

Estimación de costos adicionales por seguridad sísmica en proyectos de cimentaciones superficiales

Estimation of additional costs by seismic safety in shallow foundations projects

Eduardo Rafael Álvarez-Deulofeu^{1*}, Eduardo Beira-Fontaine¹, Pedro Manuel Cabrera-Castro¹, Mohamed Daoud-Mohamed²

¹Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

²Ministerio de Ciudad, Organismo y Vivienda, Yibuti.

*Autor para la correspondencia: ealvarez@uo.edu.cu

Resumen

Se evalúan los costos adicionales por seguridad sísmica en proyectos de cimentaciones superficiales para cinco edificaciones de hormigón armado con diferentes dimensiones en planta y puntal, en la ciudad de Santiago de Cuba, zona de mayor peligrosidad sísmica en Cuba. Se comparan los costos directos de los platos de cimentación para cargas sísmicas, de viento y para cargas gravitatorias separadamente. Las propiedades físico mecánicas del suelo son obtenidas de ensayos de muestras de suelos para calas en el sitio de las obras. Las solicitaciones para el diseño de los platos de cimentación resultan de la modelación estructural utilizando el SAP 2000 NL versión 14 para las combinaciones de carga recomendadas por las normativas cubanas vigentes. Para el diseño geotécnico y estructural de la cimentación se utilizó el libro Excel DISCAR 3.0. Los presupuestos son ofrecidos por el programa PRESWIN, demostrándose incrementos de los costos por seguridad sísmica de los platos de cimentación entre un 34 a 66 % en relación a similares costos obtenidos por las cargas de viento o cargas gravitatorias, incrementándose significativamente las dimensiones de los platos de cimentación, los volúmenes de hormigón y de excavación y peso total de acero de refuerzo para las cargas sísmicas.

Palabras clave: Cimentaciones superficiales; seguridad sísmica; evaluación económica; diseño geotécnico y estructural.

Abstract

Additional costs for seismic safety are evaluated in shallow foundation projects for five reinforced concrete buildings with different dimensions in plan and prop, in the city of Santiago de Cuba, an area of greatest seismic danger in Cuba. The direct costs of the foundation plates for seismic, wind load and gravity loads are compared separately. The physical mechanical properties of the soil were obtained from testing soil samples obtained by SPT test at the construction site. The requirements for the design of the foundation plates result from the structural modeling using SAP 2000 NL version 14 for the load combinations recommended by current Cuban regulations. For the geotechnical and structural design of the foundation, the Excel book DISCAR 3.0 was used. The budgets were calculated using the PRESWIN program, showing increases in the costs for seismic safety of the foundation plates between 34 to 66% in relation to similar costs obtained by wind loads or gravitational loads, significantly increasing the dimensions of the foundation's plates, concrete and excavation volumes as well as total reinforcing steel weight for seismic loads.

Keywords: Shallow foundations; seismic safety; economic evaluation; geotechnical and structural design.

1. INTRODUCCIÓN

Los eventos sísmicos acompañan a la humanidad desde hace muchos años y estarán presentes en el futuro; por su impacto en la sociedad, ocupan un lugar relevante en la historia. Existen regiones donde los sismos se concentran más en cantidad y en intensidad (Arriagada 2005). Para la UNESCO, el grado de amenaza de cada región obliga a exigencias en el diseño de las construcciones, estrictas en relación a la responsabilidad social y el nivel de desarrollo de las mismas. El diseño de cimentaciones en áreas propensas a terremotos necesita consideraciones especiales. Para las cimentaciones superficiales se reduce la capacidad soportante e incrementan los asentamientos e inclinación por las cargas sísmicas (Richards *et al.* 1993). Esta reducción de capacidad dependerá del tipo de suelo y aceleración del terreno. Las cimentaciones en zonas sísmicas deben asegurar la transmisión de la carga al suelo y deben permitir con un daño mínimo, que se verifiquen los mecanismos de disipación de energía asumidos para la superestructura (Paulay *et al.* 1990), de los cuales depende la seguridad de la edificación. Esto lleva a cimentaciones con un alto consumo de hormigón y acero (Álvarez-Deulofeu *et al.* 2018), que disminuiría para reducciones significativas de las cargas muertas (Álvarez-Deulofeu 2019). Una posterior

validación del diseño geotécnico y estructural aplicando un análisis dinámico lineal en el tiempo (Álvarez-Deulofeu *et al.* 2019) haciendo uso de acelerogramas de sismos sintéticos escalados para el sitio de la edificación aporta testimonios importantes del riesgo sísmico de las cimentaciones.

En Cuba se desarrollaron investigaciones para evaluar los métodos de cálculo de diseño geotécnico de cimentaciones (Chagoyén & Negrín 2009), las cuales entre otras tributaron a la "Norma Cubana para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales" (2016). Esta norma considera la disminución de la capacidad soportante del suelo debido a las cargas sísmicas a través de factores de inclinación de la carga transmitida al suelo y un factor de seguridad adicional que reduce la capacidad de carga total del suelo.

El costo total de una construcción civil puede cambiar la toma de decisión o la forma de plantear las soluciones, por lo que esta rama cada día adquiere mayor importancia. En las zonas sísmicas para decidir sobre qué medida de mitigación de riesgo sísmico implementar, para el nivel de desempeño exigido, se hace un análisis cuantitativo tanto de los beneficios, como de los costos necesarios para la implementación de dichas medidas, para realizar una comparación de alternativas constructivas para tomar decisiones científicamente sustentadas en cuanto a las inversiones (Mora 2015). El costo total en zona sísmica podría presentarse como la suma de varios costos:

- A. Costo estructural básico (baja amenaza sísmica, acciones gravitatorias).
- B. Costo estructural adicional (garantizar seguridad sísmica).
- C. Costo de elementos no estructurales (falla para eventos sísmicos).

La ciudad de Santiago de Cuba, sacudida por un gran terremoto en 1932, donde hubo pocas víctimas, pero cuantiosos daños, está ubicada en la zona de más alta peligrosidad sísmica del país, donde las sollicitaciones sísmicas resultan dominantes en el diseño de estructuras, precisando de proyectos estructurales racionales que garantizando la seguridad sísmica, contribuyan a un mejor uso de los recursos y al mismo tiempo eviten graves pérdidas económicas y de vidas humanas y que mitiguen impactos ambientales negativos e irreversibles para el país. Así al desconocer los costos adicionales al diseñar cimentaciones superficiales sismorresistentes en estructuras de diferentes tipos y niveles en la provincia de Santiago de Cuba, compromete la seguridad estructural e introduce incertidumbres en las estimaciones en la valoración económica de los proyectos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Investigaciones experimentales geotécnicas

Se parte de la hipótesis que los edificios estudiados están ubicados en un perfil ingeniero geológico, donde se realizaron calas hasta los 10 m profundidad. Las investigaciones experimentales de los parámetros físico-mecánicos en los estratos de suelo encontrados, realizadas por Cabrera (2006) y publicadas por Cabrera y Beira (2007), se resumen en la Tabla 1 y Figura 1. El perfil ingeniero geológico de suelo está formado por una capa de relleno de 3 m, seguido de un estrato arcilloso de alta compresibilidad (CH) hasta 9 m y a la que sigue un estrato de arcilla de baja compresibilidad (CL). El número de golpes promedio por pie (N_{SPT}) hasta los 7 m refieren una consistencia dura, alcanzando ser muy dura por debajo de esta profundidad. Los índices de compresión del suelo (C_c) están entre 0,14 y 0,22 y los de expansión (C_s) entre 0,02 y 0,06. Los cimientos de los edificios modelados se desplantan en el estrato de suelo CH, con una cohesión de 70 kPa, ángulo de fricción interna de 15 grados, peso específico sumergido 9 kN/m³, humedad promedio 30 %, grado de saturación promedio de 80 % y nivel freático a 7 m.

Tabla 1. Valores promedios de parámetros físico-mecánicos del suelo por cada metro de profundidad (Cabrera, 2006)

Est.	z (m)	LL (%)	LP (%)	Nspt (Golpes)	ω (%)	I _c	γ_f (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	e _o	S (%)
R	1	64,5	25,6	15	23,6	1,1	18,3	14,8	26,9	0,70	79,0
R	2	63,1	24,6	22	24,4	1,0	19,3	15,5	26,9	0,62	69,0
R	3	56,5	24,4	16	25,6	1,0	18,6	14,8	26,6	0,72	76,0
1	4	60,3	24,6	29	29,8	0,9	18,5	14,2	26,8	0,72	85,0
1	5	56,9	28,2	21	35,8	0,7	17,8	13,1	26,8	0,92	83,0
1	6	81,7	31,8	20	34,0	1,0	17,8	13,3	26,9	0,84	90,0
1	7	80,3	30,8	21	41,9	0,8	16,8	11,9	27,2	1,29	88,5
2	8	74,3	27,6	23	22,3	1,1	18,2	14,9	27,3	0,84	75,0
2	9	54,2	24,5	22	20,4	1,1	19,6	16,2	27,4	0,69	83,0
3	10	49,4	24,2	58	19,7	1,2	20,3	17,0	27,2	0,60	90,7

Est.: estrato **Nspt**: número de golpes promedio por pie **R**: relleno **z**: profundidad **LL**: límite líquido **S**: saturación **LP**: límite plástico **ω** : humedad **I_c**: índice de consistencia **e_o**: índice de poros **γ_f** : peso específico del suelo natural **γ_d** : peso específico del suelo seco **γ_s** : peso específico del suelo saturado

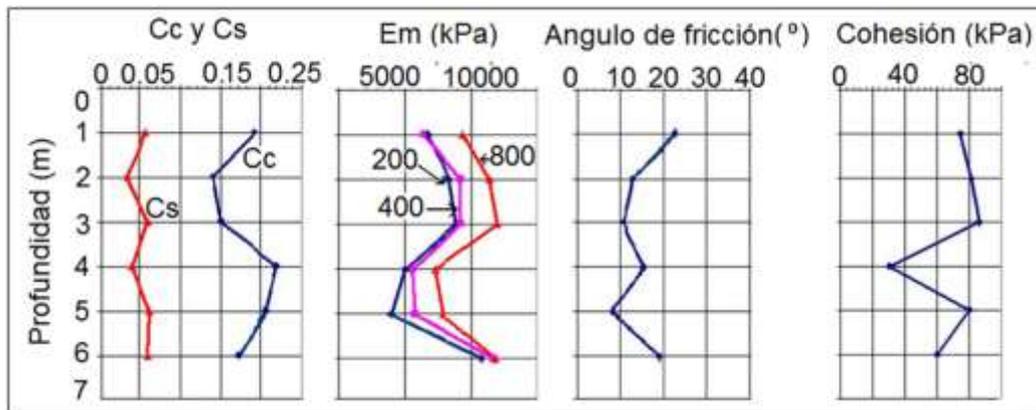


Figura 1. Parámetros de compresibilidad y resistencia del perfil del suelo hasta los 6 m de profundidad, (Cabrera 2006).

2.2. Modelo estructural de los edificios analizados

Se estudian cinco edificios de baja altura, 4 de viviendas y uno social, con diferentes plantas y puntal (Tabla 2), a construir en la ciudad de Santiago de Cuba en perfil de suelo D, según la norma sísmica cubana NC 46:2017 (2017), de acuerdo con las características físico-mecánicas del estrato resistente. Para los edificios de vivienda, la profundidad de desplante es de 2.30 m, partiendo de la ejecución de una terracería que termina en la profundidad - 0.70 m de la superficie del terreno, ejecutada hipotéticamente por razones constructivas antes de la ejecución de la obra. En el caso del Edificio 5 para servicio social la profundidad de desplante será considerada a 3 m de profundidad desde la cota de terreno natural. La modelación de las estructuras se realizó con el SAP 2000 NL versión 14. Las combinaciones de cargas utilizadas para el diseño de la cimentación se corresponden con las recomendadas por la NC 450:2006 (2006) para las cargas de viento y gravitatorias y por la NC 46:2017 (2017) para las cargas sísmicas.

Tabla 2. Datos relacionados a la geometría de las edificaciones y secciones transversales de los elementos de la subestructura

Edif.	Dimensiones del Edificio				Elevación		Dirección Longitudinal Dir. X		Dirección Transversal Dir. Y	
	Altura (m)	Largo (m)	Ancho (m)	No. Pisos	Puntal Primer Piso (m)	Puntal Restantes Pisos (m)	No. Luces	Luz (m)	No. Luces	Luz (m)
1	8.4	30.0	10.2	3	3.0	2.70	10	3.0	2	5.1
2	12.3	15.0	7.8	4	3.3	3.00	5	3.0	2	3.9
3	9.3	14.4	8.4	3	3.3	3.00	4	3.6	2	4.2
4	5.7	24.0	10.2	2	3.0	2.70	8	3.0	2	5.1
5	16.5	36.0	30.0	5	3.3	3.30	5	7.2	5	6.0

Edif.	Dimensiones Viga Sísmica				Dimensiones Pedestal			
	Peralto (m)	Ancho (m)	A (m ²)	Ix (m ⁴)	Peralto (m)	Ancho (m)	A (m ²)	Ix (m ⁴)
1	0.80	0.30	0.2400	0.0128	0.55	0.55	0.3025	0.0076
2	0.65	0.25	0.1625	0.0057	0.50	0.50	0.2500	0.0052
3	0.70	0.25	0.1750	0.0071	0.50	0.50	0.2500	0.0052
4	0.70	0.25	0.1750	0.0071	0.50	0.50	0.2500	0.0052
5	0.90	0.40	0.3600	0.0243	0.60	0.60	0.3600	0.0108

A: Área de la sección transversal

Ix: Momento de inercia con respecto al eje de flexión de la sección transversal en el plano de los pórticos

Considerando carga de sismo que incluye la demanda sísmica vertical:

COMBO 1: CP + 25% CU+ 100% CSx + 30% CSy + 30% CSz

COMBO 2: CP + 25% CU + 30% CSx + 100% CSy + 30% CSz

COMBO 3: CP + 100% CSx + 30% CSy - 30% CSz

COMBO 4: CP + 30% CSx + 100%CSy - 30% CSz

COMBO 5: CP + CU

Considerando carga de viento:

COMBO 1: CP + CU + CVx

COMBO 2: CP + CU + CVy

COMBO 3: CP + CVx

COMBO 4: CP + CVy

COMBO 5: CP + CU

Considerando solo cargas gravitatorias:

COMBO 1: CP + CU

Donde:

CP: Cargas gravitatorias que incluyen las cargas de peso propio de la estructura del edificio

CU: Cargas de utilización del edificio

CS_x: Cargas sísmicas horizontales en la dirección X del edificio

CS_y: Cargas sísmicas horizontales en la dirección Y del edificio

CS_z: Cargas sísmicas verticales

CV_x: Cargas de viento con acción predominante en la dirección X del edificio

CV_y: Cargas de viento con acción predominante en la dirección Y del edificio

2.3. Métodos para el cálculo de las cargas

A. Cargas sísmicas

Se modelan las cargas sísmicas por la norma sísmica cubana NC 46:2017 utilizando el "*Método Estático Equivalente*", considerando las tres componentes fundamentales del sismo, dos componentes horizontales y la otra vertical, combinando el 100% de la carga sísmica en una de las direcciones principales, simultáneamente con el 30% en las restantes direcciones. La carga sísmica vertical se modela como un incremento de la carga permanente total, incluido el peso propio de la estructura, y estimado como el 20% de la carga permanente referida anteriormente por la aceleración de respuesta para período corto según el espectro de diseño para el perfil de suelo considerado.

B. Carga de viento

La modelación de la carga de viento se realizó por la NC 285:2003 (2003) utilizando el "*Método Estático*", considerando la acción del viento por separado en la dirección longitudinal (dirección de X) y transversal (dirección de Y), para la presión básica del viento establecida para las provincias orientales en este reglamento.

2.4. Diseño de la cimentación superficial

Se analizaron tres variantes de diseño para los platos de cimentación de las 5 tipologías de edificios, considerando en la primera variante el efecto del sismo, en la segunda el efecto del viento y finalmente teniendo en cuenta solo cargas gravitatorias. Las solicitaciones de los cimientos, ofrecidas por el

SAP 2000 NL versión 14, fueron exportadas al libro Excel DISCAR 3.0, que realiza el diseño geotécnico y estructural de la cimentación por las normas cubanas vigentes. Las dimensiones de los platos de cimentación, para un valor prefijado de rectangularidad de 1, serán aquellas que garantizan que se cumplan los estados límites de estabilidad al vuelco, deslizamiento y capacidad portante. Para evaluar las consecuencias económicas del uso conservador o no del factor de seguridad adicional establecido en la norma cubana de diseño geotécnico de cimentaciones superficiales (2016) se realizó el proyecto considerando los tres tipos de factores de seguridad adicional (γ_s) para condiciones geológicas normales, es decir: 1.15, 1.20 y 1.25. Para el diseño estructural se usa acero G-40 ($R_{ak}=300$ MPa) y hormigón de $R'_{bk}=25$ MPa, variando el diámetro de barra según la tipología de la estructura para las tres variantes. Se chequeó también el criterio a cortante y punzonamiento. En la Figura 2 aparece la planta de cimentación, así como los tipos de cimientos para el diseño geotécnico y estructural.

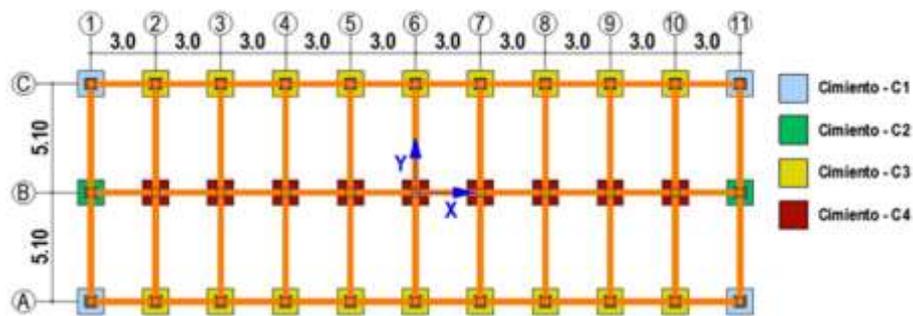


Figura 2. Planta de cimentación y tipos de cimientos (Edificio 1).

2.5. Análisis de los costos

Definidas las dimensiones de los cimientos y la profundidad de desplante en cada caso, se realizó un análisis de costos directos de la cimentación superficial (solo plato), utilizando para el cálculo de presupuestos el software PRESWIN basado en el sistema de precios de la construcción vigente en Cuba PRECONS II (2005). El material excavado se utilizó como material de rehincho y el hormigón fundido in situ, se consideró elaborado con arena lavada de Juraguá y grava de la cantera Los Guaos. Los precios de los materiales (cemento, acero, arena y piedra) son los vigentes según las resoluciones actuales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Cálculo de las cargas ecológicas y cargas gravitatorias

Las cargas sísmicas horizontales totales, cargas de viento para las dos direcciones de actuación del viento y cargas gravitatorias totales en la base de suelo se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Cargas sísmicas horizontales totales, cargas de viento totales para las dos direcciones de actuación del viento y cargas gravitatorias totales en la base de suelo.

Cargas Sísmicas Horizontales Totales en la Base (kN)					
Edificios	1	2	3	4	5
Base	1639.15	859.76	534.75	778.59	6503.93
Cargas de Viento Horizontales en la Base del Edificio (kN)					
Dirección Viento					
Fachada	198.955	167.422	115.096	101.073	474.954
Combo Cálculo	278.531	234.390	161.134	141.502	664.936
Lateral	64.500	80.729	61.243	42.231	391.226
Combo Cálculo	90.301	113.021	85.740	59.124	547.716
Cargas Gravitatorias de Cálculo Totales en la Base (kN)					
Combo Cálculo	16171.73	8277.68	5401.94	7992.67	89214.90
Relación entre las cargas ecológicas y gravitatorias en la Base					
Edif.	CV fach/CS	CV Lat/CS	CV fach/CG	CV Lat/CG	CS/CG
1	0.1699	0.0551	0.0172	0.0040	0.1014
2	0.2726	0.1315	0.0283	0.0098	0.1039
3	0.3013	0.1603	0.0298	0.0113	0.0990
4	0.1817	0.0759	0.0177	0.0053	0.0974
5	0.1022	0.0842	0.0075	0.0044	0.0729

Fachada: acción predominante del viento en la dirección Y del edificio

Lateral: acción predominante del viento en la dirección X del edificio

3.2. Diseño geotécnico de la cimentación superficial

Las dimensiones ($L = B$) del plato de cada uno de los cimientos tipos de los edificios para cada variante y factor de seguridad adicional considerado, se resumen en la Tabla 4. Se aprecian incrementos considerables (por encima del 30 %) de estas dimensiones cuando incide la carga sísmica, resultados que repercuten en el análisis económico. Las dimensiones de los platos de los cimientos requieren de mayores dimensiones independientemente del tipo de edificio cuando se incluye la carga sísmica en las combinaciones de carga y variando poco en función del factor de seguridad adicional.

Tabla 4. Variación de las dimensiones de los cimientos ofrecidas por el diseño geotécnico para el dominio de los factores de seguridad adicional según la norma cubana para el diseño geotécnico de cimentaciones.

Edif.	Tipo de Cargas	γ_s	Dimensiones de los Platos de Cimentación (m)				
			C1	C2	C3	C4	Peralto
1	Sísmica	1.25	1.75	1.45	1.35	1.50	0.35
		1.15	1.75	1.45	1.35	1.45	0.30
	Viento	1.25	1.00	1.00	1.00	1.10	0.25
		1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
	Gravitatorias	1.25	1.00	1.00	1.00	1.10	0.25
		1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
2	Sísmica	1.25	2.05	1.50	1.60	1.45	0.35
		1.15	2.05	1.50	1.60	1.40	0.30
	Viento	1.25	1.00	1.00	1.00	1.10	0.25
		1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
	Gravitatorias	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
		1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
3	Sísmica	1.25	1.65	1.35	1.25	1.30	0.35
		1.15	1.65	1.30	1.25	1.25	0.30
	Viento	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
		1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
	Gravitatorias	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
		1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
4	Sísmica	1.25	1.35	1.20	1.10	1.20	0.35
		1.15	1.35	1.20	1.10	1.15	0.30
	Viento	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
		1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
	Gravitatorias	1.25	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
		1.15	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25
5	Sísmica	1.25	2.85	2.45	2.55	2.65	0.55
		1.15	2.85	2.35	2.45	2.60	0.55
	Viento	1.25	1.60	1.85	1.90	2.30	0.55
		1.15	1.60	1.80	1.85	2.20	0.55
	Gravitatorias	1.25	1.60	1.85	1.90	2.25	0.55
		1.15	1.60	1.75	1.80	2.15	0.55

3.3. Análisis de los costos

Los resultados de los costos directos totales de cada edificio para cada tipo de carga (vertical, viento y sismo) y factores de seguridad adicional analizados, se muestra en la Figura 3. Es notable la diferencia de costo entre las variantes que consideran o no la acción del sismo, superior en un 34 %, confirmando que en un diseño sismo-resistente habrá un mayor consumo de materiales (hormigón y acero). No hay diferencias significativas de los costos bajo el efecto de las cargas gravitatorias y del viento (Tabla 5).

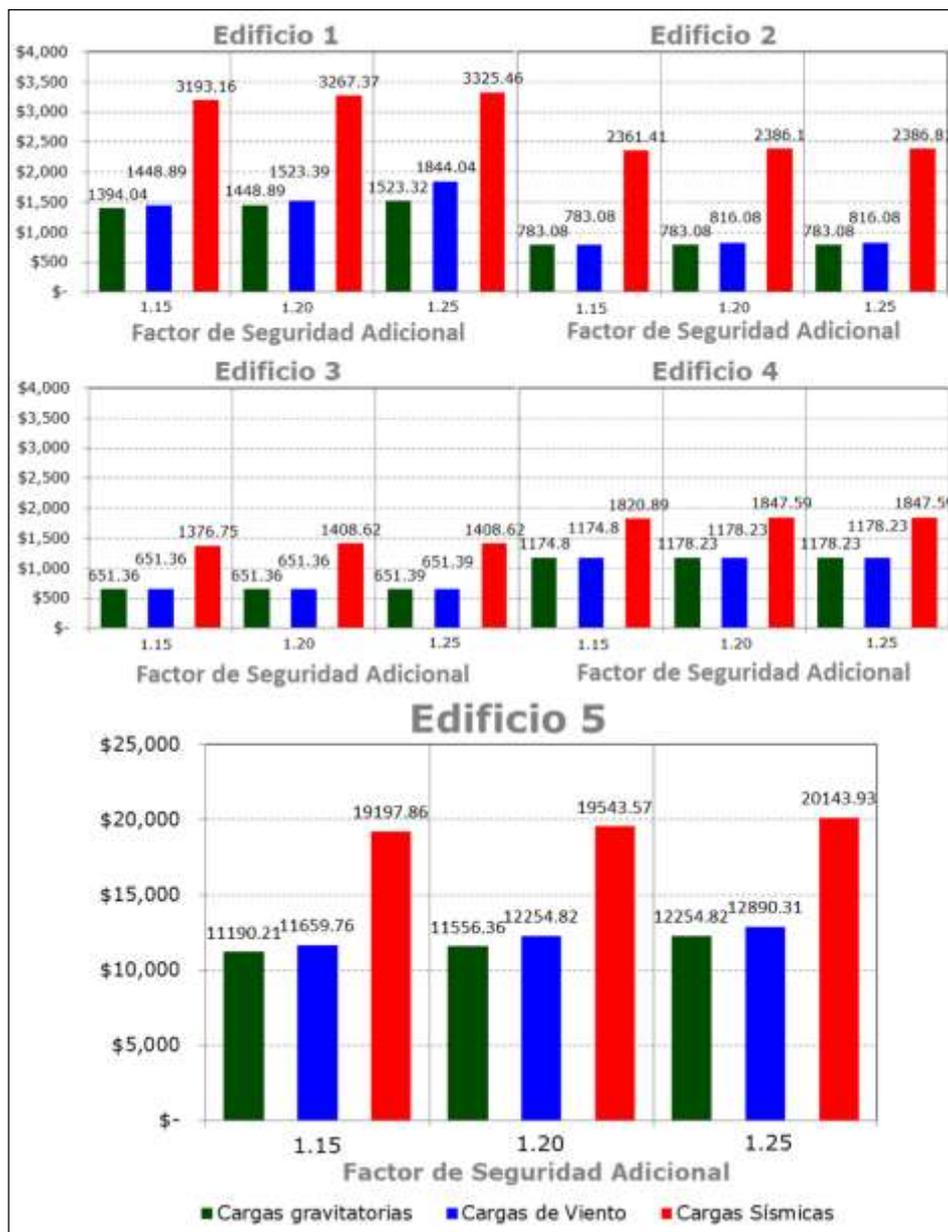


Figura 3. Comparación de los costos directos de la cimentación para las cargas analizadas y factores de seguridad adicional según la norma cubana para el diseño geotécnico de cimentaciones superficiales.

Tabla 5. Incremento de costos directos totales de la cimentación debido a cargas de viento y sísmicas con relación a las cargas gravitatorias ($\gamma_s = 1.15$).

Edificios	Costos Totales (\$)			Incremento de Costos Totales vs. Cargas gravitatorias (%)	
	Cargas Gravitatorias	Cargas de Viento	Cargas Sísmicas	Cargas de Viento	Cargas Sísmicas
1	1394.04	1448.89	3193.16	3.79	56.34
2	783.08	783.08	2361.41	0.00	66.84
3	651.36	651.36	1376.75	0.00	52.69
4	1186.63	1186.63	1820.89	0.00	34.83
5	11190.21	11659.76	19197.86	4.03	41.71

Resultan polémicas las dimensiones similares de los platos de cimentación debido a cargas de viento y cargas gravitatorias, generando costos similares, lo cual se justifica a continuación:

1. Según la norma cubana de carga de viento la presión básica del viento para las provincias orientales ($0,9 \text{ kg/m}^2$) es mucho menor que para las provincias centrales ($1,1 \text{ kg/m}^2$) y occidentales ($1,3 \text{ kg/m}^2$), fijando una velocidad máxima sostenida del viento de $136,6 \text{ km/h}$, muy por debajo de los últimos huracanes intensos que han azotado el país. Los edificios estudiados no alcanzan alturas significativas, siendo el gradiente de velocidad del viento bajo. Además, para el diseño de las cimentaciones las normas de cargas de viento no consideran el coeficiente de ráfaga, ya que su efecto se disipa en la superestructura.
2. Los edificios de hormigón armado predimensionados para sismos resultan pesados, por el uso de losas planas y grandes secciones transversales de las vigas y columnas que garanticen reducidos desplazamientos relativos de los pisos para el control de daños. La cimentación se recomienda rígida, usándose pedestales y vigas sísmicas con secciones transversales con grandes áreas y momentos de inercia en el plano de flexión de los pórticos. Los edificios de viviendas (Edificios 1 al 4) presentan además modulaciones en planta, de las cuales no resultan grandes luces por lo que los intercolumnios en las fachadas también serán reducidos. Todo lo anterior determina que las cargas de viento transmitan a las zapatas aisladas reducidas solicitaciones de momentos de vuelco y fuerzas de deslizamientos en comparación con las ocasionadas por las cargas sísmicas.

3. En la modelación estructural para las cargas de viento se asume comportamiento elástico lineal de la estructura, por lo que el ancho eficaz de las alas de las vigas fundidas integralmente con las losas es mucho mayor que para el modelo de comportamiento elasto - plástico asumido para las cargas sísmicas. Esto determina mayor participación de las vigas en la flexión de los pórticos reduciendo los momentos de vuelco que llegan al plato de la cimentación.
4. La combinación de cálculo de las cargas gravitatorias máximas utilizada para el diseño geotécnico de los platos de cimentación usan grandes factores de mayoración, sobre todo para las cargas de uso, determinando que las cargas verticales transmitidas al suelo alcancen valores significativos para el diseño geotécnico de las zapatas aisladas. Por otra parte, las cargas gravitatorias que se combinan con las de viento alcanzan valores en el orden de las resultan de la combinación de las cargas gravitatorias máximas, siendo los momentos transmitidos a las zapatas aisladas debido a las cargas de viento pequeños. Esto determina que las excentricidades de las cargas verticales transmitidas a las zapatas aisladas sean muy reducidas y no influyan significativamente en su diseño geotécnico.

Al comparar los costos para las cargas gravitatorias y sísmicas se aprecian notables incrementos (entre 34 y 66 %), mostrados en la Tabla 5 y Figura. 4. Al variar el factor de seguridad adicional (γ_s) para un mismo edificio, al incluir las cargas sísmicas, pueden producirse ligeros incrementos del costo de la cimentación para algunos de ellos (Figura 4), especialmente en los casos del modelo de edificio 1 y 5.



Figura 4. Incrementos de los costos directos de la cimentación debido a las cargas sísmicas y variación de los costos directos en función del factor de seguridad adicional seleccionado.

4. CONCLUSIONES

- Las cargas sísmicas dominan el diseño geotécnico de los platos, incrementando significativamente sus dimensiones en relación con las cargas de viento o gravitatorias, siendo el incremento independiente de la posición del cimientado en la planta de cimentación y variando poco en función del factor de seguridad adicional seleccionado.
- Los costos de los platos de cimentación debido a cargas sísmicas para los edificios de hormigón armado de baja altura estudiados en la ciudad de Santiago de Cuba son muy superiores a los costos debido a cargas de viento y cargas gravitatorias (entre el 34% a 66 %).
- Se demuestran diferencias despreciables entre los costos de los platos de cimentación para las cargas gravitatorias y de viento, por lo que los costos adicionales por seguridad sísmica pueden ser estimados en relación con las cargas gravitatorias para edificios de hormigón armado de baja altura, construidos en la Ciudad de Santiago de Cuba.
- Considerar el efecto sísmico en el diseño de las zapatas aisladas superficiales induce un incremento significativo de los costos directos por este concepto, sin embargo, además de garantizar la seguridad estructural de las edificaciones contribuye a evitar costos elevados de mantenimiento o demoliciones posdesastres.

5. REFERENCIAS

- Álvarez-Deulofeu, E. R. 2019: Influencia de las Cargas Muertas y el Tipo de Suelo en el Diseño de Cimentaciones Aisladas en Zonas Sísmicas, *Revista electrónica "Ciencia en su PC"*, No. 4:1-8, ISSN 1027-2887.
- Álvarez-Deulofeu, E. R., Beira-Fontaine, E. & Cabrera-Castro, P. M. 2018: Influencia del Sismo en los Costos Directos de Cimentaciones Aisladas en la Ciudad de Santiago de Cuba, *Revista de Obras Públicas*, ROP 3595:42-52, ISSN: 0034-8619, ISSN electrónico: 1695-4408, ROP en internet: <http://ropdigital.ciccp.es>
- Álvarez-Deulofeu, E. R., Beira-Fontaine, E. & Cabrera-Castro, P. M. 2019: Revisión del Diseño Geotécnico y Estructural de Cimentaciones Aisladas en Zonas Sísmicas por el Método de Análisis en el Tiempo, *Revista de Obras Públicas*, ROP 3609:48-58, ISSN: 0034-8619, ISSN electrónico: 1695-4408, ROP en internet: <http://ropdigital.ciccp.es>
- Arriagada, J. A. 2005: Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos. Análisis Comparativo de comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional, Valdivia, Chile. Consulta: 4 sep. 2020. Disponible en: <https://docplayer.es/16138477-Aislacion-sismica-de-un-edificio-de->

[oficinas-de-siete-pisos-analisis-comparativo-de-comportamiento-y-costos-con-un-edificio-tradicional.html](#)

- Cabrera, P. 2006: *Caracterización geotécnica del campo experimental de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente*. Eduardo Beira-Fontaine (Tutor). Tesis de Maestría. Universidad de Oriente. 80 p.
- Cabrera, P. & Beira, E. 2007: Caracterización geotécnica del campo experimental de ingeniería civil de la Universidad de Oriente. *Revista Académica de la FI-UADY*, 11(2): 57-66. ISSN:1665-529X.
- Chagoyén, E. & Negrín, A. 2009. Diseño Óptimo de Cimentaciones Superficiales Rectangulares. Formulación. *Revista de la Construcción*, Volumen 8. No.2, 60-71.
- Mora, M. 2015: *Análisis beneficio costo probabilista de medidas de mitigación del riesgo por sismo*. Alex Barbat, Omar Cardona, Martha Carreño (Tutores). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 109 p.
- NC 46:2017. Construcciones Sismo-resistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y la Construcción. Comité Estatal de Normalización. La Habana.
- NC 285:2003. Carga de viento. Método de cálculo. Comité Estatal de Normalización. La Habana.
- NC 450:2006. Edificaciones—factores de carga o ponderación—combinaciones. Comité Estatal de Normalización. La Habana.
- Norma Cubana para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales 2016. Comité Estatal de Normalización. La Habana.
- Paulay T., Bachmann H. & Moser K. 1990: *Erdbebenbemessung von Stahlbetonhochbauten*. Birkhaeuser Verlag, Berlin, 562 p.
- PRECONS II. 2005. Sistema de precios de la construcción. Editorial Obras. Centro de información de la construcción. La Habana.
- Richards R., Elms D. & Budhu M., 1993: Seismic Bearing Capacity and Settlements of Foundations, *Journal Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 119:662-674, USA.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

ERAD y MDM: Modelación estructural de las variantes de los edificios analizados haciendo uso del SAP 2000. Obtención de las solicitaciones de cálculo en la cimentación. Diseño geotécnico y estructural de los platos de cimentación. EBF y PMCC: Investigaciones experimentales

geotécnicas. Definición del perfil ingeniero geológico de suelo y determinación de los parámetros físico-mecánicos de suelo utilizados en el diseño de los platos de cimentación.

Todos los autores trabajaron por igual en el procesamiento de los datos, interpretación de resultados y elaboración y aprobación final del artículo.

ORCID

ERAD, <https://orcid.org/0000-0003-1819-263X>

EBF, <https://orcid.org/0000-0001-5701-8015>

PMCC, <https://orcid.org/0000-0001-7619-3396>

MDM, <https://orcid.org/0000-0002-1664-2142>

Recibido: 05/01/2021

Aceptado: 22/09/2021