

Consideraciones sobre Seguridad en el Diseño Sísmico de Hospitales

Dr. Yuji Ishiyama

Resumen

El objetivo de este artículo es presentar consideraciones para proteger el funcionamiento de hospitales durante y después de terremotos. Para facilitar el entendimiento de estas consideraciones, son explicados el comportamiento de edificios y de cuerpos rígidos durante sismos. Finalmente, consideraciones sobre edificios de hospitales y equipos médicos son recopilados, es decir, selección del lugar, configuración estructural del edificio, resistencia, rigidez y ductilidad adecuadas de los elementos estructurales y sus conexiones, ventajas del sótano, conexiones de tuberías al edificio, localización de los ambientes importantes, prevención al volteo de cuerpos, fijación de las ruedas de muebles y adopción de bases de aislamiento.

Introducción

Para proteger el funcionamiento de un hospital durante y después de terremotos, la resistencia sísmica de edificios para hospitales y equipos médicos son esenciales. Sin embargo, los pacientes y los ocupantes deben ser protegidos contra daños y evacuaciones obstruidas debido al volteo o deslizamiento de muebles o equipos. Este artículo presenta el comportamiento de

edificios y cuerpos rígidos durante terremotos así como consideraciones para proteger el funcionamiento de hospitales en caso de sismos.

Comportamiento de edificios en terremotos

Cuando un edificio está sujeto a movimientos sísmicos, éste vibra con el período natural del edificio. La Figura 1 indica que el 9º piso experimenta una aceleración cuatro veces mayor que la del nivel del terreno en la dirección N-S, 2.6 veces mayor en la dirección E-O y 2.3 veces mayor en la dirección arriba-abajo.

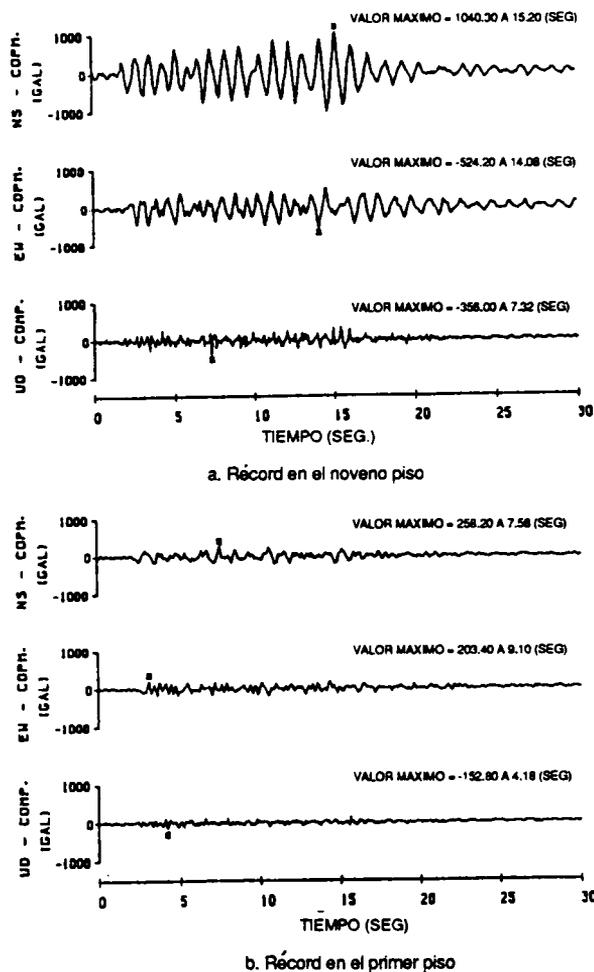


Figura 1. Registros de movimientos sísmicos, terremoto de Miyagi-oki, 12 de junio 1978.

En algunos casos la parte media del edificio puede tener menores vibraciones que las otras partes (ver Figura 2C).

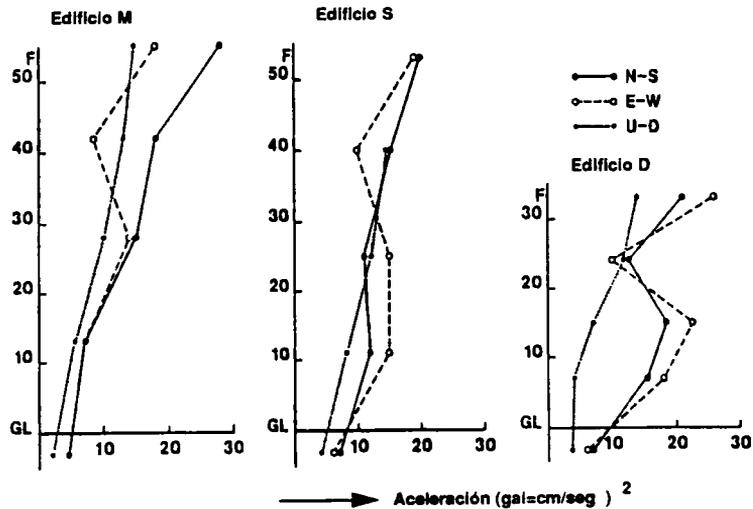


Figura 2. Distribución de máximas aceleraciones en edificios, terremoto de Izuoshima-kinkai, 14 de enero 1978.

La magnitud de la vibración depende de la magnitud del sismo, distancia del epicentro, condiciones de suelo, etc.

La magnitud M indica el tamaño del sismo. Una fórmula empírica que dá una relación entre la energía liberada E (ergios) y la magnitud M es:

$$\log E = 11.8 + 1.5 M \quad (1)$$

Se debe notar que cada unidad de incremento en la magnitud origina 32 veces el incremento de la energía y dos unidades de crecimiento en la magnitud origina 1000 veces el incremento de la energía. Esta relación muestra que miles de pequeños sismos de $M < 6$ tienen que ocurrir para liberar la energía de un sismo de $M=8$.

La severidad de los movimientos sísmicos observada en algún punto se llama *intensidad* del sismo. En Japón, la escala que usa la agencia meteorológica del Japón (JMA) tiene 8 puntos de rango desde 0 (no sensación) hasta VII (desastroso) (ver Tabla 1). En los Estados Unidos, y en

muchos otros países, se usa la escala de Mercalli Modificada, la cual tiene un rango desde I (no sentido) hasta XII (total destrucción) (ver Tabla 2). Desde que la escala de intensidad no es un único valor, podemos poner atención a qué escala es usada para estimar la real intensidad en el lugar.

Escala JMA		Descripción	Max. aceleración del terreno (gal)
0	No sentido	Registrado por sismógrafos pero no perceptible por humanos	bajo 0.8
I	Ligero	Sentida por personas en reposo o personas especialmente sensitivas a terremotos	0.8 - 2.5
II	Débil	Sentida por la mayoría de personas, ligero ruido de puertas y deslizamiento de puertas enrejadas, de paneles al estilo japonés (shoji)	2.5 - 8.0
III	Algo	Vibración de casas y edificios, fuertes ruidos de puertas y "shoji", balanceo de candelabros (arañas) y otros objetos colgantes, movimiento de líquidos.	8.0 - 25
IV	Fuerte	Movimientos fuertes de casas y edificios, volcadura de objetos inestables, derramamiento de líquidos de las vasijas llenas hasta los 4/5.	25 - 80
V	Muy fuerte	Fisuras en los morteros de las paredes, volcaduras de lápidas y linternas de piedra, daños en chimeneas de mampostería y almacenes revestidos con barro.	80 - 250
VI	Desastroso	Demolición de un 30% de casas de madera japonesas, numerosos deslizamientos de tierra y fallas de terraplenes, fisuras en terrenos planos.	250 - 400
VII	Ruinoso	Demolición de más del 30% de casas de madera japonesas.	sobre 400

Tabla 1. Escala de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA)

Escala MM	Descripción	Max. aceleración del terreno(gal)
I	No sentida, excepto por unos pocos en condiciones especialmente favorables.	Bajo 1
II	Sentido solo por personas en reposo en lugares tales como los pisos superiores de edificios. Balanceo de objetos delicadamente suspendidos.	1 - 2
III	Sentido por muchas personas en lugares tales como los pisos superiores de edificios, pero de un grado tal que muchas personas no lo reconocen como un sismo. Automóviles estacionados pueden mecerse ligeramente como si fuera causado por vibraciones de un camión que pasa. La duración puede ser medida.	2 - 5
IV	En el día, sentido por muchos en interiores, pero por pocos en el exterior. Disturbaciones de vasijas, ventanas, puertas y crujido de paredes. Sensación como si un pesado camión golpease al edificio. Automóviles estacionados se mecen considerablemente.	5 - 10
V	Sentido por todos, muchos son despertados, algunas vasijas y vidrios de ventanas se rompen, el mortero de la pared se puede romper, volcadura de objetos inestables. A veces se notan disturbancia de polos del teléfono, árboles y otros objetos altos, relojes de péndulo paran.	10 - 21
VI	La gente se asusta y corren al exterior. Pesados muebles pueden moverse, en algunos lugares cae el mortero, caída de chimeneas, daños ligeros.	21 - 44
VII	Todos corren fuera de la casa. Daños insignificantes en edificios de buena construcción y diseño, ligeros a moderdos en estructuras comunes, y considerables en edificaciones malas o mal diseñadas estructuralmente, rotura de chimeneas, sentido en autos en movimiento.	44 - 94
VIII	Algunos daños en edificios de buena construcción y diseño, considerables daños en construcciones comunes con algunos colapsos, grandes daños en edificaciones pobremente construidas. Muros de diafragma son sacados fuera de la estructura aporticada, caída de chimeneas de fábricas y casas, columnas, monumentos y paredes. Volcadura de muebles pesados. Arena y lodo es lanzado en pequeñas cantidades. Cambios de pozos de agua. Molestias en el manejo de automóviles.	94 - 202

- | | | |
|-----|--|-----------|
| IX | Considerables daños en edificios de buen diseño y 202 - 432 construcción. Estructuras son sacadas de su alineamiento con las cimentaciones, rajaduras visibles en el suelo. Daños en tuberías enterradas. | |
| X | Casas de madera de buen diseño y construcción colapsan. Muchas de las estructuras de albañilería y aporticadas son destruidas con cimentaciones. Fisuras en el suelo originan daños, durmientes de rieles, pendientes y terraplenes se deslizan. Elevación del nivel de agua. | Sobre 432 |
| XI | Casi todas las estructuras de albañilería colapan. Puentes destruidos. Fisuras sobre todo la superficie del suelo. Tuberías bajo el terreno son completamente puestas fuera de servicio. Asentamiento de tierras y deslizamiento de suelos blandos. Prominentes de durmientes de rieles. | Sobre 432 |
| XII | Total daño. Las ondas son transmitidas a la superficie del terreno. Cambios en la topografía. Objetos vuelan por el aire. | Sobre 432 |

Tabla 2. Escala Mercalli Modificada(MM).

Comportamiento de cuerpos antisísmos

Cuando un cuerpo sobre un piso es sujeto a excitaciones sísmicas, el cuerpo podría permanecer en reposo mientras las excitaciones no son grandes. Cuando las excitaciones llegan a ser lo suficientemente grandes, el cuerpo puede rotar, deslizarse, saltar o tener una combinación de esos movimientos.

El autor ha desarrollado programas de cómputo para tratar algún movimiento plano de un cuerpo rígido sobre el piso sujeto a excitaciones verticales y horizontales. (1)

Para estudiar los movimientos de los cuerpos y las condiciones para el volteo de éstos, fueron realizadas simulaciones usando los programas de cómputo desarrollados así como experimentos en mesa vibratoria en pruebas con extensión de frecuencias. En las pruebas con extensiones de frecuencia, la aceleración, velocidad o amplitud de desplazamiento fueron mantenidas

constantes, cambiando gradualmente la frecuencia fueron medidas las condiciones de volteo del cuerpo.

Resultados típicos de experimentos del volteo de cuerpos en la prueba con extensión de frecuencias se muestra en la Figura 3.

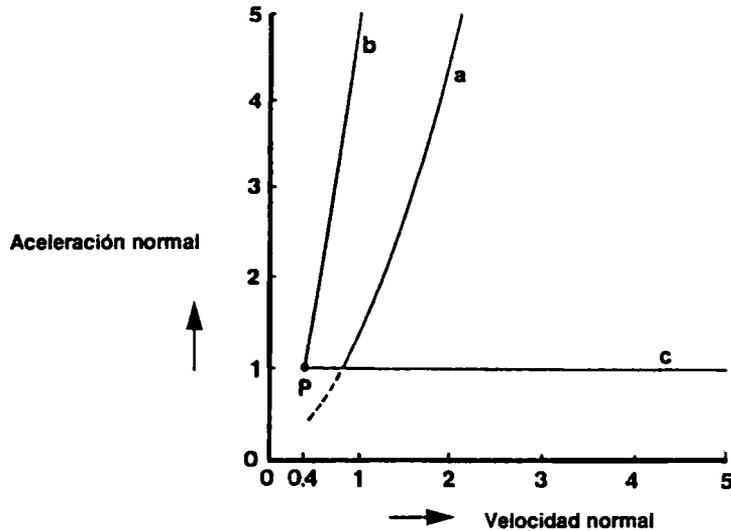


Figura 3. Límites inferiores de volcadura en pruebas de extensión de frecuencia.

En la figura la ordenada representa la aceleración normalizada, la cual es definida como la amplitud de la aceleración horizontal "a" necesaria para iniciar el movimiento de rotación del cuerpo, esto es:

$$a = \frac{b}{h} g \quad : \text{ F\u00f3rmula de West} \quad (2)$$

donde b/h es la relaci\u00f3n ancho-altura (ver Figura 4) y g es la aceleraci\u00f3n de la gravedad, y la abscisa es la velocidad normalizada la cual es definida como la amplitud de la velocidad dividida entre la velocidad v necesaria para el volteo de un cuerpo por un simple golpe (choque) horizontal, esto es:

$$v = \frac{2g}{r} (i^2 + r^2) \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha}$$

donde α es el ángulo entre la vertical y la línea desde O hasta G del cuerpo en reposo, i es el radio de giro del cuerpo respecto a G y r es la distancia desde O hasta G (ver Figura 4).

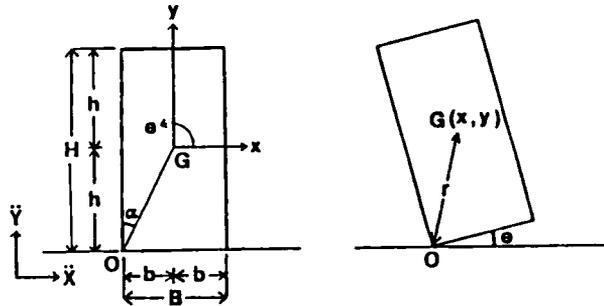


Figura 4. Cuerpo en movimiento.

Se encontró que los resultados en la figura 3 no fueron muy afectados por los materiales componentes del cuerpo y del peso, y de los parámetros implicados: es decir, tamaño del cuerpo b/h , coeficiente de fricción, coeficiente de restricción, magnitud de la excitación vertical y la fase entre las excitaciones verticales y horizontales.

En la figura 3 hay tres tipos de volteos (ver Figura 5) en el caso de pruebas con extensiones de frecuencia de aceleración constantes, el cuerpo usualmente inicia el movimiento de rotación en la fase inversa y el volteo desde esta rotación de fase inversa (ver Figura 6a) ocurre cuando la excitación de ingreso alcanza la curva "a" en la figura 3, pero si el cuerpo inicia un movimiento de giro sub-armónico, el volteo de giro subarmónico ocurre (ver Figura 7b) en la curva b de la Figura 3. Es difícil decir las condiciones que hacen que el cuerpo llegue a la fase inversa o a la prueba con extensiones de amplitudes de desplazamiento, el cuerpo repite esto "en fase" un movimiento de rotación solo unas pocas veces y el volteo en fase de rotación ocurre (ver Figura 6C) en la línea C de la figura 3.

De los resultados de esas simulaciones y experimentos, se encontró que los límites inferiores de aceleración normalizada y la velocidad necesaria para el volteo del cuerpo (punto P en la Figura 4) no están muy afectadas por los parámetros componentes. Sin embargo podemos estimar el criterio de volteo de un cuerpo como sigue: la amplitud de la aceleración a_0 , la cual es el

límite inferior de la aceleración horizontal máxima para el volteo del cuerpo, es aproximadamente igual a la aceleración normalizada.

$$a_0 = \frac{b}{h} g = \frac{B}{H} g \quad (5)$$

donde B y H son el ancho y la altura respectivamente de un cuerpo rectangular.

La amplitud de la velocidad V_0 , la cual es el límite inferior de la velocidad máxima para el volteo del cuerpo, es aproximadamente 0.4 veces la velocidad normalizada.

$$v_0 = 0.4 \frac{2g}{r} (i^2 + r^2) \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha} \quad (6)$$

en el caso de un cuerpo rectangular:

$$v_0 = 0.4 \frac{8gr}{3} (i^2 + r^2) \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha} \quad (7)$$

Si α es pequeño

$$v_0 = 0.4 \frac{4gb}{3} \alpha = 10 \frac{B}{H} \quad (8)$$

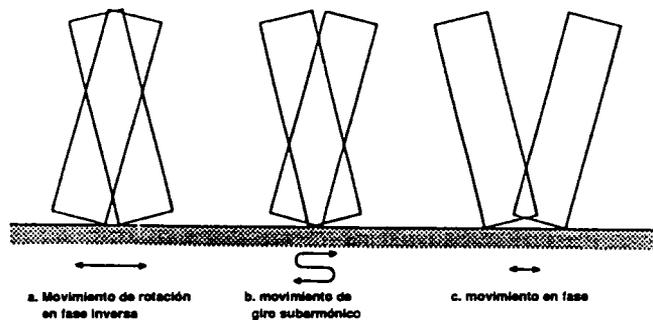
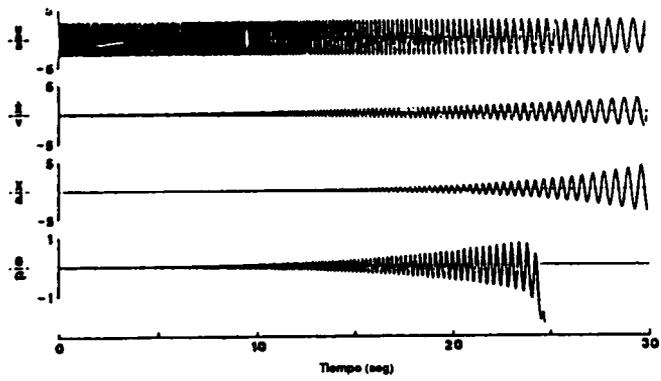
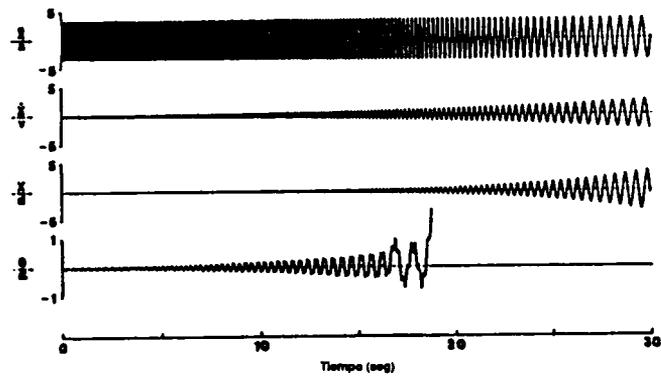


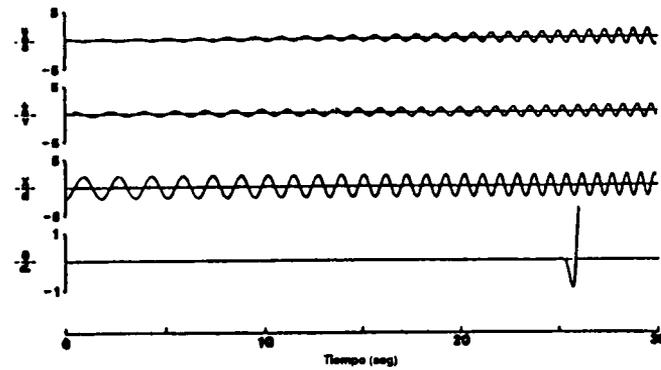
Figura 5. Tres tipos de movimiento de rotación antes del volteo.



a. Volcadura de fase de rotación inversa



b. Volcadura de rotación subarmónica



c. Volcadura de rotación en fase

Figura 6. Aceleraciones, velocidad y desplazamiento del piso y desplazamiento angular del cuerpo.

Considerando la amplitud del desplazamiento, ésta es mayor que el valor que hace la aceleración normalizada igual a 1.0 y la velocidad normalizada igual a 0.4. Luego usando la relación $V_o^2 = a_o d_o$, la amplitud del desplazamiento d_o , la cual es el límite inferior del máximo desplazamiento necesario para el volteo del cuerpo, esta dado por:

$$d_o = \frac{v_o^2}{a_o} \quad (9)$$

en el caso de un cuerpo rectangular y si α es pequeño

$$d_o = \frac{B}{10} \quad (10)$$

Usando el criterio de volteo de un cuerpo dado por las ecuaciones (5), (7), (9), el diagrama para estimar los límites inferiores de las máximas aceleraciones, velocidad y desplazamiento del tamaño de un cuerpo rectangular homogéneo volteado, puede ser realizado como se muestra en la Figura 8. Se puede notar que la aceleración no es solamente el factor de volteo sino también la velocidad es tan importante como la aceleración; consecuentemente el desplazamiento llega a ser tan importante como esos dos factores.

Simulaciones de excitaciones sísmicas actuales muestran que el criterio es también aplicable a excitaciones sísmicas. Por consiguiente, podemos estimar los límites inferiores de la máxima aceleración horizontal y la velocidad de excitaciones inducidas del tamaño del cuerpo volteado, o la posibilidad de volteo del cuerpo si se da las dimensiones de éste, y la máxima aceleración y velocidad de excitación de la Figura 7.

Si la posibilidad de volteo es marcada, el cuerpo deberá ser fijado a una parte estable del edificio. Dos métodos son considerados para fijar un cuerpo. Uno es fijar la base del cuerpo al piso y otro es fijar la parte superior de este a la pared. Por ejemplo, consideremos el caso de fijar el estante de la figura 8, cuando éste se fija al piso (ver figura 8a) la fuerza F aplicada a la base es más de dos veces el peso del estante, sustituyendo el coeficiente sísmico horizontal $K_h = 1/5$ y $p = 2b$.

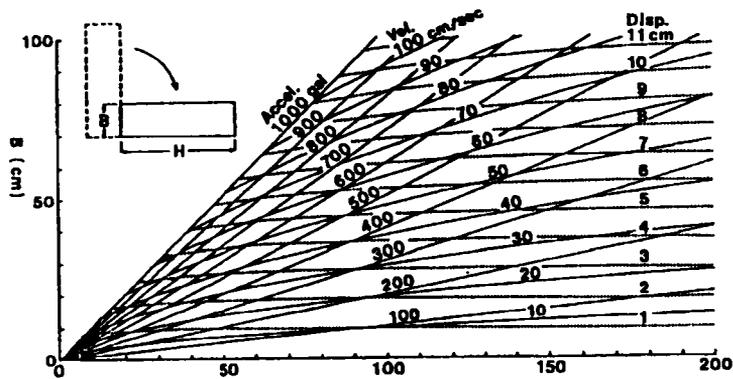


Figura 7. Límites inferiores de aceleración, velocidad y desplazamiento para la volcadura de cuerpos homogéneos rectangulares.

Cuando es fijado a la pared (ver figura 8b) la fuerza P aplicada a la parte superior del estante es aproximadamente $1/3$ del peso del mismo, sustituyendo las mismas condiciones y $q = 2h$, por lo tanto fijando la parte superior del estante a la pared es más efectivo y fácil que fijarlo en el piso. En ambos casos, la pared y el piso deberán ser lo suficientemente fuertes para resistir esas fuerzas.

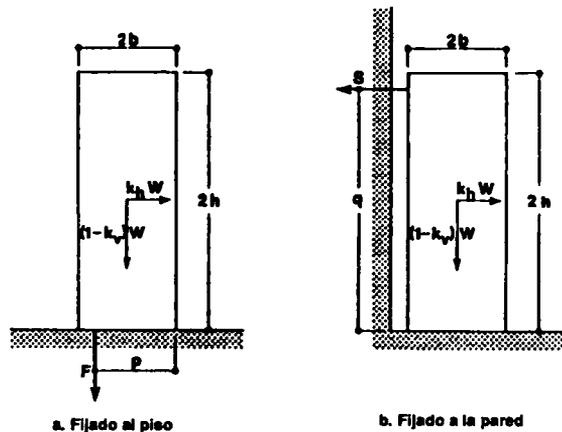


Figura 8. Estante fijado al piso o a la pared.

Consideraciones en hospitales y equipos médicos contra terremotos

Revisando el comportamiento de edificios y los objetos dentro de éste durante terremotos y experimentos, los siguientes ítems podrían ser señalados para proteger hospitales contra terremotos. (2)

- ▶ ***Selección del lugar:*** La selección del sitio es probablemente uno de los más importantes factores para la seguridad de hospitales. El terreno debe ser firme. Deben ser evitadas arenas saturadas debido a su potencial de licuefacción durante los terremotos. Se deberá evitar también lugares donde existe riesgo de deslizamiento de tierras, los cuales pueden ser causados por terremotos.
- ▶ ***Construcción y configuración estructural:*** La construcción y la configuración estructural deben ser simples tanto en planta como en la elevación. Edificios de configuraciones complicadas pueden ser sujetos a movimientos severos en ciertas partes del edificio, mayores que las consideradas. Cuando son diseñadas estructuras de formas complicadas, se deberá realizar un preciso análisis dinámico para chequear el comportamiento potencial de la estructura.
- ▶ ***Adecuada resistencia, rigidez y ductilidad de elementos estructurales y conexiones:*** Los elementos estructurales con adecuada resistencia, rigidez y ductilidad deben ser colocados para resistir fuerzas sísmicas. Similares consideraciones se deberán dar a las conexiones entre los elementos. Muros cortantes y arriostres son muy efectivos para resistir fuerzas laterales y para limitar la deformación de la estructura la cual minimizará la inconveniencia en el uso de la estructura y la seguridad pública de riesgo.
- ▶ ***Ventaja de sótano:*** La existencia de sótano parece incrementar la capacidad resistente a los sismos del edificio aunque esto no está claramente establecido en algún reglamento de construcción. El sótano será especialmente efectivo cuando el edificio va a ser construido en suelo blando.
- ▶ ***Conexiones de tuberías en los edificios:*** Las conexiones de tuberías en el edificio son vulnerables a los daños causados por terremotos los cuales pueden empeorar completamente las funciones del hospital. Las conexiones deben ser protegidas de las dislocaciones entre el piso y el edificio.

- ▶ *Ubicación de ambientes importantes:* Los ambientes importantes como sala de operaciones, etc. deberán estar en la parte baja del edificio para evitar las grandes vibraciones durante terremotos.
- ▶ *Prevención de volcadura de cuerpos:* Estantes y repisas para instalar medicinas, etc. deberán ser sujetos a paredes fijas para prevenir su volteo. La posibilidad de volteo puede ser estimada por la Figura 8. Las puertas de los estantes deberán cerrarse con llave de manera que no se abran durante el movimiento.
- ▶ *Bloqueo de ruedas de muebles:* Los equipos médicos con ruedas son susceptibles a chocar y bloquear las evacuaciones, por esto las ruedas deben ser bloqueadas. Pruebas en mesa vibratoria indican la efectividad de bloqueo de ruedas diagonalmente. (3)
- ▶ *Adopción de base de aislamiento:* Para proteger las partes más importantes, se recomienda la adopción de una base de aislamiento del edificio, desde que la base de aislamiento de todo el edificio es muy costoso y no es aplicable a edificios existentes, aplicaciones del aislamiento de vibraciones del piso serán muy prácticas.

Conclusiones

Para proteger hospitales contra terremotos, numerosas consideraciones deberán tomarse en cuenta, alguna de ellas son: selección de lugar, construcción y configuración estructural, adecuada resistencia, rigidez y ductilidad, ventaja de sótano, conexiones de tuberías al edificio, ubicación de ambientes importantes, prevención de volcadura de cuerpos, bloqueo de ruedas de muebles y adopción de base de aislamiento.

Referencias

- (1) ISHIMAYA, Y. "Criterio para el volteo de cuerpos rígidos ante excitaciones sísmicas y sinusoidales", Proc de 8 SCEE, Agosto (1984)
 - (2) "Bases para diseño de Estructuras - Acciones sísmicas en estructuras", ISO 3010, Organización Internacional para Normalización, julio (1988).
 - (3) MIZUNO, H. "Comportamiento sísmico y evaluación de riesgo de equipos médicos con ruedas", Proc. de GWCEE, agosto (1988).
- (*WCEE - Conferencia Mundial de Ingeniería Antisísmica)

