

## ANALISIS MATEMATICO SISMO-RESISTENTE DE DOCE HOSPITALES

### Resistencia de Fluencia, Ductilidad, Mecanismos de Falla y Distorsiones de Pisos.

Son algunos conceptos que se utilizarán en la interpretación de los resultados de los análisis y que se exponen a continuación

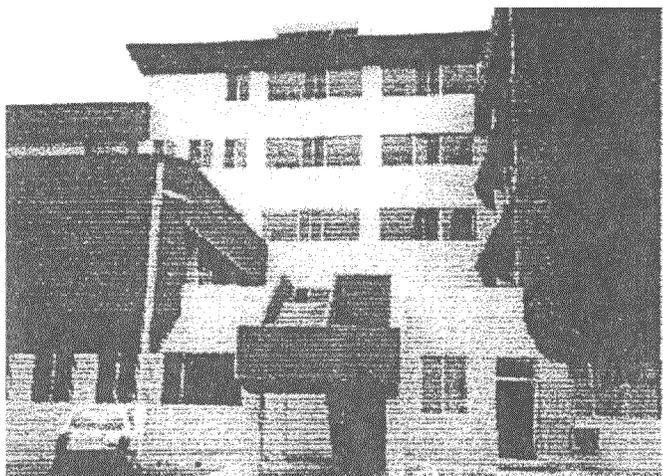
La resistencia de fluencia del hormigón armado equivale aproximadamente al 95% de su capacidad de resistencia última o de falla y corresponde a un nivel de esfuerzos a partir del cual los elementos pierden rigidez drásticamente y desarrollan deformaciones de tipo plástico que producen daño no irreversible.

La ductilidad es la razón entre la deformación en la falla o colapso y la deformación de cedencia, mide por tanto, la capacidad de un elemento para deformarse sin experimentar colapso. Elevadas ductilidades en los elementos son recomendables para prevenir su falla frágil o súbita después de la cedencia, para dotar a la estructura de una buena ductilidad global que incremente su nivel de sismo-resistencia y para poder configurar un mecanismo de falla o colapso controlado que minimize los daños a las personas que habitan la estructura

La ductilidad global, mide la capacidad sismo-resistente de la estructura y depende no solo del diseño dúctil de los elementos, sino también de la distribución de los esfuerzos al interior de la estructura y de la posibilidad de configurar un mecanismo de falla controlada. Con relación a los hospitales, el uso de formas arquitectónicas asimétricas y desproporcionadas con plantas en forma de "H", "L", "T", "I" y cambios bruscos de elevación ha contribuido a incrementar la vulnerabilidad (Referencia No. 9). La configuración arquitectónica propicia en éstos casos la concentración de esfuerzos en zonas críticas, mecanismos de colapso frágil y limita la capacidad de la estructura para desarrollar una adecuada ductilidad.

El mecanismo de falla protege a las estructuras de un colapso frágil. Para configurar un mecanismo de falla controlada y dúctil se requiere cumplir algunos requisitos, el más importante de los cuales consiste en dimensionar a las columnas con mayor tamaño y fortaleza que a las vigas y aprovechar su capacidad para desarrollar ductilidad. En Guayaquil antes de la década de los 70 se construyeron hospitales (Valenzuela, Becerra, Militar), con dimensionamiento de vigas fuertes y columnas débiles, con una capacidad casi nula de desarrollar ductilidad

Durante los años 70 y principios de los 80, otro grupo de hospitales (Guayaquil, Naval, Alborada, Guasmo y Bloque de Cirugía del Venaza) se construyeron con un sistema estructural de losas planas con vigas contenidas en las losas, (sistema que durante el sismo de México mostró un mecanismo de colapso frágil) cuya ductilidad global, depende de la limitada capacidad de las columnas para desarrollar ductilidad



*El hospital de la Policía posee una torre en forma de T con arquitectura asimétrica e irregular elevación, para obtener un buen comportamiento sísmico existen juntas que dividen al edificio en bloques de planta rectangular separados por juntas sísmicas de dilatación.*



*Sistema estructural de vigas fuertes y columnas débiles en el Bloque de Varones del Hospital Alfredo Valenzuela, con mínima capacidad para desarrollar ductilidad después de la fluencia.*

La distorsión lateral de un piso es la razón entre el desplazamiento lateral de un piso (medido con relación al piso inferior) y la altura del entrepiso. Es una variable importante para controlar el nivel de daño estructural y no estructural y en el diseño de estructuras hospitalarias el control de las distorsiones laterales debía ser mucho más severo que en estructuras convencionales a fin de limitar el desarrollo de daños no estructurales muy prematuros que pudieren comprometer la operatividad del hospital.

### Estructuras analizadas

Los análisis se realizaron para doce hospitales. En cada hospital se seleccionó al bloque o estructura que caracteriza mejor la vulnerabilidad del conjunto. Donde la configuración estructural resultó diversa, se eligió una estructura vital, tal fue el caso de la selección del Bloque de Cirugía en el Hospital Vernaza. La descripción de la configuración arquitectónica de los hospitales y los bloques analizados se presenta en el Cuadro No. 8.

**CUADRO No. 8: PRINCIPALES VARIABLES GEOMETRICAS DE LOS BLOQUES ANALIZADOS.**

NOMBRE DEL HOSPITAL	TIPO DE CONFIGURACION ARQUITECTONICA DEL HOSPITAL	ESTRUCTURA ANALIZADA	SIST. <sup>(1)</sup> ESTR.	B x H <sup>(2)</sup> cm x cm	b x h <sup>(3)</sup> cm x cm	L <sub>max</sub> <sup>(4)</sup> L <sub>min</sub> (m)	Fc/F'c <sup>(5)</sup> en %
GUAYAQUIL	Torre de 8 pisos separada de bloques de 1 piso por juntas de ancho < 3 cm	Torre principal	3	40 x 90	Losa plana	7.2 3.2	12 42
VALENZUELA	19 edificios totalmente independientes construidos hace 50 años aprox	Bloque de Varones	4	40 x 45 30 x 35	20 x 70	5.5 2.5	5.2 21
SOLCA	Torre de 6 pisos separada de bloques de 2 pisos por juntas de ancho < 3 cm	Torre principal	1	30 x 115 50 x 80	35 x 90	6.4 5.6	9.8 33
IESS	Bloque 4 pisos separado de bloques de igual altura por juntas de ancho < 6 cm	Bloque Central	5	50 x 65 40 x 40	20 x 100 10 x 30	7.4 2.4	9.4 18.5
VERNAZA	Varios bloques, de distinta edad y arquitectura	Bloque de Cirugía	3	45 x 65	Losa plana	6.3 5.8	7.2 28.4
NIÑO	Torre de 6 pisos en forma de H, dividida por juntas de ancho < 6 cm, en 3 plantas rectangulares. Hay otros bloques de 2 y 3 pisos separados de la torre por juntas	Bloque de la parte lateral de la torre en forma de H	2	50 x 50 50 x 60	35 x 90	7.2 3.0	6.6 29
POLICIA	Torre de 5 pisos en forma de T, dividida por juntas de ancho < 6 cm en 3 plantas rectangulares. Hay otros bloques de 1 y 2 pisos separados de la torre por juntas	Bloque de la parte central de la torre en forma de I.	2	70 x 70 40 x 80 35 x 60	40 x 70 30 x 60	7.7 7.0	7.8 15.8
MILITAR	Torres de 4 pisos en forma de H, dividida en 3 plantas rectangulares por juntas sísmicas actualmente selladas por pisos.	Bloque de la parte lateral de torre en H	4	30 x 40	20 x 55	5.5 2.4	5 17
NAVAL	Torre de 7 pisos en forma de L, dividida en 2 plantas rectangulares por juntas sísmicas parcialmente selladas por pisos.	Bloque grande de la torre en forma de L	3	80 x 80	Losa Plana	8.3 6.8	6.6 25
ALBORADA	Un solo edificio de 4 pisos, sin juntas sísmicas ni anexos de menor altura.	Unico bloque existente.	3	50 x 50	Losa Plana	6.5 3.6	3.9 17.8
BECERRA	Estructuras aisladas de 2 y 3 pisos, algunas de ellas conectadas entre sí por losas de corredores rigidamente	Estructura de 3 pisos con unión rígida.	4	40 x 40	30 x 45	5.6 2.6	3.7 12
GUASMO	Varios bloques de un solo piso separados por juntas de 2 cm de ancho aprox.	Una estructura intermedia	3	30 x 30	Losa Plana	5.2 3.6	2.5 7.7

(1) Tipo de Sistema Estructural:

- 1 = Pórticos espaciales con mecanismo de falla muy dúctil, columnas fuertes y vigas peraltadas débiles que desarrollan ductilidad mucho antes del desarrollo de ductilidad en las columnas
- 2 = Pórticos con mecanismo de falla dúctil, columnas un poco más fuertes y vigas con cedencia casi a la par que las columnas.
- 3 = Pórticos espaciales con mecanismo de falla por flexión dúctil y falla cortante frágil, con vigas no peraltadas (losas planas) y columnas fuertes con poca capacidad de desarrollar ductilidad.
- 4 = Pórticos espaciales con mecanismo de falla frágil, con vigas peraltadas fuertes y columnas más débiles con mínima capacidad de desarrollar ductilidad
- 5 = Combinación de los sistemas anteriores

(2) Dimensiones de las columnas a nivel de planta baja

(3) Dimensiones de las vigas a nivel de primer piso

(4) Luces o distancias entre ejes de columnas. "L<sub>max</sub>" valor máximo, "L<sub>min</sub>" valor mínimo

(5) Fc/ F'c en porcentajes máximos y mínimos. Fc, esfuerzo en las columnas debido a la sobrecarga vertical. F'c, resistencia de diseño

## Variables Geométricas y Mecánicas de las Estructuras o Bloques

Se obtuvo la información de las propiedades geométricas y mecánicas de los planos estructurales (hospitales Naval, IESS, Alborada, Vernaza, Solca y Policía) de un levantamiento estructural de campo y de los planos arquitectónicos disponibles (hospitales: Guayaquil, Niño, Militar) o bien mediante un levantamiento de campo tanto estructural como arquitectónico (hospitales: Valenzuela, Becerra y Guasmo) En los casos en los que no se disponía de planos estructurales se debió obtener las cuantías de acero  $\phi_{cp}$  y  $\phi_{cs}$  en el sitio, mediante el uso del equipo de resonancia magnética "localizador de armaduras" donado por ECHO. En los Cuadros No 8 y 9 se presentan los valores de las principales variables geométricas y mecánicas.

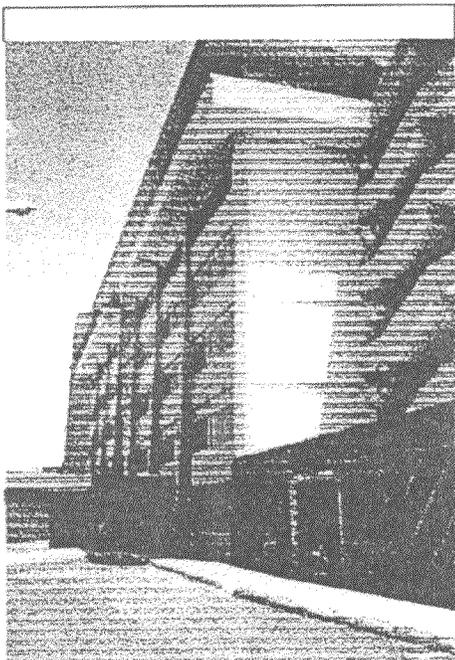
### Análisis normalizado a la primera fluencia de una columna de planta baja

En los análisis matemáticos se utilizó el programa computacional SAP90, las sollicitaciones sísmicas o espectros elásticos del Anexo 2 y se consideró a las cargas verticales permanentes actuando con valores reales, sin factores de carga. Los análisis se normalizaron para el nivel de la aceleración espectral correspondiente a la primera fluencia de una columna

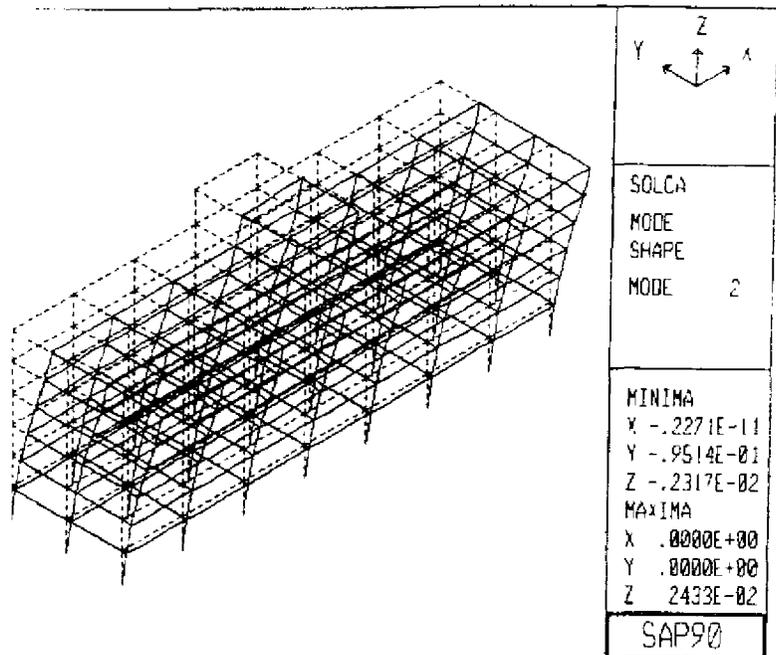
En las estructuras con columnas fuertes y vigas peraltadas más débiles, la fluencia en algunas vigas precede a la cedencia de la primera columna, en éstos casos, se ha utilizado las correlaciones de la Referencia No 10 para obtener la ductilidad global equivalente  $\mu_{cy} > 1$  correspondiente a la condición de normalización.

Otros sistemas estructurales con vigas más fuertes que las columnas o vigas perdidas en las losas, se comportan elásticamente hasta la formación de la primera cedencia en una columna, y por lo tanto, la ductilidad global equivalente a la condición de normalización es  $\mu_{cy} = 1$

Una gran ventaja de este tipo de normalización es que al utilizar los valores la resistencia experimental  $F'c$  y las cuantías de acero  $\phi_{cp}$  y  $\phi_{cs}$  de las columnas para el cálculo de la resistencia de la primera fluencia se obtiene un patrón de comparación más representativo, basado no solo en las propiedades geométricas de los elementos sino también en sus propiedades mecánicas experimentales. Los resultados de los análisis normalizados se presentan a continuación en el Cuadro No. 9



Fachada del Hospital Oncológico Dr. Juan Tanca Marengo (SOLCA)



Deformación del Hospital de SOLCA, calculada mediante el programa SAP90 para una sollicitación sísmica actuando en la dirección más flexible del edificio.

**CUADRO No. 9: PROPIEDADES MECANICAS Y RESULTADOS DEL ANALISIS NORMALIZADO A LA PRIMERA FLUENCIA EN UNA COLUMNA.**

	DUCTILIDAD $\mu_{cap}$ <sup>(1)</sup>	Fyp <sup>(2)</sup> Kg/cm <sup>2</sup>	Fys <sup>(3)</sup> kg/cm <sup>2</sup>	$\Phi_{cp}$ <sup>(4)</sup>	$\Phi_{cs}$ <sup>(5)</sup>	$\mu_{cy}$ <sup>(6)</sup>	$\gamma_{cy}$ <sup>(7)</sup> ‰	Ae ( $\mu_{cy}$ ) <sup>(8)</sup> cm/seg <sup>2</sup>	INTENSIDAD SISMICA <sup>(9)</sup>
GUAYAQUIL	3	4200	2800	0.025	0.007	1.0	4.9	165	VII
VALENZUELA	1.5	2800	2800	0.005	0.001	1.0	2.5	136	VII
SOLCA	4	4200	2800	0.02	0.005	1.6	6.9	238	VIII
IESS	2	4200	2800	0.015	0.003	1.0	3.4	125	VII
VERNAZA	2	4200	2800	0.015	0.003	1.0	7.4	480	VIII
NIÑO	2	4200	2800	0.015	0.003	1.1	3.2	160	VII
POLICIA	3	4200	2800	0.02	0.005	1.1	3.4	270	VIII
MILITAR	2	2800	2800	0.01	0.002	1.0	2.2	156	VII
NAVAL	2	2800	2800	0.03	0.01	1.0	11.2	333	VIII
ALBORADA	2	4200	2800	0.015	0.009	1.0	3.4	460	VIII
BECERRA	1.5	2800	2800	0.005	0.001	1.0	3.0	132	VII
GUASMO	2	4200	2800	0.01	0.002	1.0	4.1	560	IX

- (1) Capacidad máxima de desarrollo de ductilidad previo colapso, que se estima tendría la estructura según su sistema estructural  
 (2) Esfuerzo de Fluencia del acero de refuerzo principal  
 (3) Esfuerzo de Fluencia del acero de refuerzo transversal o estribos  
 (4) Cuantía de refuerzo principal en las columnas  
 (5) Cuantía de refuerzo transversal (estribos) en las columnas  
 (6) Ductilidad de la estructura a la primera cedencia  
 (7) Distorsión lateral máxima de un piso a la primer cedencia  
 (8) Aceleración espectral correspondiente a la primera cedencia  
 (9) Intensidad Mercalli Modificada a la primera cedencia.

**Análisis del comportamiento sismo-resistente para sismos de gran intensidad**

Considerando los factores de ductilidad y las variables del peligro sísmico, se calcula el comportamiento sismo-resistente para sismos de intensidad VII, VIII y IX. Los resultados se presentan en el Cuadro No 10

**CUADRO No. 10 : COMPORTAMIENTO SISMICO PARA INTENSIDADES VII, VIII y IX**

NOMBRE DEL HOSPITAL	SISMO DE INTENSIDAD VII			SISMO DE INTENSIDAD VIII			SISMO DE INTENSIDAD IX		
	Ae <sub>max</sub> <sup>(1)</sup> cm/seg <sup>2</sup>	$\mu_{DEM}$ <sup>(2)</sup>	COMPARACION $\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$ <sup>(3)</sup>	Ae <sub>max</sub> <sup>(1)</sup> cm/seg <sup>2</sup>	$\mu_{DEM}$ <sup>(2)</sup>	COMPARACION $\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$ <sup>(3)</sup>	Ae <sub>max</sub> <sup>(1)</sup> cm/seg <sup>2</sup>	$\mu_{DEM}$ <sup>(2)</sup>	COMPARACION $\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$ <sup>(3)</sup>
GUAYAQUIL	150	0.9	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	1.8	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	500	3	$\mu_{DEM} = \mu_{CAP}$
VALENZUELA	200	1.45	$\mu_{DEM} \leq \mu_{CAP}$	400	2.9	$\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$	600	4.4	$\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$
SOLCA	150	1.0	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	2	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	500	3.4	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$
IESS	150	1.2	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	2.4	$\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$	500	4	$\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$
VERNAZA	200	0.4	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	400	0.8	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	600	1.2	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$
NIÑO	150	0.9	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	1.9	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	500	3.1	$\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$
POLICIA	150	0.6	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	1.1	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	500	1.9	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$
MILITAR	150	1.0	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	2.0	$\mu_{DEM} = \mu_{CAP}$	500	3.2	$\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$
NAVAL	150	0.5	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	1.0	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	500	1.5	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$
ALBORADA	200	0.45	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	400	0.9	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	600	1.3	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$
BECERRA	150	1.1	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	2.3	$\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$	500	3.8	$\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$
GUASMO	150	0.25	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	300	0.5	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$	500	1.1	$\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$

- (1) Aceleración espectral máxima del Anexo 2  
 (2) Demanda de Ductilidad Global para la sollicitación sísmica analizada  
 (3) Comparación entre la demanda de ductilidad y la capacidad máxima de desarrollar ductilidad  
 $\mu_{DEM} < \mu_{CAP}$  Demanda menor que la capacidad, el mecanismo de falla no ha ocurrido, la estructura responde con su ductilidad  
 $\mu_{DEM} = \mu_{CAP}$  Demanda igual a la capacidad, el mecanismo de falla o colapso se ha formado para la intensidad sísmica dada  
 $\mu_{DEM} > \mu_{CAP}$  Demanda mayor que la capacidad, la estructura ha fallado para una intensidad menor a la analizada.

**Interpretación de resultados**

Los resultados muestran estructuras seguras para sismos de intensidades menores o iguales a VII y comportamiento elástico ( $\mu_{DEM} < 1$ ) que implica daños no estructurales moderados o pequeños. Sismos de intensidad VIII producen la falla de cuatro hospitales (33%) y un comportamiento inelástico ( $\mu_{DEM} > 1$ ) que equivale a un nivel de daños muy severo en elementos no - estructurales. Finalmente se aprecia, que un 50% de las estructuras están en capacidad de resistir, sin falla un sismo de intensidad IX que equivale a la máxima intensidad históricamente registrada en Guayaquil