

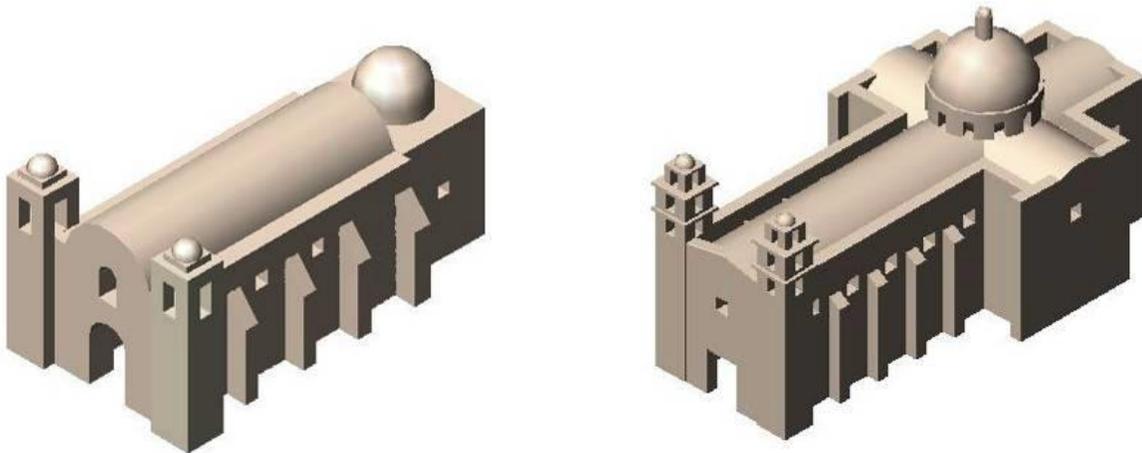
CAPITULO 2

2. Simulación numérica

Antes de describir los modelos creados en este trabajo, es importante conocer el antecedente del mismo que son los experimentos realizados en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM, de un modelo a escala 1:8 del cual se da una pequeña descripción a continuación.

2.1.El modelo a escala 1:8

Para la elaboración de dicho experimento se tomaron como base dos tipos de templos ubicados en el estado de Oaxaca y en el estado de Puebla. Ya que es ahí donde estas construcciones revisten gran importancia y se encuentran en zonas de una importante actividad sísmica. La configuración de dichos templos se ilustra en la Figura 2.0



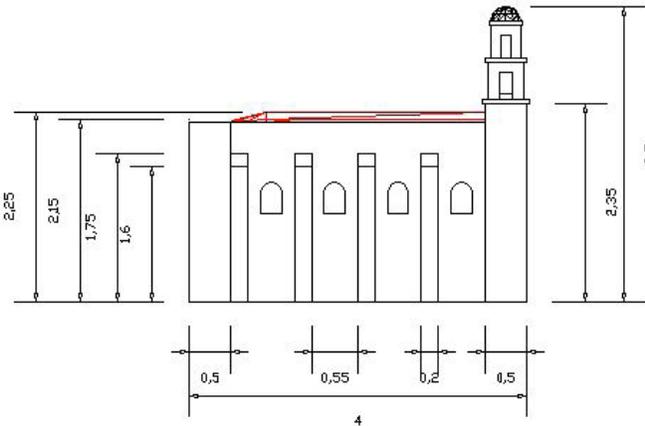
a) Estado de Oaxaca

b) Estado de Puebla

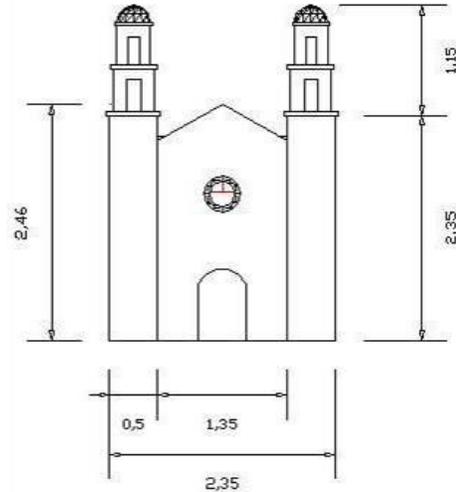
Figura 2.0. Templos típicos de la región sudoeste (Chávez y Meli)

Para la construcción del modelo a escala se tomó como prototipo los templos del estado de Puebla, debido a que son más vulnerables a fenómenos sísmicos, dadas sus características geométricas, pues son altos con torres esbeltas y espesores de muros menores a los del estado de Oaxaca. Además, debido a las limitaciones de espacio de la mesa vibradora, tuvo que ser modificado el prototipo para limitar al mínimo el factor de escala, considerando que esto no afecta su comportamiento para los modos básicos de falla estudiados, los cuales son: la falla de la fachada y sus torres, y la crujía típica de la nave.

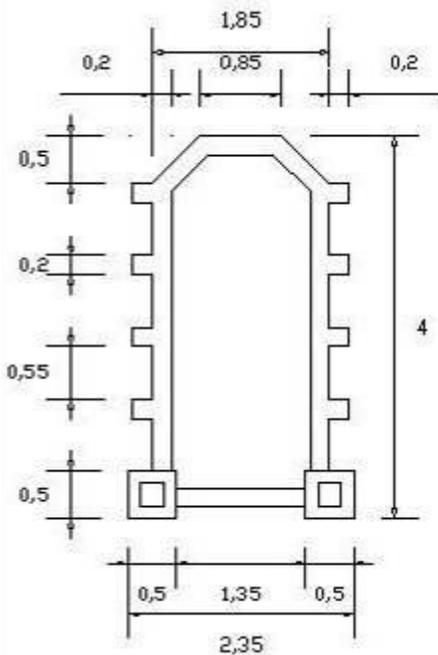
La escala geométrica elegida (FE: factor de escala) fue de 1:8, de esta manera las dimensiones del modelo fueron las siguientes: una longitud de 4.00 [m] por 2.35 [m] de ancho, una altura de bóveda de 2.15 [m] y de las torres de 3.50 [m]; el espesor de la bóveda quedó en 0.10 [m] y el de los muros de 0.20 [m], como lo muestra la Figura 2.1.



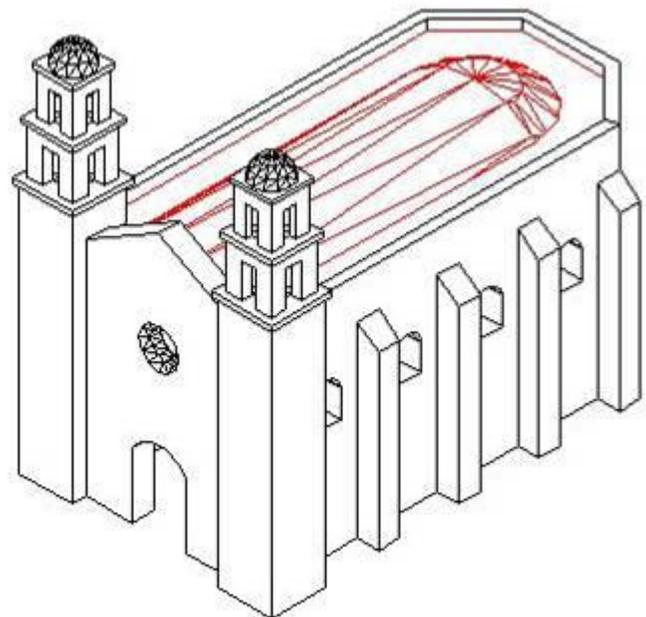
a) Vista longitudinal (Acot. en m)



b) Vista Frontal (Acot. en m)



c) Visita en Planta (Acot. en m)



d) Vista tridimensional

Figura 2.1. Características geométricas del modelo a escala (Chávez y Meli)

Con base en los resultados experimentales de este estudio, se realizó la calibración de un modelo matemático que produjo adecuadamente el comportamiento observado. Teniendo como antecedente estos resultados se pensó en estudiar los efectos que le impondría a un templo histórico, el cambio de la geometría de algunos de sus elementos que son susceptibles a sufrir daños con regularidad.

2.2. Modelos de análisis

Los modelos de análisis fueron tomados partiendo del prototipo del modelo analizado en Chávez, 2011. Los modelos estudiados para este trabajo fueron tres. El primero, denominado MD-01, que es el prototipo original, sin modificaciones, y es el modelo con el cual se compara la respuesta con la obtenida de los modelos modificados. Las propiedades mecánicas de los materiales se incluyen en la Tabla 2.0 y 2.1 (Chávez, 2010).

Tabla 2.0. Propiedades mecánicas de las mamposterías de piedra

Contenido de piedra y mortero	Piedra		Mortero		Mampostería		
	P	f'c	P	f'c	ρ	f'c	E
	Kg/m ³	MPa	Kg/m ³	MPa	Kg/m ³	MPa	MPa
44% mortero; 56% piedra	1900	6.5	1656	0.98	1664	1.3	240
35% mortero; 65% piedra			1598	0.79	1627	1.3	265

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de las mamposterías de ladrillo

Ladrillo		Mortero		Mampostería			
ρ	f'c	ρ	f'c*	ρ	f'c*	E*	Resistencia a Cortante*
Kg/m ³	MPa	Kg/m ³	MPa	Kg/m ³	MPa	MPa	MPa
1612	11.7	1683	0.79	1541	3.9	471	2.8

*Valores obtenidos en especímenes ensayados a la edad de 56 días

Para la creación de los modelos se realizó un mallado por capas de los elementos estructurales del templo en 3D con el programa de diseño Auto-CAD. Posteriormente, estas mallas fueron importadas en el programa ANSYS, donde se finalizó con el proceso y se obtuvieron los modelos presentados a continuación.

2.2.1. Modelo MD-01

El modelo MD-01 mostrado en la Figura 2.2, es el prototipo en escala 1:1, del modelo ensayado en la mesa vibradora. Está formado por 28,625 elementos sólidos. La bóveda y la parte alta de los campanarios se consideraron como elementos de mampostería de ladrillo, el resto del modelo como elementos de mampostería de piedra. A continuación se mencionan las dimensiones de sus elementos más importantes;

Tabla 2.2. Dimensiones de los elementos estructurales del MD-01

Elemento	Altura [m]	Ancho [m]	Largo [m]
Muros	12.4	1.6	21.0
Contrafuertes	12.4	1.6	1.6
Fachada	19.7	1.55	10.8
Bóveda	4.9	0.8	22.4
Campanarios	7.5	Variable	Variable
Cupulín	1.8	3.4	3.4
Torres	18.8	4.0	4.0
Ábside	12.4	14.8	7.0

La configuración en planta sería aproximadamente de 19 x 32 m.

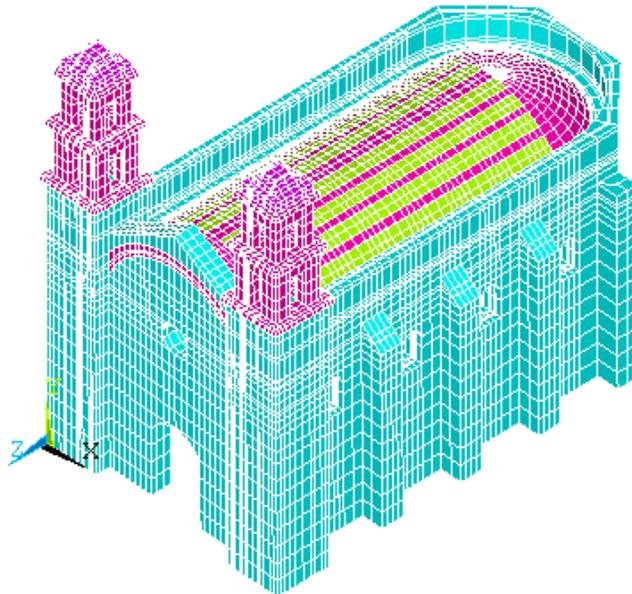


Figura 2.2. Modelo MD-01

2.2.2. Modelo MD-02

El modelo MD-02 es una variante del modelo anterior sólo se modificó la geometría de sus contrafuertes, cambiando de una forma rectangular en toda su altura a una forma trapezoidal como se muestra en la Figura 2.3. El resto de los elementos conservaron las características citadas en la Tabla 2.2.

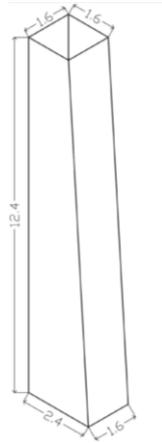


Figura 2.3. Configuración del contrafuerte (Acot. en m)

El MD-02 que se muestra en la Figura 2.4, está formado por 28959 elementos sólidos.

El cambio introducido en la geometría de los contrafuertes fue con el objetivo de incrementar la resistencia del modelo ante el efecto del empuje producido por la bóveda sobre los muros. Se considera que los daños serían menores que en el modelo MD-01.

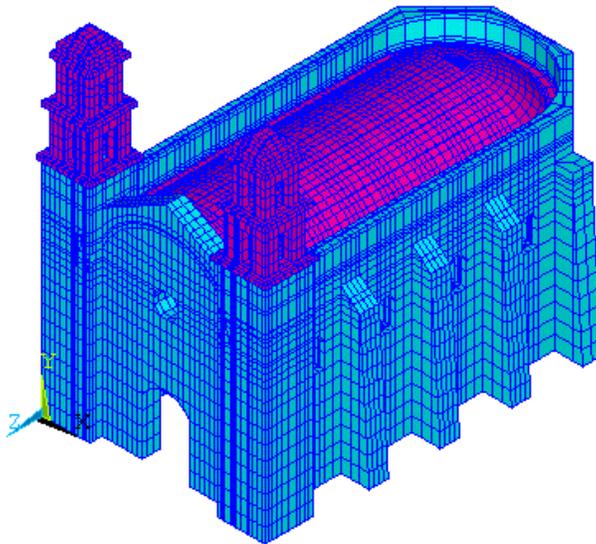


Figura 2.4. Modelo MD-02

2.2.3. Modelo MD-03

El modelo MD-03, también es una variante del MD-01; fue modificado en su altura en todo el perímetro pasando de 12.4 metros a 9.0 metros de la base al arranque de la bóveda, lo que representa un acortamiento en cuanto al original del 27.4%, sin modificar los demás elementos estructurales. Esto con el objetivo de revisar el cambio del comportamiento del modelo al ser de menor altura, pero conservando los mismos espesores de los muros. Los materiales estructurales son los mismos que el MD-01. El modelo numérico está formado por 26703 elementos sólidos prismáticos.

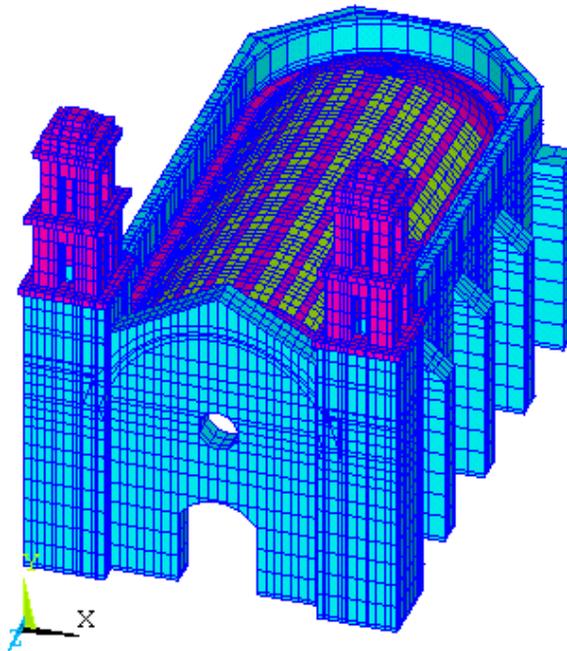


Figura 2.5. Modelo MD-03

2.3. Métodos de análisis

Debido a que en la mampostería histórica el comportamiento es no lineal aún ante bajos niveles de sollicitación, se limita el uso de métodos lineales al estudio general de su comportamiento. Para un mejor entendimiento del comportamiento de este tipo de estructuras resulta más conveniente el uso de métodos de análisis no lineales, que a pesar de ser más complejos y de que requieren una caracterización más amplia de las propiedades de los materiales de construcción, el avance acelerado de la tecnología está permitido desarrollar métodos no lineales para analizar la respuesta detallada de este tipo de estructuras.

La mampostería de bloques (ladrillos, sillares) es un material anisotrópico, esto debido a que las juntas de mortero forman planos de debilidad por su baja capacidad para resistir tensiones. Ahora bien

en el caso de mampostería de conglomerado, donde la piedra está cubierta en todas direcciones por mortero es aceptable considerarla como un material isotrópico, cuyo comportamiento sería similar al de un concreto ciclópeo.

Para poder simular el comportamiento de la mampostería en un intervalo no lineal, se requiere definir el grado de fineza que se desea en los resultados. Con el avance de la tecnología se han llegado a desarrollar herramientas de análisis que ayudan a comprender el comportamiento estructural de las construcciones de mampostería, tales como el método de los elementos finitos, método de elementos discretos, método de los elementos rígidos, etc., que se emplean para solucionar problemas con cualquier tipo de geometría y que abarcan un gran número de disciplinas de la ingeniería.

En la actualidad la técnica de análisis más utilizada es la de los elementos finitos, ya que permite discretizar geometrías complejas y obtener resultados muy detallados para cualquier condición de carga, sin embargo, no dejar de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis del método.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de la estructura en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, de los que se puede conocer la solución. Se plantean las ecuaciones de compatibilidad de esfuerzos y, con ello, se encuentra la solución en términos de esfuerzos de la estructura en cada uno de los nodos.

El modelado numérico del comportamiento no lineal de las estructuras de mampostería con elementos finitos se ha realizado desde los siguientes enfoques.

- Micromodelo; en este enfoque los bloques y las juntas se definen con elementos continuos y en las fronteras entre el mortero y los bloques se utilizan elementos finitos de interfaz, conocidos como discontinuos.
- Micromodelo simplificado; en este casos los bloques se especifican como modelos continuos, mientras que las juntas y la frontera entre el mortero y las unidades sólidas se concentran en elementos de interfaz. La que lo diferencia del Micromodelo es que aquí no se toma la junta como elemento continuo lo que simplifica el problema y la demanda de recursos computacionales.
- Macromodelo; en este tipo de enfoque los bloques, las juntas y las interfaces entre éstas últimas y las unidades sólidas se agrupan como un solo material con propiedades homogeneizadas.

2.4. Acciones sísmicas

El comportamiento de los monumentos históricos ante movimiento sísmicos es uno de los más críticos que pueden afectar su estabilidad. En este trabajo los modelos fueron analizados bajo el efecto de la aplicación de acelerogramas previamente modificados para inducir el mayor daño posible en los modelos.

Los acelerogramas, son diagramas que relacionan la magnitud de las aceleraciones que se van registrando en el suelo durante un sismo.

El sismo que se eligió para las pruebas experimentales fue el registro **Cal** del sismo del 19 de septiembre de 1985 con magnitud de 8.1 (Ms, registrado en Michoacán, en la estación Caleta de Campos, con aceleraciones máximas de 0.12 g ($1.17 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$) en la dirección horizontal y 0.099 g ($0.97 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$) en la dirección vertical, y es el mismo que se tomó como base para analizar los modelos numéricos. Este movimiento fue modificado en su escala de tiempo para que el periodo de los modelos se localizara en la parte ascendente de los respectivos espectros de respuesta de los acelerogramas.

La Figura 2.6 muestra los acelerogramas y los espectros de respuesta respectivos.

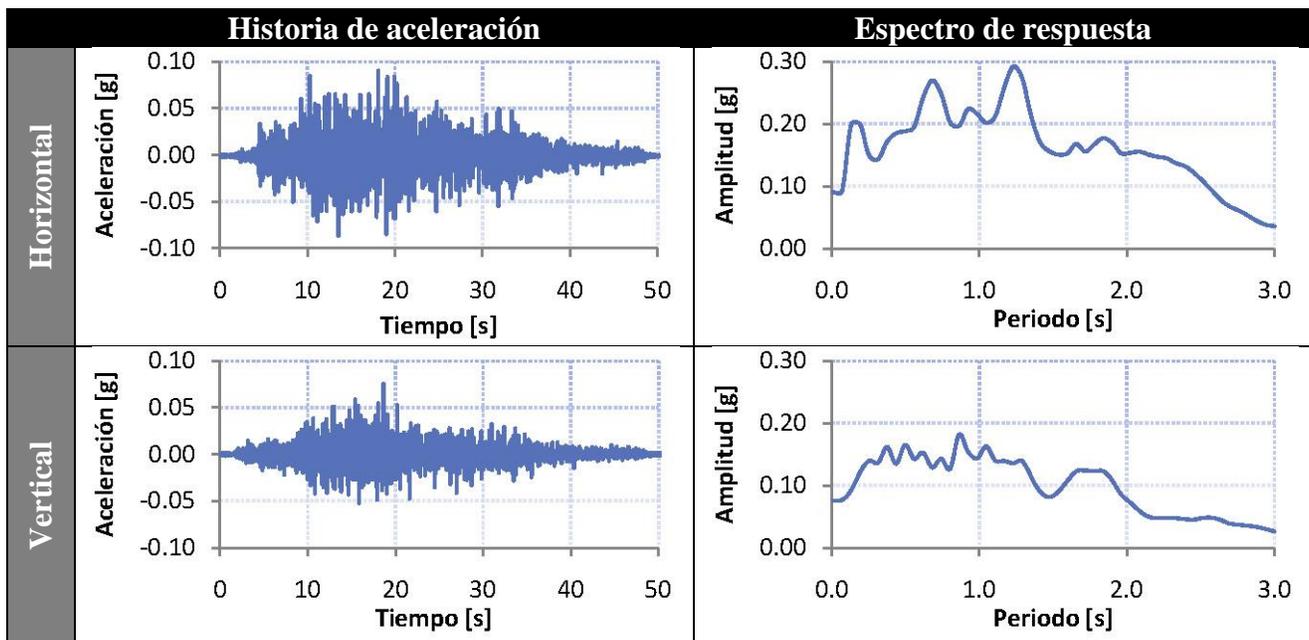


Figura 2.6. Registros del Sismo Cal

2.5. Amortiguamiento de Rayleigh

Para el análisis de una estructura sometida a solicitaciones dinámicas, se requiere definir parámetros cuyo valor sólo puede ser estimado por medio de estudios experimentales. Uno de dichos parámetros es el coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico (ξ), que representa el efecto de los mecanismos de disipación de energía que provocan que el movimiento inducido en la estructura tienda a disminuir con el tiempo.

Debido a que en análisis no lineales las formas modales no pueden ser constantes al estar cambiando la matriz de rigidez, el amortiguamiento no puede ser expresado en términos del porcentaje del amortiguamiento crítico. Por lo tanto es necesario definir la matriz de amortiguamiento.

La manera más sencilla de formular una matriz de amortiguamiento (C) consiste en hacerla proporcional a la matriz de masa (M) y a la de rigidez (K), ya que las formas modales son ortogonales respecto a cada uno de éstos. Esta matriz puede calcularse considerando las constantes de proporcionalidad α y β cuyas unidades son s^{-1} y s , respectivamente. A esto se le conoce como amortiguamiento de Rayleigh.

Para el cálculo de las constantes α y β se utilizaron los valores de frecuencia obtenidos en los análisis modales de los modelos analizados. La Figura 2.7 muestra la gráfica que describe el amortiguamiento de Rayleigh.

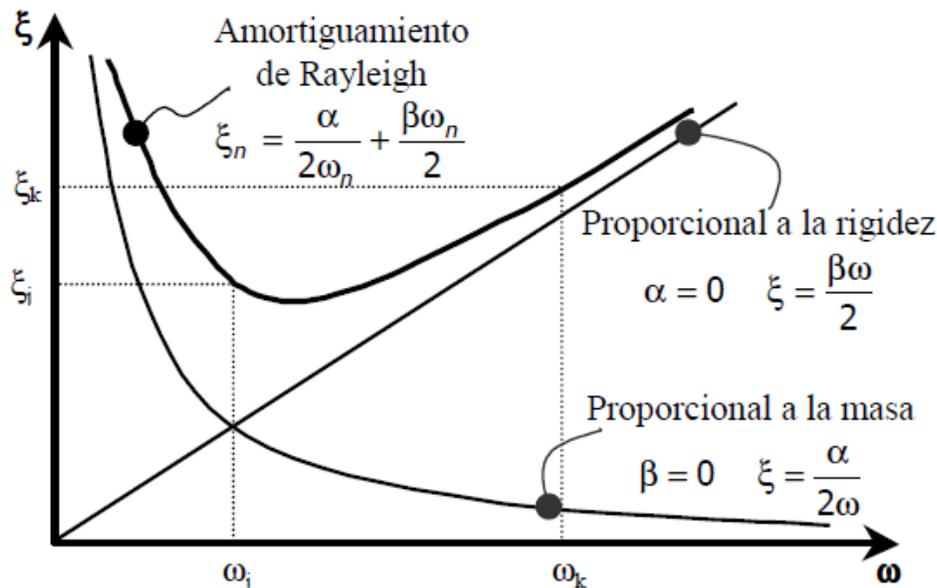


Figura 2.7. Amortiguamiento de Rayleigh

2.6. Simulación numérica

La simulación numérica se realizó con el programa de análisis no lineal avanzado ANSYS MULTIPHYSICS 11.0 que utiliza el método de los elementos finitos.

Las mallas de los modelos fueron creadas con elementos prismáticos de forma regular con 8 nodos y elementos cuña de 6 nodos, con una relación de aspecto no mayor de 20, como se recomienda en el manual del programa. Es importante mencionar que los elementos cuña no son recomendables, sin embargo debido a la gran complejidad del modelo se tuvo que recurrir a su uso.

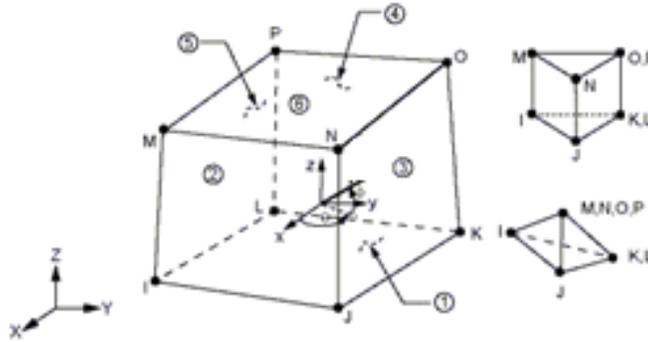


Figura 2.8. Geometría del elemento SOLID65 (ANSYS 11.0)

Para realizar la simulación numérica de los modelos se consideró a la mampostería como un concreto ciclópeo de baja anisotropía, de esta manera, fue posible utilizar el modelo constitutivo del concreto simple, SOLID65 incluido en ANSYS, como se ha estudiado en trabajos previos (Chávez, 2010). Este elemento tiene la capacidad de modelar la falla tanto por agrietamiento como por aplastamiento del material, además del comportamiento plástico.

SOLID65 considera al material como elástico-lineal en su estado no dañado del concreto, para el agrietamiento o el aplastamiento, el matriz esfuerzo-deformación se ajusta al modo de falla.

Para modelar el comportamiento frágil de la mampostería, este elemento requiere que al menos dos parámetros sean definidos y que son:

$f_t \Rightarrow$ Resistencia a tensión uniaxial.

$f_m \Rightarrow$ Resistencia a compresión uniaxial.

Con estas propiedades se puede definir la superficie de la falla.

Dado que lo análisis no lineales requieren de la ejecución de una gran cantidad de operaciones por nodo, es necesario el empleo de un, equipo de cómputo avanzado. Teniendo en consideración esto y que los modelos cuentan con un número elevado de nodos, se recurrió a la ejecución de una subrutina que reduce los tamaños de los archivos de resultados al sólo guardar la información de los nodos de interés. También, sólo para los nodos seleccionados, el programa almacena la historia completa de los desplazamientos y las aceleraciones.

Con ello el manejo de los resultados y los tiempos de ejecución quedan reducidos sustancialmente. Los análisis fueron ejecutados en una estación de trabajo Dell Precision T7400 con las siguientes características: cuenta con un procesador Intel Xeon X5482 a 3.2 GHz. y 4 Gb de RAM, el tiempo empleado en cada análisis fue de aproximadamente 336 horas.