

Pozos de fundación Tronco – Cónicos

Introducción

Todos los que estamos de alguna manera ligados a la construcción tenemos que resolver además de los aspectos de ejecución o de diseño el problema de las estructuras y en particular de las fundaciones o cimientos.

Si bien estas partes estructurales no lucen en un edificio, constituyen el aspecto más importante de su sustentación y posterior comportamiento ante las diversas sollicitaciones.

En la ciudad de Santa Fe (Argentina), normalmente para edificios en altura se funda con zapatas aisladas a una cota de -2,50m a -4,00m; o con pilotes excavados "in situ" con circulación de lodo bentonítico a una cota de -9,00m a -11,00m (tomando +-0,00m el nivel de vereda).

Ambos tipos de fundación no han tenido problemas hasta el momento (salvo casos particulares), pero presentan algunos inconvenientes de diversos ordenes.

En las bases aisladas el problema se presenta cuando las cargas superan aproximadamente las 100t, donde debido a la poca resistencia del terreno (15t/m² en promedio) necesitan un desarrollo en planta considerable, lo cual trae aparejado superposición de bases o directamente imposibilidad de fundar en el espacio disponible de terreno.

Los pilotes resuelven el problema antes mencionado pero resultan un 50% a un 69% más caros que una fundación con zapatas.

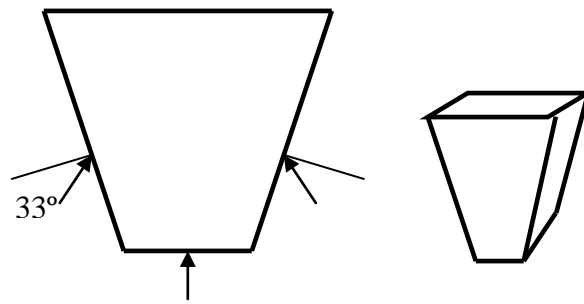
Teniendo en cuenta todos estos aspectos surgió como idea implementar en Santa Fe la fundación mediante POZOS TRONCO-CÓNICOS.

Consisten en un tronco de cono invertido que se sustenta a través de la capacidad de carga de punta y por el empuje pasivo que ejerce el suelo contra las caras laterales inclinadas.

Funcionalmente se comporta similar a un pozo romano, con la ventaja que asegura y aumenta la fricción en los laterales, precisamente por la inclinación antes mencionada.

Breve reseña histórica

En el año 1954 el Ing. Carlos Laucher propuso un tipo de cimiento o base cuya forma era de un tronco de pirámide invertida que tomaba según sus hipótesis la carga mediante un estado de tensiones que suponía verticales en la punta inferior e inclinadas en las caras laterales con un ángulo de 33°.



Posteriormente el Ing. Oreste Moretto estudió para un suelo céntrico de la ciudad de Buenos Aires la capacidad de carga de acuerdo con hipótesis más afinadas :

capacidad de carga de punta de acuerdo con el mecanismo de colapso de Terzaghi.

Capacidad de las cargas laterales por rozamiento.

Capacidad de carga por empuje pasivo del suelo sobre las caras laterales según Caquot.

El arquitecto estructuralista Luis C. Curcio realizó una serie de ensayos comparativos de bases tronco piramidales con bases convencionales midiendo asentamientos por el año 1959.

Llegó a las siguientes conclusiones:

La economía que representa el empleo de bases tronco piramidales con las dimensiones que estableció el Ing. Laucher alcanza en general a cifras mayores al 33%.

Hasta valores de carga que originaban tensiones en el suelo bajo la base común del orden de 4,0 a 4,5 kg/cm², los asentamientos que experimentaban ambas bases fueron iguales. Para cargas más elevadas la base tronco piramidal acentuó sensiblemente su tendencia a hundimientos mayores, y así hasta el límite de resistencia del suelo (11 a 12 kg/cm²) duplicaba en general el valor correspondiente a la base común.

La capacidad portante del cemento tronco piramidal estaría fundamentalmente dada por la resistencia al corte del estrato arcilloso.

El diseño de una base tronco piramidal tiene influencia en los asentamientos que experimenta.

El fisuramiento en la base común comenzó para el momento en que las tierras reaccionaban con tensiones del orden de 8kg/cm².

Hacia los 10kg/cm² se encontraba en pleno periodo de rotura. Con la base tronco piramidal usada en un primer ensayo no se fisuró siquiera, y en un

segundo ensayo rompió prácticamente para el momento final de la prueba, no obstante su diseño, afirmamos que en general es nula o remota la posibilidad de rotura de dichos cimientos.

Para la debida interpretación de estas conclusiones es necesario recordar que las pruebas se realizaron en un estrato arcilloso muy compacto.

El pozo de fundación tronco cónico

La idea de sustituir a la pirámide invertida por un tronco de cono también invertido no era nueva y el Ing. Laucher la tuvo en cuenta pero había dos aspectos que ofrecían dificultades.

Para un mismo volumen de cemento el tronco de pirámide tiene un área lateral mayor que la del tronco de cono.

Para las condiciones técnico económicas de la época la excavación de la base Laucher podía ser más barata que la tronco cónica.

En realidad comparando la operación a mano y según nuestra experiencia es más económica la de tronco de cono. El excavador puede dar mas fácilmente la pendiente en el contorno circular a medida que va profundizando, que en el contorno cuadrado sobre todo cuando el ángulo del énfasis es chico, condición muy importante como se verá mas adelante para la eficiencia del cemento tanto en la capacidad de carga como en la deformación, pues a nuestro juicio los valores de asentamiento que obtuvieron Curcio y Moretto se debieron justamente a ángulos entre caras de las bases (énfasis) demasiado grandes. Además se puede encarar la excavación del pozo a máquina con una forma cilíndrica que luego se perfila a tronco cónica, cosa que en el pozo tronco piramidal es imposible.

Los antecedentes de pilotes cónicos o tronco cónicos son varios, por ejemplo el Raymond y siempre con pendientes chicas (de 1:30 como máximo a 1:100).

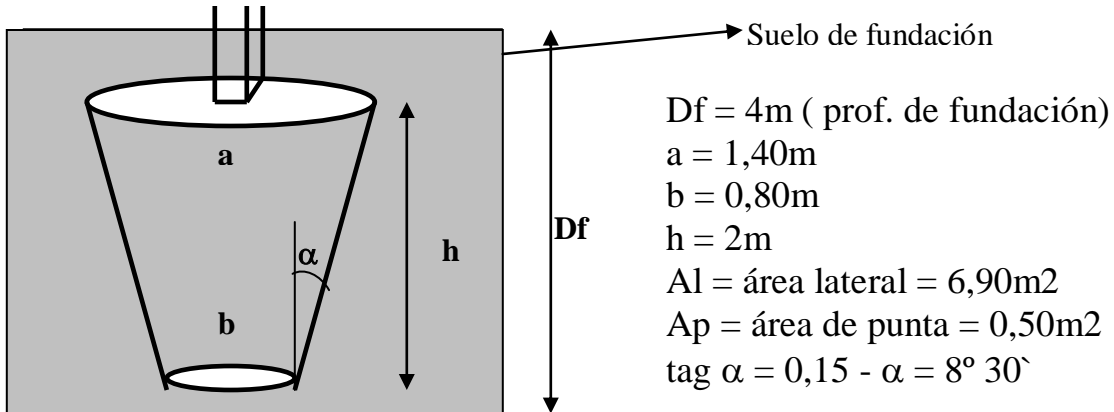
Cálculo de un pozo tronco cónico

A continuación vamos a calcular un pozo de fundación tronco cónico basándonos en experiencias propias y adoptando fórmulas de capacidad de carga y empujes pasivos que según nuestro criterio son bastante confiables para los resultados obtenidos.

El estudio lo desarrollamos para dos ejemplos en arcilla y en una arcilla arenosa.

Para la capacidad de carga de punta utilizamos la teoría de Meyerhof y para los empujes laterales pasivos los ábacos de Hettiaratchi y Reece (1974).

Datos de la fundación:



Ejemplo : En arcilla.

$$\phi = 6^\circ - C = 8,5\text{t/m}^2 - \gamma = 1,34\text{t/m}^3$$

Según Meyerhof – Capacidad de carga de punta-

- Meyerhof

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi)$$

Factores de forma, profundidad e inclinación para la ec. de Meyerhof.

$$S_c = 1 + 0.2 K_p \frac{B}{L}$$

Forma: $S_q = S_\gamma = 1 + 0.1 K_p \frac{B}{L} \rightarrow si \cdot \phi > 10$

$$S_q = S_\gamma = 1 \rightarrow si \cdot \phi = 0$$

$$d_c = 1 + 0.2 \sqrt{K_p} \frac{D}{B}$$

Profundidad: $d_q = d_\gamma = 1 + 0.1 \sqrt{K_p} \frac{D}{B} \rightarrow \phi > 10$

$$d_q = d_\gamma = 1 \rightarrow \phi = 0$$

$$i_c = i_q = \left(1 - \frac{\rho}{90}\right)^2$$

Inclinación: $i_\gamma = \left(1 - \frac{\theta}{\phi}\right)^2 \rightarrow \text{para } \phi > 0$

$$i_\gamma = 0 \rightarrow \text{para } \phi = 0$$

Donde: $K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$
 $\theta \rightarrow \text{ángulo medido desde la vertical}$

En nuestro caso $Q_p = (c N_c' + \gamma D_f N_q) A_p$
 $N_c' = 16,11$ aplicando los factores de forma y profundidad
 $N_q' = 2,93$ aplicando los factores de forma y profundidad

$$\text{Luego } Q_p = (8,5\text{t/m}^2 \times 16,11 + 1,34\text{t/m}^3 \times 4\text{m} \times 2,93) \times 0,5\text{m}^2 = 76,32\text{t}$$

Capacidad de carga lateral

$$Q_l = (c + p \operatorname{tg} \delta) \times A_l$$

En donde c = cohesión, p = presión lateral pasiva, δ = ángulo de fricción entre suelo y hormigón = $\frac{3}{4} \phi$

Heettiaratchi y Reece han elaborado (1974) ábacos para el cálculo del empuje pasivo (presión pasiva) según la fórmula: $p = K_\gamma \times \gamma \times H + K_{pc} \times c$

K_γ y K_{pc} están en ábacos para $\delta = 0^\circ$ y $\delta = \phi$

$$\text{Luego } K(\delta) = K(0) \times [K(\phi)/K(0)]^{\delta/\phi}$$

Por supuesto que la hipótesis planteada es más exhaustiva y desarrollada, pero no es objeto de este informe.

Interpolando en los ábacos tenemos:

$$K_\gamma(\delta = 4,5^\circ) = 0,72$$

$$K_{pc}(\delta = 4,5^\circ) = 3,217$$

$$\text{Luego } p = (0,72 \times 1,34\text{t/m}^3 \times 3\text{m} + 3,217 \times 8,5\text{t/m}^2) = 30,24\text{t/m}^2$$

$$Q_l = (8,5\text{t/m}^2 + 30,24\text{t/m}^2 \times \operatorname{tag} 4,5^\circ) \times 6,90\text{m}^2 = 75,07\text{t}$$

Valores de presión pasiva más conservadores se hubieran obtenido con la teoría de Coulomb.

$$\text{La carga total } Q_t = Q_p + Q_l = 76,32\text{t} + 75,07\text{t} = 151,39\text{t}$$

Con un coeficiente de seguridad = 2,5 tenemos que $Q_{tadm.} = 60,55\text{t}$

Ábacos para presión pasiva

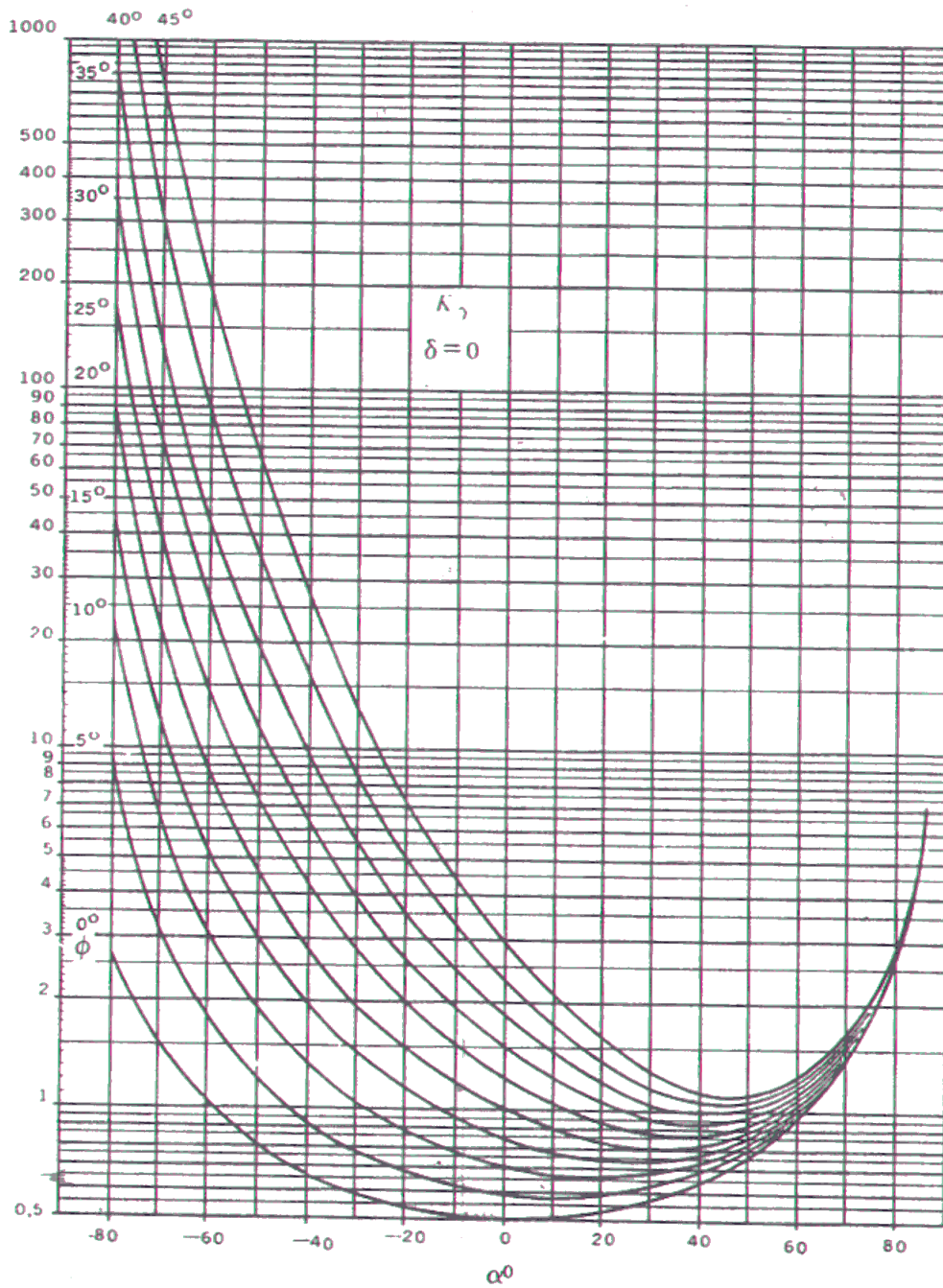


Fig. 10.35.—Coeficiente K_γ para $\delta = 0$. Cortesía de I.C.E. (Londres).

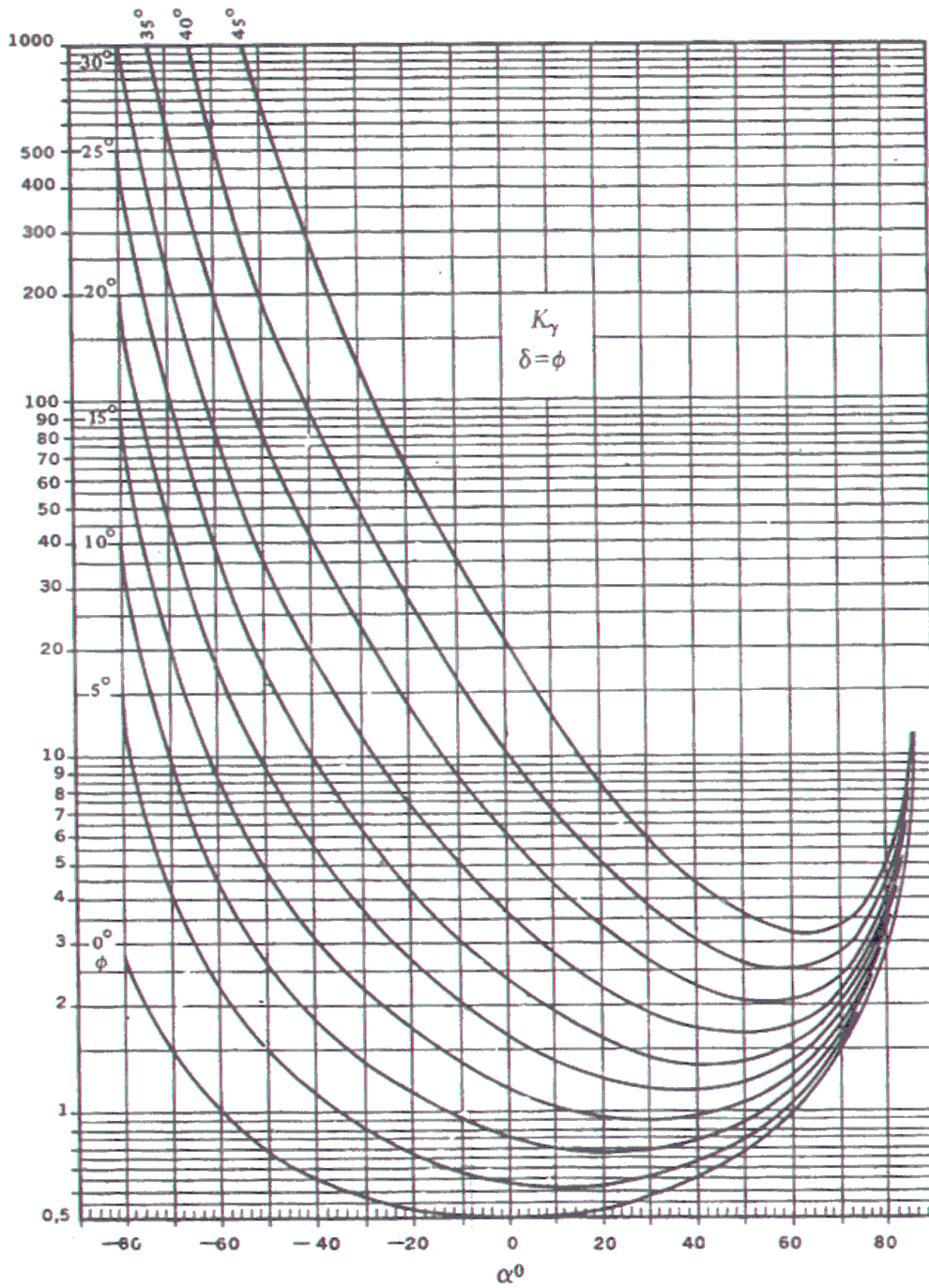


Fig. 10.36.—Coeficiente K_γ para $\delta = \phi$. Cortesía de I.C.E. (Londres).

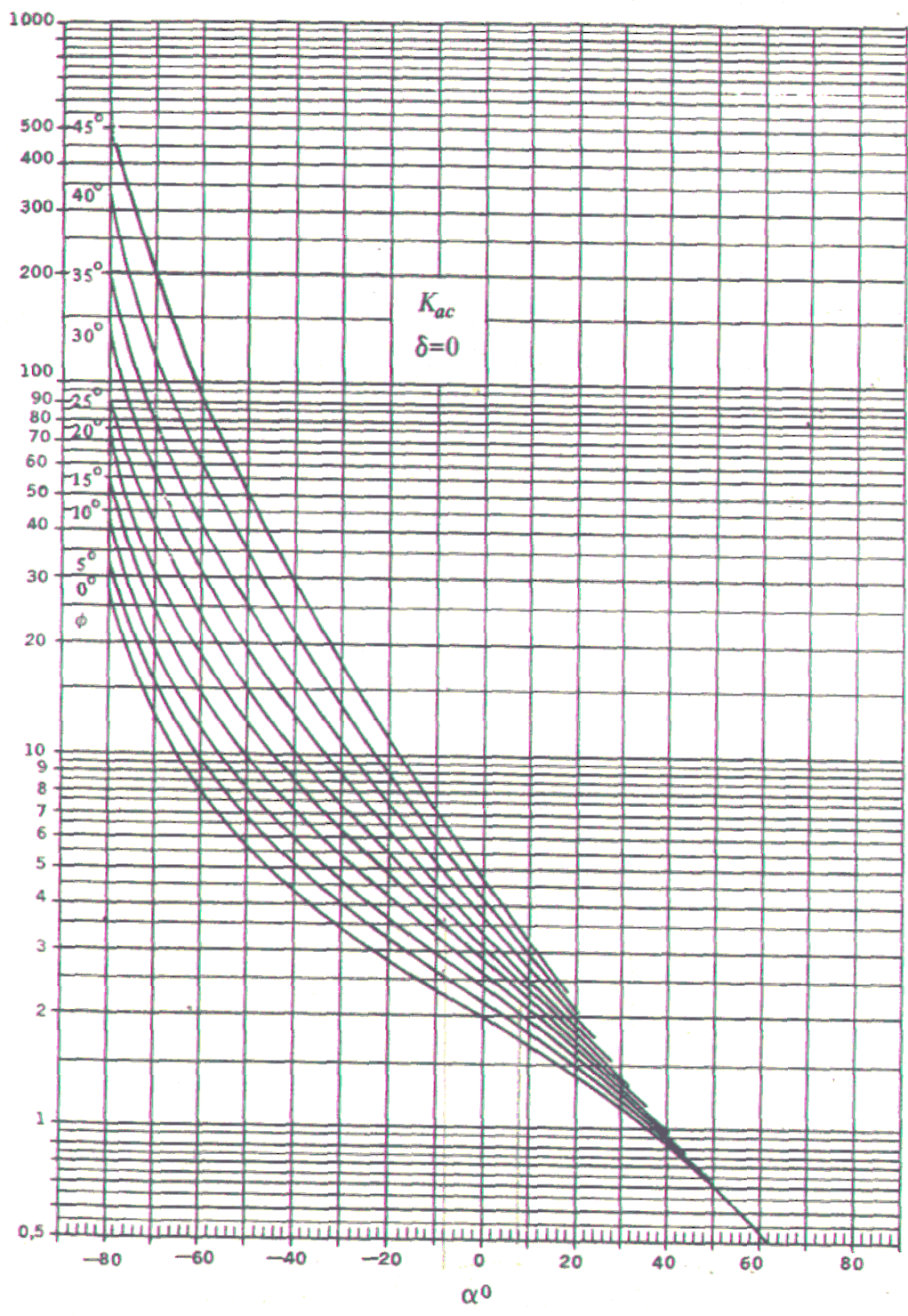


Fig. 10.37.—Coeficiente K_{ac} para $\delta = 0$. Cortesía de I.C.E. (Londres).

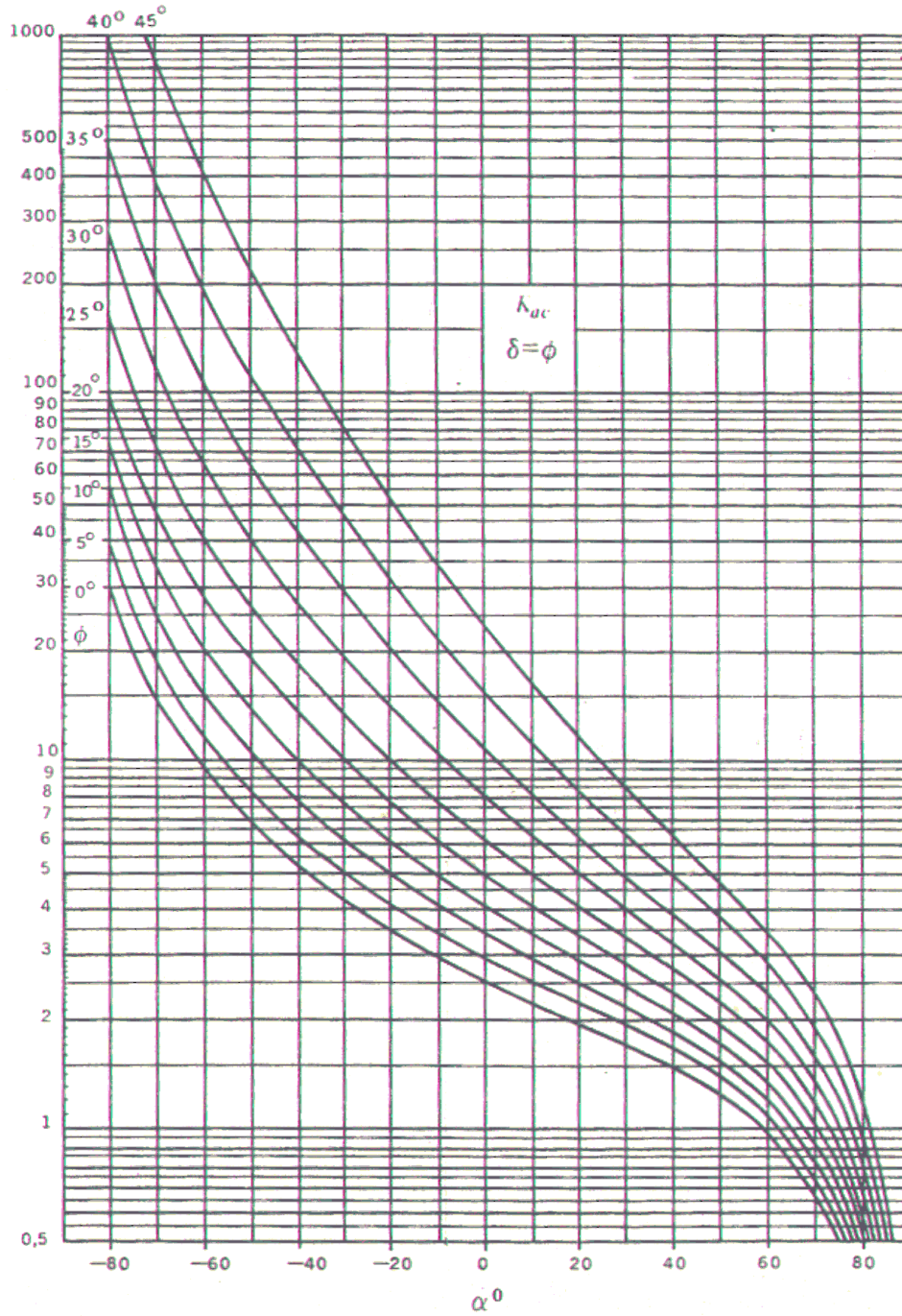


Fig. 10.38.—Coeficiente K_{ac} para $\delta = \phi$. Cortesía de I.C.E. (Londres).

Ejemplo : En arcilla arenosa

$$\phi = 18^\circ - C = 7\text{t/m}^2 - \gamma = 1,55\text{t/m}^3$$

Con el mismo procedimiento anterior obtenemos:

$N_c' = 36,97$ aplicando los factores de forma y profundidad

$N_q' = 10,58$ aplicando los factores de forma y profundidad

$$Q_p = (7\text{t/m}^2 \times 36,97 + 1,55\text{t/m}^3 \times 4\text{m} \times 10,98) \times 0,5\text{m}^2 = 162,19\text{t}$$

$$K_\gamma (\delta=13,5^\circ) = 1,76$$

$$K_{pc}(\delta=13,5^\circ) = 5,24$$

$$\text{Luego } p = (1,76 \times 1,55\text{t/m}^3 \times 3\text{m} + 5,24 \times 7\text{t/m}^2) = 44,86\text{t/m}^2$$

$$Q_l = (7\text{t/m}^2 + 44,86\text{t/m}^2 \times \tan 13,5^\circ) \times 6,90\text{m}^2 = 122,60\text{t}$$

$$\text{La carga total } Q_t = Q_p + Q_l = 162,19\text{t} + 122,60\text{t} = 284,79\text{t}$$

Con un coeficiente de seguridad = 2,5 tenemos que $Q_{\text{adm.}} = 113,92\text{t}$

Consideraciones finales

Todo lo expresado en este informe se basó fundamentalmente en consideraciones teóricas que pueden ser modificadas con otros criterios, ya que en todo el estudio de suelos se presentan incertidumbres que varían según apreciaciones del autor o investigador del tema en sus experiencias y ensayos. En la practica otros ingenieros han utilizado estas bases en obras ya sea combinando con otros tipos de bases o mediante fundaciones como las descritas. No obstante han llegado a resultados de cálculos que difieren en la proporción que los pozos tronco cónicos absorben los esfuerzos de punta y laterales.

Como criterio particular, debe cuidarse el esfuerzo provocado por el empuje pasivo, dado que es poco confiable en los suelos que realicé este tipo de bases la capacidad de carga en los estratos por encima del nivel de fundación.

Las principales ventajas de este tipo de fundación son:

- No necesita armadura ya que no existen esfuerzos de flexión y pandeo, solo se coloca una armadura de repartición de diam. 8 cada 20cm para absorber la fisuración.
- Facilidad en la excavación dado que el mismo pozo con talud inclinado protege de posibles desmoronamientos.
- Se aprovecha la totalidad de lo excavado, lo que evita el traslado de tierra a otra parte de la obra o fuera de la misma.
- El hormigón utilizado para el pozo no necesita ser de elevada resistencia ya que trabaja a la compresión simple.
- No necesita mano de obra calificada ni maquinaria para su ejecución.

- En general son más baratas que las bases aisladas tradicionales y por supuesto los pilotes, pero esta ventaja es apreciable para cargas grandes en donde por razones de espacio las primeras se superponen con las bases vecinas o cuando la única opción son los mencionados pilotes.

Es importante dejar abierta la discusión sobre este tema a otros profesionales que puedan aportar sus experiencias y criterios, dado que como se mencionó anteriormente existen diferencias de opinión sobre la factibilidad de uso de estas bases o pozos y suelos con características muy diferentes en las diversas zonas del mundo.

La intención de mi parte es aportar una inquietud sobre las fundaciones y tratar de resolver algunos problemas que tenemos los ingenieros al momento de decidir cual es la forma mas adecuada de sustentar un edificio.

Es importante destacar la simplicidad de este tipo de fundación, tanto en su ejecución como dimensionado, dejando de lado todo lo abstracto y tedioso que algunos profesionales de la ingeniería quieren imprimir en el campo estructural, con un despliegue de ecuaciones diferenciales y artificios matemáticos que nada tienen que ver con la realidad física.

Para finalizar dejo expresado el deseo que en el desarrollo de la ingeniería se estudien y experimenten cada vez más elementos constructivos simples y de fácil ejecución, pero además que sean económicos y seguros, que es en definitiva el fin de toda actividad que tenga por objetivo servir al hombre.

Ing. José a. Prati

"Pozo de Fundación Tronco Cónico " - Revista Cifras N°46 (1995)

Ejemplo de cálculo