

Efecto de interacción suelo-estructura en cimientos laminares tronco-cónicos bajo carga axial-simétrica.

MSc. Ing. Yoermes González Haramboure¹
Dr. Ing. Willian D. Cobelo Cristiá²
Dr. Ing. Á. Emilio Castañeda Hevia³



¹Profesor Instructor, Departamento de Ing. Civil, ISPJAE; yoermes@civil.cujae.edu.cu
²Decano de la Facultad de Ing. Civil, ISPJAE; wcobelo@civil.cujae.edu.cu
³Profesor Titular, Departamento de Ing. Civil, ISPJAE; ecashevia@civil.cujae.edu.cu
Ciudad de La Habana, Cuba.

RESUMEN

Las cimentaciones laminares resultan más económicas que las masivas de igual área en la base, ya que reducen considerablemente el consumo de materiales de construcción y, en muchos casos, el volumen de excavación. El diseño estructural de elementos laminares de hormigón armado aplicados a cimentaciones se realiza mediante la Teoría Membranal con Efecto de Alteración Simple (Criterio de Goldenveizer), método de análisis que se basa en hipótesis muy conservadoras y no tiene en cuenta la influencia del fenómeno de interacción suelo-estructura en la magnitud de las sollicitaciones membranales. El diseño geotécnico se realiza de igual forma que en cimientos de base plana y no se aprovecha el incremento de la capacidad portante, reconocido en las tipologías de cimientos tipo cáscara. La modelación matemática-computacional a través de un software profesional de la ingeniería geotécnica: el PLAXIS 2D v8.2, permite una mayor aproximación al comportamiento tenso-deformacional de estas cimentaciones, posibilita un diseño estructural y geotécnico más seguro y el regreso de la ingeniería civil cubana a su utilización.

ABSTRACT

Shell foundations are more economic than the massive foundations of same area in the base, since they reduce considerably the consumption of construction materials and, in many cases, the excavation volume. The structural design of shell structures concrete applied to foundations is carried out by means of the Membranal Theory with Simple Alteration Effect (Approach of Goldenveizer), analysis method that is based on very conservative hypothesis that doesn't keep in mind the influence of the soil-structure interaction in the magnitude of the internal forces of shells. The geotechnical design is carried out of equal it forms that in plane base foundations and doesn't take advantage the increment of the load capacity, recognized in the typologies of shell foundations. The mathematics-computational modelación through a professional software of the engineering geotechnical: the PLAXIS 2D v8.2, allows a bigger approach to the tense-deformational behavior of these foundations, it facilitates a structural and geotechnical design, and the return from the Cuban civil engineering to their use.

1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras esbeltas que habitualmente se construyen en Cuba (depósitos elevados tipo Güira y chimeneas cortas) se caracterizan por sus cimientos masivos de gran volumen, en correspondencia con la magnitud de las sollicitaciones a nivel de fuste y las características físico-mecánicas de los suelos de la base.

Para este tipo de estructuras existe y se ha aplicado por más de cinco décadas en el mundo, con contados y antiguos ejemplos nacionales, una solución de cimentación mucho más económica desde el punto de vista de la cantidad de materiales que requieren en su construcción y en muchos casos el volumen de excavación. Se hace referencia a la "cimentación laminar", representada por diversas geometrías de estructuras tipo cáscaras (Figura 1).

En el caso de las estructuras esbeltas de simetría axial, entre las que se incluyen los ejemplos antes mencionados, se ajusta la tipología laminar cónica y aunque la Teoría Membranal permite estimar la magnitud de las sollicitaciones interiores de la lámina, no incluye la influencia de la interacción suelo-estructura, fenómeno representado por la fricción que se produce entre dos materiales (el suelo y el hormigón estructural) y la

diferencia de modelos de comportamiento de los mismos, que genera distribuciones de presiones y deformaciones no uniformes a nivel de solera, entre otros aspectos [González, 2010].

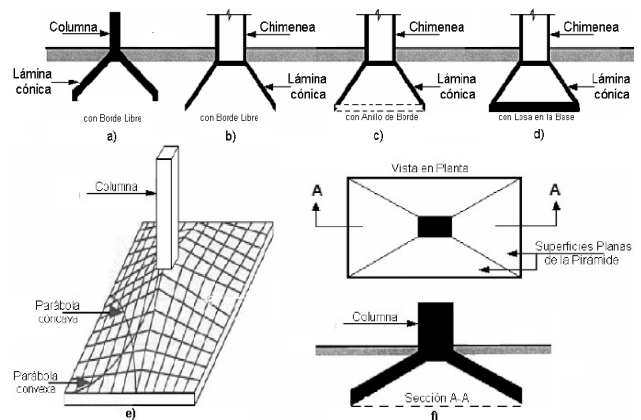


Figura 1: Geometrías típicas de cimientos laminares: a), b), c) y d) cónicos de directriz recta; e) hyper, y f) piramidal [Huat y Mohammed, 2006].

2 ESTADO DEL ARTE

El cálculo a través de la Teoría Membranal considerando el Efecto de Alteración Simple, también denominado Criterio de Goldenveizer [Hernández (1973, 1974 y 1975); Castañeda (1981 y 1982)], se fundamenta sobre las hipótesis de distribución uniforme de presiones a nivel de solera, transmitida directamente a la lámina con libertad de desplazamientos en el sentido normal a su superficie media, a través del suelo del núcleo, que se supone totalmente confinado y rígido, sin fricción con el hormigón. Estas hipótesis contradicen el comportamiento físico real del conjunto suelo-estructura, por lo que las solicitaciones membranales calculadas por medio de la Teoría Membranal (N_r y N_ϕ , en el caso de cimientos laminares tronco-cónicos bajo carga axial simétrica) difieren de las que realmente se generan allí y se incurre en el riesgo de colocar una armadura inferior a la necesaria y menor peralte de la lámina, lo cual conduce a la falla estructural. Por su parte, el diseño geotécnico aplicado a la tipología laminar dista mucho de ser eficiente, pues subestima la capacidad de carga que el efecto de interacción suelo-estructura incrementa.

Numerosos investigadores han realizado ensayos físicos a escala real y reducida, con el fin de determinar la influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento estructural y geotécnico de las cimentaciones laminares. Se destacan los trabajos de Nicholls e Izadi (1968), Sharma (1973), Jain y Nayak (1977) y Kurian (1983), quienes aportaron nuevas formulaciones al cálculo de las solicitaciones membranales a partir de resultados obtenidos en el laboratorio. Sin embargo y a pesar de sus aportes, estas formulaciones han sido poco utilizadas y se continúa aplicando el Criterio de Goldenveizer, cuya seguridad se fundamenta en la permanencia de estructuras diseñadas según sus preceptos y los criterios constructivos del Ing. José "Pimpo" Hernández (colocación de un "tacón" de borde, engrosamiento de la lámina en la vecindad de las líneas de alteración, etc.) (Figura 2).

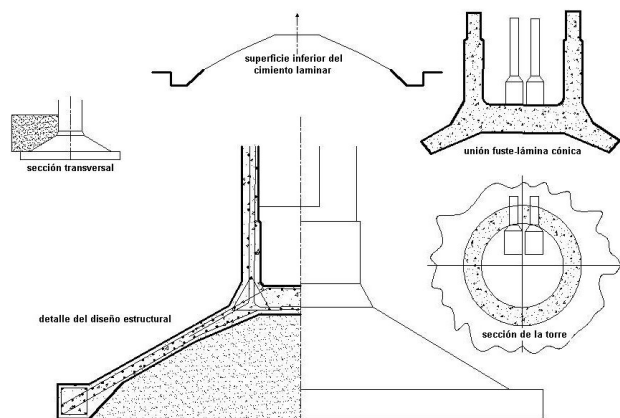


Figura 2: Detalles constructivos de una cimentación laminar diseñada por el Ing. José "Pimpo" Hernández.

En el aspecto geotécnico, son destacados los trabajos de Nicholls e Izadi (1968), Iyer y Rao (1970), Kurian y Jeyachandran (1972), Jain et al. (1977), Kurian y Mohan (1981), Agarwal y Gupta (1983), Rahman (1987), Hanna

y Hadid (1987), Arai et al (1988), Hanna (1988), Yasuda et al (1994), Rahman y Hanna (1990), Kurian (1994), entre otros. En 1996, Rahman realizó un compendio de estos trabajos, y comprobó los incrementos de capacidad de carga última obtenidos en 1987 mediante ensayos experimentales y modelos computacionales con aplicación del M.E.F., utilizando para ello el software CRISP desarrollado a tal efecto por la Universidad de Cambridge [Britto y Gunn, (1987)]. Determinó además que los cimientos laminares ensayados presentan un mejor comportamiento deformacional que sus equivalentes planos de igual área de la base. Respecto a las tensiones verticales a nivel de solera, confirmó los resultados de Szechy (1965), Nicholls e Izadi (1968) y Kurian (1983), ya mencionados [Rahman (1996)].

En 2004, Cobelo expone su investigación doctoral en la que obtiene resultados del comportamiento estructural de láminas cónicas de cimentación aplicadas a chimeneas cortas (altura de 74,5m) bajo carga axial-simétrica, a través de modelación computacional mediante el Software SIGMA/W del paquete GeoSlope v5.13, que incluye la aplicación del M.E.F. y el análisis deformacional axial-simétrico [Cobelo (2004)]. Esta investigación se basa en la metodología y resultados de la investigación doctoral de Rahman (1996), aplicada al análisis geotécnico y los resultados preliminares de la Tesis de Maestría del propio Cobelo (1996). La investigación doctoral abarca tres geometrías de láminas cónicas de directriz recta, diferenciadas por el ángulo (α) de inclinación de dicha directriz respecto al plano de la base (25° , 35° y 45°). Determinó en las mismas las distribuciones de solicitaciones radiales y circunferenciales a lo largo del radio de la lámina en nueve casos de combinaciones de suelos del núcleo y bajo la solera con modelos de comportamiento lineal-elástico y elasto-plástico, y las comparó con las obtenidas mediante la Teoría Membranal. Finalmente obtuvo "**factores de corrección a las solicitaciones membranales**", que expresan la relación entre el valor de la solicitación obtenido a través de la modelación computacional con aplicación del M.E.F. y el efecto de interacción suelo-estructura, y el valor de la misma solicitación obtenido a través de la Teoría Membranal con Efecto de Alteración Simple. Los **factores de corrección** permiten diseñar estas estructuras por medio de la Teoría Membranal más Efecto de Alteración Simple e incluir a sus resultados el efecto de interacción suelo-estructura. Desde el punto de vista geotécnico, determinó que las distribuciones de deformaciones verticales (s_y) en la solera de los cimientos tronco-cónicos demuestran que el suelo del núcleo no es absolutamente rígido, sino que absorbe deformaciones verticales en la mayor parte del área de la solera, siendo estas pronunciadas hacia el borde exterior de la misma, en la vecindad de la estructura laminar, de comportamiento más rígido. Las distribuciones de tensiones verticales (σ_y) a nivel de solera se corresponden con las obtenidas a través de ensayos físicos por Szechy (1965), Nicholls e Izadi (1968), Kurian (1983), entre otros, ratificando que existe una concentración de las tensiones verticales a nivel de solera hacia los bordes de los cimientos laminares cónicos. En el caso de la capacidad de carga q_u , determinó que en los mismo se alcanzan valores hasta 40% superiores a los determinados por la ecuación de

capacidad de carga de Terzaghi, hasta 34% superiores a los determinados según el criterio de Hansen y hasta 20% sobre los determinados según el criterio de Meyerhof, en función del ángulo de inclinación de la directriz y de los tipos de suelo presentes en el núcleo, el relleno y la base. A partir de tales resultados y similar a Rahman (1987) estimó un factor de corrección F_q que modifica directamente el coeficiente N_q calculado según Reissner (1924) [Braja (2000), Norma Cubana para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales (2007)] y compatibiliza los valores matemáticos de capacidad de carga de los cimientos tronco-cónicos con los determinados para cimiento laminar corrido de sección triangular mediante formulación analítica desarrollada por Hanna y Rahman. Posteriormente estableció un coeficiente S_s que, incorporado a la ecuación de capacidad de carga de Terzaghi (con coeficientes de capacidad de carga corregidos por el factor F_q), toma en consideración la influencia de la forma del cimiento.

El software utilizado por Cobelo (2004) en su Tesis Doctoral adolece de limitaciones que motivaron la realización de este estudio comparativo. Entre estas, pueden mencionarse la utilización de mallas estructuradas para la aplicación del M.E.F. (que debieron ser refinadas manualmente en los nodos de estudio) y la modelación de la interacción suelo-estructura mediante un material virtual de pequeño espesor en el contacto entre el suelo y el hormigón.

Huat y Mohamed (2006) se basan también en las formulaciones de Rahman (1996) para validar modelos computacionales de cimientos laminares de revolución con sección triangular analizados por M.E.F. mediante el software PLAXIS 2D. En estos modelos computacionales se consideró un único suelo de tipo friccion puro y comportamiento elasto-plástico tipo Mohr-Coulomb. El hormigón estructural se modeló con comportamiento lineal elástico y se utilizó la herramienta "Plate" del software para recrear la estructura laminar. Las curvas de carga-asentamiento obtenidas por M.E.F fueron comparadas con las determinadas experimentalmente por Rahman (1996), encontrándose discrepancias entre 11% y 25%, siendo superiores en todos los casos los valores de carga determinados por el método matemático.

Por su parte, Esmaili y Hataf (2008) ensayaron modelos reducidos de cimientos tronco-cónicos (análisis axial-simétrico) y piramidales (análisis tridimensional), en suelos arenosos reforzados y no reforzados. Los resultados se compararon con los obtenidos para los cimientos planos de igual área de la base y los de modelos computacionales realizados en el software PLAXIS 2D y obtuvieron discrepancias no superiores al 14% entre los resultados físicos y matemáticos.

3. NUEVOS MODELOS COMPUTACIONALES.

Con base en las experiencias obtenidas por estos últimos investigadores [Huat y Mohamed (2006), Esmaili y Hataf (2008)] con el software PLAXIS 2D, se decidió recrear en el mismo los modelos ejecutados por Cobelo (2004) en el SIGMA/W del GeoSlope v5.13, aprovechando las ventajas que sobre este software tiene: generador automático de mallas no estructuradas en los

elementos del modelo, para la aplicación del M.E.F., la "interfase" como herramienta de modelación del contacto entre distintos elementos y materiales y salida de datos particular de la relación carga-deformación en un proceso de ensayo virtual de capacidad de carga a través de la opción de cálculo "**c-φ' reduction**", que permite establecer un criterio gráfico de determinación de la capacidad de carga última. A las tres geometrías laminares cónicas de directriz recta estudiadas por Cobelo (2004) (denominadas 05, 07 y 10) se agregaron dos de directriz parabólica y curvatura gaussiana negativa (denominadas V1 y V2, ver Tabla 1).

TABLA I
5 GEOMETRÍAS DE CIMIENTOS LAMINARES ESTUDIADAS
MEDIANTE PLAXIS-2D

Denominación	Forma	Ecuación cartesiana de la directriz.
05		$y = -0,5x + 4,200$
07		$y = -0,7x + 5,800$
10		$y = -x + 8,200$
v1		$y = 0,177x^2 - 2,832x + 11,328$
v2		$y = 0,141x^2 - 2,256x + 9,244$

Mediante la modelación en PLAXIS 2D se investiga el comportamiento estructural de las láminas a través de los valores de las solicitaciones membranales N_r y N_ϕ y el comportamiento geotécnico a través de las distribuciones de tensiones verticales σ_y , asentamientos verticales s_y , y capacidad de carga q_u . Los resultados del análisis estructural se comparan con los obtenidos por Cobelo (2004) y los calculados según la Teoría Membranal más Efecto de Alteración Simple (Criterio de Goldenveizer, que no considera el fenómeno de interacción suelo-estructura). La capacidad de carga obtenida en el análisis geotécnico se compara con valores calculados por métodos analíticos tradicionales.

La cimentación fue diseñada desde el punto de vista geotécnico para colocar una torre de chimenea de 74,5m de altura, estructura típica en los centrales azucareros cubanos. Dicha torre impone una carga axial $N'=21970,7kN$, que distribuida en el fuste anular resulta $q'=1535,5kPa$ (Figura 3). No se consideró en la modelación computacional el efecto de Momento (M') y Fuerza Horizontal (H') en el fuste, aunque sí para el diseño geotécnico del cimiento circular plano equivalente, que resulta de 9,40m de diámetro para el caso de suelo más desfavorable ($\phi'=20^\circ$; $C'=0$).

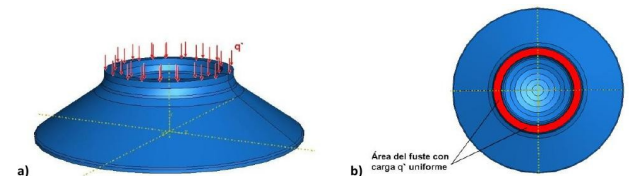


Figura 3: Carga distribuida en el fuste del cimiento laminar tronco-cónico.

En su transformación a cimiento laminar tronco-cónico, siguiendo las consideraciones constructivas y

estructurales realizadas por Cobelo (2004), el diámetro se extiende hasta 16m, de los cuales 8m corresponden al fondo interior de la chimenea, con forma de cúpula invertida y que trabaja en compresión por la distribución de presiones que transmite a la misma el suelo del núcleo, por lo que no es objeto de estudio. Se analiza la lámina tronco-cónica empotrada en el fuste y libre en el borde exterior del cemento, a través de 10 secciones en las que se miden las solicitaciones interiores radiales (N_r) y circunferenciales (N_ϕ), (Figura 4). En la proyección de esta lámina sobre la base del cemento se estudian las distribuciones de tensiones y asentamientos verticales.

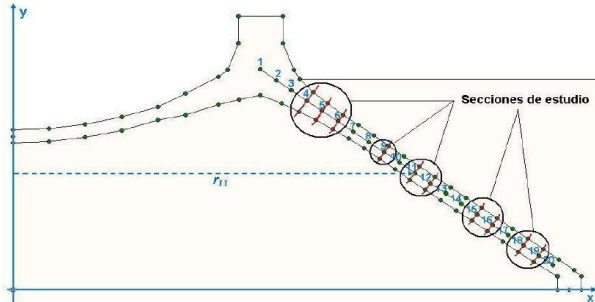


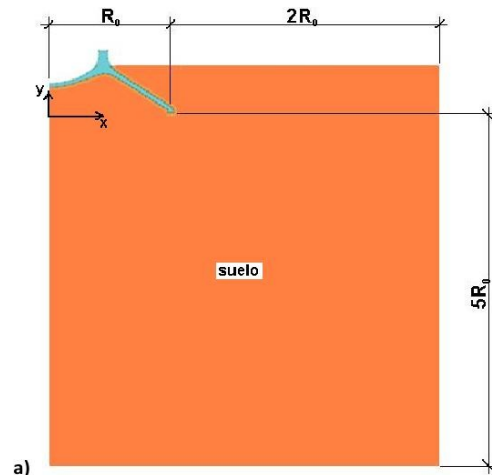
Figura 4: Secciones de estudio del comportamiento estructural en la lámina tronco-cónica.

En PLAXIS 2D se realiza un análisis axial-simétrico de estos modelos, introduciendo las condiciones geométricas como se muestra en la Figura 5 a) y b). Las dimensiones representadas en la Figura 5 a) indican las precauciones que se tomaron para que los límites geométricos del modelo no interfiriesen en su comportamiento. En la Figura 5 b) se aprecia la geometría de la sección axial-simétrica del cemento laminar tronco-cónico. La lámina a estudiar tiene en su proyección horizontal una longitud de 4,24m, desde el centro del fuste hasta el tacón de borde, ocupa el intervalo radial entre 3,56m y 7,8m. El eje "y" es el eje de simetría de la estructura. El suelo del núcleo y sobre la lámina es idéntico.

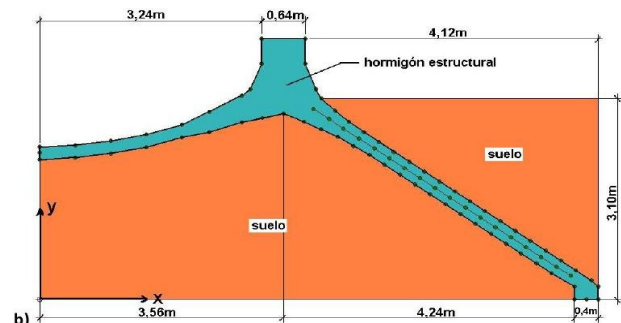
Al hormigón estructural se atribuyó un modelo de comportamiento lineal elástico idéntico en todos los casos, representado por los parámetros Módulo de Elasticidad $E=2,16 \times 10^7 \text{ kPa}$ y Coeficiente de Poisson $\mu=0,176$.

Los modelos computacionales se ejecutaron en 9 tipos de suelo friccional, definidos con modelo de comportamiento Mohr-Coulomb y la combinación de tres valores del ángulo de fricción interna ϕ' ($\phi'_1=20^\circ$, $\phi'_2=30^\circ$ y $\phi'_3=40^\circ$) y tres Módulos de Elasticidad E_0 ($E_{01}=7260 \text{ kPa}$, $E_{02}=11000 \text{ kPa}$ y $E_{03}=30000 \text{ kPa}$). De ahí resulta que en total se ensayaron 45 modelos específicos: 5 geometrías X 9 tipos de suelo. En cada modelo el suelo fue idéntico en el núcleo, el relleno y el entorno del cemento laminar tronco-cónico. La Tabla II muestra la denominación del modelo en función de su geometría y tipo de suelo.

En el caso particular de determinación de la capacidad de carga q_u se analizaron las 5 geometrías en 5 tipos de suelo friccional caracterizados por un Módulo de Elasticidad E_0 y un ángulo de fricción interna ϕ' , tal como se muestra en la Tabla III. En este caso, se analizaron 25 modelos.



a)



b)

Figura 5: Dimensiones geométricas en los modelos computacionales de PLAXIS 2D.

TABLA II
45 MODELOS COMPUTACIONALES ESTUDIADOS EN PLAXIS 2D

Geometría	Propiedades mecánicas del suelo (E_{0i} ; ϕ'_i)								
	ϕ'_1			ϕ'_2			ϕ'_3		
	E_{01}	E_{02}	E_{03}	E_{01}	E_{02}	E_{03}	E_{01}	E_{02}	E_{03}
05	05-1	05-2	05-3	05-4	05-5	05-6	05-7	05-8	05-9
07	07-1	07-2	07-3	07-4	07-5	07-6	07-7	07-8	07-9
10	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8	10-9
V1	V1-1	V1-2	V1-3	V1-4	V1-5	V1-6	V1-7	V1-8	V1-9
V2	V2-1	V2-2	V2-3	V2-4	V2-5	V2-6	V2-7	V2-8	V2-9

TABLA III
5 TIPOS DE SUELO EN LOS QUE SE DETERMINA
LA CAPACIDAD DE CARGA DE LAS 5 GEOMETRÍAS

Propiedades mecánicas (E_{0i} ; ϕ'_i) de 5 suelos en el análisis de Capacidad de Carga Última (q_u)				
$\phi'_1=20^\circ$	$\phi'_2=25^\circ$	$\phi'_3=30^\circ$	$\phi'_4=35^\circ$	$\phi'_5=40^\circ$
$E_{01}=7260 \text{ kPa}$	$E_{02}=11000 \text{ kPa}$	$E_{03}=11000 \text{ kPa}$	$E_{04}=30000 \text{ kPa}$	$E_{05}=30000 \text{ kPa}$

En estos modelos computacionales la carga aplicada en el fuste ($q^*=1535,5 \text{ kPa}$) se introduce en PLAXIS 2D como se muestra en la Figura 6.

Para modelar la interacción suelo-estructura se aplica una "interfase" en toda la superficie de contacto entre ambos materiales (Figura 7). A dicha "interfase" también se le atribuye un modelo de comportamiento tipo Mohr-Coulomb y las propiedades de los suelos que rodean la estructura afectadas por el coeficiente $R_{inter}=0,666$, recomendado en la literatura para el tipo de suelo incluido en los modelos [Ibañez (2000) y Cobelo (2004)].

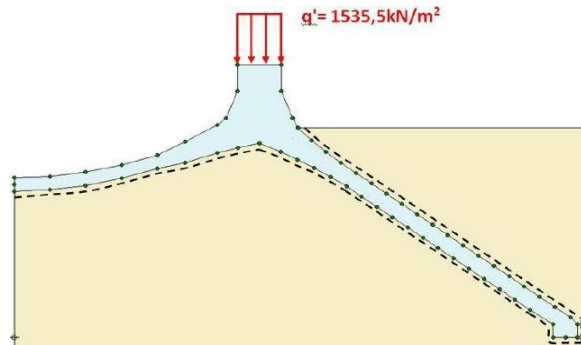


Figura 6: Carga en el modelo computacional realizado en PLAXIS 2D.

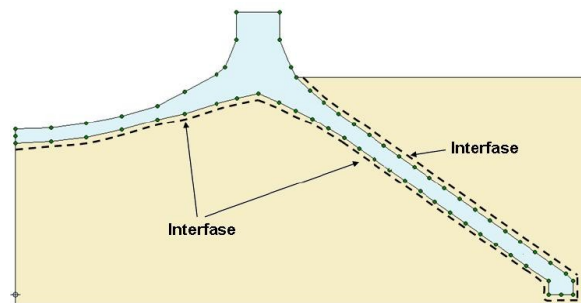


Figura 7: Interfase que modela el contacto e interacción suelo-estructura.

Por último, se aplicaron las condiciones de frontera a los modelos computacionales tal y como se muestra en la Figura 8.

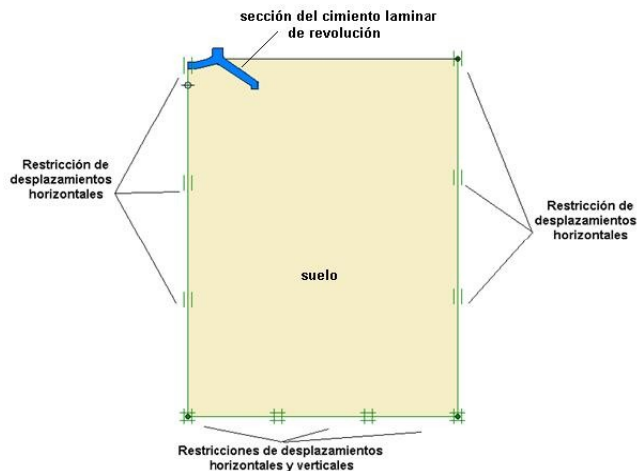


Figura 8: Condiciones de frontera de los modelos computacionales.

No se definieron niveles hidrostáticos y las cargas (por peso propio del cemento e impuesta por la torre) se aplican de forma tal que no se generan presiones intersticiales en el suelo.

Por las condiciones de hardware y tiempo disponibles para la ejecución de estos modelos, se decidió aplicar el análisis por el Método de Elementos Finitos (MEF) mediante el mallado más denso de los disponibles en el software, que permitió un tamaño promedio de elementos no superior a 1m, y que se refina en las secciones y

nodos de análisis para ganar en precisión de los valores de tensiones y deformaciones calculados allí.

4. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.

Se obtuvieron las distribuciones de solicitaciones radiales (N_r , Figura 9) y circunferenciales (N_ϕ , Figura 10) que se generan en la superficie media de las 5 láminas tronco-cónicas sobre los 9 suelos friccionales ensayados. En cada gráfico se agrega la distribución de solicitaciones membranales determinada mediante la Teoría Membranal (en todos los casos representada por una línea de color negro). Se utiliza el convenio de signos habitual en la Geotecnia: los esfuerzos de compresión son considerados positivos y los esfuerzos de tracción negativos. A continuación se realizan observaciones acerca de estos resultados, comparándolos con los obtenidos por Cobelo (2004):

1- Las curvas que representan las distribuciones de solicitaciones N_r y N_ϕ obtenidas por M.E.F. para los diferentes tipos de suelo y geometrías laminares se caracterizan por su uniformidad, sin puntos de máximos o mínimos locales, a diferencia de las alcanzadas en la Tesis Doctoral de Cobelo (2004) para las láminas tronco-cónicas de directriz recta, lo que se atribuye a la aplicación de mallas más densas y no estructuradas, dos aspectos que contribuyen a la precisión y concordancia de los resultados.

2- Las solicitaciones N_r son siempre de compresión en cualquiera de las geometrías laminares estudiadas, con valores máximos en el empotramiento de la lámina con el fuste y mínimos hacia el extremo libre. En las láminas de directriz recta (05, 07 y 10) las solicitaciones N_r aumentan a medida que disminuye la inclinación de la directriz respecto a la base, lo que se atribuye al incremento de la flexibilidad de la geometría [Cobelo (2004)].

3- Las solicitaciones N_r en cada sección se incrementan en la medida que aumenta el valor del ángulo de fricción interna (ϕ') del suelo de cimentación, para un valor constante de Módulo de Elasticidad E_0 del mismo. Este fenómeno está relacionado con el aumento de la fuerza de fricción que se genera en el contacto entre el suelo y la estructura laminar, pues para un mismo Módulo de Elasticidad el incremento de ϕ' implica que el suelo sea más rígido y, por tanto, menos deformable. En este caso, los incrementos de las solicitaciones membranales son atribuibles únicamente al incremento de la fricción y no a la ocurrencia de deformaciones del suelo bajo el nivel de solera y dentro del núcleo.

Las solicitaciones N_r en cada sección también aumentan en la medida que disminuye el valor del Módulo de Elasticidad E_0 del suelo de cimentación para un valor constante del ángulo de fricción interna ϕ' del mismo, lo cual está asociado a la ocurrencia de mayores deformaciones de la lámina al disminuir la rigidez del suelo. Sin embargo, en este caso las variaciones de N_r son mucho menos perceptibles que las asociadas a la variación de ϕ' . Este resultado concuerda además con los aportados por Cobelo (2004), Rahman (1987 y 1996) y otros investigadores ya mencionados.

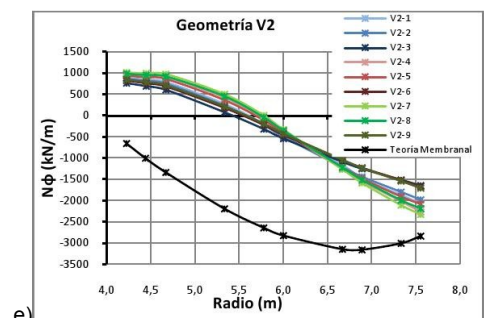
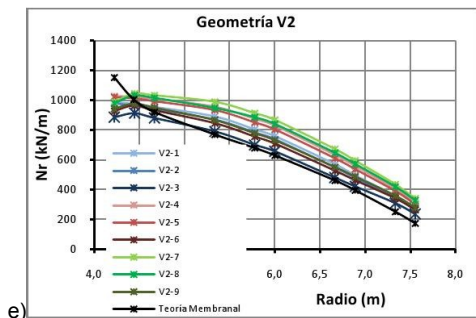
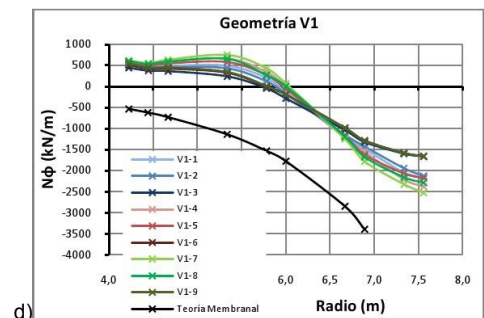
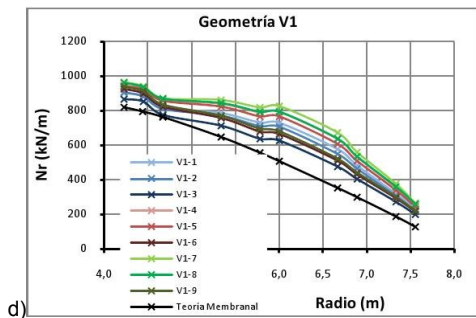
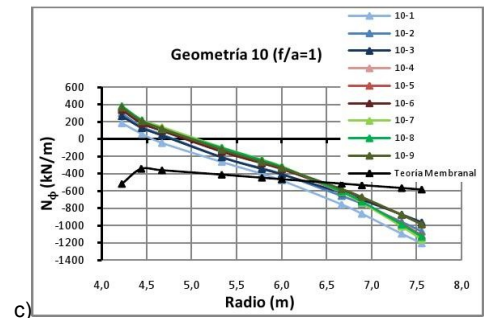
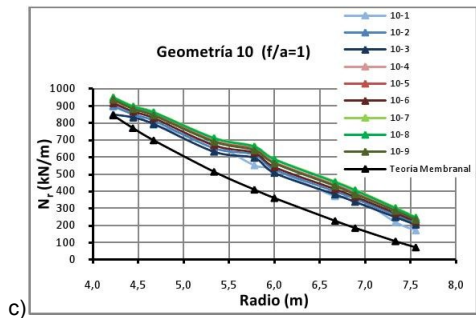
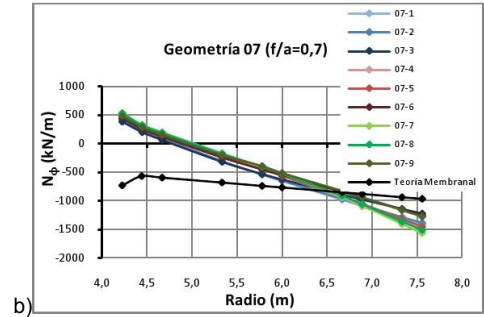
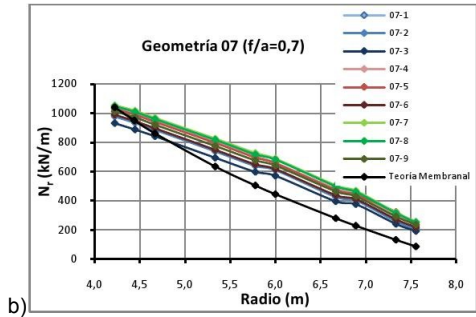
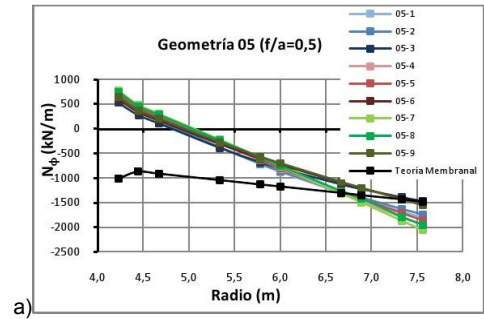
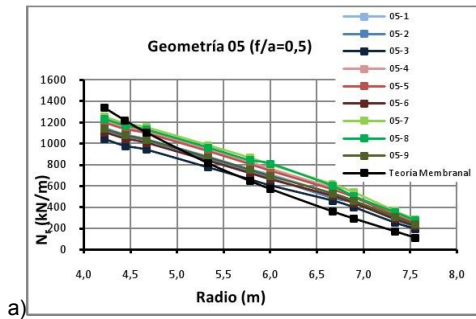


Figura 9: Gráficos de solicitaciones radiales N_r en la superficie media de las 5 láminas tronco-cónicas.

Figura 10: Gráficos de solicitaciones circunferenciales N_ϕ en la superficie media de las 5 láminas tronco-cónicas.

4- Los valores máximos de N_r ocurren en todas las geometrías laminares para el suelo tipo 7 ($\varphi'=40^\circ$; $E_0=7260\text{kPa}$), en el que se genera la mayor fuerza de fricción suelo-lámina y ocurren las mayores deformaciones de la estructura por efecto de menor rigidez elástica del suelo. Los valores mínimos de N_r ocurren en todas las geometrías laminares para el suelo tipo 3 ($\varphi'=20^\circ$; $E_0=30000\text{kPa}$), que impone menor fuerza de fricción con la lámina y tiene menores deformaciones elásticas.

5- En la sección de máxima compresión radial (sección 4, ver Figura 4) las solicitaciones N_r determinadas por M.E.F. tienen valores máximos muy próximos (0,93 a 1,18 veces) a los calculados a través de la Teoría Membranal más Efecto de Alteración Simple. En la sección de mínima compresión radial (sección 19), las solicitaciones N_r determinadas por M.E.F. tienen valores más alejados (2,0 a 3,5 veces) de los calculados a través de la Teoría Membranal más Efecto de Alteración Simple.

6- Las solicitaciones N_ϕ , pronosticadas de tracción según la Teoría Membranal más Efecto de Alteración Simple en todo el radio de las tipologías laminares que se estudian, adoptan valores de compresión en las secciones próximas al empotramiento con el fuste, según resultados del cálculo por M.E.F. En el extremo libre, por el contrario, se diferencia el comportamiento de estas solicitaciones: las láminas de directriz recta muestran mayores valores de N_ϕ calculados por M.E.F. que los estimados a través de la Teoría Membranal más Efecto de Alteración Simple mientras que en las láminas de directriz parabólica los valores de tracción circunferencial estimados por el M.E.F. son menores. Se distingue la geometría V1 en que se estima un valor elevado de N_ϕ en el extremo libre de la lámina ($N_\phi=7319\text{kN/m}$) según la Teoría Membranal, debido a la perpendicularidad de la reacción del suelo (q_n) a la lámina media en esta región. El fenómeno de interacción suelo-estructura y el confinamiento que impone el suelo en el núcleo y el relleno sobre la lámina reduce considerablemente este valor.

7- Los valores máximos de N_ϕ (de compresión y de tracción) en las geometrías laminares ocurren por lo general para el suelo tipo 7 ($\varphi'=40^\circ$; $E_0=7260\text{kPa}$), en el que ocurre mayor fricción suelo-lámina y mayor deformación de la estructura por efecto de menor rigidez elástica del suelo. Los valores mínimos de N_ϕ (de compresión y de tracción) en las geometrías laminares ocurren por lo general para el suelo tipo 3 ($\varphi'=20^\circ$; $E_0=30000\text{kPa}$), que impone menor fricción con la lámina y menor deformación por ser más rígido desde el punto de vista elástico.

8- En los cimientos laminares de directriz recta ocurre mayor variación de los valores de N_ϕ en función del tipo de suelo que la obtenida por Cobelo (2004). Se atribuye este incremento de la variación a que se consideró también un contacto friccional entre la superficie superior de la lámina cónica y el suelo de relleno de la cimentación en los modelos analizados en PLAXIS 2D v8.2, a diferencia de lo realizado por Cobelo en su Tesis Doctoral.

5. COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO.

Se obtuvieron las distribuciones de tensiones verticales (σ_y , Figura 11) y asentamientos verticales (s_y , Figura 12) a nivel de solera de las 5 láminas tronco-cónicas sobre los 9 suelos friccionales ensayados.

El método clásico de análisis geotécnico de cimientos laminares de revolución asume una distribución uniforme de presiones de contacto en la solera bajo cimientos laminares cónicos sometidos a carga axial. Al atribuirse un peso específico promedio de 20kN/m^3 al conjunto suelo-lámina, resulta que en cimientos de revolución con igual área de la base A_B y carga axial actuante N' en el fuste, la diferencia de presión que aportan a la solera está dada por la variación de la profundidad de cimentación D_r .

En las cinco geometrías laminares analizadas $A_B=211\text{m}^2$ y $N'=21970,73\text{kN}$. La profundidad de cimentación es idéntica para 07, V1 y V2 y diferente para 05 y 10. La Tabla IV resume el valor analítico de la distribución uniforme de presiones correspondiente a cada geometría en función de la profundidad de cimentación.

TABLA IV
PROFUNDIDAD DE CIMENTACIÓN Y PRESIÓN VERTICAL (ANALÍTICA) A NIVEL DE SOLERA EN LAS 5 GEOMETRÍAS DE CIMIENTOS LAMINARES

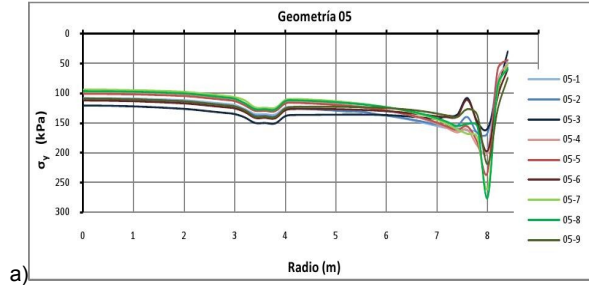
Modelo geométrico	Profundidad de cimentación (m)	σ_y (kPa)
05	2,40	152
07	3,10	166
10	4,60	196
V1	3,10	166
V2	3,10	166

Las distribuciones de tensiones σ_y determinadas a través del M.E.F. se analizan en dos zonas de la solera adoptando criterios similares a los de la Tesis Doctoral de Cobelo (2004): la zona 1 o central de forma circular, se extiende en el intervalo radial de la base $0 \leq R_0 \leq 7\text{m}$, representa aproximadamente el 85% de área de la solera; la zona 2 o externa de forma anular, ocupa el intervalo radial de la base $7\text{m} \leq R_0 \leq 8,2\text{m}$ y representa aproximadamente el 15% del área de la base (8,2m constituye el radio máximo constructivo de la cimentación e incluye revestimiento del acero y tacón de borde). Al respecto se realizan las siguientes observaciones:

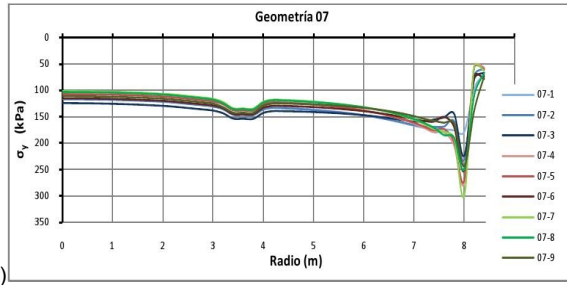
1- En la zona 1 o central:

1.1- En todas las geometrías las curvas de distribución de presiones para los nueve tipos de suelo son prácticamente paralelas, demostrando cualitativamente el mismo comportamiento de la variable. Sin embargo, el valor de la presión de contacto es inferior al determinado analíticamente sin tener en cuenta la interacción suelo-estructura, debido a una redistribución de tensiones que ocurre en el suelo dentro del núcleo.

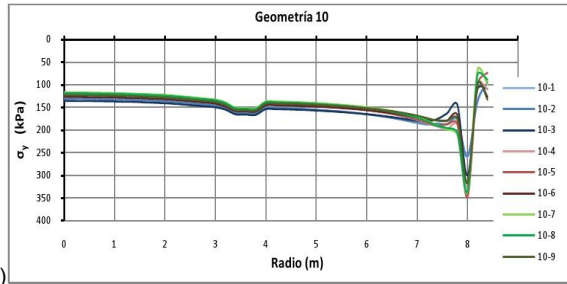
1.2- En cualquier geometría laminar la distribución de presiones tiene valores mínimos en el suelo tipo 7 ($\varphi'=40^\circ$, $E_0=7260\text{kPa}$) y máximos en el suelo tipo 3 ($\varphi'=20^\circ$, $E_0=30000\text{kPa}$).



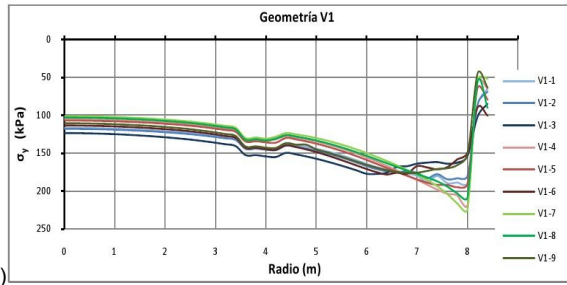
a)



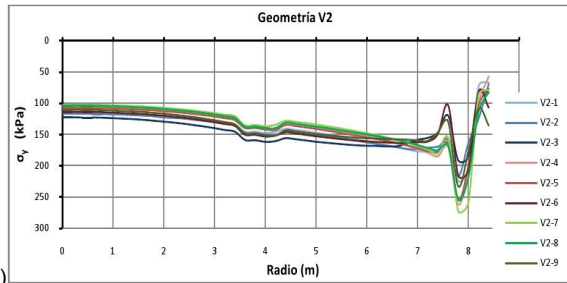
b)



c)

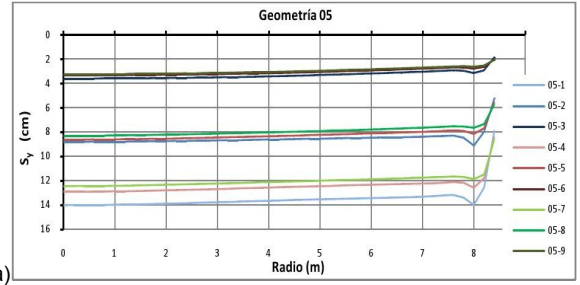


d)

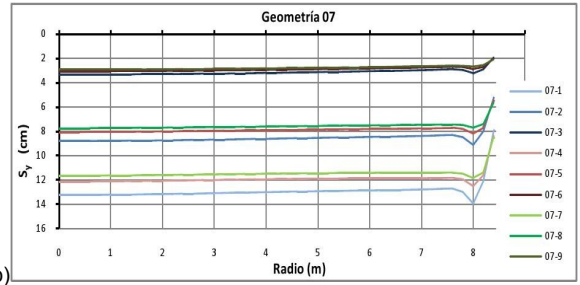


e)

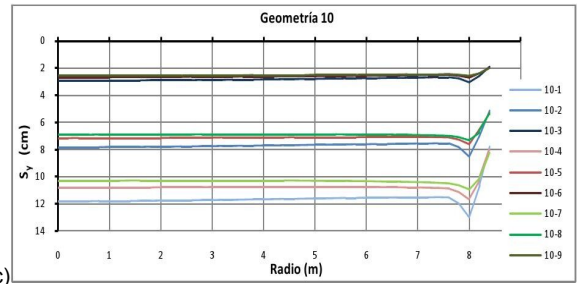
Figura 11: Distribuciones de tensiones verticales (σ_y) a nivel de solera de los cimientos laminares, desde el eje de simetría hasta el borde de la base.



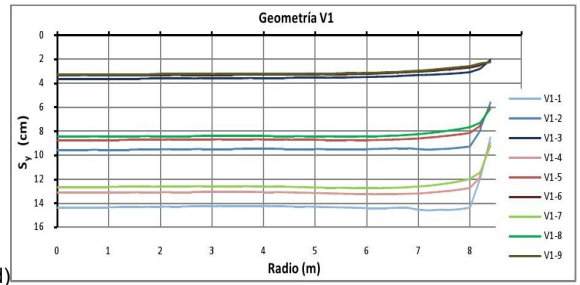
a)



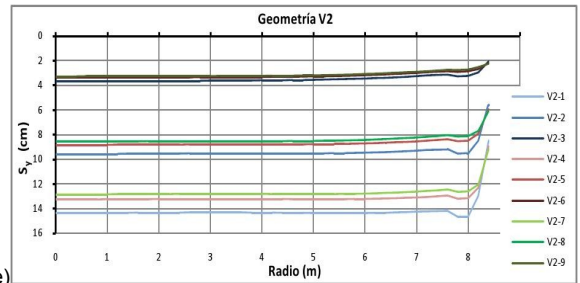
b)



c)



d)



e)

Figura 12: Distribuciones de deformaciones verticales (S_y) a nivel de solera de los cimientos laminares, desde el eje de simetría hasta el borde de la base.

1.3- En las láminas de directriz recta, a medida que aumenta el ángulo de inclinación de la lámina respecto a la base disminuye la variación de las presiones para los nueve tipos de suelo. En las de directriz parabólica la variación de las presiones es idéntica para las dos geometrías estudiadas.

1.4- Cobelo (2004) describe una tendencia general cóncava de la distribución de presiones en la zona 1. En el nuevo análisis se observa una concavidad local entre $R_0=3,4m$ y $R_0=4m$, coincidente con la proyección vertical del área del fuste en que actúa la carga de la superestructura. Se estima que la utilización de una malla no estructurada y más refinada en la aplicación del M.E.F. permite precisar en la solera la región anular $3,4m \leq R_0 \leq 4m$ de influencia directa del esfuerzo cortante que transmite la carga distribuida en el fuste al núcleo de suelo en el interior del cimiento laminar.

2- En la zona 2 o externa:

2.1- En las tres láminas de directriz recta se distingue una concentración de los valores máximos de presión en $R_0=8m$, posición en la que también ocurre la variación máxima para los nueve tipos de suelo. En la de directriz parabólica V2 la concentración de la presión ocurre en $R_0=7,8m$. En la lámina de directriz parabólica V1 el punto de concentración de presiones es función del tipo de suelo.

2.2- Los valores máximos de la presión en esta zona son superiores a los estimados analíticamente. Sin embargo, se distinguen las láminas de directriz parabólica V1 y V2 con los menores incrementos de σ_y determinados por M.E.F. respecto al valor analítico.

2.3- La variación de la presión en la zona 2 es superior a la que acontece en la zona 1. En las láminas de directriz recta, en la medida que aumenta el ángulo de inclinación de la lámina respecto a la base disminuye la variación de las presiones para los nueve tipos de suelo. En las de directriz parabólica la variación máxima de la presión es idéntica para las dos geometrías estudiadas.

2.4- Aunque no existe regularidad en el tipo de suelo en que ocurren los valores extremos de presiones, se observa la tendencia a la ocurrencia de máximos en los suelos con mayor ángulo de fricción ϕ' y mínimos en los suelos con menor ángulo de fricción ϕ' .

Del análisis de deformaciones verticales s_y a nivel de solera se comprueba que:

1- Las distribuciones de deformaciones verticales se agrupan claramente en función del Módulo de Elasticidad E_0 que caracteriza al tipo de suelo. En la medida que aumenta el Módulo de Elasticidad disminuye el valor del asentamiento promedio de la solera, para un mismo ángulo de fricción ϕ' . La variación del ángulo de fricción para un mismo módulo elástico tiene menor influencia en la variable dependiente y sólo es más apreciable en la medida en que E_0 es menor.

2- En las cinco geometrías laminares la distribución de deformaciones verticales a nivel de solera es prácticamente uniforme en toda el área de la base, con variaciones inferiores a 1,5cm. Cobelo (2004) obtiene los mismos resultados cuando modela el comportamiento del suelo como lineal elástico. Esto se debe a que en la presente investigación la cimentación laminar, en cualquiera de sus geometrías, cumple la Condición de Linealidad para la carga axial con que fue analizada. No obstante, es posible apreciar un incremento sustancial de

las deformaciones en el borde de las geometrías 05, 07, 10 y V2 en la medida que disminuye el módulo elástico del suelo, es decir, su rigidez, lo cual identifica una zona de mayor plastificación. La geometría V1 nunca alcanza los valores máximos de desplazamiento vertical en el extremo de la solera, sino en la región central ($0 \leq R_0 \leq 4m$, aproximadamente), similares en magnitud a los que alcanzan el resto de las geometrías en el borde.

Por último, se determinó la capacidad portante q_u de las cinco geometrías de cimiento laminar tronco-cónico en cinco suelos friccionales (ver Tabla III). Para ello se utilizó el método de análisis "c- ϕ' reduction" disponible en PLAXIS 2D v8.2 [ver manual PLAXIS 2D (2004)]. Los resultados se exponen gráficamente en la Figura 13.

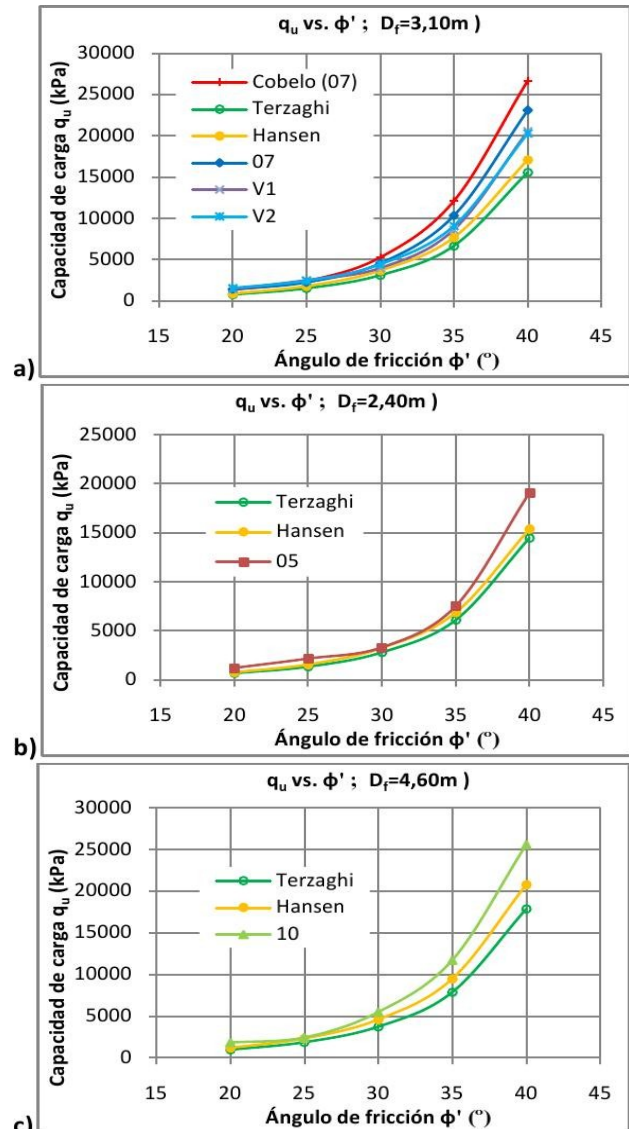


Figura 13: Capacidad de carga de los 5 cimientos laminares, determinada por M.E.F. en PLAXIS 2D, en SIGMA/W del GeoSlope [Cobelo (2004)] para el cimiento 07 y según criterios de Terzaghi y Hansen [Braja (2000)].

Se agrupan los cimientos de igual profundidad de desplante D_r , debido a que este parámetro influye en la

capacidad portante. Además, se incluyen las curvas de q_u determinadas analíticamente según los criterios de Terzaghi y Hanzen [Braja (2000), Norma Cubana para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones Superficiales (2007)] para cimientos circulares planos de igual área de la base, y la obtenida por Cobelo (2004) para la lámina tronco-cónica de directriz recta denominada 07. De estos resultados se deducen las siguientes conclusiones:

1- La capacidad de carga última q_u determinada por M.E.F. para las geometrías 07, V1 y V2 es significativamente superior a la determinada analíticamente para cimiento circular de igual área de la base y profundidad de cimentación en los cinco tipos de suelo friccional [resultados que se corresponden con los obtenidos por Rahman (1987 y 1996), Cobelo (2004) y otros autores].

2- En general, a medida que el ángulo de fricción ϕ' del suelo aumenta, los valores de q_u determinados en los tres modelos geométricos (07, V1 y V2) por M.E.F. disminuyen respecto a los determinados por Cobelo para la geometría 07, resultado que se atribuye a que el método semi-gráfico escogido para la determinación de la capacidad de carga y el estado de plastificación estimado como patrón de falla, no se ajustan rigurosamente al proceso de plastificación de cada suelo friccional estudiado.

3- La capacidad de carga q_u de las geometrías de cimientos laminares 05 y 10 supera a la determinada analíticamente en los cimientos planos de igual área de la base y profundidad de cimentación, en todos los tipos de suelo analizados, de acuerdo a lo determinado por Cobelo (2004), Rahman (1987 y 1996) y otros autores. La mayor diferencia de q_u ocurre (para las tres láminas cónicas de directriz recta) en el suelo friccional con $\phi'=20^\circ$, cuyas propiedades mecánicas permiten un mejor acomodado de la estructura laminar al suelo y el desarrollo de su máxima capacidad portante.

6. CONCLUSIONES.

La modelación matemática-computacional de cinco geometrías de cimientos laminares tronco-cónicos permitió realizar el análisis estructural y geotécnico, y establecer criterios constructivos acordes con los obtenidos en investigaciones precedentes.

Se determinó la influencia de las condiciones geotécnicas del suelo de la base, núcleo y relleno de la cimentación, así como de la forma de la directriz de la lámina cónica, en las sollicitaciones membranales N_r y N_ϕ . Se comprobó que las sollicitaciones membranales se incrementan proporcionalmente al ángulo de fricción interna ϕ' e inversamente proporcional al Módulo de Elasticidad E_0 , alcanzando valores máximos en las láminas tronco-cónicas de directriz parabólica y mínimos en las láminas tronco-cónicas de directriz recta.

Las distribuciones de tensiones (σ_y) y deformaciones (s_y) a nivel de solera están determinadas en forma y magnitud por el Módulo de Elasticidad E_0 del suelo para las condiciones de carga en que se analizaron los modelos de cimientos laminares. La geometría laminar de directriz parabólica permite mejores distribuciones de tensiones (en particular el modelo geométrico V1 en suelos friccionales con alto módulo elástico) pero impone

mayores deformaciones verticales que la geometría de directriz recta.

La geometría laminar de directriz parabólica permite mayor capacidad de carga que su homóloga de directriz recta con igual área de la base y profundidad de cimentación, en suelos friccionales con bajas propiedades mecánicas. Sin embargo, para suelos friccionales con propiedades mecánicas medias y altas, la tipología laminar de directriz recta supera en capacidad de carga a la de directriz parabólica.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Agrawal, K.B. and Gupta, R.N. "Soil Structure Interaction in Shell Foundations". Proceedings of the International Workshop on soil structure Interaction, University of Roorkee, India, Vol. 1, pág. 110-112. 1983.
- Arai, K., Ohnishi, Y., Horita, M., Yasukawa, I. and Nakaya, S. "Interpretation of concrete top base foundation behavior on soft ground by coupled stress flow finite element analysis", Proceedings of 6th International Conference of Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Austria, pág. 625-630, 1988.
- Braja M. Das. "Principios de Ingeniería de Cimentaciones". Ed. Thomson Learning, ISBN: 970-686-035-5, 2000.
- Britto, A.M. and Gunn, M.J. "CRISP user's and programmer's guide", Department of Engineering, Cambridge University, England, 1992.
- Castañeda H., A.E., "Corrimientos membranales. Otro enfoque", Revista Ingeniería Civil, ISPJAE, Vol. 2, 1981.
- Castañeda H., A.E., "Algoritmo para el Cálculo de un Cimiento Laminar de Revolución de Directriz Recta". Revista Ingeniería Civil, ISPJAE, Vol. 2, 1982.
- Cobelo, W.D. "Solución de Cimiento Laminar de Revolución para Chimeneas Cortas". Tesis de Maestría, Dpto. de Ing. Civil, ISPJAE, 1996.
- Cobelo, W.D. "Contribución al análisis estructural y al diseño geotécnico de cimentaciones tronco cónicas bajo carga axial-simétrica en estructuras tipo torre", Tesis de Doctorado, Dpto. de Ing. Civil, ISPJAE, 2004.
- Esmaili, D., and Hataf, N., "Experimental and numerical investigation of ultimate load capacity of shell foundations on reinforced and unreinforced sand", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 32, No. B5, pág. 491-500, República Islámica de Irán, 2008.
- González Haramboure, Y. "Estudio comparativo de cimientos laminares bajo carga axial-simétrica para torres de chimenea de 74,5m en Cuba", Tesis de Maestría, Dpto. de Ing. Civil, ISPJAE, 2009.
- Hanna, A.M. and Hadid, W. "New models of shallow foundations", International Journal of Mathematical Modeling, Vol. 9, N°11, pág. 799-811, 1987.
- Hanna, A.M. "Shell foundations: the future alternative", International Journal of Housing Science and Its Applications", Vol. 12, N°4, 1988

- Hernández. P.J., "Estructuras laminares Teoría y Aplicaciones, "Revista de Ingeniería Civil No4-1973, No2-1974, No5-1974, No4-1975, No6-1975.
- Huat, B.B.K. and Mohammed, T.A. "Finite Element Study Using FE Code (PLAXIS) on the Geotechnical Behavior of Shell Footings", Journal of Computer Science, ISSN 1549-3636, Vol. 2 N°1, pág. 104-108, 2006.
- Ibañez, M.L.; "Algunas recomendaciones para la modelación de problemas tensión deformación en cimentaciones sobre pilotes" Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño Estructural, N°1626, 2000.
- Iyer, T. S. and Rao, N. R. "Model studies on funicular shells as rafts on sands". Proceedings Symposium on shallow foundations, India, Vol.1, pág. 149-156, 1970.
- Jain, V.K., Nayak, G.C. and Jain, O.P. "General Behavior of Conical Shell Foundation". Proceedings of the International Conference on Computer Applications in Civil Engineering, Roorkee, pág. IV: 197-207, 1977.
- Kurian, N.P. "Modern Foundations, Introduction to Advanced Techniques", Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 1983.
- Kurian, N.P. "Behavior of Shell Foundations under subsidence of core soil", Proceedings of 13th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India, pág. 591-594, 1994.
- Kurian, N.P. and Jeyachandran, R.S. "Model studies on the behavior of sand under two and three dimensional shell foundations". Indian Geotechnical Journal, Vol.2, N°1, 1972.
- Kurian, N.P. and Mohan, C.S "Contact pressures under shell foundations". Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, Vol.2, pág. 165-168, 1981.
- Nicholls, R.L. and Izadi, M.V. "Design and testing of cone and hypar footings". Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 94 (SMI), pág. 47-72, 1968.
- NC 1:2007, "Propuesta de Norma Cubana para el Diseño Geotécnico de Cimentaciones superficiales", elaborada por el CTN #20 de Geotecnia y presentada para su aprobación a la Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba, 2007.
- PLAXIS: "Manual de Referencia" Versión 8, PLAXIS BV, Delft University of Technology, Países Bajos, 2004.
- Rahman, M.A. "Ultimate Bearing Capacity of Triangular Shell Strip Footings on Sand", Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concordia, Montreal, Canadá, 1987.
- Rahman, M.A. y Hanna, A.M. "Ultimate Bearing Capacity of Triangular Shell Strip Footings on Sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Vol. 116, N°12, pág. 1851-1863, 1990.
- Rahman, M.A. "Geotechnical Behavior of Shell Foundations". Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concordia, Montreal, Canadá, 1996.
- Sharma K. A. "Investigation of Spherical Shell Foundations". The Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 99, No. SM6, Junio, 1973.
- Szechy. C "Influence of shape of contact surface upon the bearing capacity and settlement of strip foundations" "Proceedings of the 5th Symposium of the Civil and Hydraulic Engineering Department, Bangalore, India, 1965.
- Yasuda, S., Hakuno, M., Nagase, H., Kobayashi, S. y Yoshida, T. "Effectiveness of top-shaped concrete blocks in preventing settlements of foundations in liquefied ground", Japanese Journal of Soil Mechanics and Foundation engineering", Vol. 34, N°1, pág. 65-76, 1994.