , en dirección normal a las fibras es tan baja que generalmente se desprecia en los cálculos. La resistencia en compresión en la dirección de las fibras está entre 80 y  $100 \frac{Kg}{cm^2}$ , menor que a tensión. La resistencia en compresión normal a las fibras es de entre 15 y  $30 \frac{Kg}{cm^2}$ , y el esfuerzo cortante resistente entre 15 y  $20 \frac{Kg}{cm^2}$ , el módulo de elasticidad típico es de  $100,000 \frac{Kg}{cm^2}$ .

### 1.1.5. Metales

Los metales no fueron usados masivamente como elemento estructural, ya que existían problemas para obtener uno que cumpliera con características óptimas para su empleo, y fue hasta el siglo XVIII con el hierro colado al cual se le pudieron dar características uniformes y una alta resistencia, cuando este material llegó a ser lo suficientemente económico para que fuera considerado en el empleo como elemento estructural a una escala importante.

Un inconveniente del hierro colado fue su baja resistencia a esfuerzos de tensión, por lo cual solo podía ser usado en elementos que trabajaran a compresión, tales como postes, columnas y arcos.

A finales del siglo XIX se comenzó a utilizar el acero; la trabajabilidad del acero permitió el desarrollo de formas más eficientes y sencillas. La tecnología de las estructuras de acero es propia de las construcciones modernas.

Las principales desventajas que encontramos en el hierro y el acero se derivan de su sensibilidad a las altas temperaturas (fuego) y a la corrosión; estas debilidades propiciaron que muchas de las estructuras antiguas que estaban constituidas con este material no sobrevivieran hasta nuestros días. Aunado a ello está el robo de este material, debido principalmente a su alto costo y la facilidad para ser rehusado.

## 1.2. Componentes típicos de un templo colonial

Aun cuando la configuración de un templo varía por diferentes razones, existen elementos estructurales comunes a casi todos los templos que existen en la actualidad. En la Figura 2.2 se presentan estos elementos.

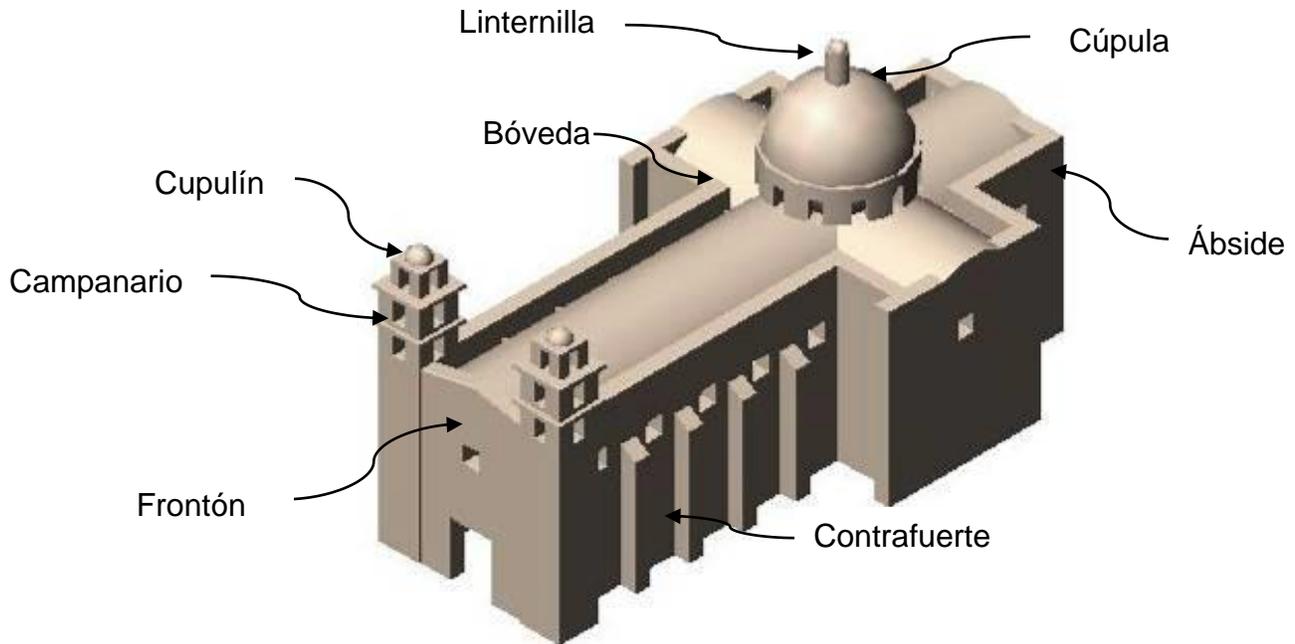


Figura 1.1 Componentes típicos de un templo colonial (Chávez, 2010)

### 1.3.Elementos estructurales

Como en toda estructura los elementos básicos que la componen son de vital importancia, a continuación se describirán a groso modo; se explicará su función y comportamiento ante cargas, además de dar un panorama general de las situaciones críticas que los llevan a la falla.

Para ello se enlistan a continuación los elementos que serán tratados:

- Columnas
- Muros
- Vigas y arcos
- Bóvedas
- Cúpulas
- Contrafuertes y arbotantes

Como se verá más adelante estos elementos son en esencia los constituyentes de un templo típico colonial; por ello es de suma importancia conocer de ellos, ya que los modelos presentados aquí están contruidos a partir de estos elementos.

### 1.3.1. Columnas

El elemento columna cumple con la función primordial y básica de soportar la estructura, y transmitir el peso de está hacia los niveles inferiores, hasta llegar a la cimentación. Constituye un elemento estructural simple, que recibe las cargas en la dirección de su eje principal y está sujeto a esfuerzos de compresión.

Su capacidad de carga está definida por la resistencia del material del que está constituida, sin dejar de lado que esta se puede ver afectada por factores que reducen significativamente la resistencia con respecto a la del material base.

Otro punto importante a tener en consideración se presenta cuando en la columna existe excentricidad en la aplicación de la carga, ya sea por desviación de las fuerzas transmitidas por el sistema de techo o bien por irregularidades en la forma de la columna, y posibles desplomos debido al asentamiento de su cimentación.

En lo que respecta a la seguridad en este elemento, el factor de seguridad que debe emplearse es muy elevado, ya que con el paso del tiempo tiende a disminuir, debido al deterioro de los materiales o por la aparición de condiciones de carga más desfavorables. Para saber cuál es nuestro factor de seguridad actual es necesario cuantificar la influencia de estos factores.

Las columnas tienen un tipo de falla frágil, ya que solo muestran signos de daño visibles cuando están cerca del colapso. Por lo tanto es necesario prestar mucho cuidado a pequeños cambios que muestren signos de deterioro en una columna. Una de las características más evidentes de que esto ocurra es que aparece un sistema de grietas verticales que indican que la expansión lateral del material alcanza niveles elevados y se puede presentar el desprendimiento del material y de esta manera la falla del elemento.

La problemática de las columnas radica en que al ser elementos sometidos a carga axial, por su flexibilidad no absorben fuerzas laterales o momentos flexionantes significativos, por lo tanto no son eficaces para resistir cargas laterales por sismo ni efectos de asentamientos diferenciales de edificio.

### 1.3.2. Muros

Al igual que las columnas tienen como función el soportar al edificio, adicionalmente cumplen otras funciones estructurales, como la de absorber los empujes laterales debidos al coceo de arcos y bóvedas, viento y, algo muy importante para el problema que nos ocupa, al efecto del sismo.

Como se ha mencionado el material típico para muros es la mampostería. La resistencia a carga axial se rige por los mismos factores comentados para las columnas. En este caso el pandeo no suele ser crítico, debido a que los espesores empleados en su construcción son generosos, la relación altura-

espesor no excede de 6, si esto pasa entran en escenario los contrafuertes de los que hablaremos más adelante.

En muros interiores la descarga es aproximadamente axial, sin embargo en muros exteriores no sucede lo mismo, ya que el componente horizontal de descarga puede ser significativo y esto induce a que se tengan problemas ya no de resistencia sino de rigidez al movimiento normal a su plano, ya que si debido al coceo, el muro se desplaza hacia fuera, la bóveda del techo se abre y se agrieta, lo que nos llevaría a una pérdida de estabilidad.

Un efecto importante que daña estas estructuras son los sismos, y dicho efecto es resistido principalmente por los muros. Ya que como habíamos visto la mampostería tiene baja resistencia a esfuerzos en tensión, se puede presentar en los muros una grieta diagonal perpendicular a la dirección de los esfuerzos en tensión. Como los movimientos del sismo se alternan en ambas direcciones horizontales, su efecto se hace notorio por la aparición en los muros de grietas diagonales cruzadas.

Si por otra parte el edificio sufre de hundimientos diferenciales en distintas partes de su cimentación, estas producirán distorsiones en los muros que dan lugar a la aparición de un estado de esfuerzos similar al inducido por las fuerzas laterales del sismo pero en un solo sentido, por lo que las grietas producidas se dan en una sola diagonal.

Adicionalmente el muro puede sufrir agrietamientos en los muros de mampostería debido a la contracción por secado del material, sobre todo del mortero de adobe.



Figura 1.2 Iglesia de San Pedro Pochutla, Oaxaca

### 1.3.3. Arcos

Para solucionar el problema que presentaba cubrir las estructuras con techos, se recurrió a las vigas y losas de cantera, sin embargo debido a su baja capacidad para resistir esfuerzos a tensión los claros que se podían librar eran muy cortos.

Surge de esta manera la concepción de una geometría circular para la distribución de las piedras, acuñándolas una contra la otra; de esta manera surge el arco circular, en el cual las cargas se transmiten hacia los apoyos mediante esfuerzos de compresión que son resistidos eficientemente por la mampostería. Por ello los arcos son la forma natural de cubrir claros grandes con mampostería, lo mismo que la bóveda.

Una particularidad de cómo trabaja un arco es el coceo, que es el empuje horizontal que transmite a sus apoyos y tiende a voltearlos hacia afuera. Este punto reviste gran importancia en lo que se refiere a muros y columnas, al igual que para el arco, ya que pueden perder estabilidad estos elementos. La magnitud del coceo depende del peso propio del arco, la forma del mismo y en particular la relación que guardan su flecha y su claro.

Un arco falla generalmente por movimiento de los apoyos debidos principalmente al coceo, aunque también por asentamientos diferenciales en la cimentación, o movimientos sísmicos.

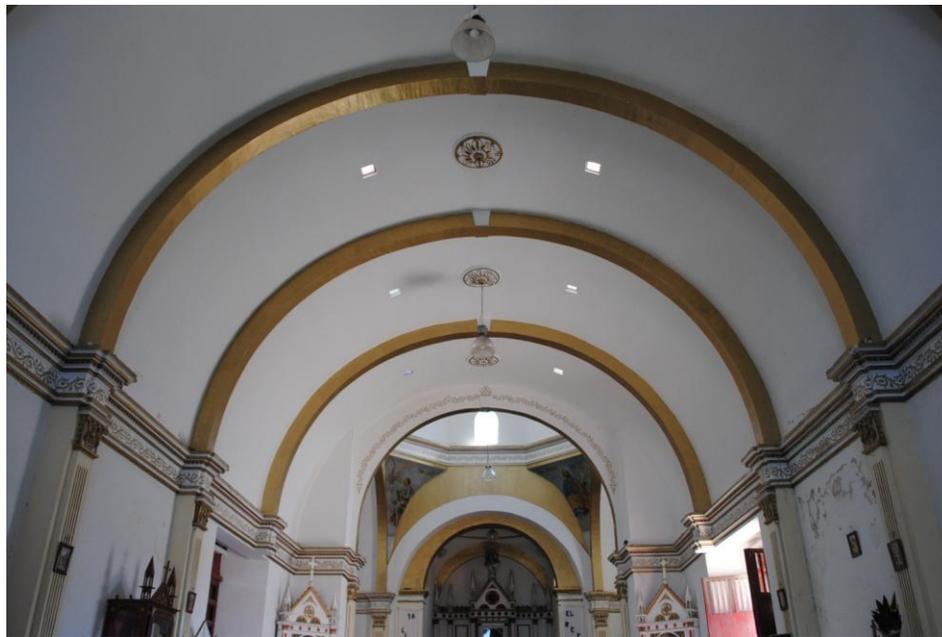


Figura 1.3. Iglesia de Juquila, Oaxaca

### 1.3.4. Bóvedas

La bóveda es la extensión natural del arco, y puede ser definida como una sucesión de los mismos con la finalidad de formar una techumbre completa. Para poder estudiar su comportamiento y modo de falla solo basta con tomar una franja de la bóveda es decir un arco (solo para una bóveda cilíndrica).

Como ya vimos en el arco el aspecto crítico para la estabilidad de las bóvedas es la rigidez de sus apoyos. Por lo que es necesario evitar el movimiento hacia afuera de la bóveda en toda su longitud. Un problema que se presenta es la entrada de luz al recinto, ya que si bien por una parte debe de existir continuidad por la otra se requiere de ventanas, para remediar esto se perforan en los muros los orificios necesarios, generalmente en forma de arco.



**Figura 1.4. Iglesia de San Pedro Pochutla, Oaxaca**

Es importante mencionar que las bóvedas intersecadas y las nervadas transmiten el peso del techo en un número reducido de puntos de apoyo, lo cual da como consecuencia que la carga vertical se vuelva crítica, pero más importante es el coceo que se ejerce en los puntos de apoyo, esto generó la aparición de los contrafuerte y de los arbotantes, por la necesidad de neutralizar esta problemática.

### 1.3.5. Cúpulas

La construcción de las cúpulas requiere de piedra con una geometría bien definida y compleja, esto con el fin de dar la forma espacial a la cúpula, estas formas difícilmente se hallan en la naturaleza, por lo tanto se recurrió al uso de ladrillo, o bien de concreto de mortero de cal y aditivos puzonálicos.

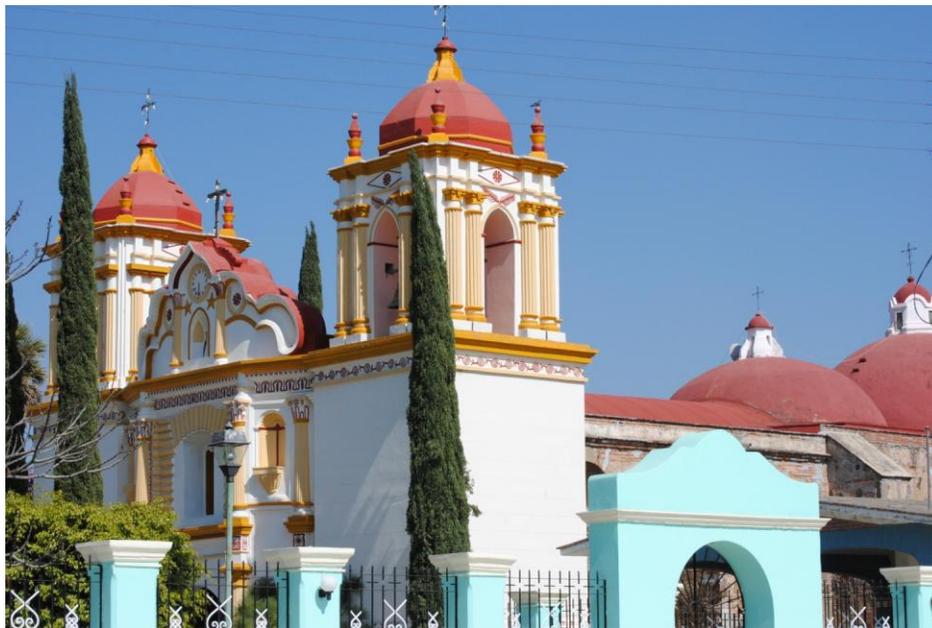
Para llevar a cabo estas obras se tuvo que idear la manera de construirlas sin que en el proceso fallaran por lo cual toda cúpula requiere de cimbra y apuntalamiento parcial o total.

Este elemento cambia radicalmente la distribución de los espacios en los templos, al proporcionar alturas libres y espacios que antes no se imaginaban posibles.

Estructuralmente las cúpulas pueden ser vistas como estructuras espaciales delgadas que transmiten las cargas debidas sobre todo a su peso propio, de manera que los esfuerzos presentan son de compresión en dos direcciones principales.

La transmisión de carga vertical hacia los apoyos suele ser crítica, debido a que no se puede dar apoyo a toda la circunferencia por lo que la carga se concentra generalmente en cuatro columnas por lo que se requiere de elementos que transmitan dicha carga, como lo son arcos y pechinas.

Se pueden presentar daños en las cúpulas debido a esfuerzos de tensión tangencial en la parte superior de la cúpula, los que se transmiten hasta la base y se generan agrietamientos a lo largo de los meridianos. Esto hace que el domo se separe en una serie de secciones que funcionan como arcos adyacentes. Luego estos arcos transmiten las cargas por esfuerzos normales de compresión impidiendo de esta manera que la cúpula pierda estabilidad.



**Figura 1.5. Iglesia de San Dionisio Ocotlán, Oaxaca**

### 1.3.6. Contrafuertes

Los contrafuertes surgen por la necesidad de rigidizar los muros de mampostería y evitar de esta manera el posible volteo, además de que intervienen otros factores desfavorables en dicho elemento como lo son el coceo por la cúpula y la bóveda. Si bien es cierto que una solución alterna consistiría en engrosar el muro, muchas de las veces es una solución poco eficiente debido al grosor que alcanzarían los muros para mantener una estabilidad estructural.

La geometría del contrafuerte puede tener forma rectangular o trapezoidal, esta última le da mayor estabilidad. Para su construcción debe contar con un soporte rígido sobre el terreno para que no tienda a girar hacia afuera y pierda su objetivo estructural.

Hay ocasiones en que la colocación del contrafuerte produce hundimientos en la base del muro que desea estabilizar, debido a su gran peso. Una manera de disminuir dicho peso sin que esto afecte su funcionamiento es abrir un hueco central, que además sirve como circulación a través del él.

Como se puede ver un templo se compone principalmente de los elementos antes descritos por lo que el conocimiento de los mismos es primordial, y ellos en conjunto nos dan la concepción de estructuras tan impresionantes como lo son los templos coloniales que vamos a estudiar en este trabajo.



**Figura 1.6. Iglesia de San Dionisio Ocotlán, Oaxaca**