UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES

(Texto de la Conferencia presentada en el Seminario Internacional de Planeamiento, Diseño, Reparación y Administración de Hospitales en Zonas Sísmicas Realizado en Lima - Perú, del 20 de Agosto al 9 de Setiembre de 1989)

IDENTIFICACION Y EVALUACION DE EDIFICIOS SISMICAMENTE VULNERABLES (CON ANOTACIONES RELATIVAS AL CASO DE HOSPITALES)

Por: Héctor Gallegos

INTRODUCCION:

En todas las ciudades sujetas a peligros sísmicos existe un considerable inventario de edificios que han sido construidos sin el beneficio de reglamentación sísmica o de reglamentación sísmica adecuada: ellos son sospechosos de ser vulnerables a los sismos y por lo tanto de constituir riesgos mayores que los aceptables para la vida y la integridad física de las personas. Esta situación es particularmente crítica cuando se trata de hospitales -y de otras edificaciones destinadas al cuidado de la salud en razón, sobre todo, de su rol, que es esencial, en las situaciones de emergencia que derivan de un evento sísmico.

Como consecuencia de la necesidad de reducir el riesgo sísmico a niveles aceptables es necesario aplicar técnicas de investigación para, primero, identificar los edificios potencialmente vulnerables, evaluar luego, de uno en uno, su vulnerabilidad real y, finalmente, en una tercera etapa, adoptar procedimientos de reparación y/o fortalecimiento o, en casos extremos, el cambio de uso y/o la demolición parcial o total.

Estas técnicas, aplicadas en sucesivas, y de ser posible consecutivas, fases, se apoyan -como se apreciará con más detalle a lo largo del desarrollo de este documento- en la siguiente información:

a) el conocimiento de la sismicidad local, cuantificada en los requisitos de diseño de la zona sísmica;
b) el estudio geotécnico a nivel, por lo menos, de microzonificación y para estructuras importantes a nivel de estudio de suelo específico,
c) la vulnerabilidad de los diferentes tipos de construcciones usados en la localidad tal cual ha sido observada en sismos previos en la misma localidad o en otras partes,
d) los datos obtenidos de la inspección ocular destinada a determinar las características estructurales del edificio cuando -como es común en edificios antiguos no hay planos o para determinar si existen modificaciones sustantivas a los mismos;
e) los datos obtenidos de la inspección ocular destinada a determinar el estado de mantenimiento de la edificación, que debe precisar los daños por asentamientos, fuego, corrosión o sismos previos;
f) los datos obtenidos de la inspección ocular de los elementos no estructurales, tabiques, instalaciones, equipamiento y contenido, y
g) los cálculos (simples o complejos) dirigidos a determinar el comportamiento sísmico esperado.

Debe tenerse en cuenta que los resultados que se obtienen de esta investigación tienen características de aproximación gruesa, ya que si bien las técnicas para la identificación son relativamente simples, confiables, y generales las otras fases del proceso: la evaluación de la vulnerabilidad y los métodos para su reducción, dependen de técnicas más complejas, menos confiables y más específicas. En particular, las técnicas de evaluación deben apoyarse en aspectos acerca de los cuales no sólo no se tiene información completa sino que son aspectos muy difíciles de cuantificar. Tal es el caso de la calidad de los materiales, el tipo de construcción, el estado de mantenimiento y la correlación sismo -> respuesta estructural -> daños.

En este documento -además de proveerse una relación de definiciones y tratar aspectos esenciales que ayudan ambos a la comprensión del tema se plantean los criterios generales y se desarrollan procedimientos aplicables a las dos primeras fases de la investigación: la identificación y la evaluación de las estructuras y los sistemas no estructurales de edificios sísmicamente vulnerables. Debe entenderse que los métodos y técnicas específicos -sobre todo las de evaluación aplicables a situaciones concretas, si bien deben apoyarse en la información antes detallada y en los aspectos generales que se tratan más adelante, requieren tener características que los hagan eficientes y válidos en la situación en que se aplican.

El documento no trata el tema de los métodos de reforzamiento sísmico que corresponde a la tercera fase de la investigación.

DEFINICIONES:

Daño. Cualquier destrucción estructural o no estructural.

Daño sísmico. Daño causado por un sismo.

Diafragma. Elemento estructural horizontal (o prácticamente horizontal) que unifica una estructura y la capacita para comportarse como un todo cuando está sometida a vibraciones del suelo.

Ductilidad. Medida de la capacidad de una estructura de comportarse plásticamente al terminar el rango elástico e ingresar al rango de las deformaciones inelásticas.

Evento sísmico. Liberación súbita de energía en la litósfera.

Indice de calidad sismo resistente. Medida de la calidad sismo resistente de una estructura que tiene en cuenta las condiciones de suelo, uso y altura de la misma. Su inversa se puede considerar como una medida de la vulnerabilidad sísmica de la estructura.

Peligro sísmico. Cualquier fenómeno físico (por ejemplo: vibración del suelo, falla del suelo, tsunami) asociado con un sismo.

Pérdida. Es la medida económica del daño.

Riesgo. Es la probabilidad de ocurrencia de determinado daño (o determinada pérdida).

Riesgo aceptable. Es el riesgo juzgado, social y económicamente, adecuado por la autoridad competente.

Riesgo sísmico. Es la probabilidad de la ocurrencia de determinado daño (o determinada pérdida) en un lugar específico como consecuencia de un evento sísmico determinado.

Vulnerable. Que puede sufrir daños.

Vulnerabilidad. Calidad de lo que puede sufrir daños. La inversa del índice de calidad sismo resistente de una estructura se puede considerar como medida de su vulnerabilidad sísmica.

Zona sísmica. Area definida por la ocurrencia de sismos relativamente uniformes en frecuencia, intensidad y magnitud y en la cual, como consecuencia, los requisitos de diseño sismo resistente son constantes.

ASPECTOS GENERALES:

Un sismo severo es uno de los eventos más pavorosos y devastadores de la naturaleza. La mayoría de las muertes, lesiones y daños que ocurren como consecuencia de los sismos -particularmente en áreas urbanas proceden de la falla de la estructura o de los sistemas no estructurales de edificios que no han sido adecuadamente ubicados, diseñados, construidos y/o mantenidos para resistir los complejos movimientos del suelo que los sismos generan.

El desarrollo del conocimiento del origen y consecuencias de los sismos ha constituido un proceso lento y gradual que se inicia, hace más de dos mil años, cuando se creía que Posidón -dios griego del mar era responsable del fenómeno. Sólo ha sido posible recientemente -después de cuidadosa observación de la tierra y de los daños resultantes a las obras humanas reconocer lo que realmente son: liberación súbita de energía debida a la recuperación violenta del equilibrio de las fuerzas internas en la corteza terrestre. Esta liberación de energía ocurre en partes de la litósfera que han estado sometidas a esfuerzos debidos a la tectónica de las placas que la constituyen.

En efecto, el evento sísmico es de transformación de energía. La energía de deformación acumulada en la litósfera se convierte violentamente en energía cinética; esta se manifiesta a través de movimientos ondulatorios que se transmiten a través del cuerpo y la superficie de la tierra. Es esta energía, atenuada por la distancia al evento, la que los edificios deben absorber y, en caso de sismos severos, disipar. El conocimiento sísmico obtenido de manera sistemática y coherente -particularmente en las tres o cuatro últimas décadas ha permitido cuantificar el fenómeno y desarrollar las bases que nos permiten efectuar el diseño de estructuras con razonable certeza de su seguridad. Más aún: ha sido posible aplicar consideraciones económicas al diseño sismo resistente, optando por estructuras menos fuertes que lo necesario (y, como consecuencia, de menor costo inicial) las que al ser sometidas a un movimiento sísmico severo sufrirán daños controlados, sin colapsar, y disiparán así una parte importante de la energía absorbida.

El comportamiento sísmico de las estructuras es descrito por las curvas espectrales de respuesta que son, en efecto, diagramas de influencia de, por ejemplo, desplazamientos y cortantes máximos. Los espectros muestran como la respuesta de la estructura es afectada por la magnitud (o tamaño) y características dinámicas del sismo, por la distancia epicentral (o distancia de la estructura al evento sísmico), por las características dinámicaas del terreno de cimentación y por sus propias características dinámicas representadas por el período natural y el amortiguamiento. Del análisis de dichos espectros se confirma que durante un sismo severo las estructuras comunes estarán sometidas a aceleraciones (o fuerzas) mayores que las prescritas por los reglamentos y que, como consecuencia, su comportamiento dependerá de su habilidad para disipar la energía vibracional a partir del instante en que las deformaciones estructurales exceden el límite elástico. En otras palabras: no es suficiente para causar el colapso estructural aplicar determinadas fuerzas, sino que para hacerlo es necesario también saturar la capacidad estructural de absorción y disipación de energía vibracional.

Del análisis precedente se desprenden las siguientes consideraciones:

a) el comportamiento sísmico exitoso de una estructura depende, además de su resistencia, de su comportamiento plástico o, en otras palabras, de su ductilidad y,
b) el ingreso previsto de la estructura en el rango del comportamiento plástico, cuando ella es sometida a un sismo severo, está necesariamente acompañado de la ocurrencia de daños.

En otras palabras, la calidad sismo resistente de una estructura depende directamente de su resistencia y de su ductilidad, y serán, consecuentemente, estructuras vulnerables aquellas que tienen resistencia reducida y ductilidad escasa. Adicionalmente, debe reconocerse con claridad que la ocurrencia de daños sísmicos no implica necesariamente un comportamiento defectuoso y/o peligroso.

Alguien ha dicho que las estructuras son como los vinos; hay buenos y malos dependiendo de la calidad de la cosecha de la que proceden. En el caso de las estructuras las causas (o cosechas) que explican la existencia de extremas diferencias (en un tema de ingeniería que el lego puede pensar está sujeto a leyes inmutables) provienen del estilo arquitectónico y de la tipología estructural preferidos en la época de su construcción; de "avances" no siempre exitosos de los reglamentos; de la variabilidad, algo cíclica, de la calidad de los materiales y de los procesos de construcción; de las prácticas aplicadas en la supervisión de la construcción de las obras, y del rigor en el mantenimiento y reparación de las estructuras.

En consecuencia en la identificación de dichos edificios potencialmente vulnerables no sólo preocupan los edificios "antiguos" -construidos hace unas tres o cuatro décadas antes de que los reglamentos de construcción incluyeran provisiones sismo resistentes racionales y mandatorias sino también edificios relativamente nuevos. En efecto, dado que los reglamentos sólo pueden reflejar el conocimiento existente al momento de su elaboración y que, en el proceso del desarrollo del conocimiento sísmico, han ocurrido avances y retrocesos hasta consolidar, recién hace unos quince años, bases sismo resistentes que se reconocen como permanentes y, reglamentos que se pueden considerar adecuados, resulta que la mayor parte del inventario urbano de todas las ciudades sujetas a peligros sísmicos es sospechoso de ser vulnerable.

Idealmente se podría enfrentar el problema de las estructuras vulnerables ya sea reduciendo o eliminando su vulnerabilidad (es decir, reforzándolas y/o ductilizándolas) o, alternativamente, demoliéndolas (total o parcialmente) o reduciendo y/o cambiando su ocupación destinándola a un uso menos crítico. Desafortunadamente, en este aspecto, vivimos en un mundo política, económica y socialmente complejo que convierte a las soluciones técnicas "ideales" en muy difíciles de proponer, decretar y, especialmente, aplicar. En otras palabras, el proceso de reducción del riesgo sísmico proveniente de estructuras vulnerables es, en un contexto urbano determinado, más un tema político que un tema puramente técnico.

De otro lado, como se puede deducir del análisis efectuado anteriormente acerca del origen de la vulnerabilidad, la cantidad de estructuras sospechosas es considerable. En una ciudad de tamaño medio -digamos de quinientos mil habitantes descartando la vivienda unifamiliar y las construcciones obviamente vulnerables (de adobe, por ejemplo) su número puede alcanzar algunos cientos. Es así que aunque fuera políticamente posible iniciar un proceso para su identificación, evaluación y fortalecimiento se estaría ante el caso -como alguien decía refiriéndose al mismo problema en una de las ciudades que conforman la gran metrópoli de Los Angeles de "enfrentar un problema tan grande como el de comerse un elefante". Para comerse un elefante, de acuerdo a un decir popular, hay que proceder bocado por bocado.

Un primer "bocado" muy efectivo y ciertamente viable - tanto política como económica y socialmente para cualquier sociedad es la identificación, la evaluación y la reducción efectiva del riesgo de las edificaciones hospitalarias vulnerables. La prioridad de éstas se explica y radica en las siguientes características de los hospitales y, en general, de todas las edificaciones destinadas al cuidado de la salud:

a) Importancia. Los hospitales son componentes esenciales en las situaciones de emergencia, socorro y recuperación que caracterizan al postsismo. Su pérdida, total o parcial, puede incrementar las bajas, agravar las lesiones y aumentar el padecimiento humano.
b) Contenido y equipamiento. El contenido de un hospital incluye desde productos farmacéuticos diversos, esenciales para el tratamiento de víctimas, hasta productos químicos y gases (oxígeno, vapor y propano, por ejemplo) que pueden generar, en casos de derramarse o escapar, daños, como incendios y explosiones, adicionales a los del sismo. De otro lado el equipamiento -de radiología, esterilización y salas de operación también

esencial en cualquier situación de emergencia, es delicado y costoso y puede ser muy difícil de restituir oportunamente.

c) Densidad ocupacional. Los hospitales tienen una densidad ocupacional de alrededor de 15 personas por cada 100 m^2 de área techada las veinticuatro horas del día. Esta ocupación en determinadas horas (horas de visita y de atención externa, por ejemplo) y zonas se triplica.

d) Ocupantes. Por su propia naturaleza los hospitales albergan a personas con handicap (enfermos, minusválidos, ancianos, infantes y parturientas); mientras que los niños de un colegio, por ejemplo, pueden protegerse cobijándose debajo de una mesa o de un pupitre, el paciente de un hospital en cama o en silla de ruedas no puede hacerlo y queda desguarnecido. En adición, después de un sismo, muchos pacientes estarán físicamente impedidos de evacuar.

FASE 1: IDENTIFICACION

Dado un inventario numeroso de edificios, la identificación de aquellos que son potencialmente vulnerables debe efectuarse utilizando algún tipo de tamizado. El objetivo fundamental del tamizado es identificar rápida y económicamente -con información escasa y en base, esencialmente, a una breve inspección ocular- aquellos edificios sospechosos de ser vulnerables, que pueden causar pérdidas de vida o lesiones a las personas, así como tener efectos adversos en los servicios esenciales a la comunidad. No debe ser objetivo de este proceso de tamizado recomendar acciones para la reducción de la vulnerabilidad.

Debido a la adopción de exigencias sismo resistentes reglamentarias que se consideran adecuadas -es decir que incluyen conceptos claros de resistencia y ductilidad estructural y que se apoyan en datos sísmicos instrumentales y en predicciones estadísticas válidas de la sismicidad local y que son aplicables a la construcción nueva a partir de cierta fecha, la fecha de construcción es siempre considerada como un criterio básico para identificar edificios potencialmente vulnerables. Se asume que, en general, los edificios diseñados con anterioridad a provisiones reglamentarias sismo resistentes adecuadas son potencialmente más peligrosos que aquellos diseñados de acuerdo a reglamentos que las incluyen.

La revisión del registro de daños observados en sismos precedentes señala siempre los tipos de estructuración que son particularmente vulnerables. Una tipología general de estructuración puede ser representada por la lista siguiente:

Tipo 1. Estructuras sin diafragma.

Tipo 2. Estructuras con diafragma:

- 2a. de pórticos sin ductilidad,
- 2b. de muros sin refuerzo,
- 2c. mixtos de 2a y 2b,
- 2d. de pórticos dúctiles,
- 2e. de muros reforzados, y
- 2f. mixtos de 2d y 2e.

Dentro de estos las estructuras de Tipo 1, las estructuras no diafragmadas, particularmente la de muros de adobe o de albañilería sin refuerzo, han demostrado consistentemente, en todas partes, ser las más vulnerables. Existe evidencia irrebatible con relación al fracaso de las estructuras no diafragmadas cuando éstas son de adobe (Huaraz, 1970, Managua, 1972 y Tang Shan, 1976) o de albañilería sin armar (Long Beach, 1933, Gibellino, 1968, Chimbote, 1970, Tang Shan, 1976, Coalinga, 1982 y Leninakan, 1988). Más aún: la implícita debilidad de este tipo estructural se magnifica tanto en los suelos blandos como por el mal estado de conservación y la existencia de daños acumulados causados por sismos previos que no han sido reparados adecuadamente.

Existe también evidencia del mal comportamiento de estructuras de pórticos no dúctiles (Caracas, 1967 y México, 1985). Este tipo estructural es tan crítico que, entre otros

documentos que citan su debilidad, el análisis de la Comisión de Seguridad Sísmica de California los ubica en su lista de vulnerabilidad, sólo después de las construcciones no diafragmadas de albañilería sin refuerzo. Alternativamente, las estructuras Tipo 2f, que incluyen pórticos dúctiles en combinación con muros reforzados en un sistema unitario diafragmado, han demostrado consistentemente excelente calidad sismo resistente.

Los tipos estructurales diafragmados (Tipo 2) pueden tener configuraciones simétricas, continuas, compactas y robustas en cuyo caso dentro de las limitaciones de su tipo tendrán el mejor comportamiento. Si sus configuraciones son asimétricas, discontinuas, irregulares o débiles representarán más bien el grupo de elevada vulnerabilidad dentro de su tipología. (Ver, para más detalle, Gallegos H., Estructuración sismo resistente de edificios. El Ingeniero Civil No. 33, Artículo 02, Lima, Perú, Noviembre 1986, o la Revista del Instituto Mexicano del Cemento y Concreto No. 165, Enero 1985, México).

Como parte del análisis de la configuración debe considerarse la relación de la estructura con los elementos no estructurales rígidos (tabiques de albañilería, principalmente). Si estos se encuentran adosados a la estructura de modo de impedir su libre deformación, ellas efectivamente modifican los sistemas de rigidez y resistencia del sistema estructural primario, alterando su configuración y sus características dinámicas y, consecuentemente, modifican su comportamiento sísmico. Además, en ciertos casos, originan en los elementos estructurales zonas de severa concentración de esfuerzos (columnas cortas, por ejemplo) que conducen a fallas frágiles prematuras.

En el contexto precedente los siguientes aspectos relativos a la configuración estructural primaria y a la configuración estructural modificada por elementos no estructurales son particularmente críticos:

a) Estructuras con piso blando. En las que la rigidez de un piso es significativamente menor que en el resto de la estructura creándose en él una zona de atracción de energía que es difícil de absorber y disipar y, en estructuras esbeltas efectos secundarios severos.
b) Irregularidades horizontales. Ellas causan efectos torsionales que conducen a crear zonas de atracción de energía en los elementos perimetrales.
c) Diafragmas incompetentes. Si los diafragmas son ineficientes o si ellos se dañan, incapacitándose para unificar el conjunto estructural, cambiará la configuración y el tipo estructural y, consecuentemente, su comportamiento sísmico a uno no previsto y más vulnerable. (Caracas, 1967 y Lima, 1974).

En adición a la identificación de las características intrínsecas de las estructuras primaria y modificada es necesario establecer -mediante la inspección ocular el estado de mantenimiento del edificio. Los edificios que muestran daños (o los tienen simplemente recubiertos) por diferentes causas: asentamientos, corrosión, fuego y/o sismo previos, deben clasificarse como potencialmente vulnerables para que queden sujetos a la fase más avanzada de evaluación en el proceso de investigación.

En la inspección ocular también deben detectarse los sistemas no estructurales potencialmente vulnerable (ver, al respecto, la parte final de este documento). En el caso de los sistemas estructurales exteriores, de no encontrarse conformidad, conviene -debido al importante riesgo que ellos generan conducirlos a un proceso de atención rápida.

Del análisis precedente se puede definir una lista de tamices consecutivos con el fin de identificar las estructuras y los elementos no estructurales potencialmente vulnerables. La lista puede ser como la siguiente:

Tamiz 1. Fecha de construcción. Interesa este dato para relacionarlo con la fecha del reglamento sismo resistente que se considera adecuado.

Tamiz 2. Uso de la edificación. Interesa detectar las edificaciones esenciales. Todos los hospitales quedarían retenidos en este tamiz y serían sujetos de evaluación integral, salvo que hubieran sido construidos con posterioridad a la fecha del reglamento sismo resistente adecuado, en cuyo caso sólo quedarían sujetos a la revisión de mantenimiento y de elementos no estructurales.

Tamiz 3. Importancia de la edificación. Aquí se trata de detectar edificaciones cuya ocupación (medida por el número máximo de ocupantes potenciales), área techada o número de pisos excedan un determinado valor.

Tamiz 4. Tipo estructural. Aquí se trata de obtener la clasificación final y de separar aquellos tipos obviamente vulnerables para atención inmediata.

Tamiz 5. Configuración. Se trata de considerar en este caso tanto la configuración primaria de la estructura como la configuración modificada por elementos no estructurales rígidos.

Tamiz 6. Estado de mantenimiento. Este aspecto debe evaluarse en la inspección ocular determinándose la condición de los materiales y las evidencias de agrietamientos y asentamientos.

Tamiz 7. Sistemas no estructurales. Se trata de identificar los elementos exteriores e interiores.

Por razones prácticas -limitaciones de recursos y de tiempo- se requiere para identificar estructuras potencialmente vulnerables utilizar un procedimiento simple apoyado en la información limitada que se puede obtener de una revisión rápida de los planos, en caso de ser existentes y/o localizables, y de una breve inspección ocular. En la figura 1 se detalla un flujograma de aplicación simple -que es una versión modificada del propuesto en el ATC-3, capítulo 13 (Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings (ATC-3). Applied Technology Council, USA, June 1978) el que permite identificar los edificios potencialmente vulnerables y los casos de vulnerabilidad obvia.

FASE 2: EVALUACION

Cuando un edificio (su estructura y/o sus sistemas no estructurales) ha sido identificado como potencialmente vulnerable es necesario continuar el proceso de investigación para confirmar o descartar dicha vulnerabilidad y, en caso de confirmarla, determinar la naturaleza y extensión de los daños probables y la magnitud del riesgo y de la pérdida. Se trata de seguir un procedimiento de evaluación de la competencia sismo resistente. El objetivo de este proceso de evaluación será, en última instancia, determinar la necesidad y la urgencia de efectuar las modificaciones y reforzamientos o, en casos extremos, del cambio de uso o de la demolición, destinados a reducir el riesgo sísmico.

Después de ocurrir un sismo el comportamiento de un edificio puede ser medido objetivamente en diferentes rubros: muertos y heridos, daños y pérdidas estructurales y no estructurales, pérdidas sociales y económicas derivadas de la paralización de actividades y costos de reparación y/o de reconstrucción. Sin embargo -a pesar de todos los avances en el análisis estructural y en la correlación entre las características del sismo y la respuesta estructural- evaluar, es decir predecir, dicho comportamiento sismo resistente es todavía un tema muy incierto (ver, para más detalles acerca de la magnitud de la incertidumbre, Boissonade A.C., Seismic Damage Forecasting of Structures, Proceedings Eigth World Conference in Earthquake Engineering, Vol. I, San Francisco, California, USA, 1984).

Es muy común pretender determinar la vulnerabilidad y evaluar el comportamiento sísmico de un edificio existente en función de lo que demandan los reglamentos de construcción para la obra nueva. En dichos reglamentos las ecuaciones básicas definen una fuerza de diseño (llamada cortante basal) que se determina en función de factores tales como la zona sísmica, el tipo de estructuración, el uso del edificio, las condiciones del suelo, las características dinámicas del edificio y su masa. Esta fuerza de diseño es distribuida entre los diferentes pisos de la edificación y entre los elementos resistentes en planta utilizando métodos estáticos equivalentes. En base a estas fuerzas sísmicas distribuidas se determina la demanda en los diferentes componentes caracterizada en términos de desplazamientos, cortantes y momentos. En un proceso de diseño la capacidad de los componentes se provee por lo menos igual a esa demanda. Cuando se trata de la evaluación de una obra existente estos valores se comparan con las capacidades de los componentes; en caso de determinarse que hay elementos críticos en que

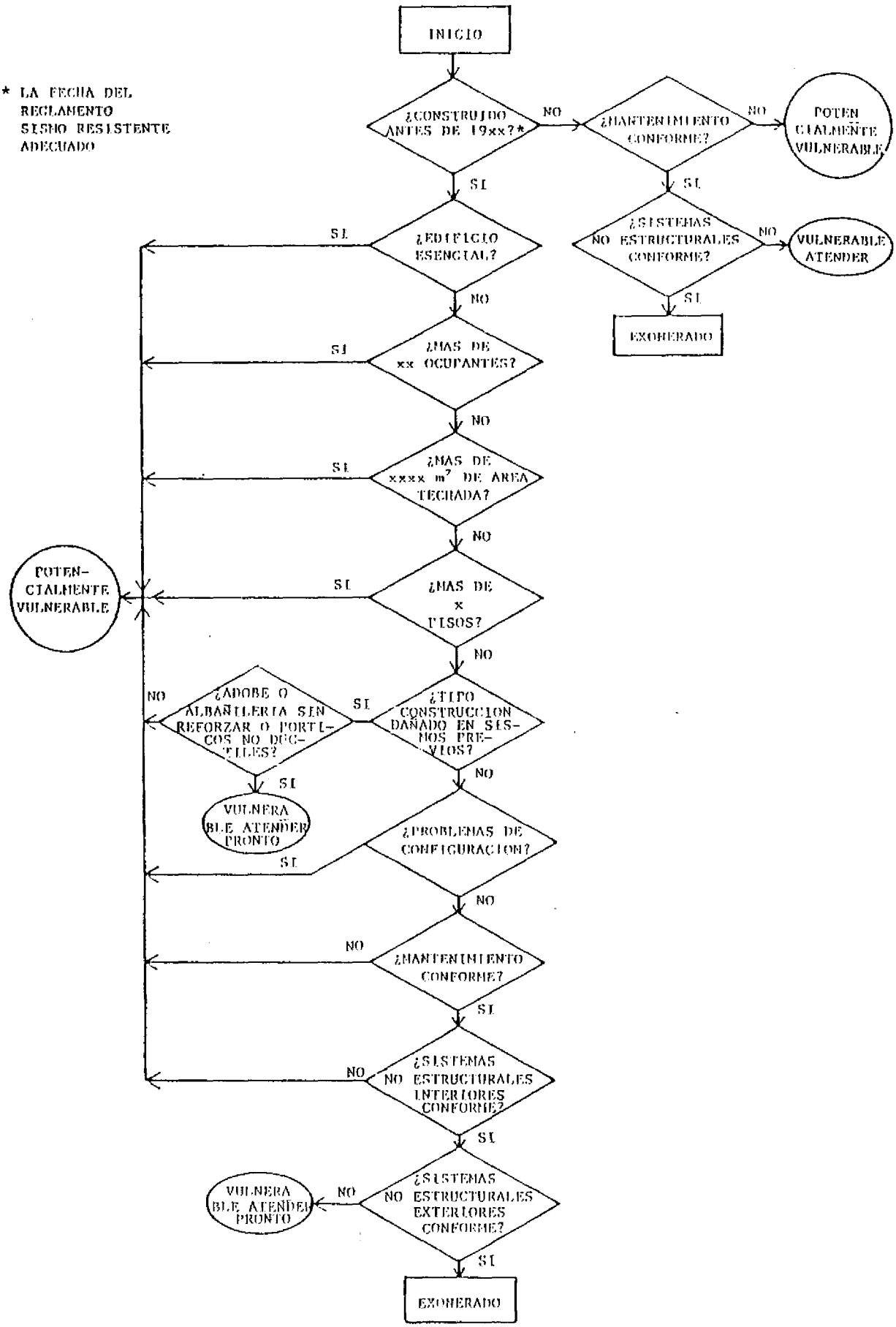

FIGURA 1. FLUJOGRAMA PARA LA IDENTIFICACION DE EDIFICIOS

las demandas exceden a las capacidades se asume que el edificio entero es vulnerable y que constituye un riesgo sísmico que excede el riesgo aceptable.

Este procedimiento no es correcto por los siguientes motivos:

a) la competencia sismo resistente no depende exclusivamente de la resistencia de la estructura a la fuerza de diseño, sino que depende también de la ductilidad del sistema estructural;
b) el valor de la fuerza de diseño no es determinístico, es un valor probabilístico aleatorio (su variabilidad a lo largo de la historia de los reglamentos es una demostración de este hecho);
c) muchos de los tipos de construcción y materiales utilizados en las construcciones antiguas ya no son utilizados y no están contemplados en los reglamentos, ellos proveen muchas veces edificios con competencias sismo resistentes adecuadas;
d) los reglamentos demandan además de la resistencia a la fuerza de diseño, requisitos adicionales (por ejemplo, cuantías mínimas de acero de confinamiento para las columnas) que seguramente no fueron considerados en las edificaciones que se analizan lo que conduciría a considerarlas riesgosas sin una verdadera justificación, y e) se ha establecido que pretender elevar la competencia sismo resistente de edificios que no satisfacen un reglamento al nivel del mismo es excesivamente costoso y este costo no se puede justificar sobre bases técnicas.

Los métodos de evaluación válidos pueden clasificarse en tres grupos principales: empíricos, cualitativos y teóricos o analíticos.

Los métodos empíricos se apoyan en la correlación entre las características del sismo y las características del terreno de cimentación con los daños observados, debidamente clasificados, en los tipos y las configuraciones estructurales. Los resultados que una evaluación de esta naturaleza provee son valores promedios, genéricos y con incertidumbre elevada. Por estos motivos los métodos empíricos son realmente aplicables a grupos o zonas de análisis pero no a estructuras específicas.

Los métodos cualitativos se apoyan en el conocimiento empírico y a través de métodos simples cuantifican, es decir califican numéricamente, una serie de características cualitativas que determinan el comportamiento sismo resistente. Usualmente se incluyen para esta calificación, además del tipo del edificio, la configuración del mismo (por ejemplo, su forma en planta y elevación), las características del sistema estructural (por ejemplo densidad de los elementos verticales, tipo de elementos, calidad de las conexiones y simetría de la rigidez del sistema resistente), y la relación con los elementos no estructurales rígidos. En la figura 2 se detalla un flujograma para la evaluación cualitativa basado en la aplicación del índice de calidad estructural sismo resistente (para detalles completos acerca de la determinación de este índice ver: Gallegos H. y Ríos R., Indice de calidad estructural sismo resistente, 4as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Viña del Mar, Chile, Abril 1987 y para detalle de la forma de aplicación ver: Gallegos H. y Casabonne C., Evaluación y reforzamiento de edificaciones existentes, Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huaraz, Ancash, Perú, Setiembre 1988).

Las evaluaciones detalladas teóricas o analíticas se basan en modelos que consideran las características dinámicas de la estructura investigada y permiten establecer la respuesta estructural ante un movimiento sísmico determinado (por ejemplo: El Centro o Taft). Evidentemente la calidad del resultado obtenido depende del ajuste del modelo a la realidad y de la capacidad de procesamiento matemático a disposición del investigador. De otro lado: su ventaja consiste en que se aplican métodos usuales en ingeniería, y su problema fundamental radica en que los resultados obtenidos deben interpretarse en el contexto de una serie de parámetros inciertos como la calidad de la construcción, el estado de mantenimiento y la correlación sismo -> daño. En resumen a pesar de su aspecto científico estos métodos demandan un considerable buen juicio ingenieril y no pueden ser considerados como determinísticos.

Una forma de expresar el resultado de una evaluación teórica es mediante la relación R = capacidad/demanda; esta relación puede determinarse tanto para la resistencia del edificio como para la ductilidad que corresponde a esa resistencia. Es usual considerar que R

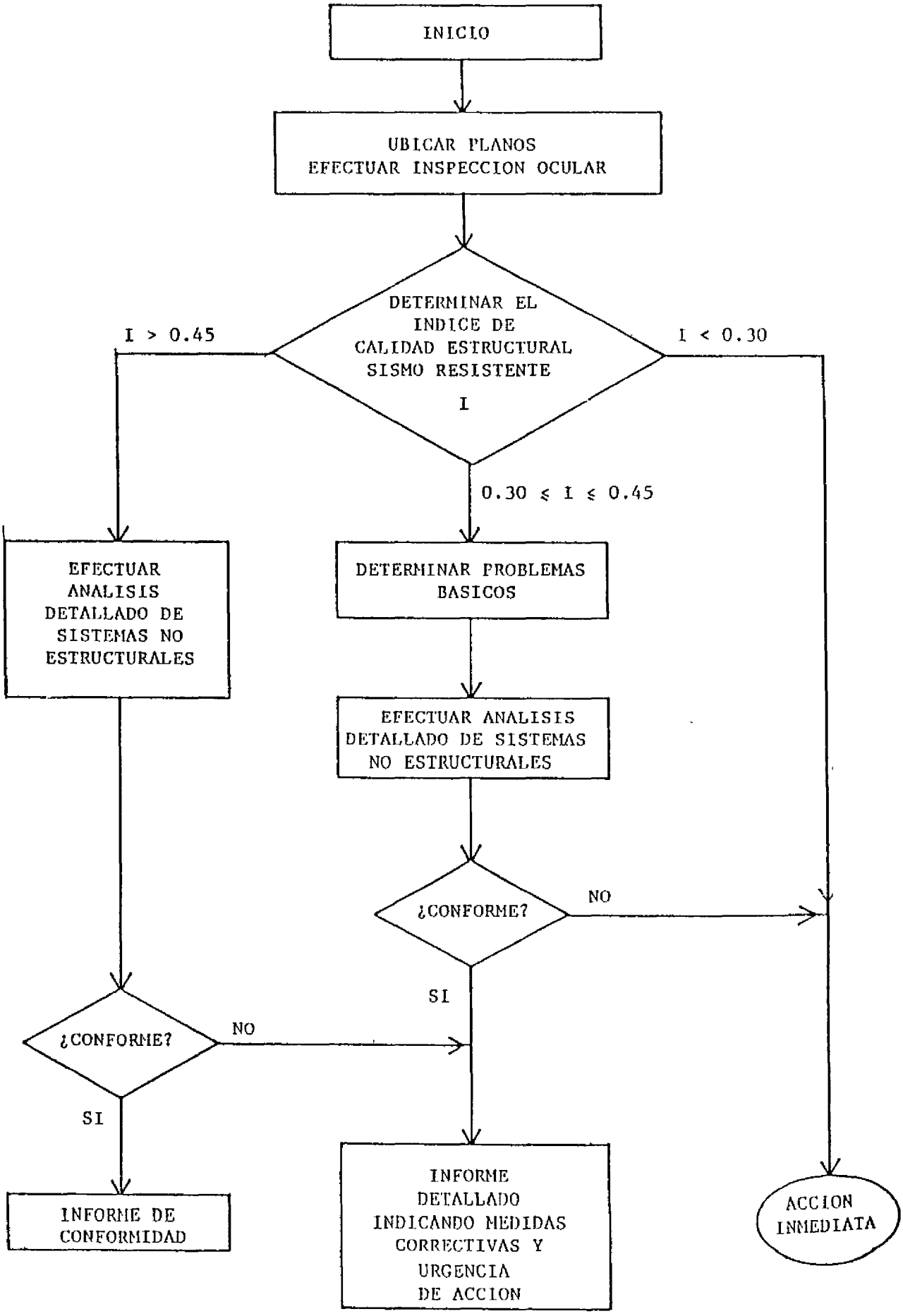

FIGURA 2. FLUJOGRAMA PARA LA EVALUACION CUALITATIVA

SISTEMAS NO ESTRUCTURALES	FLEXIBILIDAD	ANCLAJE	ARRIOSTRAMIENTO	ESTABILIDAD	RESISTENCIA	AISLAMIENTO	UBICACION
PARAPETOS Y ORNAMENTOS EXTERIORES		●	●	●	●		●
MUROS PERIMETRALES DE CIERRE		●	●	●	●		
MARQUESINAS		●		●	●		●
VENTANAS		●				●	
VIDRIOS	●				●	●	
ENCHAPES		●					●
TABIQUES		●	●	●	●		
CIELO RASOS		●	●				●
LUMINARIAS		●					
BARANDAS		●		●	●		
TUBERIAS	●	●	●				
SISTEMAS MECANICOS	●	●	●				●
LETREROS		●		●	●		●
SISTEMAS DE TRANSPORTE					●	●	
EQUIPOS		●	●	●			●
MUEBLES		●		●			
INSTRUMENTOS, FRASCOS, ETC.				●			●

FIGURA 3. GUIA PARA LA EVALUACION DE SISTEMAS NO ESTRUCTURALES

ductilidad no puede ser nunca menor que uno, ya que hacerlo implicaría aceptar colapso total o parcial y, consecuentemente, riesgo a la vida humana. De otro lado sí es usual considerar que R resistencia puede ser menor que uno; por ejemplo el ATC-3 - documento ya mencionado anteriormente admite valores de 0.5 para edificaciones comunes y de 0 8 para edificaciones esenciales, como en el caso de hospitales. Esta aceptación de valores menores que uno implica la aceptación de mayores daños.

Un aspecto de suma importancia en el proceso de evaluación lo constituye el análisis detallado de los sistemas, o elementos de la edificación, denominados no estructurales por no pertenecer al sistema estructural primario. Existe evidencia considerable (Lima 1966, 1970 y 1974, por ejemplo), de que es usual que ocurran pérdidas de vida y lesiones, graves daños sísmicos y considerables pérdidas, como consecuencia de la vulnerabilidad de dichos elementos no estructurales, aunque la estructura primaria del edificio permanezca intacta.

En el caso de los hospitales, en adición a los elementos no estructurales comunes a todo tipo de edificación -como son los muros de cierre y tabiques, ventanas, vidrios, parapetos, enchapes, cielos rasos, luminarias, barandas y tuberías existen además equipos pesados y costosos, sistemas mecánicos, tuberías con gases combustibles y comburentes o con líquidos a elevada temperatura y presión, instrumentos delicados y un contenido de sustancias químicas algunas de necesidad vital y otras muy peligrosas cuando son derramadas. Este hecho no solamente puede magnificar la pérdida, sino causar riesgos adicionales como explosiones y/o incendios e incapacitar al hospital para cumplir su función. Por ejemplo: en el sismo de Coalinga (1982), el pequeño hospital comunal tuvo que ser evacuado por casi un mes debido a fallas en sistemas no estructurales de equipamiento y amoblamiento a pesar de que ni la estructura ni la tabiquería sufrieron daño alguno.

Como parte esencial de la inspección ocular -que debe llevarse a cabo de manera detallada en el proceso de evaluación debe identificarse los diferentes sistemas no estructurales a un nivel tal que permita evaluar los diferentes aspectos en que pueden ser vulnerables: flexibilidad, anclaje, arriostramiento, estabilidad, resistencia, aislamiento y ubicación. En la figura 3 se muestra un cuadro que relaciona los sistemas no estructurales con los aspectos que son pertinentes para su evaluación.

BIBLIOGRAFIA GENERAL

1. Earthquake Risk Buildings. National Society for Earthquake Engineering, New Zealand, December 1988.

2 Seismic Considerations, Health Care Facilities. Federal Engineering Management Agency, USA, April 1988.

3. Methods for Evaluating the Seismic Strength of Existing Buildings (ATC-14). Applied Technology Council, USA, 1989.

4. An Action Plan for Reducing Earthquake Hazards of Existing Buildings, Federal Engineering Management Agency, USA, December 1985

5. Long Beach Municipal Code, Sections 8100.8000 through 8100.8014, Subdivision 80, Earthquake Hazard Regulations for Rehabilitation of Existing Structures Within the City, Long Beach, California, USA, 1971

6. O'Connor, E.M., Efforts to Correct Existing Earthquake Hazardous Buildings in the State of California, Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, 1973

7. McClure, F. E., Survey and Evaluation of Existing Buildings, Building Practices for Disaster Mitigation, Building Science Series 46, NBS, U.S. Department of Commerce, USA, February 1973.