

# Análisis Técnico Económico de Cimentaciones con Pilotes Cortos para obras turísticas de Cayería Noreste de Villa Clara



Msc. Raimundo Francisco Pérez Delgado. Msc. Miguel Angel Maestre Mesa.  
*UIC Villa Clara. Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas. Carretera Central  
Nº 441 Reparto Virginia. Santa Clara. Villa Clara. Cuba.*

## ABSTRACT

Through of an Engineer-geologic Investigation that included load tests to real scale and the model use by means of numeric methods settles down, for fine and uniform sandy floors, from loose until dense with the depth, the foundation variant with short, fused piles "in situ", perforated with drill helical numberless, without casing and on the level of the sea in facilities of the tourist development in key Santa María in Northeast of Villa Clara.

A comparative technician-economic analysis of this solution, with the direct and isolated foundation, very diffused for similar conditions, it allows to highlight the decrease of the work volumes with savings of materials, workers and time, jointly with other important advantages as the half-environmental ones, convincing investors, planners and manufacturers, maxima responsible for the constructions in the country, of establishing this type of short pile as basic element of the foundation in this area.

## RESUMEN

A partir de una Investigación Ingeniero-Geológica que incluyó pruebas de carga a escala real y el uso de modelación mediante métodos numéricos se establece, para suelos arenosos finos y uniformes, desde sueltos hasta densos con la profundidad, la variante de cimentación con pilotes cortos, fundidos "in situ", perforados con barrena helicoidal sin fin, sin encamisado y sobre el nivel del mar en instalaciones del desarrollo turístico en Cayería Noreste de Villa Clara.

Un análisis técnico-económico comparativo de esta solución, con la cimentación directa y aislada, muy difundida para condiciones similares, permite destacar la disminución de los volúmenes de trabajo con ahorros de materiales, fuerza de trabajo y tiempo, conjuntamente con otras ventajas no menos importantes como las medio-ambientales, para así convencer a inversionistas, proyectistas y constructores, máximos responsables de las construcciones en el país, de establecer este tipo de pilote corto como elemento básico de la cimentación en esta zona.

## INTRODUCCIÓN

El auge de la industria turística, en cuyos atractivos las playas poseen un peso fundamental, ha provocado que gran parte de las construcciones actuales, vinculadas a este proyecto, se ejecuten en zonas costeras donde abundan los suelos arenosos de origen sedimentario. Un ejemplo de esto lo constituye Cayo Santa María, en Cayería Norte de Villa Clara, donde se destina considerable número de parcelas a la construcción de hoteles y otras instalaciones afines al desarrollo de este plan, en litologías cuyas características como cotas relativamente bajas (1.00~3.00), nivel freático coincidente de manera aproximada con el nivel medio del mar, por ende poco profundo, y el aumento de la compacidad con la profundidad, unido a la disponibilidad técnica requerida, condicionan la valoración de la cimentación semi-profunda como solución de infraestructura en esta región.

Si bien esta variante de cimentación había sido implementada en otras regiones con litologías similares, la técnica empleada, máquinas Benotto y Poceras, con exigencias de encamisado, unido a los diámetros y longitudes de fuste considerables, necesarios en el elemento para alcanzar las capacidades de carga determinadas según las metodologías de diseño utilizadas, generalmente con interferencia del nivel

freático, impidió considerarla ventajosa para las estructuras proyectadas, recurriendo a otras soluciones dentro de las que la cimentación superficial y aislada resulta la más generalizada.

Por otra parte, la incertidumbre en los distintos métodos de cálculos, así como en las posibilidades reales de conformación del pozo en estos suelos granulares, exigieron de la realización de pruebas de campo como la excavación de pozos con diferentes diámetros, hormigonado de estos y posterior realización de pruebas de cargas verticales y horizontales para:

- Determinar de forma experimental la capacidad de carga de los pilotes cortos en arenas.
- Evaluar los modelos existentes para la determinación de parámetros de resistencia y deformación del suelo a partir de los resultados experimentales y de la modelación ajustada.
- Demostrar la superioridad técnico-económica de la solución de cimentación en forma de pilote corto con respecto a otras soluciones muy usadas.

Como aportes de esta investigación se dispone además de las novedades que representan las determinaciones "in situ" a escala real de la capacidad de carga de pilotes cortos y la modelación de esta cimentación a partir de resultados de campo, la aprobación del uso del pilote corto como elemento básico de cimentación para la región en cuestión.

## DESARROLLO

A partir de investigaciones ingeniero geológicas ordinarias para caracterizar dos parcelas contiguas de aproximadamente trece hectáreas cada una mediante: la perforación a percusión, con muestreador cuchara cubana correlacionada con la cuchara de Terzaghi, que constituye un ensayo estandarizado índice del comportamiento mecánico de los suelos, el que tratado estadísticamente mediante pruebas paramétricas y no paramétricas posibilitó probar la no existencia de diferencias apreciables entre las perforaciones de ambas parcelas estudiadas con más de 70 calas de hasta 10 m de profundidad distribuidas en toda el área garantizando

representatividad, y alrededor de 350 ensayos de laboratorio físicos y mecánicos, realizados según normas cubanas vigentes, se establece la litología del lugar con su propiedades físico-mecánicas medias:

*Estrato N° 1.* Arena de grano fino y medio uniforme, mezclada con materia orgánica y restos de vegetal, en estado muy suelto y suelto, color pardo. H = 0.20 ~ 0.60 m,  $N_{SPT} = 6$ .

*Estrato N° 2.* Arena fina y media uniforme, densidad media (suelta a densa), por partes con lentes de calcarenita al final del estrato, color beige. H = 0.60 ~ 3.35 m,  $N_{SPT} = 18$ .

*Estrato N° 3.* Arena fina y media, limosa, cementada, alterada por la perforación, recuperada suelta con algunas gravas pequeñas, carbonatada, en estado muy denso, color blanco-beige. H = 1.30 ~ 4.90 m,  $N_{SPT} > 50$ .

Parámetros físicos medios útiles para la clasificación de los suelos.

Estrato	Lim(%)		Densidad(kN/m <sup>3</sup> )		Ángulos de Reposo			% Pasados			
	SUCS	LLP	Máx.	Mín.	Seco	Sat.	Sum.	T#4	T#10	T#40	T#200
N° 2	SP	NP	15.5	13.6	36°	52°	30°	99	95	78	3
N° 3	SM	NP	16.1	13.8	39°	52°	30°	99	95	68	22

Parámetros físico mecánicos medios para el diseño de la cimentación.

Capa	SUCS	$W_n(\%)$	$\gamma_f(\text{kN/m}^3)$	e(adm)	S(%)	C(kPa)	$\phi^\circ$	E(MPa)	$\mu(\text{adm})$	$N_{SPT}$	Kf(cm/s)
N° 2	SP	7.01	15.9	0.86	23	12	33	0.06H	0.33	17	$5.2 \times 10^{-2}$
N° 3	SM	16.1	17.8	0.66	90	82	44	0.14H	0.30	>50	$1.2 \times 10^{-4}$

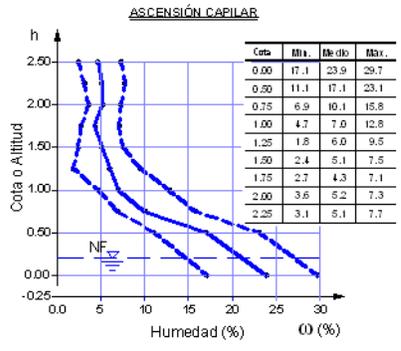
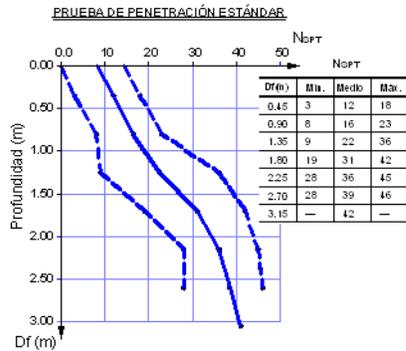
H – Profundidad media del estrato en cm

Se acomete entonces el diseño evaluando para ello métodos tradicionales y actuales tales como:

D <sub>o</sub> = 0.80 m		D <sub>o</sub> = 0.50 m		METODOLOGIA APLICADA
Q <sub>V</sub> (kN)	Q <sub>H</sub> (kN)	Q <sub>V</sub> (kN)	Q <sub>H</sub> (kN)	
156		56		Instructivo ENIA (Ing. O. García-Ing. J. Ribas.)
490	36.8	203	22.4	Metodología por Estados Límites (Ing. R. Lima)
399		146		Metodología Caquot- Kerisel
852	78.5	331	60.7	Metodología de Jiménez - Beng - Brooms
843		257		Meyerhof para arenas medias según $N_{SPT}$

Como se observa con resultados muy dispersos y mayor discrepancia en las metodologías Caquot Kerisel e Instructivo ENIA, específicas para suelos con cohesión y para grandes diámetros en ese orden.

Además se incluyen otros resultados no menos importantes en el comportamiento de estos suelos en cuanto a resistencia y estabilidad en corte, obtenidos a partir de la perforación, relacionados como sigue:

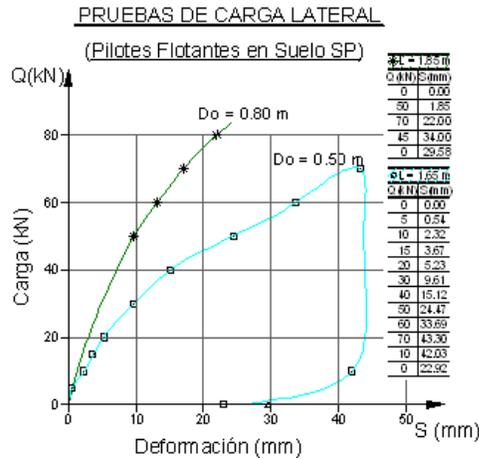
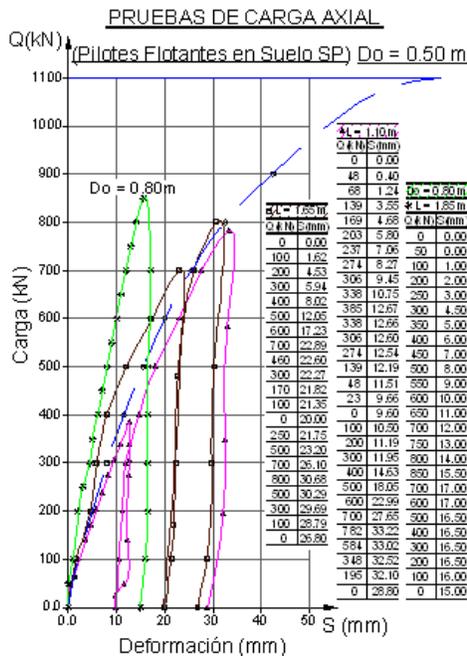


- el  $N_{SPT}$  que constituye una prueba de penetración estandarizada con respecto a la profundidad de la muestra, con sus líneas de comportamiento medio y extremos
- comportamiento de la humedad natural, medida en el laboratorio a muestras semi-alteradas de cucharas, tomadas a lo largo en calas, por efecto de ascensión capilar, con respecto a la altitud de las muestras

Partiendo de un consenso generalizado para la mayoría de los autores que plantean que el método más seguro para determinar la capacidad de carga de un pilote es la prueba de carga, unido a la incertidumbre creada por la evaluación de varios métodos teóricos frecuentemente implementados, se decide para ajustar el diseño geotécnico de pilotes cortos en suelos arenosos, la realización de pruebas de carga a escala natural en el lugar de interés, del tipo de prueba de carga controlada como el más usado por permitir determinar la carga

última cuando se ha superado la resistencia del suelo que se encuentra bajo la punta y rodeando al pilote.

Sus inconvenientes fundamentales estriban en su elevado costo y en el tiempo requerido para realizarlas, por lo que recurriendo al mínimo indispensable de estas pruebas, siguiendo los criterios del Manual Canadiense (1985), NC 54-265 (1984) y el Manual de Ingeniería US Army Corp of Engineer (1991) que plantean la realización de tres determinaciones para ser promediadas en cada condición de emplazamiento, pudiendo prescindirse de la tercera cuando las dos primeras no difieran marcadamente en sus resultados, es que se realizan sólo dos determinaciones con carga vertical a pilotes de diámetro 0.50 m y sólo una determinación, a manera de comparación, a pilote corto con diámetro 0.80 m en la condición más desfavorable, flotando en arena fina y media, uniforme o estrato N° 2.

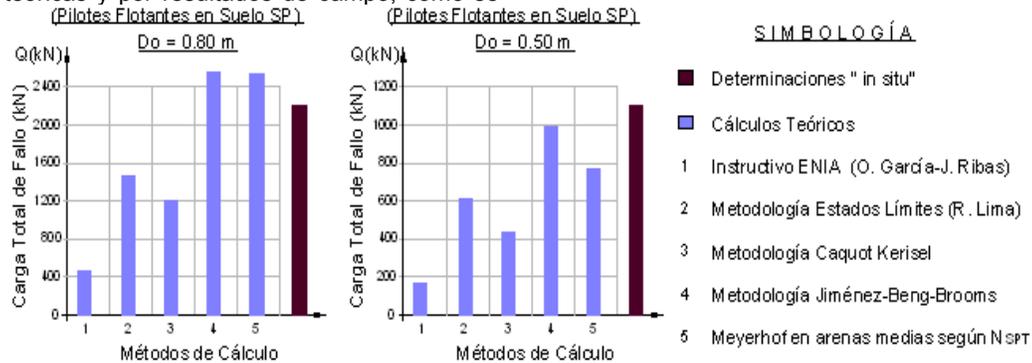


En ninguno de los ensayos a carga axial, realizados uno de forma incremental y los dos restantes con descargas intermedias o cíclicos, se alcanzó la carga de falla para la

reacción prevista de aproximadamente 900 kN, aprovechada al 94%; esto requirió de la utilización de algunos de los métodos de extrapolación recomendados

por la bibliografía internacional como Brinch Hansen (1963), Chin (1970), Mazurkiewicz (1972) y Davison (1973) que permitieron establecer cargas últimas o de fallo de 1 100 y 2 200 kN para los dos diámetros analizados, y cargas de diseño de 550 y 1 100 kN en ese orden para factor de seguridad "2", según Manual Canadiense (1985) y Sowers & Sowers (1979), que para estas determinaciones en el lugar establece un factor de seguridad de 1.5 ~ 2.0 o la carga que produce el mayor asentamiento total permisible, aspecto este último no determinante para las cargas de servicio de la mayoría de estas estructuras.

Las capacidades de cargas de pruebas de campo, resultaron superiores a las calculadas por metodologías de cálculo teóricas y por resultados de campo, como se



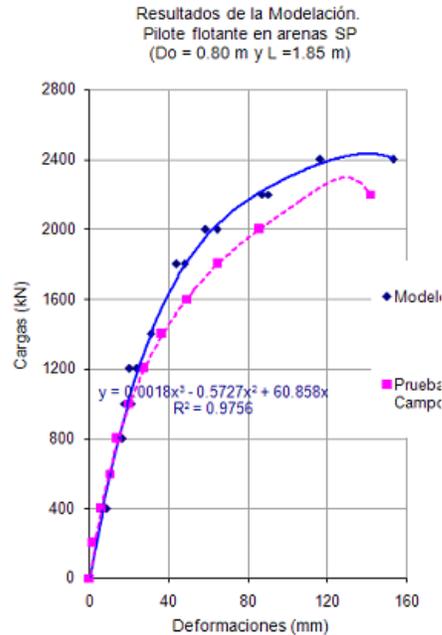
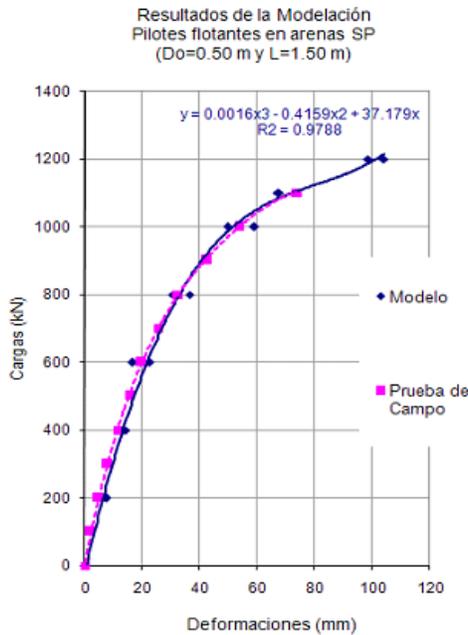
Partiendo de estas limitaciones y teniendo en cuenta las indefiniciones de los resultados de campo debido a limitaciones materiales y técnicas, se recurre a la modelación del problema, ajustado a los resultados reales, mediante métodos numéricos utilizando uno de los programas más generalizados nacional e internacionalmente, el SIGMA/W del paquete de programas GEO-SLOPE Office (1995), de origen canadiense, apoyado en el método de Elementos Finitos e implementado en el trabajo con los objetivos de: definir los parámetros físico-mecánicos del estrato de suelo involucrado, no necesariamente coincidente con la alcanzada en el estudio geotécnico, definir las cargas últimas o de fallo establecidas por métodos gráfico-analíticos y establecer el comportamiento de la transferencia de tensiones y cargas punta-fuste para la trayectoria de cargas aplicadas durante los ensayos de campo, no determinadas en el lugar.

Las Características del modelo establecidas lo más ajustadas posibles a los escenarios de trabajo reales que se analizan son: condiciones de apoyo (flotantes en arenas), geometría del pilote (diámetro 0.50 m con 1.50 m de largo y diámetro 0.80 m con longitud de 1.85 m),

aprecia en el diagrama de carga total de fallo para los distintos métodos de cálculo y escenarios, en lo que pudiera estar influyendo el hecho de haber aplicado cargas distantes a las de falla y también el factor de seguridad proporcional al grado de incertidumbre, por lo que se excluye el factor de seguridad, es decir, libre de subjetividad, asumiendo para el método de diseño por estados límites un factor de seguridad equivalente de 2.5, permitiendo su comparación sin que se observen variaciones con relación a lo tabulado anteriormente; manteniendo su mayor discrepancia los resultados del Instructivo ENIA y la metodología Caquot-Kerisel.

dimensiones del medio (tres diámetros en la horizontal y otros tantos en la vertical), cargas (en todos los casos verticales, centradas y aplicadas en escalones constantes) y materiales (24 kN/m<sup>3</sup> de densidad, 25 MPa de resistencia a compresión,  $E=2.8 \times 10^7$  kPa y  $\mu=0.15$ , con comportamiento lineal-elástico para el pilote y elasto-plástico para el suelo) y el problema que resulta tridimensional se resuelve con solución bidimensional en la variante axial-simétrica, que se ajusta tanto a la forma cilíndrica y simétrica del pilote como a las cargas verticales y centradas.

Así se trabajaron para el modelo elasto-plástico juegos de valores movidos en los siguientes intervalos ( $C=5 \sim 10$  kPa,  $\phi = 29^\circ \sim 33^\circ$ ,  $\mu=0.28 \sim 0.40$ ,  $E=2\,200 \sim 16\,000$  kPa), mientras que para el modelo lineal-elástico orientativo los valores asignados fueron ( $E=3\,000 \sim 16\,000$  kPa,  $\mu=0.30 \sim 0.35$ ); esto en corridas con 10 iteraciones pues para 25 iteraciones estos valores se movieron en los intervalos ( $C=5$  y  $10$  kPa,  $\phi=30^\circ$  y  $32^\circ$ ,  $\mu=0.33 \sim 0.38$ ,  $E=9\,000 \sim 30\,000$  kPa), requiriendo para el modelo lineal-elástico orientativo asignar los siguientes valores ( $E=3\,000 \sim 19\,000$  kPa,  $\mu=0.30 \sim 0.35$ ).



En los gráficos se muestran, de manera resumida, los resultados alcanzados para los mismos escenarios en corridas del programa con 25 iteraciones, que resumen la modelación con sus correspondientes curvas de mejor ajustes, con buena aproximación a las curvas carga-deformación reales correspondientes y semejante disminución de valores de módulos de deformación general según se incrementan las cargas, en estos casos con exigencias de módulos entre 9 000 y 30 000 kPa, el doble o mayores a los exigidos para 10 iteraciones como máximo (2 200 ~ 16 000 kPa); resaltando que en ambos casos, es decir, con 10 y con 25 iteraciones para casi la totalidad de las corridas, es gráfico de convergencia específico del programa tendió a la estabilización, acreditando así el procedimiento o modelo seguido. Los resultados de la modelación para los dos escenarios analizados en la condición de elementos flotantes en arenas uniformes, tanto para diámetro 0.50 m como 0.80 m, posibilitaron conocer, además de deformaciones en la cara superior del pilote, las tensiones en la punta, que ponderadas para cada escalón de carga, permitieron determinar los valores de carga asumidas por esta y por ende por el fuste para cada carga aplicada, importante

aspecto este en el análisis de estos elementos y estos suelos, lo que se muestra sintetizadamente a continuación con la distribución de tensiones punta-fuste a lo largo de toda la trayectoria de carga para las aplicaciones con 10 iteraciones, donde prácticamente toda la carga es asumida por el fuste tanto en los elementos con diámetro 0.50 m como el de diámetro 0.80 m, sin aporte significativo de la punta en el recorrido, mientras que para 25 iteraciones la proporción de cargas asumidas por punta y por fustes se distribuye alrededor de 25%~75% en ese orden al inicio de la carga y alrededor de 10%~90% en el escalón de falla, para ambos diámetros sin variación apreciable y próximo a lo establecido en la bibliografía consultada para pilotes y pilas referente al por ciento de carga de fricción que representa la carga de punta en este tipo de suelo para elementos fundidos, entre 25% y 40% de lo que asume el fuste y entre 20% y 25% de la carga total que llega a soportar el elemento, estos resultados se resumen en Tabla de Transferencia de Carga Punta-Fuste y para su mejor comprensión se representan en la figura homónima con las curvas de las cuatro variantes.

Tabla de Transferencia de Carga Punta-Fuste

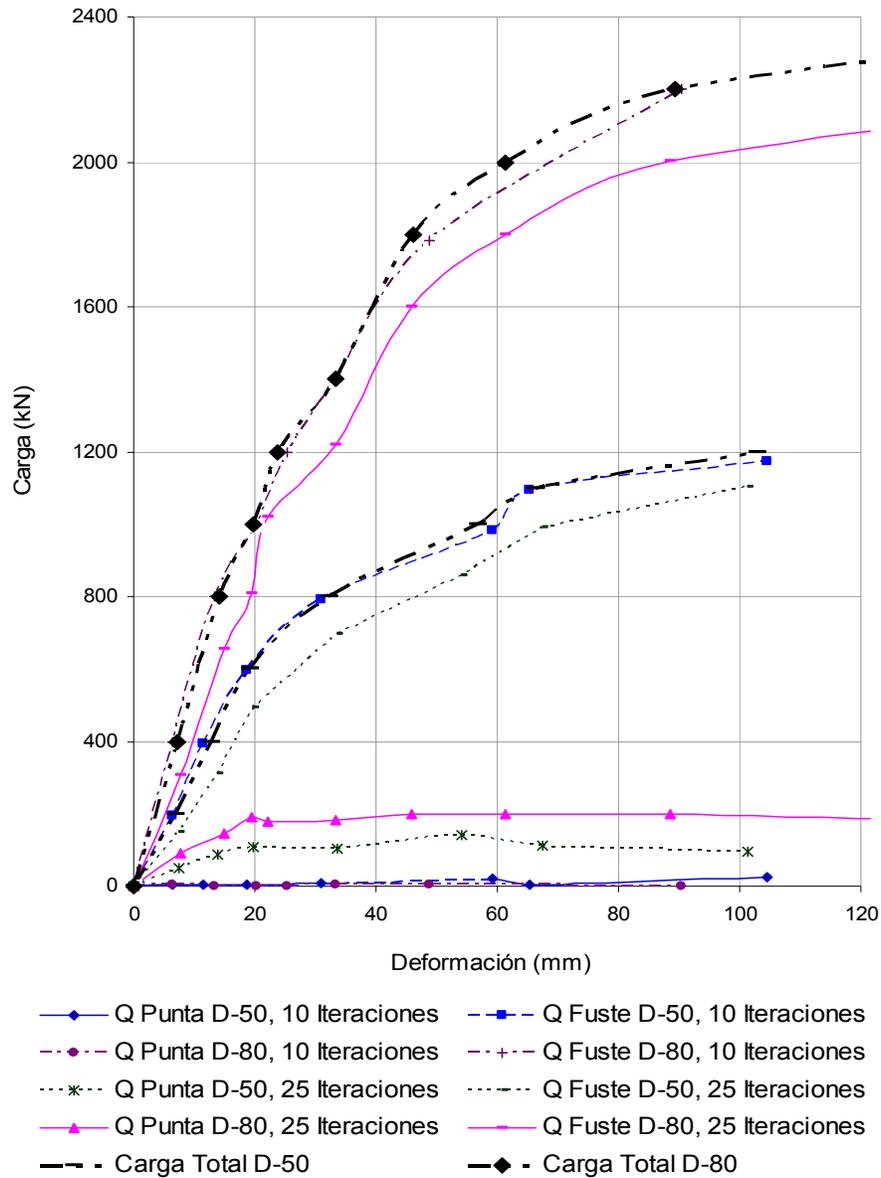
Suelo SP Do= 0.50 m. 10 Iteraciones				Suelo SP Do= 0.80 m. 10 Iteraciones			
Q <sub>Total</sub> (kN)	Q <sub>Fuste</sub> (kN)	Q <sub>Punta</sub> (kN)	Deform (mm)	Q <sub>Total</sub> (kN)	Q <sub>Fuste</sub> (kN)	Q <sub>Punta</sub> (kN)	Deform (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
200	196	4	6.5	400	397	3	6.4
400	394	6	11.4	800	800	0	13.2
600	595	5	18.7	1000	1000	0	20.3
800	794	6	30.8	1200	1200	0	25.2
1000	984	16	59.3	1400	1396	4	33.4
1100	1095	5	65.4	1800	1782	4	48.7

1200	1175	25	104.6	2200	2200	0	90.4
Suelo SP Do= 0.50 m. 25 Iteraciones				Suelo SP Do= 0.80 m. 25 Iteraciones			
Q <sub>Total</sub> (kN)	Q <sub>Fuste</sub> (kN)	Q <sub>Punta</sub> (kN)	Deform (mm)	Q <sub>Total</sub> (kN)	Q <sub>Fuste</sub> (kN)	Q <sub>Punta</sub> (kN)	Deform (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
200	150	50	7.5	400	308	92	7.8
400	312	88	13.9	800	656	144	15.0
600	492	108	19.6	1000	810	190	19.4
800	696	104	33.6	1200	1020	180	22.0
1000	860	140	54.2	1400	1218	182	33.4
1100	990	110	67.4	1800	1602	198	45.8
1200	1104	96	101.2	2000	1800	200	61.3
Q – cargas en kN				2200	2002	198	88.4
				2400	2208	162	184.5

Estos resultados no se ajustan plenamente a lo planteado por la bibliografía consultada en cuanto al máximo valor de carga asumida por el fuste, logrado para desplazamientos entre 5 y 10 mm independientemente de las dimensiones de los elementos; esto principalmente en el pilote de diámetro 0.80 m y no tanto para diámetro 0.50 m donde las curvas indican valores máximos de resistencia en fuste para deformaciones de alrededor de

15 mm, lo que pudiera asociarse a la poca esbeltez de estos elementos. Observando que la capacidad en punta alcanza su valor máximo en los diámetros 0.80 m y 0.50 m, con desplazamientos del orden de 2.5% y 5% del diámetro en ese orden, inferiores al intervalo entre 10 y 25% de su diámetro planteado por los mismos autores, sin acercarse ninguna de las condiciones de trabajo a dichos desplazamientos.

### Transferencia de Cargas Punta-Fuste



Una vez probada la posibilidad de utilizar pilotes cortos en la cimentación de gran parte de las obras proyectadas para el turismo en la zona correspondiente a Unidad Las Dunas en Cayo Santa María tanto desde el punto de vista de capacidad soportante como de viabilidad técnica, se

impone su comparación con las soluciones tradicionalmente usadas para estos niveles de carga en litologías similares de manera que se cuantifiquen ahorros como la ventaja fundamental en estos análisis.

#### Presupuesto de un cimiento superficial aislado

Cimiento Plato y Pedestal, L= 1.80m, B= 1.45m, Df = 1.20m, h = 0.20m, l = b = 0.30m						
Código	Actividades	Vol. de Trabajo	Costo Unitario	Fuerza de Trabajo	Tiempo (Horas)	Costo Real
012121	Excavación, perfilado y rehinchado mecanizado	3.13m <sup>3</sup>	15.55	1 operador	0.20	48.67

311212	Encofrado y desencofrado con colocación y limpieza de moldes	1.44 m <sup>2</sup>	17.79	1 carpintero 1 ayudante	1.44	25.62
302315	Elaboración de φ 16	0.034ton	395.53	1 cabillero	1.20	20.25
302317	acero del plato φ 20	0.050ton	593.81	1 ayudante	1.76	29.69
302102	Elaboración de φ 10	0.055ton	693.36	1 cabillero	3.23	38.13
302413	acero del pedestal φ 16	0.019ton	660.48	1 ayudante	0.67	12.55
305301	Colocación de φ 16	0.034ton	158.59	1 cabillero	Incluido en elab.	5.39
305302	acero del plato φ 20	0.050ton	131.29	1 ayudante		6.56
305106	Colocación de φ 10	0.055ton	395.88	1 cabillero	Incluido en elab.	21.77
305301	acero del pedestal φ 16	0.019ton	158.59	1 ayudante		3.01
4364	Suministro del hormigón premezclado 20MPa	0.927 m <sup>3</sup>	39.00	1 operador		36.15
41224	Hormigonado con cubo y grúa	0.927 m <sup>3</sup>	18.77	2 oper., 1 alb., 1 coop.	0.21	17.40
311212	Encofrado y desencofrado con colocación y limpieza de moldes	1.44 m <sup>2</sup>	17.79	1 carpintero 1 ayudante	1.44	25.62
012121	Excavación, perfilado y rehincho mecanizado	2.13m <sup>3</sup>	15.55	1 operador	0.14	33.12
312212	Entibamiento	7.80 m <sup>2</sup>	20.16	Costo Total	\$	323.93

Cuando se requiera acodalamiento para la contención del terreno el costo se incrementará en \$157.25.

#### Presupuesto de un cimiento semi-profundo

Cimiento Pilote Corto. L = 2.00 m, D = 0.50 m Masivo						
Código	Actividades	Vol. de Trabajo	Costo Unitario	Fuerza de Trabajo	Tiempo (Horas)	Costo Real
050505 3311	Excavación	2.00	9.25 \$/m <sup>3</sup>	1 operador 1 cooper.	0.13	18.50
302102	Elaboración de φ 10	0.011ton	693.36	1 cabillero	0.65	7.63
302413	acero del pedestal φ 16	0.009ton	660.48	1 ayudante	0.32	5.94
4364	Suministro de hormigón premezclado 20MPa	0.40	39.0 \$/m <sup>3</sup>	1 operador		15.60
41224	Hormigonado con cubo y grúa	0.40	18.77 \$/m <sup>3</sup>	2 oper. 1 alb, 1coop.	0.10	7.51
					Costo Total	\$ 55.18

NOTA: Los códigos y precios unitarios que se indican corresponden al PRECONS (1998), exceptuando la excavación del pozo con barrena helicoidal que corresponde al LISTADO OFICIAL DE PRECIOS ENIA MICONS".

Una vez probada la posibilidad de utilizar pilotes cortos en la cimentación de gran parte de las obras proyectadas para el turismo en la zona correspondiente a Unidad Las Dunas en Cayo Santa María tanto desde el punto de vista de capacidad soportante como de viabilidad técnica, se impone su comparación con las soluciones tradicionalmente usadas para estos niveles de carga en litologías similares de manera que se cuantifiquen ahorros como la ventaja fundamental en estos análisis.

Los resultados alcanzados, cuantificados en moneda nacional, muestran las ventajas que desde el punto de vista económico introduce esta solución de cimentación, sin embargo existen otros beneficios aparte de la racionalidad y la seguridad no menos importantes como son:

- menor agresión al medio dada la maniobrabilidad del equipo barrenador, sin exigencias de conformación de terrazas y accesos con sólo desbroce.

- menor exigencia de equipos al reducirse la secuencia de actividades a sólo excavación y hormigonado, ambas con reducidos volúmenes relativos redundando en menos impacto ambiental.
- sustentabilidad de las obras al minimizar las modificaciones de relieve incidente en las pendientes, el drenaje y otros aspectos influyentes en la conservación de estos ecosistemas frágiles.
- reducidas posibilidades de socavación del cimiento cuya forma alargada aprovecha los incrementos de compacidad con la profundidad en estos suelos erosionables.
- viabilidad con disponibilidad técnica de equipos con relativo alto rendimiento en estos terrenos de relieve ondulado y abrupto.
- exigencias de refuerzo mínimo cuando no se prescindiera del mismo debido a la poca esbeltez del elemento con punto de giro por debajo del tercio inferior, sin tracciones en sus caras.

## CONCLUSIONES

El Pilote Corto puede ser utilizado, de manera muy ventajosa, como elemento básico de cimentación en suelos friccionales puros para la mayoría de los objetos de obra que conforman el desarrollo turístico en Cayo Santa María, con mayor aprovechamiento de la capacidad soportante de los suelos friccionales, 1.5~2 veces la alcanzada por métodos de diseño teóricos.

La reducción del costo de la cimentación con pilote corto respecto al cimiento aislado, del orden del 83% del valor, unida a otros beneficios no menos importantes avala esta solución de cimentación semi-profunda para este tipo de obras.

La aplicación de la modelación numérica ajustando sus resultados a la curva de carga-deformación real a lo largo de toda la trayectoria de carga, usando el modelo elasto-plástico, aprueba la caracterización físico-mecánica de los suelos así como el establecimiento de la carga última o de fallo no determinada en el campo, a la vez que indica un comportamiento de distribución de carga punta fuste próximo al establecido por la bibliografía consultada para escenarios parecidos.

La similitud de situaciones presentes en el desarrollo de otras regiones también costeras destinadas al mismo proyecto, unido a la cantidad de elementos de este tipo requeridos por una sola de las instalaciones a que se propone esta solución de cimentación, incrementan sus probadas ventajas a la vez que justifica continuar trabajando en este sentido.

Los trabajos con modelos a escala real son escasos, y los que existen se vinculan a situaciones y lugares específicos, por lo que los resultados aquí alcanzados pudieran ser muy útiles como base para nuevos análisis y trabajos investigativos en estos tipos de suelos y cimientos; a la vez que podrán ser generalizados a otras zonas de la misma formación o de formaciones semejantes con litologías parecidas, requiriéndose sólo de pruebas de campo que lo corroboren.

## NOMENCLATURA

- $\gamma_f$  Densidad Natural kN

- $w_n$  Humedad Natural %
- $D_r$  Densidad Relativa Máxima y Mínima  $\text{kN/m}^3$
- $C$  Cohesión kPa
- $\varphi$  Angulo de Fricción Interna grados
- $\mu$  Coeficiente de Poisson adim.
- $E_s$  Módulo de Deformación Edométrico MPa
- $k_f$  Coeficiente de Permeabilidad cm/s
- $N_{SPT}$  Número de golpes/30 cm de penetración U
- $D_o$  Diámetro m
- $L$  Longitud de pilote m
- $Q_v$  Capacidad de Carga Axial kN
- $Q_H$  Capacidad de Carga Horizontal kN
- $Q_U$  Carga de Fallo kN
- $S$  Deformación de la cabeza del pilote mm
- SUCS Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASTM D1143-91 *Piles Under Static Axial Compressive Load, Testing Individual.*
- Canadian Foundation Engineering Handbook.* 1985.
- Geotechnical Testing Journal. *Axial Pile Loading Test.* June 1989.
- Prepared for The Public Works Canada. *Geotechnical Pile Design.* August 1989.
- Propuesta de Norma Cubana de Diseño Geotécnico para Cimentaciones Profundas. ISPJAE 1992.
- Jiménez S, J. and other. *Geotecnia y Cimientos. tomos II y III.* Editorial Rueda. Madrid 1981.
- García G, O. and Ribas J.A. *Cimientos del Tipo Pilarotes.* ENIA 1985.
- Lima R, R. *Metodología General de Diseño. Cimentaciones Indirectas.* Ing. UCLV 1998.
- Quevedo Q, G. *Diseño de Cimientos Superficiales.* UCLV 1989.
- Construcción Industrial. Información Técnica. Tomos I y II. 1971.
- Geo-Slope. SIGMA/W. For finite element analysis. International Ltd. Calgary, Alberta, Canadá. 2001.
- Ibañez M, L. *Modelación del suelo y las estructuras. Aplicaciones.* Tesis de Maestría. UCLV, 91 p. 1997.
- Sowers, G y Sowers F. *Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones.* La Habana. 1977.
- Braja M, D. *Principios de Ingeniería de Cimentaciones.* Editorial Thomson. México. 4ta edición. 855 pág. 1999.
- Delgado M. *Ingeniería de Cimentaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico.* Colombia 1999.
- Olaya M. *El Ensayo de Penetración Estándar (SPT). Últimos avances en ingeniería geotécnica.* La Habana 2000.
- Caquot, A and Kerisel, J. *Tratado de Mecánica de Suelos.* 1ª ed. e Castellanos, Paris, France. 1964.
- González-Cueto, A.V. *Diseño de cimentaciones superficiales en arenas. Aplicación de la T. de Seguridad.* 1997.
- American Society of Civil Engineers [ASCE]. *Design of pile foundations* U.S. Army Corps of Engineers. NY 1993.