

Evaluación y rehabilitación sismorresistente de monumentos históricos

*Evaluation and seismo-resistant rehabilitation
of historical monuments*

William Lobo Quintero*

Recibido: diciembre, 2000 / Aceptado: julio, 2001

Resumen

En este trabajo se define al monumento, no sólo como la edificación histórica a preservar, sino como las construcciones y valores culturales ubicados en áreas históricas, incluidas las estatuas o monumentos considerados como tales. En consecuencia, se aspira a mantener en el tiempo, aquellas herencias culturales dejadas por los antepasados, conservarlas y restaurarlas cuando estén en estado de degeneración, sin distorsionar la construcción original, ni imponer normas formales de diseño y construcción actualizadas.

Para este fin, la ingeniería sismorresistente se adapta, considerando algunos niveles de detalle, a la necesidad de un banco de datos sobre edificaciones históricas y el conocimiento de los materiales y de las técnicas antiguas de construcción y rehabilitación, aceptando los postulados de la Carta de Venecia firmada en 1984. Se asume la experiencia sísmica de las edificaciones históricas construidas como símbolos generacionales y se promueve la necesidad de una cultura de conservación, para salvaguardar a los monumentos como "reliquias arqueológicas". Se muestran algunas construcciones históricas que han experimentado daños durante sismos ocurridos, las metodologías de evaluación y rehabilitación estructural y los aspectos críticos dentro de un análisis correlativo entre las experiencias sísmicas, la historia del conocimiento, la enseñanza profesional y la aplicación práctica de la ingeniería. Además, se muestran algunas metodologías modernas de análisis y diseño aplicables a la evaluación, conservación y rehabilitación sismorresistente de monumentos históricos.

Palabras clave: evaluación; rehabilitación; monumentos históricos; conservación; mejoramiento.

Abstract

In this paper a monument is defined not only as a historical building which must be preserved, but also as all constructions and cultural values situated in historical areas, including statues or monuments which are considered as such. As a consequence, it is sought to maintain in time, the cultural heritage left by our ancestors, conserve them and restore when they begin to degenerate, without distorting the original construction, and without imposing formal updated design and construction codes.

* Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida-Venezuela

For this purpose, the seismic engineering is adapted, considering some levels of detail, the need for a database of historical constructions and the knowledge of the materials and ancient construction and rehabilitation techniques, accepting the postulates of the Venice Chart signed in 1984. The seismic experience of historical edifications is assumed as generational symbols and the need for a culture of conservation is promoted, to preserve the monuments as “archeological relics”. Some historical constructions are shown which have experimented damages during earthquakes, the evaluation of methodologies and structural rehabilitation and the critical aspects within a correlative analysis of seismic experiences, the history of knowledge, professional education and the practical application of engineering. Also, some modern methodologies of analysis and design are shown which are applicable to the seismic evaluation, conservation and rehabilitation of historical monuments.

Key words: evaluation, rehabilitation, historical monuments, conservation, improvement.

Introducción

Los sismos como eventos naturales que azotan la humanidad, causan la pérdida de vidas y la destrucción de las obras ejecutadas por el hombre a lo largo de la historia. Por otra parte, muchas construcciones se han proyectado en el tiempo, como herencias ancestrales que muestran el arte y la cultura de los pueblos de generación en generación. Muchas de ellas han sobrevivido a terremotos y guerras gracias a su grado de dureza, a su conformación y resistencia intrínseca, al mantenimiento y conservación experimentado y a la disposición de algunos pueblos por preservar estas herencias culturales. Sólo para citar algunos ejemplos, en la figura 1, se muestra el Coliseo romano, uno de los prodigios de la civilización universal y símbolo de Roma, anfiteatro construido por Vespasiano en la década de los 70 después de Cristo. Un religioso de nombre Veda ha dicho que mientras exista el Coliseo existirá Roma, y cuando

caiga el Coliseo caerá también Roma; y cuando caiga Roma caerá el mundo. Esta estructura de cuatro pisos, de forma elíptica, con muros vaciados de mampostería de piedra de 50 metros de altura, antes murallas inmovibles y hoy conserva algunos pórticos y bloques cuarteados por cicatrices que revelan el paso del tiempo.

El Coliseo apoyado sobre suelos aluvionales blandos, aplicó los conceptos de compensación en una fundación anular flotante, con excavaciones de 12 metros y ha soportado como una sola unidad sismos muy fuertes. Su confor-



Figura 1. Coliseo romano, 70 D.C.

mación estructural revela una condición sismorresistente. Hay que tomar en cuenta que los romanos no fundaban directamente sobre roca, sino que aplicaban una capa de arena y arcilla, para producir el efecto de un sistema de aislamiento sísmico (Kirikov, 1992).

Otro monumento histórico singular es la Torre de Pisa, mostrada en la figura 2, que comenzó su construcción en 1173 y terminó en 1360, después de dos largos períodos de interrupción. La Torre que fue diseñada para la verticalidad, se inclinó durante la construcción, debido a asentamientos desiguales de estratos arcillosos saturados. La estructura tiene 55 metros libres de altura por 19.6 metros de diámetro con un peso calculado de 14.5

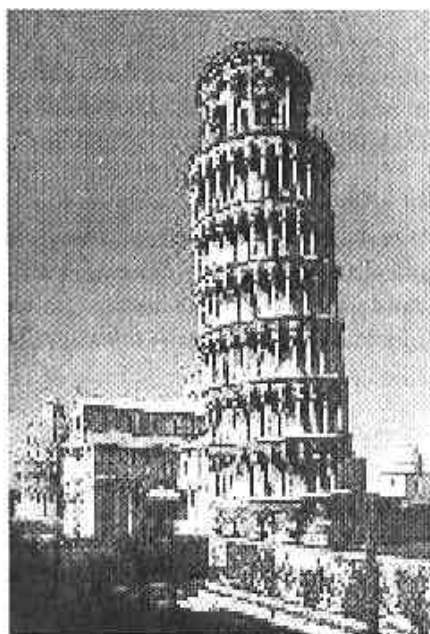


Figura 2. Torre de Pisa

toneladas y una excentricidad en la base de 2.3 metros sobre un área de fundación de 285 m². Las fachadas constituyen un cuerpo cilíndrico de mampostería con arcadas y una escalera central en espiral. El valor histórico lo ha determinado la supervivencia en condición inclinada, y las intervenciones sucesivas para buscar su corrección. Desde el siglo pasado se han hecho múltiples estudios e investigaciones que la mantienen cerrada a partir de 1988, pero que la convierten en el monumento histórico más famoso del mundo; Pisa está ubicada en una zona de ligera sismicidad.

Estos dos ejemplos de construcciones ejecutadas en épocas distintas, son una muestra de los múltiples monumentos y obras de arte que son testigos de la historia de Europa y los fundamentos de su cultura secular. Quedan regados por el mundo otros antiguos monumentos griegos, egipcios, indios, caucásicos, persas, tibetanos, chinos o japoneses, muestras de la cultura universal, que si se analizan a profundidad, para su supervivencia se han aplicado principios de construcción sismorresistente. En México, Guatemala, Perú o Ecuador quedan rasgos de la cultura autóctona, y es a partir del siglo XVI que se adelantaron obras con arquitectura, estilos, materiales y formas europeas, que para contrarrestar la alta sismicidad, se adaptaron incorporando contrafuertes externos, muros transversales cercanos, mayor dimensión de pilares y muros, y reducciones de altura y esbeltez en las torres (Meli y Sánchez, 1996).

Realmente, la ingeniería evolucionó sobre bases prácticas con construcciones puestas en un laboratorio real que se ha mantenido a través de los siglos. El avance de los conocimientos teóricos van desde la palanca de Arquímedes 250 años a.c., el principio de la catenaria en 1675, la ley de Hooke en 1678, el análisis de arcos en 1697, las fórmulas de Euler en 1759, los arcos articulados de Coulomb en 1773, el módulo de Young en 1807, el pandeo en 1824, la ley de Navier en 1826, resolución de armaduras por juntas en 1847, de armaduras por secciones en 1862, el método de Cremona en armaduras en 1864, el teorema de Maxwell-Mohr en 1875 y el análisis de pórticos de Hardy Cross en 1930, conocimientos acumulados no ligados con los efectos sísmicos. Pero, la experiencia sísmica práctica de los Estados Unidos se considera desde el sismo de Naples en 1783 hasta el de San Fernando en 1971, con fuerte crecimiento a partir de 1900 (Reitherman, 1984).

La investigación hecha con excavaciones en el área de Troya ha demostrado que al menos existieron nueve ciudades consecutivas, algunas de ellas destruidas por terremotos y que fue la Troya VII, la invadida por los griegos escondidos dentro de un caballo de madera llamado el caballo de Troya, asumido como un gran regalo ofrecido a la diosa Athena. El análisis del caballo, lo califica como una estructura sismorresistente ideal, con dimensiones moderadas, de dos a tres pisos, simétrica, elástica, liviana y con aislamiento sísmico debido a las ruedas.

En esta época, las construcciones y muros de ciudadelas se hicieron de piedra cortada en formas regulares adheridas por gravedad y atribuidas a míticos cíclopes o personajes de un solo ojo, llamada así mampostería ciclópea (Kirikov, 1992).

En términos generales, las construcciones antiguas han seguido criterios globales, racionales, creativos e intuitivos fundamentados en las experiencias y en la práctica, llegando a obtener excelentes diseños sismorresistentes, lo cual permite plantear los siguientes conceptos:

1. El buen juicio, el análisis, la experiencia y la observación son las bases del mejor ejercicio de la ingeniería.
2. Hay una gran brecha entre el nivel del conocimiento y su grado de aplicación.
3. La investigación no es la única forma de adquirir conocimientos.
4. Hay problemas que se resuelven más con la práctica que con teorías y métodos.

El prof. Vitelmo Bertero, experto en la Ingeniería Sismorresistente, considera que los investigadores continúan publicando extensos documentos que los constructores no tienen tiempo para leer.

Criterios y definiciones

En 1932 publicó John Freeman un libro monumental, donde constan criterios de diseño sismorresistente que mantienen su validez dentro de las medidas aplicables en la construcción moderna,

después de la profusa investigación de los últimos treinta años. Se destacan la contribución de la tabiquería, la pseudo resonancia en estructuras rígidas sobre suelo firme y flexibles en suelo blando, la redundancia, la torsión sísmica y los efectos de piso blando, el necesario arriostramiento de las bases, el análisis de los riesgos sísmicos, la predicción basada en la microsísmica, los esquemas de aislamiento sísmico, el análisis de pórticos rígidos, la relación entre aceleraciones verticales y horizontales, el significado de los diafragmas rígidos, el confinamiento de columnas con espirales y la necesidad de usar mesas vibrantes (Freeman, 1932).

Para comprender la filosofía de protección de la construcción histórica valen las siguientes definiciones (Gavarini, 1994):

1. *Monumento*: Edificación con importante valor cultural a preservar su carácter arquitectónico, tipológico y material.
2. *Edificación Histórica*: Ubicada en un área urbana que tiene valor histórico y cuya preservación puede dar una información significativa.
3. *Reparación*: Intervención típica para obtener seguridad estructural sin tomar en cuenta normas o requisitos de preservación.
4. *Restauración*: Intervención en monumentos históricos no necesariamente de reforzamiento.
5. *Rehabilitación*: Intervención hecha para la recuperación estructural y/o eliminar defectos estructurales.

6. *Mejoramiento*: Intervención de reforzamiento estructural diseñada sin verificación formal de la seguridad sísmica. Este concepto se amplía hacia una adecuada seguridad con mantenimiento y conservación programados, sin hacer modificaciones substanciales.

7. *Ocupación*: Esta puede ser normal para salvaguardar vidas sin colapso o estratégica para mantener su eficiencia post-sísmica sin ningún daño.

Una filosofía de mejoramiento en rehabilitación

Si se entiende la vulnerabilidad como el grado de deterioro en el tiempo de la calidad de la construcción, como resultado de fenómenos naturales o humanos, ésta puede tomarse de dos formas: la *intrínseca* conectada a las modificaciones de la edificación dependiente del tipo, tamaño, materiales y técnicas aplicadas; y la *inducida* como consecuencia del estado de degeneración, que considera la edad, el ambiente y el uso del hombre, como peligroso y hostil (D'Agostino y Bellomo, 2000). La vulnerabilidad intrínseca expresa la filosofía de la seguridad estructural, que determina por una parte los remedios de la restauración para eliminar a la inducida y por otra el uso de esquemas de ingeniería estructural, buscando "reforzar", rompiendo el concepto intrínseco. Se rechaza el uso de teorías y modelos concebidos para estructuras modernas, para rehabilitar monumentos históricos. La última legislación *anti-*

sísmica italiana sobre monumentos históricos, se basa en la promoción de la conservación cultural: Reducir la vulnerabilidad sin distorsionar el concepto original, aplicando materiales y técnicas tradicionales; evitar la imposición de códigos de seguridad formal; y cuando existan situaciones de conflicto entre la herencia cultural y la pérdida de vidas, reducir los riesgos asegurando un uso apropiado del monumento.

Para lograr una reconciliación entre la preservación arquitectónica y la seguridad estructural, se requiere un enfoque sistémico que permita la interacción de múltiples factores, reconociendo que los sistemas complejos requieren integrar conocimientos teóricos con experiencias prácticas. Sobre un marco conceptual, se trata de crear un sistema de información o banco que incorpore datos sobre aspectos urbanos, geosísmicos, climáticos, administrativos, funcionales, tipológicos, constructivos, instrumentales, artísticos, de mantenimiento y conservación. Si se aplican niveles de detalle, se debe tener un registro para identificar objetos; el catálogo para guardar información artística e histórica, de mantenimiento, de vulnerabilidad sísmica y de prioridad de intervención; la estructura por elementos, los materiales y la tipología constructiva; el meta-diseño para estudiar la factibilidad de diferentes intervenciones; y la intervención propiamente dicha. Debe buscarse un debate multidisciplinario que considere la

amenaza sísmica, la protección de vidas, el valor cultural y de conservación, buscando obviar la influencia de los códigos formales de diseño y construcción (Gavarini y Bruno, 1996).

Aceptando los criterios de mejoramiento y conservación, los monumentos históricos deben considerarse como materia *arqueológica* para mantener intacta su identidad material y estructural; aplicar cuidadosamente en la restauración las innovaciones y técnicas actuales, porque han demostrado serios errores; tener presente que los edificios antiguos que han soportado sismos, guerras y otras catástrofes han demostrado seguridad mayor que la normal; y es necesario promover una *cultura de conservación* para salvaguardar como reliquias las herencias del pasado (D'Agostino y Bellomo, 2000).

La Carta de Venecia

Para reconocer que 'las obras monumentales de los pueblos continúan siendo en la vida presente el testimonio vivo de sus tradiciones seculares', los participantes del II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos en Monumentos Históricos, reunidos en Venecia entre el 25 y el 31 de mayo de 1964, firmaron *la Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y de Conjuntos Histórico-Artísticos*, que en apretada síntesis recoge las siguientes medidas (ICOMOS, 1964):

1. Salvaguardar tanto la obra de arte como el testimonio histórico.
2. Rechazar toda construcción nueva, destrucción o arreglo que altere volúmenes y colores.
3. Respetar las aportaciones constructivas de todas las épocas.
4. Aceptar reemplazos armónicos de partes distinguibles del original.
5. No aceptar adiciones a menos que se respete el trazado, el equilibrio volumétrico y la relación ambiental.
6. Respetar materiales y técnicas tradicionales.
7. Aceptar técnicas modernas sólo si las tradicionales fueran inadecuadas.
8. Adoptar medidas para salvar elementos, esculturas, pinturas o decoraciones.

El punto 7º, corresponde al Art. 10º de la Carta, cuya redacción textual dice: *“Cuando las técnicas tradicionales se muestran inadecuadas, la consolidación de un monumento puede ser asegurada valiéndose de todas las técnicas modernas de conservación y de construcción cuya eficacia haya sido demostrada con bases científicas y garantizada por la experiencia”*. Rumania ha podido recuperar sus monumentos históricos destruidos por los terremotos de 1977 y 1986, gracias a la interpretación adecuada de este artículo, que incluyó el estudio de la morfología estructural de los monumentos religiosos, la sismicidad de las zonas ricas en monumentos, la restauración de la continuidad de estructuras dañadas, el mejoramiento de

los materiales existentes compatibles con los nuevos y la selección de esqueletos estructurales embebidos, sin cambios de tamaño, forma, proporciones o estilos arquitectónicos (Cismigiu A. y Cismigiu M., 1996).

Lecciones de terremotos anteriores

Los sismos moderados ocurridos entre el 13 de septiembre y el 9 de octubre de 1997 que asolaron la región italiana de Umbria-Marche, son un buen ejemplo de los daños ocurridos a monumentos históricos, incluida la Basílica de San Francisco de Assis, uno de los más importantes monumentos artísticos y religiosos del mundo, donde cientos de palacios, torres, iglesias, conventos, monasterios y construcciones medievales fueron severamente dañadas. Assis es famosa por las bellas decoraciones de hierro ancladas en la fachada de la mayoría de las construcciones de mampostería, con tirantes o cadenas colocados en la edad media para asegurar su estabilidad estructural (EERI, 1997).

Se dañaron 1815 iglesias y aunque los colapsos completos no son numerosos, fueron considerables los agrietamientos y la pérdida de artefactos valiosos. De una muestra de 360 iglesias de una sola nave, se estudió su vulnerabilidad, tomando cuatro niveles de daños, para cinco mecanismos de falla en fachadas (Figura 3): volcamiento global, volcamiento de la parte superior, falla en el

plano por efecto de arco, flexión lateral y agrietamiento por corte diagonal. Los resultados estadísticos se muestran gráficamente en la figura 4 y tienen un buen mecanismo de interpretación en el cuadro 1, sobre distribuciones acumulativas, relaciones medias de daños bajo intensidades de Mercalli VI, VII y VIII. La proporción de daños ligeros (D0 y D1) toma entre 40% y 60% de la muestra, y no hay preferencia por ningún mecanismo; cuando la intensidad aumenta, la falla por corte tiene mayor nivel de daños, mientras que la falla por flexión tiende a reducir (D'Ayala, 2000).

Se observa que el techo de concreto acoplado con vigas de corona, parece ser la opción más efectiva para prevenir daños serios, aunque no evitan el colapso. Estas soluciones que representan una condición estable de daños, de todas

maneras, amenazan murales u otros elementos sustentados. La correlación obtenida entre los valores calculados y los observados, justifica esta metodología de análisis, y revela la necesidad de mayores estudios sobre evaluación de daños. En Umbria-Marche, las intervenciones directas de la ingeniería estructural no son aceptadas, aunque los monumentos históricos deben ser protegidos con soluciones adecuadas.

Un informe de evaluación de campo realizado después del sismo de Pereira de 1995, sobre los daños observados en iglesias, de tres y dos naves, reveló las siguientes causas: pobre configuración estructural, interacción de áreas rígidas y áreas flexibles, plantas irregulares, grandes aberturas en los muros laterales creando zonas de debilidad, fuertes cambios de rigidez, elementos frágiles y

Cuadro 1. Distribución de daños por mecanismo y nivel (D'Ayala, 2000)

MECANISMOS	VOLCAMIENTO GLOBAL			VOLCAMIENTO SUPERIOR			EFECTO DE ARCO			FALLA POR FLEXION			FALLA POR CORTE		
INT./NIVEL	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII	VI	VII	VIII
D0-D1	0.56	0.35	0.31	0.65	0.37	0.31	0.52	0.48	0.34	0.60	0.58	0.63	0.57	0.30	0.07
D2	0.21	0.22	0.12	0.16	0.24	0.15	0.24	0.18	0.15	0.22	0.15	0.15	0.24	0.26	0.15
D3	0.18	0.28	0.24	0.16	0.26	0.22	0.19	0.18	0.24	0.16	0.18	0.12	0.17	0.24	0.46
D4-D5	0.05	0.14	0.27	0.02	0.13	0.31	0.05	0.16	0.27	0.01	0.08	0.10	0.10	0.19	0.31

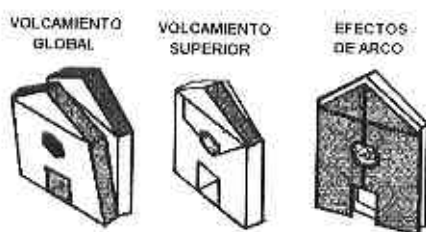


Figura 3. Mecanismos de falla en fachada



Figura 4. Distribución acumulativa de daños

de baja resistencia, efecto lateral de arcos, pérdida de resistencia y poco mantenimiento, y muy poco soporte de elementos no-estructurales muy pesados; se agrega la inexistencia de provisiones (Montilla *et al.*, 1996).

Entre los problemas más relevantes de las construcciones históricas está el volcamiento de muros de fachada por efectos fuera del plano, causados por empujes de techos o bóvedas (Figura 5); los agrietamientos por diferencias de rigidez en la interfase de torres y naves; la fallas por corte diagonal en torres esbeltas de campanarios con grandes aberturas (Figura 6); el agrietamiento longitudinal de contrafuertes por vibración transversal de bóvedas grandes, cuando estos contrafuertes no contribuyen a la capacidad a tracción (Figura 7) (Meli y Sánchez, 1996). Estos contrafuertes (Figura 8), surgieron en la búsqueda de aligerar los muros transversales, aumentando su ancho efectivo para evitar el volcamiento pero facilitando más altura, principalmente en las

catedrales góticas (Arnold y Reitherman, 1982).

Evaluación y rehabilitación

Se ha dicho que no hay mejor índice de la eficiencia estructural de un monumento, que su supervivencia durante siglos, sin defectos estructurales. Para su evaluación valen las siguientes sugerencias: a) cuando se tiene un mapa de grietas y se conocen las deformaciones de la estructura, se pueden aplicar modelos inelásticos y obtener curvas de capacidad; b) conocer la carga de colapso y su relación con la de servicio, determina un *índice de seguridad* confiable; c) un análisis elástico o inelástico para cargas de servicio determina un estado de esfuerzos probable del monumento, útil para la verificación del mismo; d) la

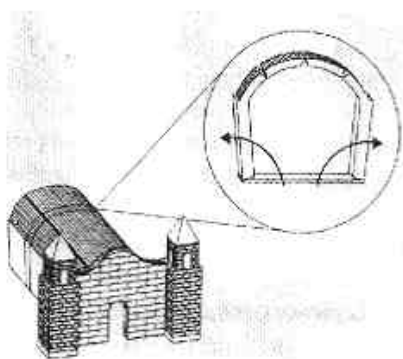


Figura 5. Efecto de flexión fuera del plano

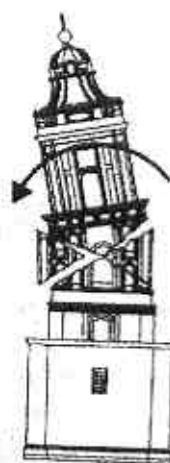


Figura 6. Corte diagonal en campanarios

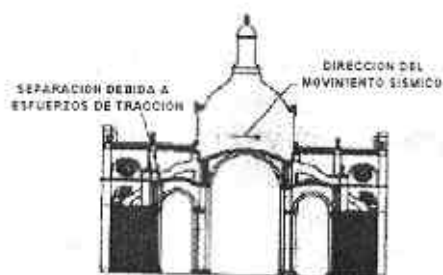


Figura 7. Tracción en contrafuerte

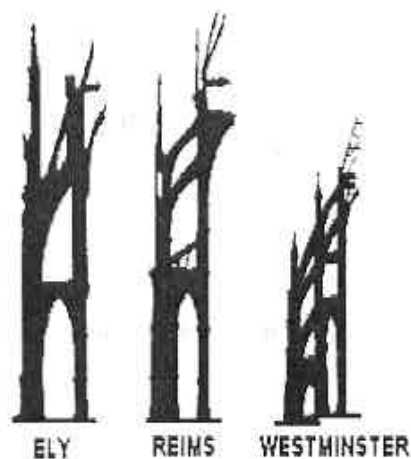


Figura 8. Variedad de contrafuertes góticos

extrapolación de los resultados elásticos para interpretar la condición inelástica no es confiable, y e) debe dársele atención especial a los coeficientes de seguridad parciales, particularmente en edificaciones históricas de gran uso (Penelis, 1996).

Según Penelis (1996), las técnicas de rehabilitación pueden ser *reversibles* o *irreversibles*. Las primeras se prefieren cuando pueden cambiarse si resultan ineficientes o se tengan mejores técnicas

y no se falsifican las evidencias artísticas e históricas. Entre éstas se cuentan contrafuertes externos, tirantes en los arcos, anillos en la base de los domos, tensores pretensados no adheridos, juntas secas con topes de piedra o de mármol, tirantes externos, vigas de corona y mejoras de ductilidad, resistencia y rigidez de diafragmas. Las técnicas irreversibles son casi inevitables y comprenden inyecciones y vaciados, elementos adheridos, agregación de morteros, reparación de juntas, reconstrucción de partes, incorporación de barras de presfuerzo y reforzamiento de fundaciones. Un caso de rehabilitación irreversible realizado en Mérida, Venezuela (Figura 9), es la Iglesia del Corazón de Jesús, construcción de mampostería que bajo los efectos de sismos y de tráfico pesado, agrietó longitudinalmente la bóveda y las columnas laterales.

Se renovaron ambos elementos en concreto armado, se adicionó una estructura en el coro para anclar el frontis y se retiraron los pendolones del techo. Las estructuras adicionales se acusan en los espacios interiores y exteriores, tal como se muestra en la figura 10.

Las conclusiones de este trabajo fueron la definición de una filosofía para la rehabilitación pre y post-sísmica, elaborar manuales de aplicación práctica, armonizar las estrategias de rehabilitación con el proceso constructivo, la patología estructural debe ser materia de enseñanza universitaria, y reconocer que la intervención con nuevos componentes



Figura 9. Vista anterior a la rehabilitación



Figura 10. Iglesia rehabilitada

estructurales puede cambiar el comportamiento global (Lobo Quintero, 2000).

La estatua monumento

La ejecución de las estatuas requiere de una estructura para sustentarse ante una eventualidad sísmica y son muchos los

casos de destrucción por agotamiento y por terremotos. En Atenas, hay una riqueza cultural que data desde muchos siglos antes de Cristo, logrando vencer al tiempo inexorable, como es el caso de las estatuas de Sócrates y Apolo con su lira, que se muestran en la figura 11. En la figura 12 se tiene la estatua del rector Louis Agassiz de la Universidad de Stanford, quien cayó de su pedestal durante el sismo de San Francisco de 1906, y la gente pensó que así este poeta pasó de lo abstracto a lo concreto (EERI, 1997).

La ingeniería sísmica actual, considera a las estatuas como bloques rígidos en condición libre y fricción de Coulomb, sometidos a excitación horizontal y vertical en la base, constituyendo sistemas planos con tres grados de libertad. Una formulación hecha por Shenton y Jones (1991), usando la teoría clásica del impacto, estableció las ecuaciones diferenciales y obtuvo tres formas modales: deslizamiento, rotación y deslizamiento-rotación, válidas para pequeños ángulos de rotación. Además, se deriva de estos modos una posible condición de vuelo libre desde la condición de reposo.

Un trabajo experimental usando modelos de bloques rígidos confirman la complejidad de estos sistemas dinámicos y dan una visión acerca de la colocación de instrumentos de medición en estatuas. Los bloques rígidos sometidos a excitación sinusoidal de la base responden de modos diferentes, que dependen de la relación de aspecto del



Figura 11. Escultura de Sócrates y Apolo

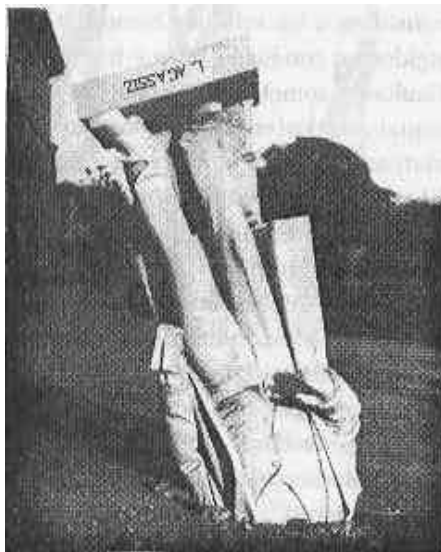


Figura 12. Colapso en Universidad de Stanford

bloque (H/B), su momento de inercia, el coeficiente de fricción entre bloque y base, el coeficiente de restitución, la frecuencia y la amplitud de la aceleración (Schultz y Jones, 1994).

Se ha recomendado el aislamiento sísmico de la base para la protección de estatuas, determinando un espectro de referencia para la zona arqueológica de Villa Adriana en Tivoli y se notó que la estatua aislada es un sistema completamente diferente, si se compara a la estructura convencional, debido a las dimensiones del material, masa, forma y dimensiones globales. En este caso el aislamiento es importante porque el sistema es muy rígido y está expuesto probablemente a grandes fuerzas sísmicas (Vestroni y Di Cintio, 2000).

Métodos y tecnologías actuales

Los métodos basados en desempeño estructural que consideran estados límites, son una herramienta excelente para el análisis de la rehabilitación de monumentos históricos. Este enfoque se desvía de los métodos basados en fuerzas, que toman un factor de respuesta R para incorporar la ductilidad. Para definir la demanda sísmica hay estados límites que pueden tomarse en forma probabilística de acuerdo con el *grado de desempeño* que la sociedad espera de una construcción particular. Así se pueden tener niveles operacionales, de ocupación inmediata, de seguridad de vidas y de prevención de colapso (FEMA 273, 1996). En otras palabras, se tienen estados límites de servicio, de daños, de seguridad y de agrietamiento severo, correspondientes a demandas sísmicas, que para

una vida útil de la construcción, tienen probabilidades de excedencia y períodos de retorno correspondientes. Una gráfica matricial 3-D, mostrada en la figura 13, pretende ilustrar las relaciones entre las probabilidades de excedencia, los objetivos y los costos para diferentes niveles generando diferentes posibilidades de desempeño a, b, c,.....p. (FEMA 273, 1996).

Un estudio de amenaza sísmica de la zona del monumento, permitirá obtener aceleraciones A, velocidades V y despla-

zamientos D, correspondientes a las probabilidades y tiempos de vida útil; y contando con los perfiles de suelos en cada nivel, podrán tenerse espectros elásticos de riesgo uniforme con 5% de amortiguamiento. Los métodos basados en desempeño estructural permiten cruzar las curvas de capacidad de la estructura antes y después de la rehabilitación con los espectros de cada condición límite. Para este fin conviene tener espectros de A vs. D, con períodos estructurales radiales $T = 2\pi(D/(Ag))^{0.5}$, y además convertir las curvas de capacidad en relaciones A vs D, donde $A = F/(aW)$, y F es la fuerza cortante lateral y a la influencia modal, tal como se muestra en la figura 14 (Rivera de U., 1997).

En rehabilitación debe trabajarse para ductilidades moderadas y así se obtienen los espectros inelásticos de diseño. Las intersecciones de las curvas de capacidad con los espectros de diseño determinan puntos de desempeño con desplazamientos característicos, tal como se

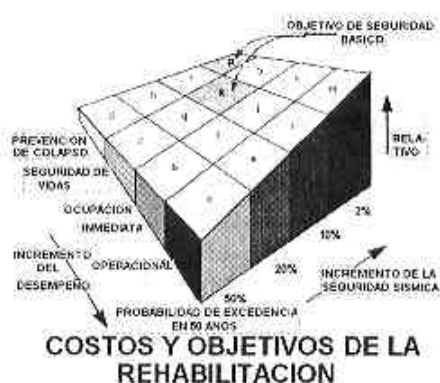


Figura 13. Alternativas de desempeño



Figura 14. Curva de capacidad

aprecia en la figura 15. Si se seleccionan estos desplazamientos a partir de las derivas aceptables para el monumento histórico, se pueden obtener las rigideces estructurales en el período T radial y las aceleraciones de diseño en el eje vertical. La rehabilitación basada en desempeño toma en cuenta a los usuarios y a los propietarios para encontrar diferentes condiciones de aceptación de la estructura rehabilitada.

Tomando en cuenta los criterios de desempeño estructural, se han adelantado con éxito proyectos de aislamiento sísmico y/o de disipación de energía de monumentos históricos, y son una alternativa que ofrece la ingeniería moderna, siempre que se respeten los lineamientos de la Carta de Venecia. Estos métodos tienen la ventaja de que pueden reducir las acciones sísmicas hasta una condición de resistencia deficiente de un monumento histórico y no hay necesidad de producir intervenciones preservando la integridad arquitectónica. Por contraste, los esquemas de aislamiento no son visibles

y conservan los interiores y exteriores de la edificación. Esta materia se ofrece como alternativa plausible y no es una panacea, ni es el objetivo del presente trabajo (Buckle, 1994).

Conclusiones y recomendaciones

- 1° La restauración de los monumentos históricos es un área crítica que requiere de la inter-relación entre la ingeniería estructural y la arquitectura especializada, siempre respetando la integridad de las construcciones y preservando sus valores originales.
- 2° Para avocarse a la evaluación y rehabilitación sísmica de monumentos históricos, los profesionales deben fundamentarse en una cultura de la conservación, que asuma las enseñanzas de las técnicas tradicionales, pero, cuando requiera de las actuales, seleccione los materiales con profundidad científica, para que se combinen adecuadamente con los antiguos.
- 3° Hasta donde sea posible, debe manejarse con el mejor juicio, la introducción de esqueletos estructurales o elementos extraños al sistema original, cuya interacción pueda afectar los valores culturales, históricos o artísticos que se pretendan proteger.
- 4° La ingeniería sísmica moderna cuenta con herramientas de análisis, diseño y construcción sismorresistente, para



Figura 15. Rehabilitación basada en desempeño

poder hacer sus aportes racionales, dentro de la filosofía conservacionista de protección y rehabilitación de monumentos históricos.

- 5°. Los criterios de diseño actuales basados en el desempeño estructural, que atiendan las expectativas de los usuarios y de los propietarios de los monumentos históricos, aunque se contrasten con los requerimientos normativos formales, son el mejor mecanismo para obtener las rehabilitaciones adecuadas.

Referencias citadas

- ARNOLD, Ch. y REITHERMAN, R. 1982. **Building Configuration Seismic Design**. John Wiley and Sons. New York. 296 p.
- BUCKLE, I.G. 1994. Applications of Passive Control Systems to the Seismic Retrofit of Historical Buildings in The United States. *IUTAM Symposium on the Active Control of Vibration*. 1-12. Bath-England.
- CISMIGIU, A. y CISMIGIU, M. 1996. The Seismic Pathology of Religion-Related Buildings in Romania and their Treatment according to Article 10 of the Venice Chart. *XI World Conference on Earthquake Engineering*. 1-8. Acapulco-México.
- D'AGOSTINO, S. y BELLOMO, M. 2000. Improvement as a Criterion for the Anti-Seismic Safeguarding and Structural Conservation of Historical Sites: Methodology and Examples. *XII World Conference on Earthquake Engineering*. 1-8. New Zealand.
- D'AYALA, D.F. 2000. Establishing Correlation between Vulnerability and Damage Survey for Churches. *XII World Conference on Earthquake Engineering*. 1-8. New Zealand.
- EERI. 1997. *Reconnaissance Report on the Umbria-Marche, Italy, Earthquakes of 1997*. Special Report. 60 p.
- FEMA 273. 1996. *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. September 1996.
- FREEMAN, J.R. 1932. **Earthquake Damage and Earthquake Insurance**, Mac Graw Hill. New York. 622 p.
- GAVARINI, C. 1994. *Monument Safety in Seismic Areas*. **Earthquake Spectra**, 10:189-195.
- GAVARINI, C. y BRUNO, S. 1996. Towards a Complex Approach to Preservation and Seismic Protection of Monuments. *XI World Conference on Earthquake Engineering*. 1-6. Acapulco-México.
- ICOMOS. 1964. Carta de Venecia-1964, Internet: www.icomos.org/docs/venice_es.html
- KIRIKOV, B. 1992. **History of Earthquake Resistant Construction from Antiquity to Our Times**. Fundación Mapfre, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 240 p.
- LOBO-QUINTERO, W. 2000. Practical Rehabilitation of Buildings in Critical Conditions. *XII World Conference on Earthquake Engineering*. 1-8. New Zealand.
- MELI, R. y SÁNCHEZ, R. 1996. Considerations on the Seismic Safety of Historical Monuments. *XI World Conference on Earthquake Engineering*. 1-8. Acapulco-México.

- MONTILLA, P.; UZCÁTEGUI, A.I. y HER-
NÁNDEZ, S.M. 1996. Damages occurred
to churches due to the Earthquake of
February 8, 1995 in Pereira, Colombia. *XI
World Conference on Earthquake
Engineering*. 1-7. Acapulco-México.
- PENELIS, G.R. 1996. Techniques & Materials
for Structural Resto-ration., *XI World
Conference on Earthquake Engineering*.
1-8. Acapulco-México.
- REITHERMAN, R. 1984. *Institutional Roles
and the prevention of nonstructural
Earthquake Damage: Why Knowledge
Doesn't Work*. **EERI**, 84:1-80. 80 p.
- RIVERA DE UZCÁTEGUI, I. 1997. *Evaluación
pre-sísmica de edificaciones bajas de
concreto armado*. **Diseño Sismo-
resistente**. Boletín Academia de
Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales.
XXXIII:229-250.
- SCHULTZ, P. y JONES, N.P. 1994. Expe-
rimental Determination of Slide-Rock
Behavior of Rigid Blocks subjected to Base
Motion. *V U.S. National Conference on
Earthquake Engineering*. 921-930.
Chicago-E.U. (10-14 julio).
- SHENTON, H.W. y JONES, N.P. 1991. *Base
Excitation of Rigid Bodies I: Formulation*.
Journal of Eng. Mechanics, 117:2286-
2306.
- VESTRONI, F. y DI CINTIO, S. 2000. Base
Isolation for Seismic Protection of Statues.
*XII World Conference on Earthquake
Engineering*. 1-8. New Zealand.