

DISEÑO SISMORESISTENTE DE EDIFICIOS ALTOS EN CENTROAMÉRICA

Edwin E. Portillo*, Dr.-Ing., El Salvador; Oscar M. Ramírez, Dr.-Ing., Panamá**

*Dr.-Ing. Edwin E. Portillo, Presidente fundador de Engineering Company of Central America S.A. y de Estructuristas Consultores S.A. de C.V. con más de 20 años de experiencia en diseño de edificios y puentes en Centroamérica y el Caribe.

**Dr.-Ing. Oscar M. Ramírez, Presidente fundador de OM RAMIREZ Y ASOCIADOS, Ingenieros Consultores, Panamá, con más de 20 años de experiencia en diseño estructural de edificios altos en Panamá y Centroamérica.

SINTESIS

El desarrollo de normativas para el diseño de edificaciones en los países Centroamericanos se ha dado en forma aislada, no existe una definición unificada para la obtención de las cargas sísmicas. Los edificios altos (cuyo diseño está gobernado por los desplazamientos laterales) inician en Centroamérica a finales de los años 60, con edificios mayores a los 10 niveles. Es notorio en esta década el sistema estructural usado para el Banco de América en Managua (T.Y. Lin), de 19 niveles, con una estructura del tipo tubo en tubo. A partir de los años 70, se construyen edificios entre 15 y 30 niveles, principalmente en Guatemala y Panamá, usando como sistema estructural marcos resistentes a momentos interactuando con paredes de concreto reforzado. A partir de los años ochenta, Panamá abrió una brecha única en la construcción de edificios altos en esta región, con edificios de hasta 50 niveles. Desde el año 2000, se construyen en Panamá edificios que exceden los 70 niveles, algunos casos de hasta 100 pisos. Este documento muestra una descripción de los sistemas de estructuración y cimentación usados en edificios altos en Centroamérica, incluyendo una comparación entre los diferentes reglamentos y las cargas sísmicas para cada país. Se presenta un resumen de índices de costos obtenidos para edificaciones en zonas de moderada y alta sismicidad en Centroamérica.

Palabras claves: Edificios, estándares de diseño, Centroamérica

ABSTRACT

Unified construction regulations for the Central American countries, ranging from Guatemala to Panama, do not exist. Design regulations in each country have been achieved in isolated forms and reflect different focuses inside each country. In the mid sixties, the first tall buildings exceeding 10 stories were constructed (tall buildings= buildings which design is ruled by lateral displacements). An interesting case was the structural system used for the design of the Bank of America, Managua (T.Y. Lin), which corresponds to a 19 story building using a tube in tube structural system. After 1970 a large number of buildings between 15 and 30 stories were constructed particularly in Guatemala and Panama, most of them used structural systems based on reinforced concrete frames interacting with concrete shear walls. In the mid 80's Panama opened an unprecedented gap with all other countries in the region in regards to building heights. Building heights increased to 50 stories. From 2000 to the present, Panama is experiencing a boom in the construction of buildings that exceed 70 stories, some of which up to 100 stories. The present paper provides a comparison between the different seismic codes used in this region, including a

description of the structural solutions used for the foundations and the main seismic resistant system. The paper presents a summary of cost indexes, obtained for buildings designed on both moderate and highly active seismic zones in Central America.

Keywords: Buildings, design, standard practices, Central America

INTRODUCCION

El istmo Centroamericano es una franja de territorio continental compuesta de aproximadamente 522,000 km² y 40, 000,000 de habitantes. Sus fronteras son México, Colombia, el Mar del Caribe y el Océano Pacífico. Centro América está situada en una zona altamente sísmica caracterizada por terremotos producidos por la interacción de placas tectónicas (usualmente terremotos profundos y de gran magnitud) y terremotos producidos por el desplazamiento de fallas territoriales asociadas con la actividad volcánica al interior del continente (estos sismos poseen magnitudes moderadas, pero dado que se originan a pocos kilómetros de profundidad, tienen un alto potencial destructivo) (ver Figuras 1 y 2).



Fig.1 Placas Tectónicas de la región

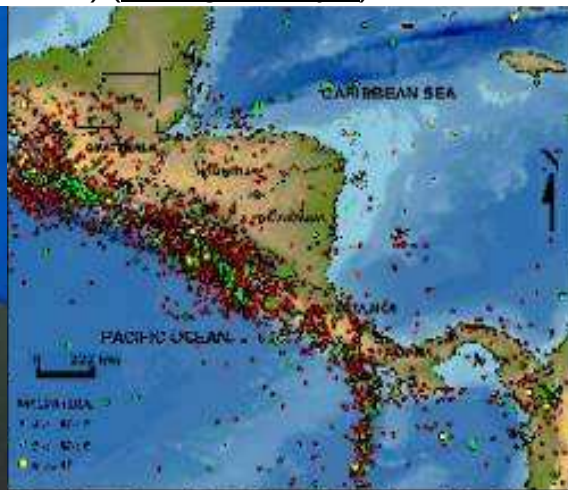


Fig.2 Actividad Sísmica Regional

Los terremotos destructivos no son tan frecuentes en Honduras y Panamá, la mayoría de los sismos que se producen en estas zonas, resultan imperceptibles para la población. Registros históricos y eventos recientes, revelan una alta peligrosidad sísmica en los restantes países del Área. En los últimos 50 años, Centroamérica ha experimentado siete terremotos severos: El Salvador: 1965, 1986, 2001a, 2001b, Nicaragua: 1972, Guatemala: 1976 y Costa Rica: 1991. El total de pérdidas humanas asciende a más de 37 mil víctimas y las pérdidas materiales superan los 4700 millones de dólares americanos. Los cuantiosos daños y las lecciones dejadas por estos terremotos han tenido un impacto directo en los reglamentos locales de construcción. Probablemente, los terremotos que más han influenciado el desarrollo de las normativas centroamericanas sean los devastadores sismos de Managua 1972 (11000 víctimas), Guatemala 1976 (23000 víctimas) y San Salvador 1986 (1500 víctimas).

Tal como se acepta actualmente, se considera alto a los edificios que están controlados por deformaciones laterales. Tal como se muestra en la Figura 3, a medida que los edificios son más altos, las cantidades de materiales requeridos adicionalmente para el control de los desplazamientos laterales se hacen más notorias respecto al resto de componentes que contribuyen principalmente a la estabilidad ante cargas verticales.

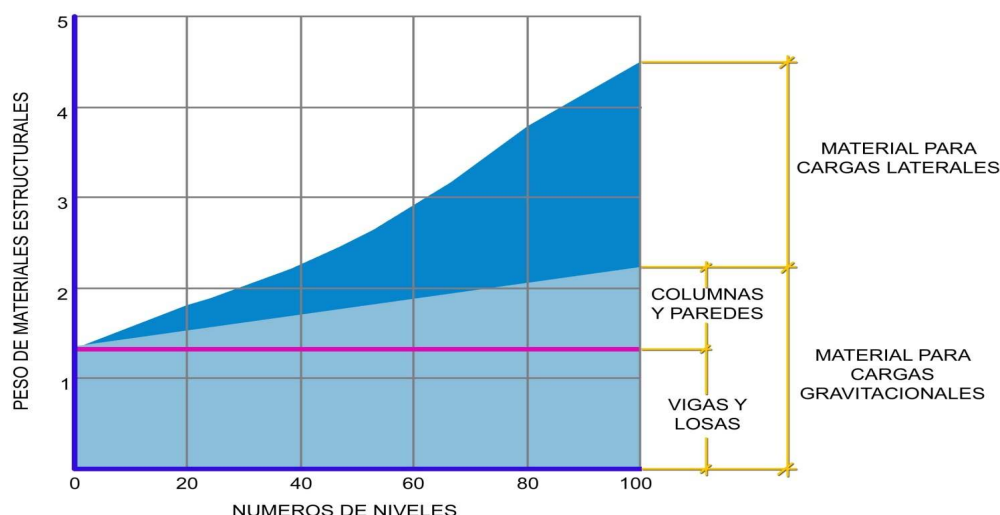


Fig.3 Peso de componentes estructurales en funcion de altura

En este sentido, la historia de edificios altos en Centro América, comienza en la década de los sesenta. Destacan como sistemas avanzados en Nicaragua, El Salvador y Guatemala, entre 10 y 20 niveles, compuestos de marcos de concreto reforzado interactuando con paredes de corte y sistemas de tubo en tubo.

COMPORTAMIENTO SISMICO DE EDIFICIOS EN CENTRO AMERICA

Los terremotos de los últimos cincuenta años, ocurridos en varias capitales centroamericanas, muestran patrones claros de deficiencias de diseño y de prácticas constructivas, que han conducido a daños severos y colapsos de edificaciones, estos se resumen a continuación:

1. Falta de ductilidad (conexiones frágiles, columnas y vigas sin adecuado confinamiento lateral)
2. Subestimación de los efectos de torsión (ver figura 4).
3. Fallas por corte, provocados por efecto de columna corta.
4. Subestimación de efectos dinámicos en suelos (licuefacción y deficiente capacidad portante)
5. Subestimación del nivel de cargas sísmicas, en particular en sistemas singulares (normativas obsoletas, coeficientes sísmicos inadecuados, etc.).

El Banco Central de Nicaragua, construido en Managua en la década de los 60, con una altura de 14 pisos, es un ejemplo representativo de edificios altos que mostraron fallas debido a torsión, falta de ductilidad y subestimación de cargas de diseño, lo que conllevó a su colapso durante el terremoto de Managua en 1972. La estructura combinaba, un núcleo rígido colocado excéntricamente y un sistema de columnas perimetrales con losas reticular celular (waffle slabs).

El edificio con dimensiones en planta de 20mx7m, mostró una clara falla por torsión, potenciada por la falta de ductilidad del sistema columnas-losa, la falta de redundancia de la estructura en su dirección corta y la excentricidad significativa entre el centro de masa y el centro de rigidez (ver figura 4). Luego del terremoto, el edificio fue demolido por encima del quinto piso.

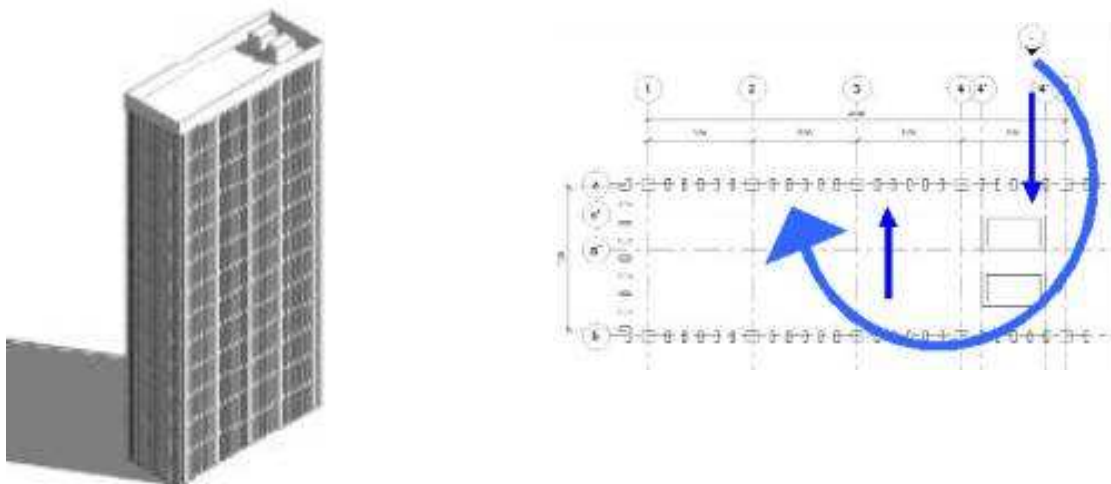


Fig.4 Torsión accidental, edificio de Banco Central de Managua, Nicaragua.

Por el contrario la torre principal del Hospital de niños Benjamín Bloom, en San Salvador, diseñado y construido en la década de los 60, es una estructura de 12 pisos con dimensiones en planta de 40x18m, conformado por marcos de concreto reforzado en la dirección longitudinal y marcos interactuando con paredes de corte estratégicamente ubicadas en la dirección transversal (ver Figura 5), mostró un comportamiento estructural aceptable durante el violento sismo de 1986: leves daños en la dirección transversal y daños locales en columnas y conexiones en la dirección longitudinal. Posterior al terremoto el edificio fue reforzado con la adición de un sistema complementario de paredes de corte en la dirección longitudinal para actualizarlo a la nueva Normativa emitida posteriormente a la ocurrencia del sismo.

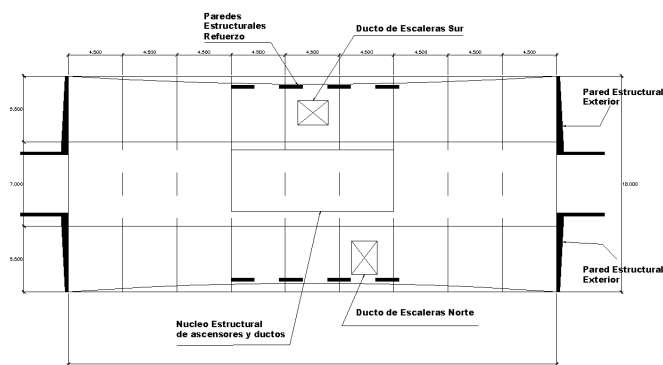


Fig. 5 Hospital de Niños, San Salvador, antes del sismo y reforzamiento con paredes de corte

REGULACIONES DE DISEÑO EN CENTROAMERICA

El desarrollo de las normativas y reglamentos de construcción, se ha dado de forma aislada, lo que conlleva a documentos con enfoques distintos, en particular en la definición de las zonas sísmicas, definición de límites de derivas y evaluación de los coeficientes de diseño sísmico, entre otros. Existen algunas iniciativas regionales de normalización en el área de diseño de carreteras, impulsadas por el SIECA (sistema de integración centroamericana), sin embargo a nivel de diseño de edificaciones, probablemente el nexo común mas importante en las normativas de Centroamérica sea el uso de las normas de diseño norteamericanas como sus principales referentes. Por un lado las normas hacen referencias, en algunos casos textuales, a versiones específicas de normativas como el UBC (Uniform Building Code), ACI (American Concrete Institute) y AISC (American Institute for Steel Construction), por otro lado la mayoría de los proyectistas en Centroamérica están familiarizados con el uso de estos estándares. La Figura 6 muestra un resumen del nombre de la normativa, su año de edición más reciente y las normativas que le sirven de base.

CODIGOS SISMICOS DE DISEÑO CENTROAMERICANOS			
PAIS	DESCRIPCION	AÑO	REFERENCIAS
GUATEMALA	Normas Estructurales de Diseño y Construcción Recomendadas para la República de Guatemala	1996	UBC, ATC3-06 ACI, AISC,
EL SALVADOR	Regulaciones para la Seguridad Estructural de Construcciones en El Salvador	1997	UBC-91, ACI, AISC,
HONDURAS	Código Hondureño de Construcción	2000	UBC, ACI, AISC
NICARAGUA	Reglamento de Construcción Nacional	2006	IBC, UBC, ACI, AISC
COSTA RICA	Código Sísmico de Costa Rica – 2002	2002	IBC, UBC, ASCE ACI, AISC.
PANAMA	Reglamento de Diseño Estructural para la República de Panamá	2004	ASCE7, NEHRP, ACI, AISC.

Fig. 6 Normas Centroamericanas y estándares internacionales de referencia.

En la definición de los sistemas estructurales, las normativas centroamericanas básicamente coinciden en los sistemas siguientes: Muros sismoresistentes, Marcos Resistentes a Momentos, Marcos de Acero Arriostrados, Sistema Dual formado por Marcos y Paredes de Corte y Sistemas de Péndulo Invertido (Viga en voladizo) (ver Figura 7). Estos sistemas estructurales pueden ser usados con algunas restricciones de altura; este concepto es descrito en el UBC al igual que en las normas de Centroamérica. Para efectos de comparar dos casos ubicados en zona de alto riesgo sísmico (zona UBC 4), se muestra en la Figura 8, los límites de altura que utilizan el UBC-97 y el Reglamento de El Salvador. Como puede observarse en dicha figura, el concepto seguido por la Norma local es idéntico al establecido por el UBC-97, la diferencia se da en los límites que restringen el sistema de muros

sismoresistentes, para el cual la norma local es más restrictiva que la del UBC-97. En cuanto a los controles de la deriva de entrepisos, las normas usan valores distintos y en el caso de las normas de Costa Rica y Nicaragua, formatos más consistentes con los tipos de sistemas estructurales.



Fig. 7 Tipificación de Sistemas estructurales acorde a las normas Centroamericanas.

LIMITE DE ALTURA DE ACUERDO A UBC Y EL SALVADOR (ZONA 4)					
PAIS	MUROS SISMORRESISTENTES	MARCOS DE A MOMENTO	MARCOS ARRIOSTRADOS (ACERO)	SISTEMA DUAL (CONCRETO)	PENDULO INVERTIDO
EL SALVADOR	H=50m Concreto H=35m Mampostería	S.L.	S.L. Detallado Especial H=50m Detallado Ordinario	S.L. Concreto H=50m Paredes Mampostería	---
UBC-97	H=70m Concreto H=50m Mampostería	S.L.	S.L. Detallado Especial H=50m Detallado Ordinario	S.L. Concreto H=50m Paredes Mampostería	---

Fig. 8 Limites en altura para sistemas en zona 4

El cálculo de la deriva de entrepiso se obtiene de dividir el desplazamiento (lateral) de la edificación entre la altura correspondiente (ver Figura 9). Para un entrepiso, la deriva "D" se obtiene dividiendo el desplazamiento horizontal relativo del centro de masa del nivel x respecto al del nivel x-1, entre la altura del entrepiso considerado:

$\Delta_x = \delta_0^x - \delta_0^{x-1}$. (Las versiones más recientes de los Reglamentos también especifican el cálculo de la deriva en el punto más desfavorable de la periferia de plantas entre niveles consecutivos, en adición a la calculada en los centros de masa). El desplazamiento elástico se amplifica para representar el comportamiento post-elástico, usando factores de mayoración asociados a los tipos de sistemas estructurales.

$$D = \frac{\Delta_x}{(h_x - h_{x-1})}$$

DERIVAS PERMISIBLES PARA EDIFICIOS ALTOS DE OFICINAS Y APARTAMENTOS (OCUPACION NORMAL) EN CENTROAMERICA					
PAIS	CATEGORIA	DERIVA			
PANAMA	CATEGORIA II	0.020			
EL SALVADOR	CATEGORIA II	0.015			
GUATEMALA	CATEGORIA IV	0.015			
NICARAGUA	CATEGORIA II	0.018	0.015	0.010	0.007
COSTA RICA	CATEGORIA IV	0.016	0.014	0.014	0.008
		MARCO DUCTIL	SISTEMA DUAL	EDIFICIO DE PAREDES	SISTEMA VOLADIZO

Fig. 9 Limites de derivas permisibles en Centroamerica

Cargas Sísmicas en Centro América

Zonificación Sísmica en Centro América.

El parámetro “ A_0 ” (factor de zona sísmica), es una medida de la máxima aceleración que debe ser utilizada en un sitio específico y corresponde a un sismo de diseño que tiene un 90% de probabilidad de no ser excedido dentro de 50 años. Aunque países como Costa Rica, Nicaragua, El Salvador y Guatemala tienen riesgos sísmicos similares, como se muestra en la [Figura 10](#), utilizan factores de zona sísmica máximos muy distintos, desde 0.30g hasta 0.44g.

ACELERACIONES PICO MAXIMAS EN CENTROAMERICA			
PAIS	NOMBRE DE CODIGO	ACELERACION MAXIMA	ACELERACION MAXIMA EN CAPITAL
GUATEMALA	Normas Estructurales de Diseño y Construcción Recomendadas para la República de Guatemala	0.30g	Guatemala 0.30g
EL SALVADOR	Regulaciones para la Seguridad Estructural de Construcciones en El Salvador	0.40g	San Salvador 0.40g
NICARAGUA	Reglamento de Construcción Nacional	0.32g	Managua 0.31g
HONDURAS	Código Hondureño de Construcción	0.35g	Tegucigalpa 0.25g
COSTA RICA	Código Sísmico de Costa Rica – 2002	0.44g	San Jose 0.36g
PANAMA	Reglamento de Diseño Estructural para la República de Panamá	0.25g	Panamá 0.15g
EEUU	Uniform Building Code	0.40g	

Fig. 10. Factores de Zona Sísmica en Códigos Centroamericanos

Los códigos de diseño en Centro América, utilizan nomenclaturas distintas para referirse a sus zonas sísmicas. Guatemala y Costa Rica siguen un enfoque similar al utilizado por el UBC. En Guatemala y en Costa Rica no existe la zona 1. Para ambos, la zona 4 (IV) corresponde a la máxima aceleración ($A_0= 0.30$ para Guatemala y $A_0= 0.44$ para Costa Rica).

Sin embargo, en El Salvador, el país se divide dos zonas: I y II, siendo la zona I la que posee la máxima aceleración ($A_0 = 0.40$). Nicaragua utiliza otra nomenclatura diferente para sus zonas: A, B y C. La zona C posee la máxima aceleración sísmica. ($A_0 = 0.32$). Honduras utiliza 6 zonas sísmicas, dos de las cuales (5 y 6) se ubican en la frontera con El Salvador, siendo la 6 la de mayor aceleración ($A_0 = 0.35$). Panamá no define ninguna zona sísmica explícitamente, en su lugar utiliza una tabla con las ciudades importantes y su correspondiente valor de aceleración (ciudad de Panamá $A_0 = 0.32$).

Se recomiendan mayores aceleraciones máximas para la zona occidental del país ($A_0 = 0.25$), ubicada cerca de la frontera con Costa Rica. La Figura 11 muestra las zonas definidas por cada país, reduciendo algunas zonas con rangos similares (caso de Honduras en la frontera con El Salvador). Como se observa en el mapa, las zonas sísmicas en la mayoría de los países reflejan la influencia de la subducción causada por la interacción de las placas de Cocos y el Caribe. Así mismo se muestra un intento para unificar las zonas para toda la región. Para respetar las zonas definidas por cada país, se utilizó un criterio de extrapolación gráfica para obtener un mapa uniforme. Los valores de “ A_0 ”, han sido agrupados en un máximo de cinco zonas siguiendo el formato del UBC.

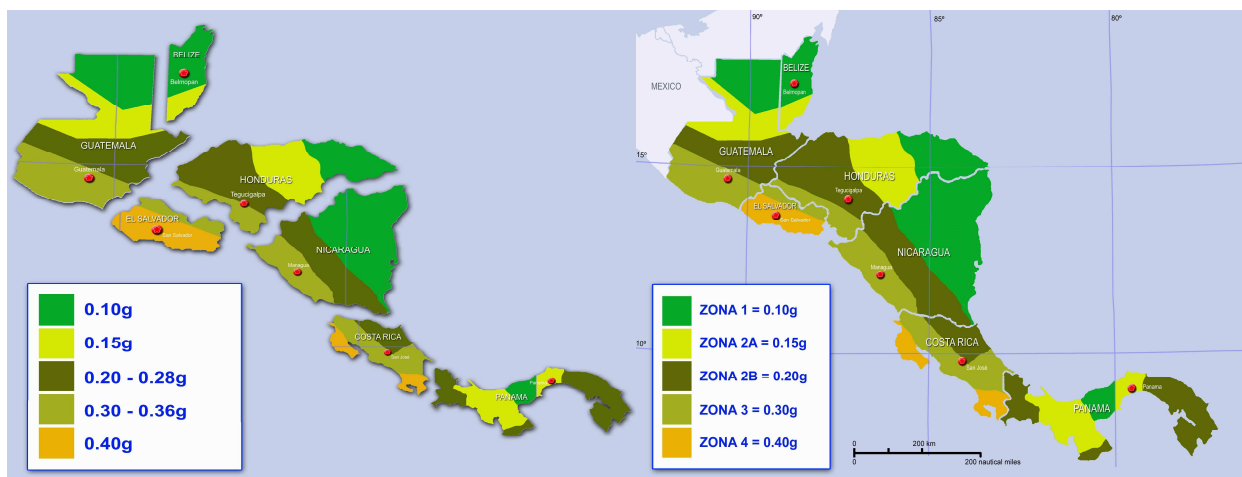


Fig. 11 Zonas Sísmicas de acuerdo a Códigos Locales y propuesta con simbología UBC-97

Estos valores son comparados con el equivalente obtenido de la zona 4 del UBC. Los valores fueron obtenidos utilizando suelo rocoso, comportamiento elástico y el factor de zona sísmica más alto (ver Figuras 12 y 13)

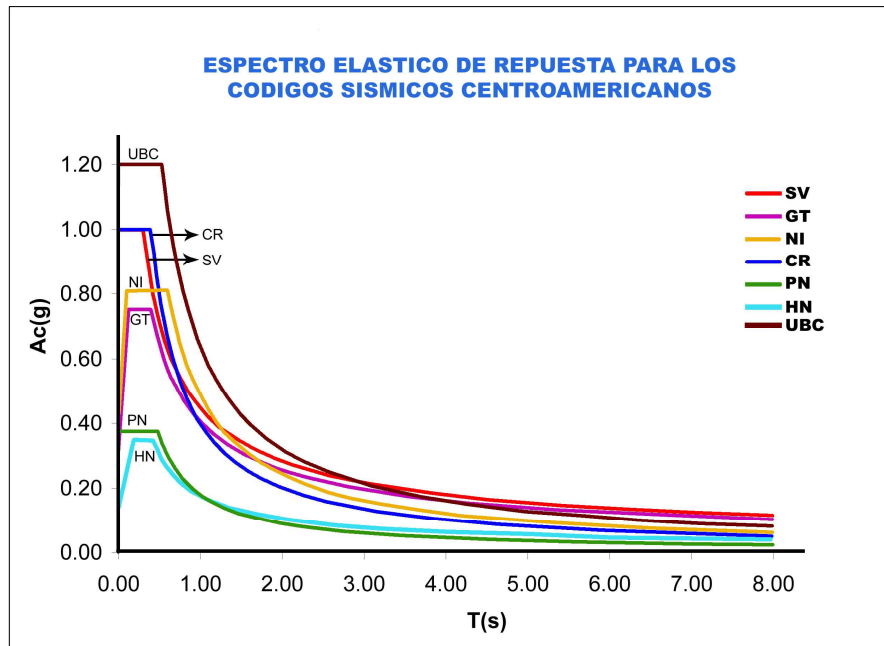


Fig. 12 Espectro Elástico de Respuesta para Códigos Centroamericanos

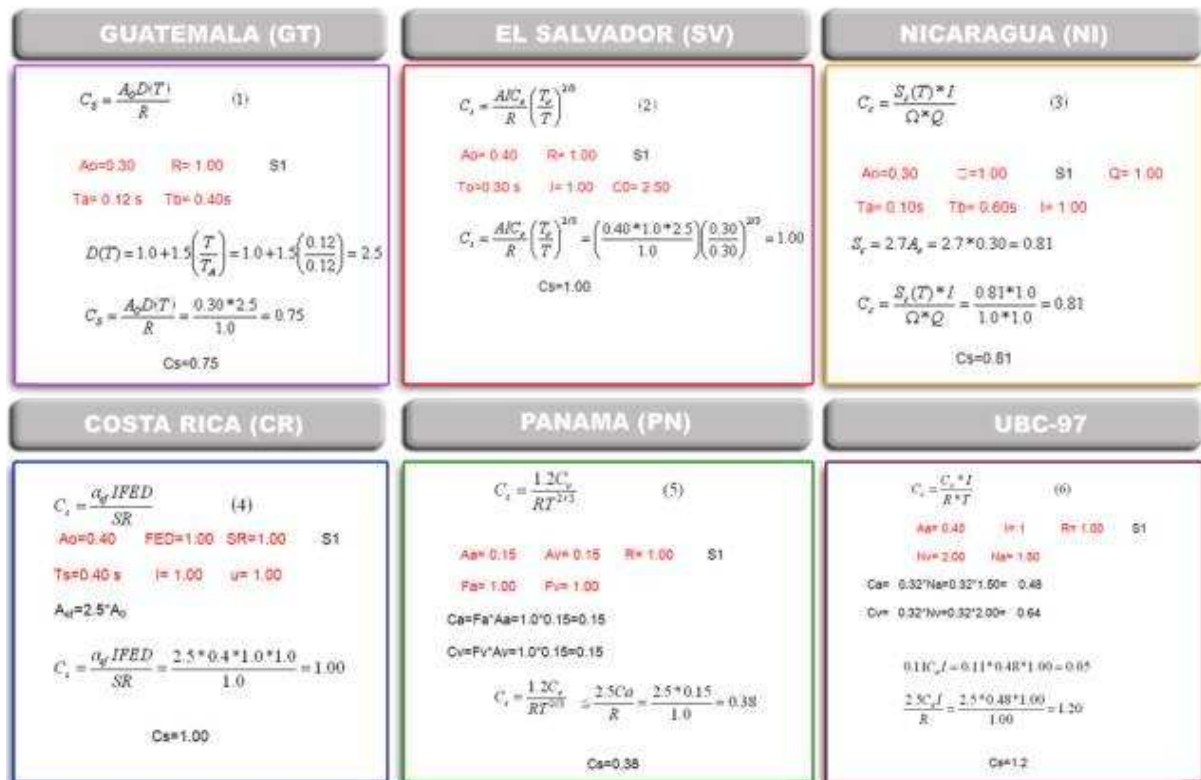


Fig. 13 Coeficientes Sísmicos para cada país.

Para comparar el coeficiente sísmico para condiciones de carga típicas en edificios altos en Centro América, se utilizaron dos edificios de oficinas de concreto reforzado con un sistema dual (marcos interactuando con paredes de corte para resistir las fuerzas sísmicas), se utilizaron marcos distribuidos en dos direcciones ortogonales y paredes de corte ubicadas en el corazón del edificio. Los edificios analizados, el

primero con 25 pisos ($T=3.0s$) y 95m de alto, y el segundo con 75 pisos ($T=8.0s$) y 300m de altura (ambos con un promedio de 4 m de altura de entrepisos), se asumieron ubicados en la capital de cada país, de manera de poder usar los factores de zonificación correspondientes a las zonas de mayor desarrollo urbano de cada país, en ambos casos se trata de edificios con usos de oficinas. Los coeficientes sísmicos obtenidos para cada capital de cada país, fueron comparados con el equivalente obtenido del UBC-97 correspondiente a la zona 4 (California). Se utilizaron tres tipos de suelo con condiciones diferentes: suelo duro (S_A), suelo denso (S_C) y suelo poco rígido (suave) (S_D).

Para el caso del edificio de oficinas de 75 pisos cimentado en suelo tipo S_A , de acuerdo al UBC-97, se obtienen los siguientes coeficientes sísmicos de acuerdo a los estándares locales correspondientes: Guatemala $C_s= 0.016$, Nicaragua y Honduras resulta con valores muy similares $C_s= 0.008$ y $C_s= 0.009$ respectivamente, Panamá $C_s= 0.004$ y UBC-97 $C_s= 0.050$. El caso particular de El Salvador se obtiene un valor de 0.03, el cual corresponde al valor mínimo permisible (independiente del crecimiento del periodo). Este valor de umbral resulta ser severo para edificios altos, y conduce al mayor valor para toda la región, siendo casi el doble del mayor valor reportado para Guatemala, país con condiciones sísmicas bastante similares, en particular si en Guatemala no se aplica un umbral mínimo (como el recomendado por el UBC). Este valor es sin embargo menor al mínimo establecido por el UBC en zona 4 ($C_s= 0.05$). Si este limite no se aplicara el coeficiente calculado para El Salvador seria de $C_s=0.01$, el cual resulta ser un 50% menor que el de Guatemala (lo cual tampoco resulta ser consistente).

COEFICIENTE SISMICO SEGUN TIPO DE SUELO						
COUNTRY	SUELO ROCOSO		SUELO DENSO		SUELO SUAVE	
	*Cs1	**Cs2	*Cs1	**Cs2	*Cs1	**Cs2
GUATEMALA	0.0160	0.0360	0.0200	0.0440	0.0250	0.0550
EL SALVADOR	0.01/0.03 ¹	0.02/0.03 ¹	0.014/0.036 ¹	0.031/0.036 ¹	0.018/0.038 ¹	0.0380
HONDURAS	0.0090	0.0170	0.0100	0.0210	0.0137	0.0260
NICARAGUA	0.0080	0.0240	0.0082	0.0250	0.0083	0.0270
COSTA RICA	0.0050	0.0180	0.0077	0.0250	0.0078	0.0250
PANAMA	0.0044	0.0150	0.0045	0.0180	0.0098	0.0320
EEUU	0.011/0.05 ¹	0.02/0.05 ¹	0.012/0.066 ¹	0.03/0.066 ¹	0.014/0.068 ¹	0.04/0.068 ¹

*Cs1 Coeficiente sísmico obtenido para un edificio de 75 pisos de marcos de concreto reforzado y paredes estructurales.

**Cs2 Coeficiente sísmico obtenido para un edificio de 25 pisos de marcos de concreto reforzado y paredes estructurales.

¹ Mínimo valor acorde a código

Fig. 14. Coeficientes Sísmicos obtenidos por tipo de suelo ($T= 3.0 s$ and $T= 8.0s$)

De los valores tabulados anteriores, se puede observar claramente que el uso directo de los parámetros del UBC zona 4, en cualquier país de Centroamérica, conduce a cargas sísmicas sobrevaloradas, respecto a las que se obtienen usando los reglamentos locales, cabe notar que esto resulta consistente con la severidad implícita en los factores del UBC asociados con zonas urbanas muy cercanas a grandes sistemas de falla. También es importante notar que, si no está cimentado en

suelo rocoso, sino que en suelo rígido (S_D), el incremento del coeficiente sísmico muestra una tasa distinta para cada país: UBC-97 un factor de amplificación de “af”=1.36 ($C_s=0.068$ en vez de $C_s=0.05$, por tanto “af”= $0.05/0.068=1.36$), Guatemala y Costa Rica, usan el mismo incremento “af”= 1.56, Honduras uno bastante similar “af”= 1.52 El Salvador un incremento moderado de “af”=1.27, Nicaragua lo mantiene prácticamente invariable, “af”=1.04 y Panamá lo incrementa de manera sustancial con “af”=2.23. Comparando las fórmulas utilizadas para obtener el coeficiente sísmico de diseño para cada regulación centroamericana, se puede notar que todos los países en el área, con la excepción de El Salvador, utilizan factores de ductilidad y sobre-resistencia de acuerdo con los últimos criterios de diseño, de esta manera, su uso es directamente compatible con los estándares internacionales basados en los últimos criterios de diseño, como ACI-318-05 y AISC-LRFD. Por el contrario, las normas salvadoreñas hacen uso imprescindible de factores de carga amplificado del orden de 1.4 para el diseño con cargas sísmicas (ver Fig.15)

EL SALVADOR (SV)	GUATEMALA (GT)	HONDURAS (HN)
$C_s = \frac{AIC_a}{R} \left(\frac{T_a}{T} \right)^{2/3}$ Ao= 0,4 R= 12 S1 To=0,30 seg I= 1 CO= 2,5 $T_o \leq T \leq 6T_o$	$C_s = \frac{A_o D(T)}{R}$ Ao=0,30 R= 6,00 S1 Ta=0,12 seg Tb= 0,40seg $T \leq T_A \quad D(T) = 1.0 + 1.5 \left(\frac{T}{T_A} \right) =$ $T_A \leq T \leq T_B \quad D(T) = 2.5$ $T_B \leq T \quad D(T) = 2.5 \left(\frac{T_B}{T} \right)^{0.67}$	$C_s = \frac{A_o * I * C}{R}$ Ao= 0.35 R= 12 S1 S=1.00 I= 1 Ta=0.15 seg Tb= 0.40 seg e= 0.80 $T \leq T_a \quad C = (0.40 + 0.60 * T/T_a) * S$ $T_a \leq T \leq T_b \quad C = S$ $T \geq T_b \quad C = \left(\frac{T_b}{T} \right)^e * S$
PANAMA (PN)	COSTA RICA (CR)	NICARAGUA (NI)
$C_s = \frac{1.2C_v}{RT^{2/3}}$ Aa= 0,15 Av= 0,15 R= 8,00 S1 Fa= 1,00 Fv= 1,00 Ca=Fa*Aa 0,15 Cv=Fv*Av 0,15 $C_s = \frac{1.2C_v}{RT^{2/3}} \leq \frac{2.5Ca}{R} \quad 0,05$	$C_s = \frac{a_{ef} IFED}{SR}$ Ao=0.40 FED=0.94 SR=2.00 S1 Ts=0.40 s I= 1.00 u= 4 Sa1= 0.40 $a_{ef} I = 2.5 * A_o \quad T \leq T_s$ $a_{ef} = \frac{\alpha_{ef} I}{T} \quad T_s \leq T$	$C_c = \frac{S_c(T) * I}{\Omega * Q}$ Ao=0,30 Ω= 2 S1 Q= 4 Ta= 0,10seg Tb= 0,60seg I= 1 $S_c = S(2.7A_o) \quad T_a \leq T \leq T_b$ $S_c = 2.7A_o \left(\frac{T_b}{T} \right) \quad T \geq T_b$
UBC		
$C_c = \frac{C_s I}{RT}$ Aa= 0.40 I= 1.25 R= 8.50 SA Nv= 2.00 Na= 1.50 Ca=0.32Na =0.48 0.11C_aI = 0.07 Cv=0.32Nv =0.64 $\frac{2.5C_a I}{R}$ 0.18 $0.11C_a I \leq C_c = \frac{C_s I}{RT} \leq \frac{2.5C_a I}{R} \quad T_s = \frac{C_v}{2.5C_a} = 0.53$ $T_o = 0.2T_s = 0.107$		

Fig. 15 Fórmulas para obtener Coeficientes Sísmicos de acuerdo a Códigos Centroamericanos

Clasificación del Suelo

De acuerdo a la clasificación del suelo utilizando velocidades de onda de corte, no se emplean definiciones coherentes a lo largo de la región (ver Figura.16). Las definiciones utilizadas en el código panameño, son muy similares a las utilizadas en el UBC-97. La clasificación de las velocidades de onda de corte en El Salvador no corresponde a ningún valor utilizado por sus países vecinos. Todos los códigos de los países se refieren a suelos rocosos y densos, asignando valores mucho más bajos que aquellos obtenidos usando pruebas directas (cross hole) o indirectas (MASW o SASW). Con respecto a suelo suave, todos los países utilizan valores similares. Para estandarizar a la región, los valores superiores utilizados para suelo rocoso, deben ser modificados en todos los códigos de los países, excepto en Panamá. El uso de diferentes tipos de suelo, conduce a incrementos importantes en el coeficiente sísmico, como se muestra en la Figura 14. De esta manera, la correcta definición de velocidad de onda de corte para cada tipo de suelo, puede ayudar a lograr una clasificación más confiable y por tanto cargas sísmicas acordes a las condiciones reales del sitio. Sólo el código panameño refleja velocidades que coinciden con mediciones de campo usando las técnicas mencionados anteriormente (cross hole / MASW o SASW).

SUMMARY OF SHEAR WAVE VELOCITIES (M/S) ACCORDING TO SOIL TYPE					
COUNTRY	ROCKY SOIL	RIGID SOIL	DENSE SOIL	PLASTIC SOIL	SOFT NONCOHESIVE SOIL
GUATEMALA	> 8 0 0	8 0 0 to 2 0 0		< 2 0 0	
EL SALVADOR	> 5 0 0	5 0 0 to 1 5 0		< 1 5 0	
NICARAGUA	> 7 5 0	750 to 360	360 to 180	< 1 8 0	
HONDURAS	> 7 6 0	7 6 0 to 1 5 0		< 1 5 0	
COSTA RICA	> 7 6 0	7 6 0 to 1 5 0		< 1 5 0	
PANAMA	> 1 5 0 0	760 to 1500	760 to 370	370 to 180	< 1 8 0
EEUU	> 1 5 0 0	760 to 1500	760 to 360	360 to 180	< 1 8 0

Fig.16 Resumen de velocidades de onda de corte (m/s) de acuerdo al tipo de suelo

Cargas de Viento

Con respecto a las cargas de viento, los códigos de diseño de Centroamérica se encuentran basados en métodos simplificados. Estos usualmente aplican a estructuras rígidas, con características que no las hacen susceptibles a los efectos dinámicos del viento, los cuales toman en cuenta efectos de ráfaga, debido al tipo de exposición al que estará sujeta la estructura, y dependen de variables de la edificación, como la altura y la geometría, así como variables del sitio, como la topografía, direccionalidad del viento, y la velocidad (o presión) instantánea básica de diseño. En principio los métodos usados reflejan el enfoque de códigos internacionales (usualmente de estados unidos) vigentes al momento de la

elaboración de la normativa correspondiente. Estos reglamentos no reflejan investigaciones propias en la región. También la definición de parámetros de diseño no es común para los países de Centroamérica, países como Costa Rica y Nicaragua, utilizan presiones básicas de diseño y no definen como se correlacionan con velocidades de diseño. En cambio en el resto de países se definen velocidades básicas de diseño, tal como puede verse en [Figura 17](#).

VELOCIDADES DE DISEÑO MINIMAS Y MAXIMAS EN CENTROAMERICA (KM/H)		
PAIS	MINIMA	MAXIMA
PANAMA	115	140
HONDURAS	112	200
GUATEMALA(UBC97)	100	210
EL SALVADOR	70	
NICARAGUA/ COSTA RICA	N/A (DEFINEN PRESIONES EN VEZ DE VELOCIDADES)	

Fig. 17 Resumen de velocidades de viento máximas y mínimas en Centroamérica

Con objeto de comparar cada uno de los códigos a continuación se muestra el cálculo de la máxima y mínima presión estática de diseño para el caso más desfavorable correspondiente a un edificio ubicado en una zona de máxima exposición al viento para cada uno de los países centroamericanos y máxima velocidad de viento. Tal como se observa en la [Figura 18](#), los códigos de Nicaragua y Honduras conducen a los valores de diseño por viento más desfavorables en toda la región, cuando se combinan todos los factores críticos.

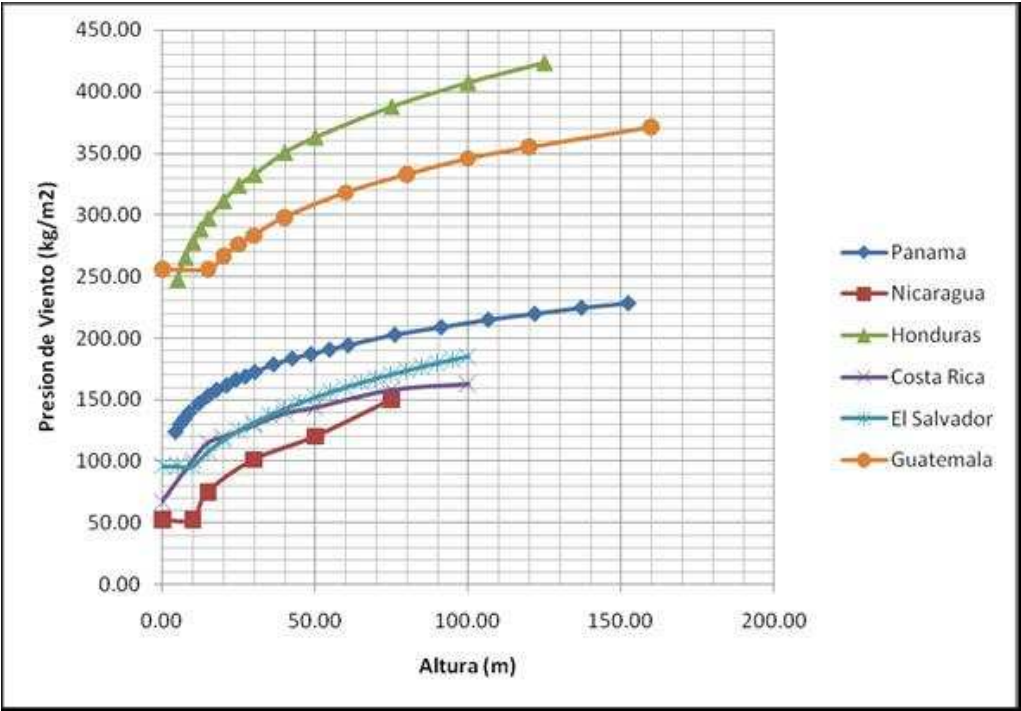


Fig. 18 Velocidades de viento máximas y mínimas en Centroamérica para casos críticos

En el caso de edificios altos, está aceptado internacionalmente, especialmente para baja y moderada sismicidad, que, sobrepasando una altura específica (normalmente los 40 pisos), el viento controla el diseño. En Centro América, únicamente Panamá incluye en su Reglamento de Diseño, lineamientos particulares para realizar los ensayos en túneles de viento para edificios altos. La [Figura 19](#) muestra un ejemplo correspondiente a un edificio de 75 pisos en Panamá.

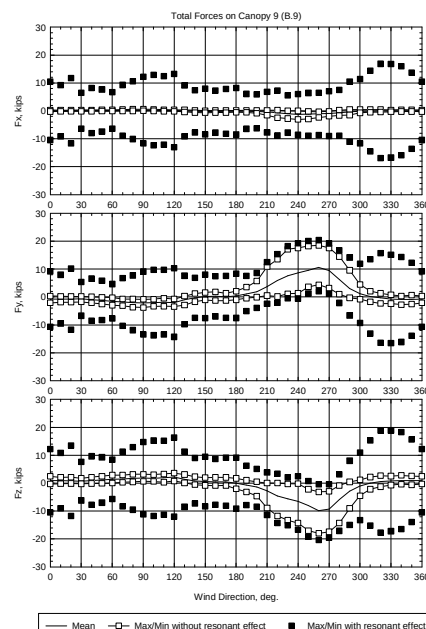
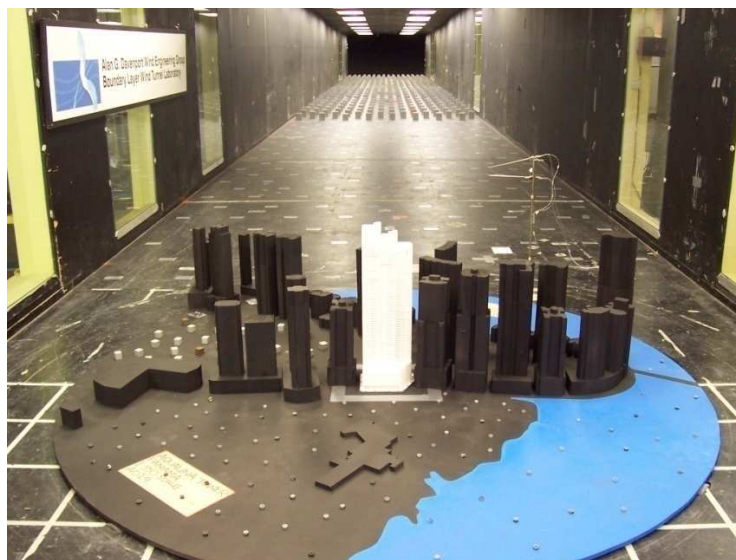


Fig. 19 Simulación en túnel de viento para un edificio de 75 niveles en Panamá

SISTEMAS ESTRUCTURALES PARA EDIFICIOS ALTOS EN C.A.

El reto principal para estructurar edificios altos es definir un sistema capaz de resistir cargas horizontales lo más eficiente posible mientras se maximiza el espacio libre. La estructura debe garantizar seguridad y una absorción eficaz de cargas gravitacionales y accidentales sin exceder los desplazamientos permisibles y límites de vibración. Desde los 80's, las estructuras predominantes en la región centroamericana se basaron en marcos espaciales y en marcos interactuando con paredes de corte. En toda la región, a excepción de Panamá, aun se continúan utilizando sistemas de losa densa y sistemas que utilizan viguetas pretensadas y rellenos aligerados con bloques de arcilla o concreto. De acuerdo a los reglamentos centroamericanos los sistemas estructurales recomendados ([ver figura 7](#)) corresponden a edificaciones eficientes para alturas moderadas.

Para edificios en altura, es común el uso de los sistemas siguientes:

- Marcos espaciales de concreto reforzado o acero interactuando con paredes de corte y/o crucetas metálicas.
- Paredes de corte estratégicamente ubicadas que absorben el 100% de cargas laterales, combinadas con columnas que absorben cargas verticales.
- Paredes de corte combinados cinchos de rigidez (outriggers) para absorber la totalidad de las cargas laterales y sistemas de marcos resistiendo cargas gravitacionales.

Debido a las altas cargas asociadas con los edificios altos, el uso de concreto de alta resistencia (mayor que 550 kg/cm²) en columnas, paredes de corte y cinchos de rigidez, se ha vuelto obligatorio. Un fenómeno particular de Panamá, es el uso generalizado de losas postensadas con tendones no-adheridos, para sistemas de entrepiso. Estas losas planas han conducido a la reducción sustancial de las alturas de entrepiso en valores de hasta 70cm por piso (de 3.50 a 2.80-3.00). La introducción de losas postensadas (de 18 a 25 cm de espesor), junto con encofrados volantes, ha conducidos a reducciones drásticas de los tiempos de construcción (usualmente se colocan 700 m² de losa cada 4 días). Al final de los años 90's, el uso de cinchos de rigidez y concreto de alta resistencia (resistencias de compresión de más de 700 kg/cm²) fueron introducidos en Panamá. Desde el año 2000, la altura de edificios en Panamá se ha incrementado hasta 70 pisos (ver Figura 20). Actualmente (2008), por lo menos 14 edificios están siendo diseñados o construidos con alturas de hasta 360m de altura (80 y 90 pisos). En estos rascacielos, la resistencia lateral es lograda usando paredes de corte en combinación con cinchos de rigidez y columnas externas. El sistema de resistencia gravitacional consiste de losas postensadas, columnas y paredes.



Fig. 20 Edificios altos en Panamá

Sistemas de Fundaciones

Los tipos de suelo en las capitales centroamericanas, son extremadamente heterogéneos, con la excepción de Ciudad de Panamá, donde el manto rocoso se encuentra relativamente cerca (menos de 15m) en la mayoría de las zonas urbanas de la ciudad). Debido a la alta actividad volcánica (Guatemala, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica), los suelos están mayormente compuestos por cenizas volcánicas con profundidades variando de 0 a 200 m. Debido a esto, los sistemas de fundaciones pueden variar drásticamente dentro de la misma ciudad. Los siguientes tipos de fundación son comunes en Centro América (ver Figura 21):

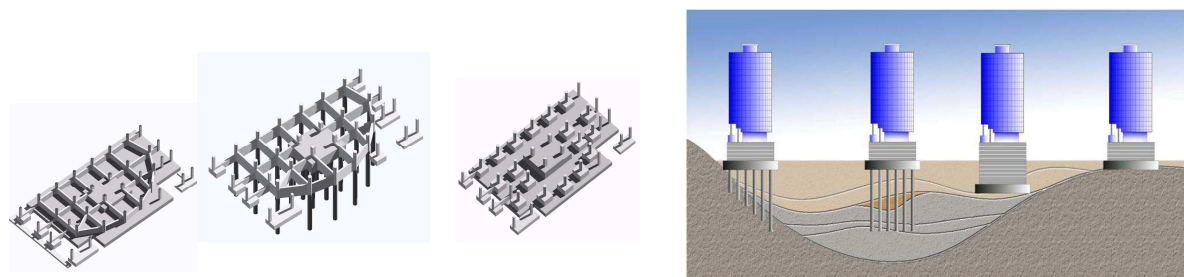


Fig. 21. Sistemas de Fundaciones para edificios altos en C.A

- Pilas de concreto reforzado coladas in situ con diámetros entre 60 cm y 180 cm, flotantes o insertadas en el manto rocoso.
- Losas de fundación combinadas con vigas profundas.
- Fundaciones con ábacos utilizando losas con espesores desde 1m a 2m y ábacos (dados) para absorber cortante de 2.00 hasta 5.00 m de peralte.(ver Figura 22)
- Cimentaciones poco profundas conectadas por vigas de fundación.(ver Figura 23)
- Muros de retención con anclajes y/o apuntalamiento temporales



Fig. 22. Ejemplo de edificio de 90 m de altura con losa de cimentación y ábacos

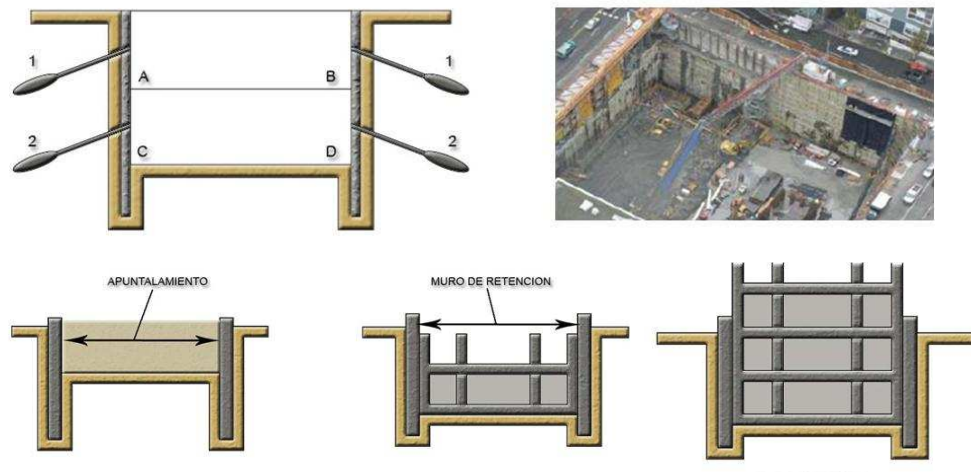


Fig. 23. Sistemas de retención para sótanos usuales en Centroamérica cimentación y ábacos

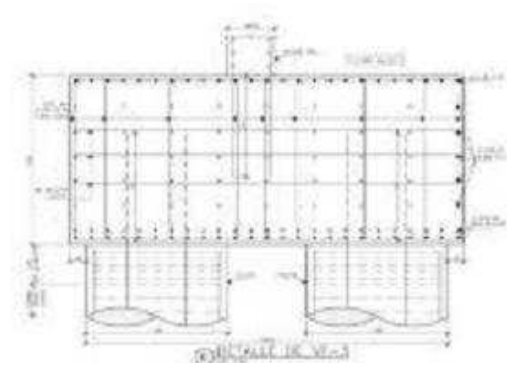


Fig. 24. Sistema de Fundación para edificios altos en Centro América.

Estructura Principal

Con el incremento en altura, los desplazamientos laterales y las vibraciones son los factores que controlan el diseño de la estructura principal de un edificio. Una de las primeras tareas a cumplir en el proceso de diseño es conseguir un sistema estructural que tenga bajo control las derivas y vibraciones. Por tanto, se busca en los estadios tempranos del diseño, un sistema con una adecuada rigidez lateral y un período de vibración natural aceptable (ver Figura 24). Una vez se ha alcanzado esta meta, se pueden llevar a cabo soluciones detalladas relacionadas con la resistencia de los componentes individuales del edificio. En países con alto riesgo sísmico ($A_o > 0.30$), el uso de cinchos de rigidez y paredes de corte debe ser combinado con marcos espaciales para garantizar eficiencia (costo) y niveles aceptables de seguridad estructural. Para edificios más altos de 50 pisos, estos sistemas que combinan paredes de corte, cinchos de rigidez y vigas de acople han conducido a soluciones estructurales y funcionales satisfactorias en Panamá ($A_o=0.15$).

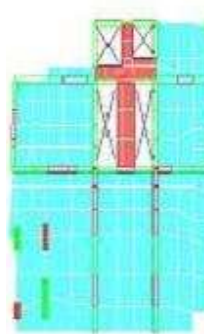


Fig. 25 Ejemplo del detalle de un cincho de rigidez para un edificio alto en Panamá, $T = 8$ s,

Los cinchos de rigidez tienen la función de conectar a las paredes del núcleo y demás paredes de corte internas, con el resto de elementos estructurales ubicados perimetralmente (columnas o paredes de corte), de esta forma se logra compensar los efectos de flexibilidad asociados con la esbeltez de la estructura, en particular los

desplazamientos laterales, así como también las altas tensiones concentradas en el sistema de fundación (ver Figura 25). El periodo natural deseado de las estructuras entre 70 y 100 pisos, es del orden de 8 segundos. En el caso del modelo mostrado en la figura 24, correspondiente a una estructura de 75 pisos, su periodo natural de vibración resultante fue de $T=8$ segundos. Este periodo se logra luego de introducir 3 cinchos de rigidez distribuidos en toda la altura. El periodo original de vibración natural sin cinchos de rigidez fue de 16 segundos. Una ventaja adicional de este tipo de sistema de restricción lateral es que puede ser construida con el uso de materiales convencionales (perfiles metálicos o concreto reforzado). Vibraciones locales causadas por cargas de viento gobernaron el diseño de este edificio. Para edificios altos, y en el caso de cargas viento, las máximas deformaciones permisibles son de $H/800$, mientras que para cargas por sismos estas están limitadas por $H/400$.

Vigas de Acople

Las vigas de acople son utilizadas para interconectar los elementos de paredes de corte, dando a las paredes rigidez y un comportamiento dúctil. Adicionalmente, las vigas de acople protegen a la losa contra daños por rotación causados por paredes de corte no interconectadas (ver figura 26). En este sistema, se busca obtener una disipación adicional de energía sin pérdida de estabilidad o resistencia en las paredes de corte, mediante la inducción de rotulaciones plásticas en las vigas.

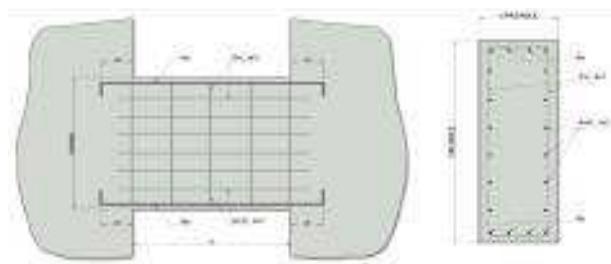


Fig. 26. Ejemplo de vigas de acople

Índices de Costos

La Figura 27 muestra un resumen obtenido del costeo de diferentes edificios altos en Centroamérica. Tal como puede apreciarse, el sistema de losas representa un volumen no menor al 50 % del volumen total de un edificio alto. Por tanto su uso eficiente conduce a los mayores ahorros en el costo total. En el caso de Panamá el éxito que ha tenido el uso de sistemas postensados, tiene su justificación en este aspecto. Para una gran cantidad de edificios de concreto reforzado, la relación entre total de superficie construida y volumen total de concreto, se ha encontrado alrededor de 0.5. Usando esta relación se puede establecer, que para una edificación con un total de 100,000 m² de construcción se esperaría un volumen de 50,000 m³ de concreto estructural. Esta relación varía ligeramente de país a país en Centroamérica, pero da una excelente guía global. Otro factor útil lo refleja el peso total de acero de refuerzo (en el caso de edificios de concreto) contra el área de construcción. En este caso para edificios en zonas altamente sísmicas se ha

obtenido en promedio rangos entre 65-75 kg/m². Para el caso de Panamá, este valor disminuye al orden de hasta 35 kg/m² con fronteras máximas de hasta 60 kg/m².

Vol. of Concrete

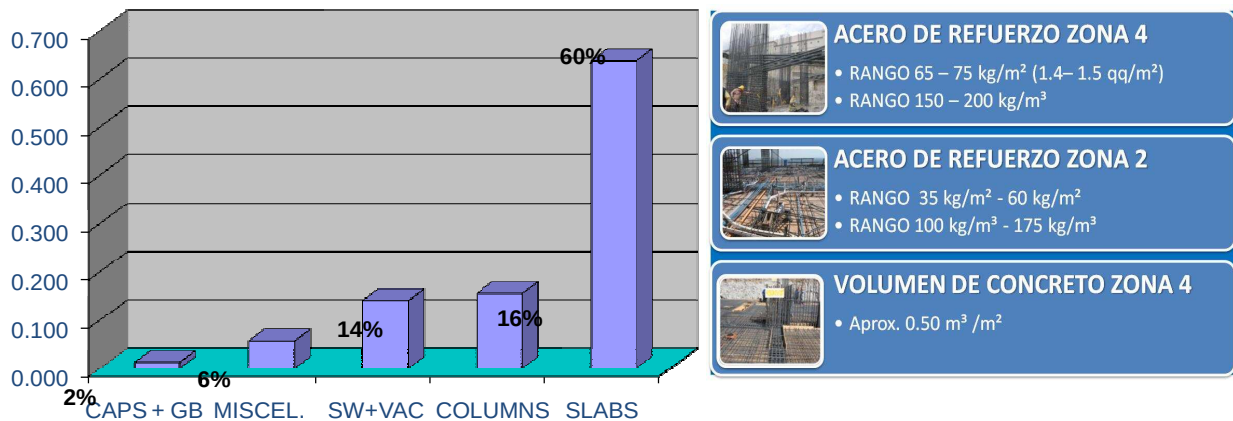


Fig. 27 Índices de costos tipo para el área de Centroamericana

Agradecimientos

Sinceros agradecimientos a nuestros colaboradores en ambas oficinas de San Salvador y Panamá, por el valioso aporte en el desarrollo de este documento.

Referencias

1. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES, "Normas Estructurales de Diseño y Construcción, Recomendadas para la República de Guatemala", Guatemala, 1996/2000.
2. Ministerio de Obras Públicas, Norma Técnica de Diseño por Sismo de El Salvador, Ministerio de Obras Públicas, MOP, El Salvador, 1997.
3. Reglamento para el Diseño Estructural en la República de Panamá, REP-2004, "Sociedad Panameña de Ingenieros y Arquitectos", Panamá, 2004.
4. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, "Código Sísmico de Costa Rica", Costa Rica, 2002.
5. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, "Reglamento Nacional de Construcción, Norma Técnica para Diseño por Sismo de Nicaragua", Nicaragua, 2005.
6. Structural Engineering Design Provision, International Conference of Building Officials, "Uniform Building Code", USA, 1997
7. Código Hondureño de Construcción. Reglamentación de Construcciones y Normas Técnicas Complementarias, Colegio de Ingenieros Civiles de Honduras CICH edición 2000.