

## **ESTUDIO DE VULNERABILIDAD DE LA CATEDRAL DE LA CIUDAD DE CUENCA**

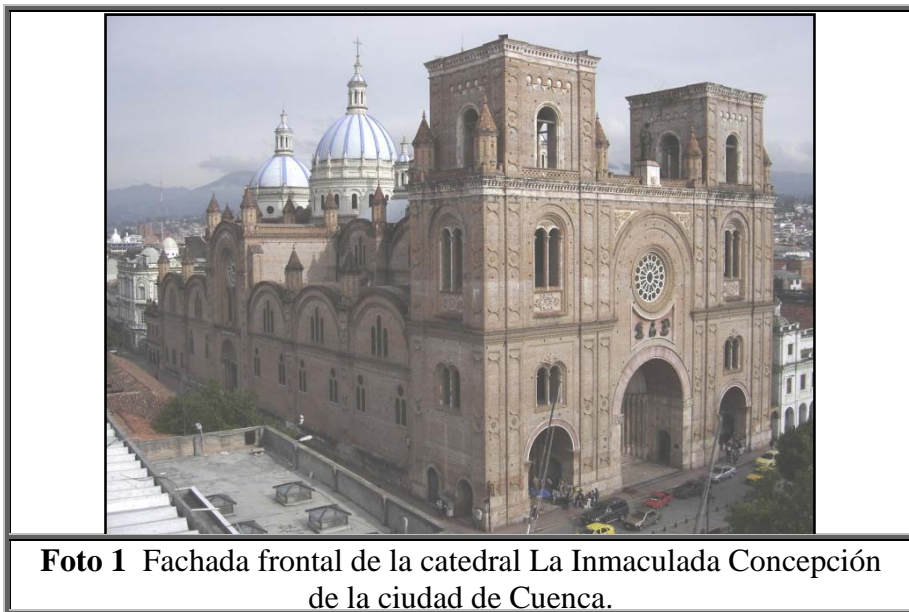
Enrique García A.<sup>1</sup>

1 Profesor Principal de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca

### **Introducción**

La catedral La Inmaculada Concepción de la Ciudad de Cuenca, más conocida como “Catedral Nueva” (ver Foto 1), es considerada la obra arquitectónica más importante de la ciudad, los estudios y planos de la estructura fueron realizados entre 1874 y 1886 por el Hermano Juan Stiehle, religioso Redentorista alemán, por encargo del Obispo Miguel León (Ramirez, 2004). Los criterios estructurales reflejan la experiencia y el conocimiento disponible en dicha época, basados principalmente en procedimientos de prueba y error.

La construcción se inició el 25 de octubre de 1885, concluyendo la estructura en 1954, sin incluir las torres, que de acuerdo al proyecto original debería llegar hasta los 73m medidos a partir del nivel de piso de la iglesia. Entre 1956 y 1967 se concluyen los terminados interiores.



La estructura actualmente tiene las siguientes características geométricas: largo 105.31m, ancho 43.20m, área de emplazamiento 4550m<sup>2</sup>, la altura actual de las torres es de 40.00m y la altura total de la estructura en la cúpula central es de 53,20m.

Desde el punto de vista estructural, se han emitido ciertos criterios que han impedido la terminación de la catedral, sin que se conozca de algún estudio que permita verificar los niveles de tensiones internas bajo los cuales se encuentra sometida la estructura.

Actualmente se cuenta con nuevas herramientas en las cuales se apoya el análisis estructural, como son los nuevos métodos analíticos apoyados en sistemas

computacionales y normas modernas basadas en una amplia experimentación y en el conocimiento de la realidad sísmica de la región. Estas herramientas facilitan el proceso de análisis pero no sustituyen el razonamiento lógico y crítico del problema.

Siendo el Ecuador uno de los países con mayor actividad sísmica en la región, es necesario realizar una evaluación de la vulnerabilidad del sistema estructural de la catedral, analizando su comportamiento bajo cargas gravitacionales y sísmicas.

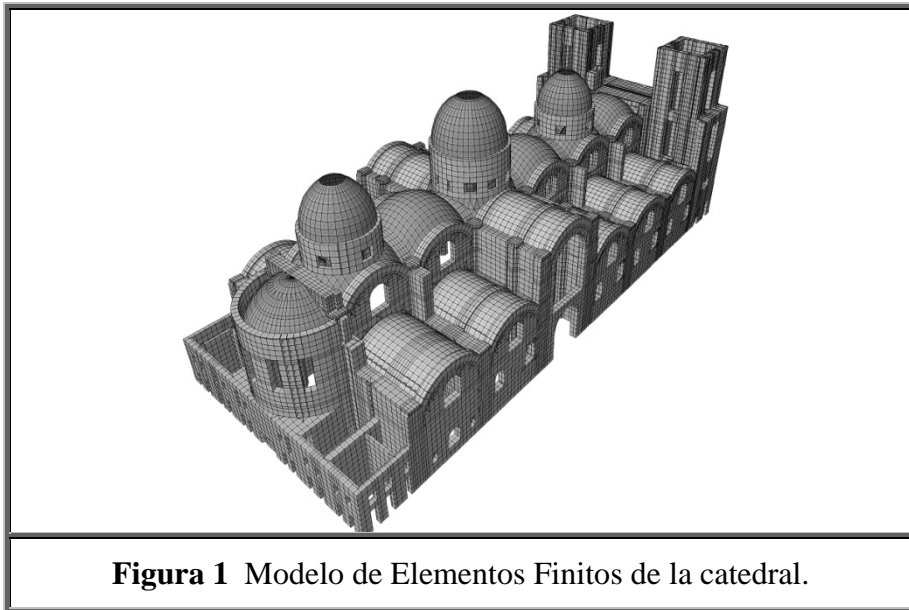
Este análisis consiste en evaluar el comportamiento dinámico de la estructura, estudio que ha sido dividido en tres partes. En la primera, se investigaron y determinaron las características geométricas y mecánicas de la estructura. En la segunda parte se procedió a la discretización del modelo geométrico, generando el modelo matemático en el programa de análisis estructural SAP2000 (Computers and Structures, Inc., 2002), utilizando el Método de los Elementos Finitos. En la tercera parte se realizó el análisis de los resultados obtenidos del modelo matemático.

El presente estudio se lo viene realizando desde el año 2002, tiempo durante el cual han participado 16 estudiantes de la Facultad de Ingeniería, se espera en los próximos estudios determinar los niveles de daño de acuerdo a la intensidad del sismo y la discretización del suelo de cimentación.

### **Objetivos del Estudio.**

Los objetivos principales de este estudio son:

- Estudio del comportamiento estructural ante cargas estáticas y dinámicas.
- Determinación de las secciones críticas, esfuerzos y desplazamientos máximos.
- Determinación del cortante basal y centro de masas.



**Figura 1** Modelo de Elementos Finitos de la catedral.

### **Modelación de la Estructura.**

La discretización de la estructura se la realizó en el programa AUTOCAD (Autodesk, Inc., 2003), dividiendo el modelo en elementos triangulares y rectangulares de diversas dimensiones, de acuerdo a la geometría del elemento discretizado, sin embargo, con el fin de obtener la mejor aproximación de los resultados, no se permitieron elementos cuya longitud sea mayor a 1 m. El modelamiento se realizó en el programa SAP2000, en base al modelo discretizado. De esta manera, para la generación de las torres, pórticos transversales, pórticos longitudinales, sección posterior y bóvedas, se proyectaron los elementos discretizados a elementos tipo SOLID de seis u ocho nodos. Para la generación de las cúpulas se proyectaron los elementos discretizados a elementos tipo SHELL de tres o cuatro nodos. El modelo matemático consta de 115504 nodos, 2026 elementos tipo SHELL y 83090 elementos tipo SOLID, es decir, 85116 elementos en total (Ver Figura 1). Lo que significó resolver aproximadamente un sistema de 310000 ecuaciones simultáneas. Un modelo similar se ha desarrollado para la catedral de la ciudad de México utilizando 9000 elementos finitos y 30000 ecuaciones simultáneas (Meli R., 2001), lo cual muestra lo complejo del modelo utilizado para la catedral de la ciudad de Cuenca.

### **Características Mecánicas del Modelo.**

La estructura de la Catedral está constituida en su totalidad, en mampostería de ladrillo unida con mortero de cal, su cimentación está formada por grandes bloques de mármol y piedra. Considerando que el suelo es Tipo 2 de acuerdo a la clasificación dada por el Código Ecuatoriano de la Construcción 2001, el modelo no considera la interacción dinámica Suelo – Estructura, el mismo que para fines de investigación se lo incluirá en futuros proyectos. El modelo considera la mampostería de ladrillo como un material isotrópico con las siguientes características: densidad de  $1650 \text{ kg/m}^3$ , masa por unidad de volumen de  $168.2 \text{ kg}\cdot\text{seg}^2/\text{m}^4$ , módulo de elasticidad de  $3.2 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$  y módulo de Poisson de 0.15.

En base a dos muestras de ladrillo se obtuvo el valor de  $f'_{cb}$  (resistencia a compresión del ladrillo) referencial de  $110 \text{ kg/cm}^2$ , de acuerdo a varias investigaciones (León et al, 2003), la resistencia a la compresión  $f'_{cb}$  del ladrillo está en el rango de 50 a  $200 \text{ kg/cm}^2$ .

De acuerdo a Paulay y Priestley (León et al, 2003) el valor de cortante inicial de la mampostería es de  $3.3 \text{ kg/cm}^2$ , debiendo añadirse la resistencia debida a la fricción originada por el esfuerzo normal con el objeto de obtener una aproximación más real de la resistencia a cortante final.

Para determinar la resistencia a tracción de la mampostería se adoptó la expresión de Sinha (León et al, 2003) obteniendo un valor máximo de  $2.1 \text{ kg/cm}^2$ .

### **Análisis Estructural.**

Para estudiar el comportamiento estructural de la catedral, se consideraron las hipótesis de carga usuales en el diseño de edificaciones:

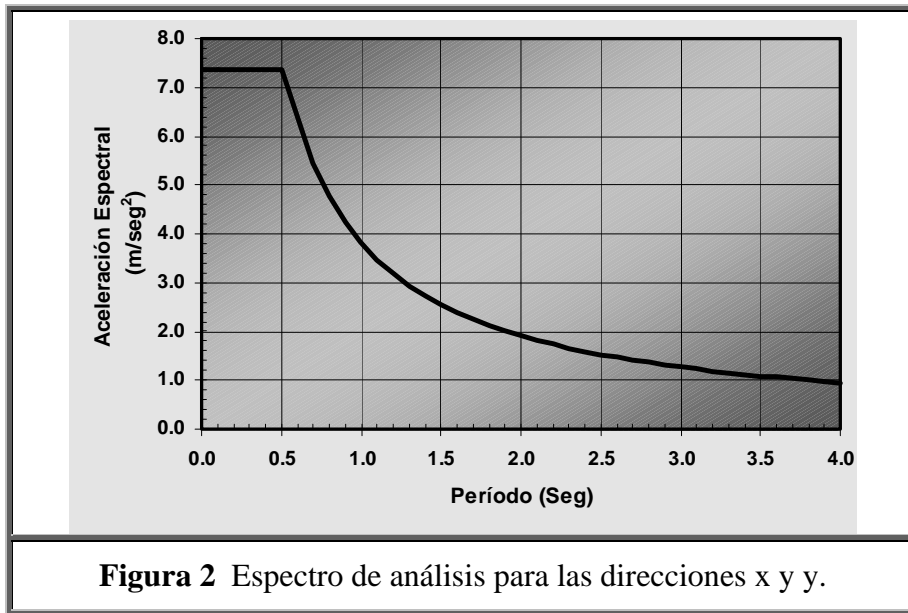
- Carga muerta (CM), calculada de acuerdo al peso específico de la mampostería de ladrillo.

- Carga viva (CV), se tomo un valor de 200 kg/m<sup>2</sup>, producido por la acción de lluvia y la posible acumulación de granizo en la cubierta de la estructura.
- Carga sísmica (CS), calculada de acuerdo a las condiciones y recomendaciones para diseño sísmico del Código Ecuatoriano de la Construcción 2001, definiéndose la aceleración espectral mediante la siguiente ecuación (Ver Figura 2):

$$a = \frac{Z \cdot I \cdot C \cdot g}{R}$$

en donde:

Z = Factor de zona sísmica .....	0.25
I = Factor de importancia de uso de la estructura .....	1
R = Factor de reducción de resistencia sísmica .....	1
g = Aceleración de la gravedad .....	9.81 m/seg <sup>2</sup>
C = Coeficiente dado por $C = \frac{1.25 \cdot S^S}{T}$ , que no debe exceder de C <sub>m</sub> .	
C <sub>m</sub> = .....	3
S = Coeficiente de suelo .....	1.2
T = Periodo	



Se consideraron las siguientes combinaciones de carga:

1. Carga Muerta
2. Carga Muerta + Carga Viva
3. Carga Muerta + Carga Sísmica en la dirección X, y,
4. Carga Muerta + Carga Sísmica en la dirección Y

Los nudos de la base del modelo se consideraron simplemente apoyados, restringiendo los movimientos de la estructura en las direcciones X, Y y Z, y permitiendo los giros.

Para el análisis se empleó el Método de los Elementos Finitos, disponible en el programa SAP 2000.

### **Resultados Obtenidos.**

**Reacciones en la Base:** De la hipótesis de carga muerta (CM) se ha determinado que el peso total de la estructura es de 37517 Tn. El cortante basal para el sismo en la dirección longitudinal es 12531 Tn y de 15177 Tn en la dirección transversal, lo que significa el 33% y el 40% respectivamente, con relación a la carga muerta, esto se debe a que la estructura no admite un comportamiento inelástico.

**Desplazamientos Máximos:** Para la hipótesis de carga debido al sismo longitudinal (dirección X), los máximos desplazamientos se producen en la torre sur con un valor de 8.4 cm. Bajo esta misma hipótesis, la cúpula central tendría un desplazamiento del orden de 3.1 cm.

Para la hipótesis de carga debido al sismo transversal (dirección Y), los máximos desplazamientos se producen en la torre sur con un valor de 3.3 cm. En el caso de la cúpula central tendría un desplazamiento del orden de 1.6 cm.

**Períodos de Vibración:** Los períodos predominantes obtenidos en la dirección X es de 0.400 seg y 0.274 seg, en la dirección Y es de 0.310 seg, en el modo rotacional alrededor del eje vertical (Z) el período predominante es 0.293 seg.

Se realizaron pruebas de vibración ambiental, registrándose la respuesta de la estructura en un acelerógrafo tipo ETNA perteneciente a la Red Sísmica del Austro de la Facultad de Ingeniería. Este instrumento permitió comprobar que los parámetros tomados para desarrollar el modelo matemático son los mas adecuados. Los períodos de vibración obtenidos son los siguientes: en la dirección X se registro un período predominante de 0.370 seg y en la dirección Y 0.313 seg

**Esfuerzos Máximos:** Para el estado de carga muerta los máximos esfuerzos de compresión se presentan en la base de la estructura, llegando a valores de 15 kg/cm<sup>2</sup>. Los máximos esfuerzos de tracción se presentan en el centro inferior de los arcos y llega a 4 kg/cm<sup>2</sup>. Esto es corroborado por la presencia de grietas en el modelo real.

Para la hipótesis de carga debido al sismo se observan esfuerzos de compresión bastante altos, llegando a valores de 60 kg/cm<sup>2</sup> en la base de la estructura. Los esfuerzos máximos de tracción se producen en la clave del arco central interior, donde las tracciones alcanzan los 50 kg/cm<sup>2</sup>.

### **Conclusiones.**

Los parámetros considerados para el desarrollo del modelo matemático son los más adecuados ya que han sido contrastados con los resultados obtenidos a través de la técnica de vibración ambiental.

Los esfuerzos obtenidos para la hipótesis de carga muerta, se encuentran dentro de los límites admisibles para este tipo de materiales, concordando las grietas existentes dentro de la catedral con las zonas de tracción que superan dichos límites.

Para las condiciones de carga sísmica especificadas por el Código Ecuatoriano de la Construcción, la estructura de la catedral nueva, no presenta un comportamiento adecuado, es decir, es susceptible de daño en varios de sus elementos estructurales.

### **Recomendaciones**

Se sugiere el estudio de la interacción suelo – estructura, para estudiar el efecto del suelo en la respuesta de la estructura y determinar los niveles de tensiones que se pueden generar a nivel de fundación.

Con el objeto de determinar la vulnerabilidad sísmica de la estructura es conveniente estudiar el desempeño esperado de la edificación ante movimientos sísmicos de diferentes intensidades (ATC-40,1996), se deberá definir los niveles de desempeño basados en la importancia dentro del ámbito histórico y cultural de la edificación (SEAOC, 1995).

### **Bibliografía**

1. ATC-40 (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete building. Volume 1 and 2 (appendices). Report No. SSC 96-01. Applied Technology Council, Redwood City, California.
2. Computers and Structures, Inc. (2002), SAP2000, Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures, Berkeley, California, USA.
3. León Ricardo, Díaz Bonett (2003), Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada Barcelona, Tesis Doctoral.
4. Meli Roberto, 2001, Diseño Estructural, Editorial Limusa, México
5. Ramírez Gastón (2004), La Catedral de la Inmaculada, Editorial EDYCA, Cuenca.
6. SEAOC (1995). Performance based seismic engineering of building. VISION 2000 Committee. Structural Engineering Association of California. Sacramento, CA.
7. Autodesk, Inc. (2003), AutoCAD2004.