

Tema 14

EVALUACIÓN PRE-SÍSMICA DE EDIFICACIONES BAJAS DE CONCRETO ARMADO

IRIA RIVERA DE UZCÁTEGUI

14.1 INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de sismos como el de México 85, Chile 85, Loma Prieta 89, Northridge 94, Kobe 95, han demostrado la vulnerabilidad de muchas edificaciones ante la amenaza sísmica. La experiencia adquirida con los daños causados por estos terremotos y la mayor investigación desarrollada, han obligado a aumentar las exigencias de las Normas Sísmicas, lo que normalmente conduce a edificios mejor preparados para resistir la acción de los sismos. Sin embargo, una cantidad significativa de estas edificaciones fueron construidas antes de la promulgación de estas Normas, y por su estructuración, forma, poca ductilidad, desplazabilidad, pueden ser vulnerables ante la acción de sismos severos, y en algunas ocasiones, de sismos moderados. Por eso es importante conocer la capacidad disponible para sismos, de aquellas edificaciones que fueron construidas para absorber mayormente el efecto de las cargas verticales.

Una definición general de vulnerabilidad sísmica es la probabilidad de que las demandas sísmicas superen a las capacidades y una definición más completa: "Es la probabilidad de que las demandas sísmicas excedan las capacidades de las estructuras en los diferentes estados límites, conduciendo a comportamiento inaceptables durante el resto de la vida de la misma" (14.1).

De acuerdo con la definición de vulnerabilidad, para que la estructura sobreviva a un sismo bajo ciertas condiciones de seguridad implica que la capacidad debe ser mayor que la demanda:

$$C/D > 1 \quad (14.1)$$

donde:

C = Capacidad de la estructura para los diferentes estados límites;

D = Demanda del sismo a la estructura para los diferentes estados límites.

Una estimación confiable de las demandas probables es muy difícil de hacer. Bertero (14.4) estima que las mayores incertidumbres en la predicción de las demandas para establecer criterios de diseño dependen de: "(1) Las excitaciones críticas y las condiciones del sitio durante la vida de servicio de la estructura; (2) El estado del sistema completo suelo-fundación-superestructura-elementos no estructurales, cuando el sismo crítico ocurre; (3) Suministro real de rigideces, resistencia, estabilidad y capacidad de absorber y disipar energía del sistema completo". En cuanto a estos sismos probables, para conducir un análisis más confiable del sismo seleccionado estima que es necesario: "(4) Mejorar la identificación de las posibles fuentes sísmicas que puedan afectar el sitio, (5) Describir completamente y en forma confiable las características dinámicas de los sismos en la fuente; (6) Cuantificar la atenuación o amplificación de los sismos a medida que ellos se propagan de la fuente al sitio; y (7) Estimar los períodos de retorno de los sismos a diferentes niveles de intensidad".

La escogencia del modelo analítico de la estructura "puede conducir a evaluaciones no reales ni conservadoras si las regiones críticas no se localizan correctamente o si algunos modos de falla se pasan por alto. En particular, cualquier estado de daño y deterioro debe cuantificarse en términos de su influencia en la rigidez, resistencia, deformabilidad, disipación de energía y estabilidad en las regiones críticas." (14.1).

En la práctica tener un modelo con todas estas condiciones es muy complicado y consume mucho tiempo, sobre todo para edificios menores, por lo que habrá que hacer muchas simplificaciones que conducen a mayor inseguridad en la predicción de la vulnerabilidad, pero pueden dar ideas generales sobre su comportamiento ante la acción sísmica.

14.2 METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO

Para la evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones existentes se han propuesto numerosas metodologías, que van desde métodos rápidos para edificaciones menores (14.14), a evaluaciones detalladas. A continuación se describen algunas de ellas, en forma resumida.

14.2.1 MÉTODO JAPONÉS

Fue desarrollado en el Departamento de Evaluación del Instituto para Investigaciones de Edificios (14.9). El método presenta los criterios para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios existentes, y cubre edificios de concreto armado, bajos y medianos, así como la evaluación de los elementos no estructurales, especialmente los elementos de fachada y paredes exteriores, que causaron muchos daños en el sismo de Tokachi-oki de 1968.

La seguridad sísmica se obtiene con un índice sísmico de comportamiento I_s :

$$I_s = E_o * G * S_d * T \quad (14.2)$$

donde:

- E_o = Índice de comportamiento básico estructural;
- G = Índice del movimiento del terreno;
- S_d = Índice de la calidad del diseño arquitectónico;
- T = Índice de deterioro con el tiempo.

Estos índices se evalúan por piso, y se desarrollan en tres niveles, desde una evaluación rápida tomando en cuenta solo la contribución de las columnas; hasta la más detallada, que además toma en cuenta la contribución de las vigas. En los tres niveles intervienen, la resistencia del edificio, la deformabilidad y los modos de falla de la estructura, así como la irregularidad del edificio, en planta y elevación, y el deterioro con el tiempo. El primero es adecuado para edificios con muchas paredes, y puede subestimar los edificios que tengan pocas. En general, con esta evaluación se busca ver el comportamiento global de la estructura. Este índice se compara con un índice de juicio Iso. Si Is es mayor que Iso, el edificio está bien. Esta metodología ha sido aplicada a los edificios que sufrieron daños en 1968 (sismo Tokachi-oki), en 1978 (sismo Izuoshima-Kinkai) y en 1978 (sismo Miyagiken-oki), y se encontró que las construcciones cuyos índices Is fueron menores que 0.3 sufrieron daños severos, el daño fue pequeño para Is mayor que 0.6, y se recomendó como índice de juicio en Japón el valor de 0.6. (14.12)

Observaciones: La aplicación de este método a otros países debe ser cuidadosa, porque el índice de juicio está calibrado para Japón, en base a su actividad sísmica y al tipo de construcción. Sin embargo, muchos lineamientos generales son aplicables y la metodología tiene la ventaja que abarca la mayor parte de los aspectos a ser juzgados en el comportamiento de una edificación durante la acción de un sismo

Una simplificación del método japonés en su primer nivel de evaluación se encuentra en la Ref 14.13, que es aplicable cuando no se tengan planos de la estructura, y por lo tanto, no se conozcan los aceros.

14.2.2 MÉTODO FEMA-178 (ATC 22) (1992)

Este método de evaluación se basa en el ATC 14, y su objetivo principal es proveer a los ingenieros involucrados en la evaluación sísmica, de una guía referida al riesgo potencial de la vivienda y de sus componentes, a la vida de las personas. Se considera que un edificio no cumple sus funciones, si durante un terremoto el edificio colapsa total o parcialmente, o los componentes del edificio caen y fallan. El método consiste en estudiar una serie de "puntos débiles" de la estructura y comparar los esfuerzos en los miembros, y la forma en que ellos afecten la respuesta del sistema estructural. Para esto se calcula la capacidad que le queda al elemento para absorber sismos, restando a la capacidad total la demanda de las cargas verticales. Las deficiencias se determinan con el índice de comportamiento.

$$\text{Índice de comportamiento} = \mathbf{De/Ce} \quad (14.3)$$

donde:

De = Demanda sísmica;

Ce = Capacidad remanente de la estructura para resistir sismos

La demanda global se obtiene disminuyendo la demanda del sismo de nuevas construcciones a un 67% en edificios de períodos medianos y a un 85% en edificios de períodos cortos. Las capacidades se estiman sin los factores de reducción de respuesta R de edificios nuevos, y a nivel de elementos se miden los esfuerzos de trabajo.

Al final de la Evaluación el ingeniero debe ensamblar los resultados del análisis y otros aspectos, revisarlas y establecer una lista de deficiencias. La evaluación debe ser mejorada con investigación posterior de los elementos que no cumplan los criterios de aceptación. Los elementos que tengan las mas altas relaciones De/Ce, son los más vulnerables.

Observaciones: El índice de comportamiento solo se mide al nivel de seguridad de la vida. Para su aplicación en Venezuela, en este método se trabaja con construcciones típicas de Estados Unidos, con cargas sísmicas correspondientes a esa zona. La metodología no da idea de los daños.

Los últimos sismos ocurridos, han demostrado que uno de los factores que más contribuyen al daño son las derivas y deformaciones excesivas. También han demostrado que, aunque el edificio no colapse, las pérdidas económicas han sido tan grandes, que el costo de reparación es sumamente alto. En edificaciones esenciales tales como hospitales, que deben seguir funcionando después de un sismo, este control es muy importante. En base a esto, a continuación se presentan algunos métodos en los que se pueden cuantificar los daños por las deformaciones sufridas, basados en procedimientos intermedios entre los métodos lineal elásticos, y los no lineales dinámicos

14.2.3 FEMA 273 (1996)

En esta Guía se presentan criterios y recomendaciones para el **análisis y rehabilitación** de edificaciones existentes, y se sugiere que sean usadas por profesionales y técnicos con conocimiento en el área.

En cada edificio se consideran separadamente el comportamiento de la estructura y de los elementos no estructurales. Para una estructura y un sismo dados, es posible determinar la demanda de fuerzas y deformaciones en la estructura, y por lo tanto, el punto de comportamiento donde el sismo lleva a la misma.

Para el análisis de la estructura se presentan tres procedimientos diferentes. estático lineal, estático no lineal y dinámico no lineal, los dos primeros se pueden realizar usando métodos estáticos o dinámicos. En el método estático lineal, las fuerzas laterales de la estructura se determinan en base a acele-

rogramas, espectros de respuesta o fuerzas laterales simplificadas. Estas fuerzas sin afectar por el factor de reducción R , se combinan con las cargas vivas y muertas y se comparan con la capacidad de fluencia de los componentes. A la relación entre la demanda de resistencias a la capacidad de fluencia se le llama relación demanda-capacidad (DCR), y se toma como una medida de la demanda de ductilidad del elemento. Estos se calculan para cada acción controladora: corte, momento, fuerza axial, y se comparan con los permisibles de ductilidad m , especificados para varios niveles de comportamiento. El criterio de aceptación será:

Para elementos dúctiles:

$$m k Q_{ce} \geq Q_{uD} \quad (14.4)$$

Para elementos controlados por resistencia:

$$k Q_{CL} \geq Q_{UF} \quad (14.5)$$

donde:

m = Factor que toma en cuenta la ductilidad esperada de la deformación asociada con esta acción;

Q_{ce}, Q_{CL} = Resistencia esperada del elemento al nivel de deformación bajo consideración;

k = Factor de conocimiento.

El método estático no lineal consiste en buscar la curva de capacidad de la estructura usando la técnica del Pushover. Esta se calcula colocándole patrones predeterminados de cargas laterales, que representan aproximadamente las fuerzas de inercia que se generan en puntos de masa substancial. Estas cargas se aplican en forma estática y van incrementándose paso a paso hasta que se alcanza el desplazamiento de comportamiento en el techo δ_t , demandado por el sismo (Fórmula 14.6). Los coeficientes C_i representan respectivamente, la relación del desplazamiento espectral y del techo; relación del desplazamiento inelástico máximo esperado a la respuesta lineal elástica; efecto de la forma histerética del máximo desplazamiento y efecto P- Δ .

$$\delta_t = \frac{C_0 C_1 C_2 C_3 S_A (T_1)^2}{4\pi^2} \quad (14.6)$$

$$\mu = K_e / K_s \quad (14.7)$$

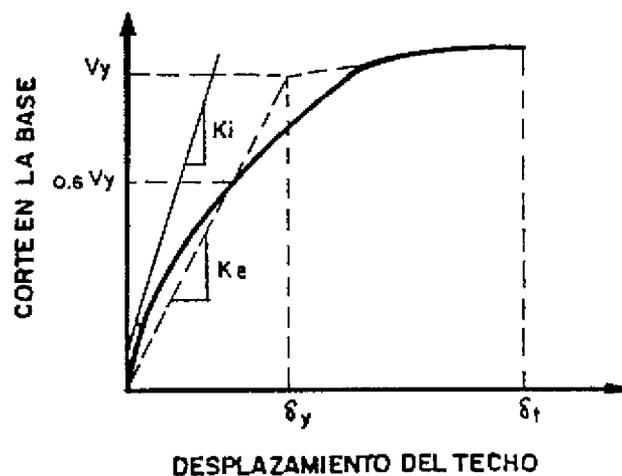
donde:

T_1 = Período fundamental de la estructura;

S_A = Aceleración espectral.

La ductilidad global de la estructura ((Fórmula 14.7), se mide en la curva de capacidad por la relación de la rigidez secante K_e y la rigidez correspondiente al desplazamiento del techo K_s (ver Figura 14.1)

Figura 14.1



CÁLCULO DE LA RIGIDEZ EFECTIVA K_e

Observaciones: Esta guía es bastante completa, toma en cuenta el comportamiento a varios niveles, de la super-estructura, fundaciones, elementos no estructurales y la demanda estimada para esos niveles. Así mismo se trata de tomar en cuenta los efectos de daños originados en la estructura por cargas histeréticas, etc. Como es para rehabilitar, se le exige el comportamiento de una estructura nueva, por lo que es poco probable que las estructuras viejas alcancen los niveles de comportamiento especificados.

14.2.4 MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD

Desarrollado inicialmente en la Ref. 14.6, como un Método de evaluación rápida para las Fuerzas Navales de los Estados Unidos, se usa para aproximar el nivel de comportamiento estructural, y consiste en calcular la curva de capacidad hasta el colapso de la estructura de múltiples grados de libertad, por el método del Pushover, transformarla a un grado de libertad y llevarla a valores espectrales de aceleraciones y desplazamientos. Las demandas del sismo y la capacidad se representan en el mismo gráfico. Si la curva de capacidad va más allá de la de demanda, el edificio sobrevive al sismo.

1) Estimación de la curva de capacidad: Se calcula igual que el procedimiento anterior, excepto que en este caso el proceso paso a paso se repite hasta que se presente un mecanismo de falla, inestabilidad o deriva excesiva. En cada paso se calculan el desplazamiento del techo (δ_t) y el cortante del edificio (V). Uniendo los puntos (δ_t , V), se obtiene la curva de capacidad simplificada (ver Figura 14.2). Para estructuras regulares de hasta tres pisos la carga lateral se puede representar por el primer modo de vibración de la estructura o por una carga triangular invertida. Los desplazamientos y fuerzas se llevan a valores espectrales, usando las Fórmulas (14.8) y (14.9).

$$S_a = \frac{V / W}{\alpha}; \quad \alpha_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{im}\right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \sum_{i=1}^n m_i \phi_{im}^2} \phi_{tm} \quad (14.8)$$

$$S_d = \frac{\delta_t}{PF_{tm}}; \quad PF_{tm} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{im}}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2} \phi_{tm} \quad (14.9)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a g}} \quad (14.10)$$

donde:

S_a, S_d = Aceleración y desplazamiento espectrales;

V = Fuerza cortante en la base;

W = Peso total;

δ_t = Desplazamiento del techo;

PF_{tm} = Factor de participación modal en el nivel de techo para el modo m ;

m_i = Masa asignada al nivel i ;

ϕ_{im}, ϕ_{tm} = Amplitudes del modo m en los niveles i y techo;

n = nivel n ;

T = Período fundamental de la estructura.

2) En la Figura 14.2 se presentan los espectros de respuesta elástica, calculados con 5% de amortiguamiento, y el 10% para la capacidad última, o cualquier otro valor estimado.

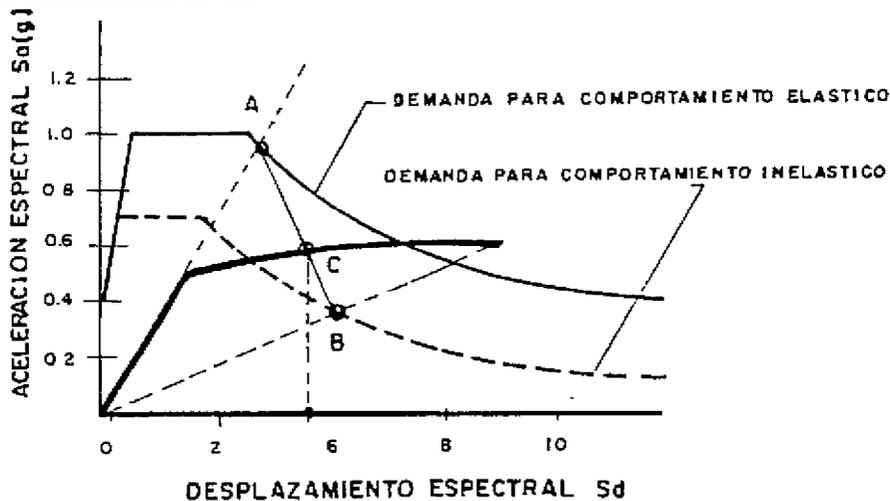
3) Para satisfacer la demanda, es necesario que la curva de capacidad se extienda más allá del espectro inelástico. Para conseguir el punto de comportamiento C, correspondiente al desplazamiento demandado por el sismo en la Figura 14.2, en la Ref. 14.5 se propone lo siguiente: a) Extender la porción elástica del espectro de capacidad hasta que se intercepte con el espectro de demanda elástica, punto A de la curva. b) Dibujar una línea desde el origen hasta el punto final de la curva de capacidad y conseguir el punto de intersec-

ción de esta línea con el espectro de respuesta inelástica, este es el punto B. c) Dibujar una línea que conecte los puntos A y B. La intersección de la línea AB con la curva de capacidad define el punto de comportamiento C de la estructura. d) Obtener el valor del desplazamiento espectral S_{dc} correspondiente al punto C.

4) Calcular el desplazamiento del techo de la estructura δ_{tc} de la Fórmula (14.11). Con este valor ir a la curva de capacidad, y calcular las demandas del sismo, tanto a nivel de la estructura como de elementos, y comparar con las capacidades reales de la estructura, de derivas, rotaciones, resistencias, etc

$$\delta_{tc} = S_{dc} * PF_n \quad (14.11)$$

Figura 14.2



ESTIMACIÓN DEL PUNTO DE COMPORTAMIENTO

Observaciones al método: No toma en cuenta la degradación de rigidez real por ciclos sucesivos de la acción sísmica. En la Ref. 14.3 se hacen las siguientes observaciones: "1) Conceptualmente no se puede obtener el espectro de respuesta inelástica del elástico simplemente incrementando el valor del amortiguamiento. 2) En la comparación directa de los espectros de capacidad y demanda, el cambio estimado en el período solo puede ser efectivo para reducir la respuesta, en el caso de que induzca en la estructura una respuesta cíclica, cuya intensidad pico se incremente con el tiempo. La comparación será completamente incorrecta para el caso de sismos impulsivos, que requieren que la deformación máxima se dé en un ciclo". Variaciones al método para mejorar la técnica de determinación del punto de comportamiento en las Refs. 14.2 y 14.10.

14.2.5 EVALUACIÓN EN BASE A UN ANÁLISIS NO LINEAL HISTORIA-TIEMPO

Este tipo de análisis consume mucho esfuerzo y tiempo; sin embargo, en ciertas condiciones y estructuras, conviene evaluar el comportamiento de las estructuras de esta manera.

14.3 REVISIÓN DE LAS EDIFICACIONES VENEZOLANAS

Para estimar la variación de la resistencia de nuestras construcciones con el año de cálculo y construcción, se hizo un estudio de las Normas Venezolanas para el cálculo de estructuras de concreto desde 1955 hasta el presente.

Hasta 1967, año en que ocurre el terremoto de Caracas, las Normas Venezolanas tenían muy pocas restricciones sísmicas, las construcciones estaban detalladas para resistir mayormente cargas verticales, los elementos estructurales no tenían confinamiento, las vigas no estaban diseñadas para una inversión de cargas sísmicas, y se usaban con bastante frecuencia las vigas con capacidad de disipación de energía y ductilidad pequeños. De los años 70 a los 80, las exigencias de fuerzas laterales sísmicas aumentaron y se redujo la separación máxima entre estribos; pero no la exigencia de que estos se colocaran con ganchos anclados dentro del núcleo de concreto, por lo que es posible que ante demandas sísmicas altas, los estribos no den un confinamiento adecuado. Al inicio de la década de los 80 se publicaron las Normas Venezolanas "Edificaciones Antisísmicas" (1982), y "Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones Análisis y Diseño" (1981), en las que se recomendaban mayores fuerzas sísmicas y mejor confinamiento de las juntas de pórticos. Desde 1982 hasta el presente existe un problema constructivo, muchos maestros de obra no colocan los estribos dentro del núcleo confinado de concreto, y si la inspección no es exigente, es posible que muchas de estas construcciones, aún después de los 90, no tengan las vigas y columnas completamente confinados con estribos dentro del núcleo de concreto.

Otro aspecto importante es que aún las estructuras diseñadas con Normas modernas pueden sufrir muchos daños, debido al uso de factores de ductilidad de desplazamiento muy altos, lo que hace que las demandas reales a nivel de miembros sean muy grandes y aunque no se produzca el colapso, los daños pueden ser tan graves que las estructuras pueden resultar irreparables, o los costos de reparación muy elevados.

Algunos de los aspectos positivos de las construcciones hasta 1980 son los siguientes: al diseñar por línea recta, los factores de seguridad son mayores que por rotura; las luces eran pequeñas, por lo que había falta un mayor número de apoyos intermedios, y como consecuencia, mayor redundancia estructural. Todo esto hace que estas construcciones tengan una sobre resistencia, que les permite sobrevivir a algunos sismos posibles. Esto se demostró en el terremoto de México de 1985.

En base al estudio anterior se propone, para efectos de evaluación por métodos aproximados y de acuerdo con el año de construcción, usar los valores de ductilidad de desplazamiento disponible, de la Tabla 14.1.

TABLA 14.1

AÑO DE CONSTRUCCIÓN	HASTA 1970	DE 1970 A 1985	DESPUES DE 1985
Nivel de diseño asumido	ND1	Un poco menor de ND2	ND3
Ductilidad disponible	2	3	4-6

14.4 PASOS A SEGUIR PARA LA EVALUACIÓN SÍSMICA

- 1) Localizar la edificación y hacer una inspección minuciosa de la misma:
 - Examinar con cuidado el tipo de suelo; observar si hay posibilidades de deslizamientos cerca de la edificación, que signifiquen un riesgo para la edificación.
 - Examinar cuidadosamente los elementos estructurales, tratando de detectar grietas, deterioro en el concreto y corrosión de aceros; deflexiones de la estructura y agrietamientos en paredes que puedan indicar asentamientos diferenciales.
 - Observar si existen elementos no estructurales que estén adosados a la estructura, que puedan afectar su comportamiento sísmico, tales como paredes que produzcan columnas cortas, elementos que puedan producir asimetría, tanto en planta como en elevación; cambios de rigidez y de masas, cambios de uso, edad (la edad es muy importante, porque permite establecer posibles distribuciones de aceros y ductilidades cuando no se tengan planos).
 - Estudiar si los elementos no estructurales, tales como muros, lámparas, instalaciones eléctricas y sanitarias, están bien anclados, sin peligro de desprenderse.
- 2) De ser posible, obtener planos de la edificación y comprobar si las luces y las dimensiones de los elementos estructurales se corresponden en la realidad. Si no existen planos, es necesario hacer un levantamiento de la estructura, con todos los elementos resistentes a fuerzas laterales
- 3) Hacer pruebas en sitio de las resistencias del concreto, de ser posible, con extracción de núcleos de concreto. Para el acero, cuando no haya planos, en base a la fecha de construcción se puede establecer la resistencia. En última instancia se pueden tomar muestras en zonas que no comprometan el comportamiento del elemento.
- 4) En base a las condiciones anteriores, establecer un modelo de la estructu-

ra, en donde se incluyan las condiciones actuales de deterioro con el tiempo, condiciones reales de detallado de aceros, estado real de las cargas muertas y sobrecargas, rigideces, etc.

5) Establecer el sismo probable que amenazará a la estructura, por medio de cargas sísmicas de la Norma o espectros de respuesta, o acelerogramas de sismos reales o artificiales, que sean compatibles con el sitio.

6) Estimar las capacidades de la estructura, estas pueden estar representadas por resistencias, esfuerzos, derivas, rotaciones, o cualquier otro parámetro. Cuando se estimen las capacidades, debe incluirse el efecto de las losas y cualquier otro aspecto que pueda cambiar el comportamiento de la estructura. No deben incluirse factores de disminución de resistencias, para conseguir una buena estimación de la condición real de la estructura.

7) Asegurarse que la capacidad sea mayor que la demanda. En construcciones que no hayan sido diseñadas con Normas modernas, es poco probable que la estructura tenga suficiente capacidad para resistir la demanda sísmica. Si ese es el caso, al tratarse de una edificación esencial, debe reforzarse para resistir la máxima demanda probable exigida por las Normas actuales. Para otro tipo de edificaciones, la relación D/C puede permitirse que baje de 1, por ejemplo, hasta 2/3. Eso significa que estamos aceptando un riesgo mayor de colapso.

14.5 EVALUACIÓN DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO DE LOS ANDES

14.5.1 PRIMERA EVALUACIÓN

Fue originalmente realizada en 1988 por los Profesores del Grupo de Investigación Sísmica, Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. En esa oportunidad se quería hacer una evaluación rápida de algunas edificaciones esenciales de la Ciudad, por lo que se escogieron las más importantes, entre ellas, el Hospital. Además de ser una edificación esencial, es el más importante del Estado, por lo que, en una emergencia sísmica debe seguir prestando sus servicios sin interrupción y en las mejores condiciones posibles. En este caso es muy importante el estudio, no solo de la edificación y del sitio de ubicación, sino de las posibilidades de acceso al mismo.

Fecha de Construcción: 1962

Ubicación: El Hospital en referencia está localizado en la parte sur-este de la Ciudad de Mérida a una distancia aproximada de 240 mt de un talud que da al Río Chama. Esta distancia podría ser suficiente para considerar que en el caso de un desprendimiento del talud, el Edificio no sufriría desperfectos a causa de ello.