

Análisis de la estabilidad de perforación para pilas

STABILITY ANALYSIS DURING DRILLING OF BORED PILES

Walter I. PANIAGUA Z.¹, Cecilia HERNANDEZ G.²

¹ Pilotec, Ciudad de México, Distrito Federal, México.

² Pilotec, Ciudad de México, Distrito Federal, México.

RESUMEN: Se presenta una descripción de las herramientas analíticas, desarrolladas por diversos autores, con las que se cuenta para el análisis de la estabilidad de perforaciones para pilas: estabilidad de las paredes con lodo bentonítico, y estabilidad del fondo y las paredes con ademes. Se revisan las ventajas y limitaciones de estos métodos, y se presentan ejemplos de aplicación de esta problemática.

ABSTRACT: This paper includes a review of the analytical tools, developed by different authors, for the analysis of the stability of drilling for bored piles: stability of the walls with drilling mud, and stability of the bottom and walls with casings. Advantages and limitations of these methods are mentioned, and examples of the problematic are shown.

1 INTRODUCCION

El diseño y construcción de cimentaciones profundas coladas en el sitio, conocida como pilas de cimentación, ha tenido un incremento notable en las últimas décadas, a nivel mundial. Las herramientas para el diseño, así como los equipos de construcción han presentado avances importantes.

Desde el punto de vista del procedimiento constructivo, las preocupaciones se han enfocado a dos aspectos fundamentalmente: 1) realizar una perforación estable, durante todo el proceso; y 2) realizar esta perforación con la mayor eficiencia posible, en tiempo y costo.

En este trabajo se revisan algunas herramientas analíticas, que permiten analizar la estabilidad de las perforaciones para pilas, tomando en cuenta las propiedades mecánicas del suelo. Por supuesto, al presentarse variaciones espaciales en la estratigrafía y propiedades, estas herramientas muestran sus limitaciones.

Los procedimientos de cálculo presentados, incluyen la posibilidad de incorporar el lodo de perforación (bentonítico, con polímero sintético, o con lodo espontáneo), así como ademes metálicos en una porción de la longitud de perforación. Se incluyen algunos ejemplos al respecto.

Al incorporar este tipo de análisis en la práctica de la construcción de pilas de cimentación, se complementan los criterios empíricos, usados comúnmente, y se tiene un mejor conocimiento de los fenómenos involucrados.

2 ESTABILIDAD EN LAS PAREDES DE LA PERFORACIÓN

Al construir pilas, con ayuda del efecto estabilizador de lodos de perforación, es necesario analizar previamente, con ayuda de fórmulas adecuadas, la factibilidad de que realmente se produzca dicho efecto.

La densidad y columna del lodo interviene directamente en la presión de la columna de lodo que estabiliza las paredes.

Las fórmulas de análisis que aquí se presentan (Schmitter et al, 1976) se desarrollaron con base en la teoría de Rankine para el caso de empujes activos en suelos, comparando por un lado el empuje activo del suelo (E_A) más el hidrostático del agua freática (E_H) contra el empuje hidrostático del lodo bentonítico (E_L).

Dado que en todo momento se debe cumplir que:

$$E_L > E_A + E_H \quad (1)$$

Para asegurar la estabilidad de las paredes de la perforación, podría entonces definirse un factor de seguridad (FS), como la relación:

$$FS = \frac{E_L}{E_A + E_H} \quad (1a)$$

Aplicando esta idea a la estabilidad de perforaciones circulares, se obtienen las siguientes expresiones:

Suelos friccionantes

$$FS = \frac{\gamma_L n^2}{K_a \gamma F_L + \gamma_w m^2} \quad (2)$$

Suelos cohesivos

$$FS = \frac{\gamma_L n^2}{\gamma F_L + \gamma_w m^2 - \frac{4c}{H\sqrt{N_\phi}}} \quad (3)$$

Donde:

- γ_L peso volumétrico del lodo
- γ peso volumétrico del suelo
- γ_w peso volumétrico del agua
- γ' peso volumétrico sumergido del suelo
- c cohesión del suelo
- ϕ ángulo de fricción interna del suelo
- K_a coeficiente de empuje activo, según Rankine

$$\sqrt{N_\phi} = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4)$$

$$F_2 = \left[1 - m^2 \left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma}\right)\right] \quad (5)$$

El resto de las variables se definen en la figura 1.

En casos de gran inestabilidad, es posible ademar la parte superior de la perforación dejando que el lodo bentonítico llene el resto.

Se presenta un ejemplo de aplicación, en el cual se ha supuesto un suelo cohesivo (aplica la ec. 3), con resistencia no drenada de 3 t/m², peso volumétrico de 1.2 t/m³, nivel de agua superficial de 3 m y profundidad de perforación de 12 m.

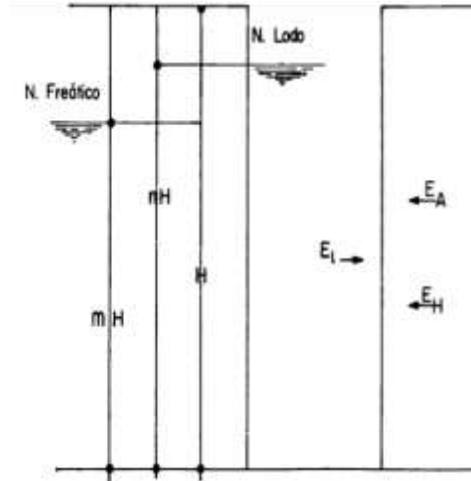


Fig. 1, Definición de variables para el análisis de estabilidad de una perforación (Schmitter et al, 1976).

En la figura 2 se muestra una gráfica de la variación del factor de seguridad de la estabilidad de la perforación vs la posición del nivel del lodo estabilizador, representada con la variable n, que es la razón entre la profundidad del lodo, respecto de la profundidad de la perforación. El cálculo se muestra para diferentes valores de peso volumétrico de lodo.

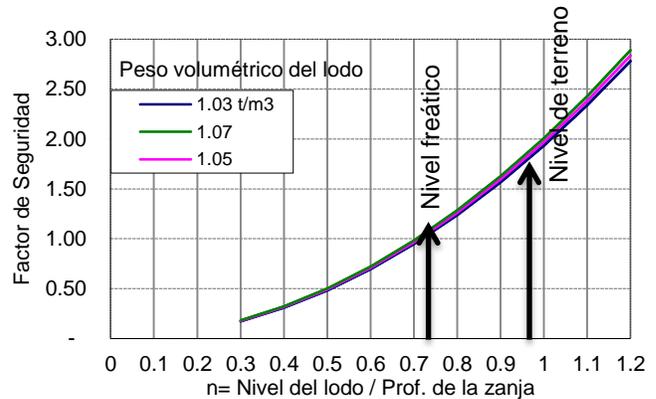


Fig. 2 Factor de seguridad vs altura de lodo bentonítico.

Se señalan dos condiciones: n=0.75, con el nivel de lodo coincidiendo con la profundidad del nivel de agua en el suelo, con un factor de seguridad apenas superior a uno; el segundo caso n= 1.0, donde el nivel del lodo se encuentra al nivel de la superficie del suelo, con un factor de seguridad de 2.0. Se hace notar que las curvas son prácticamente iguales para los diferentes valores del peso volumétrico del lodo.

Se concluye que la variable de más influencia, en la estabilidad de la perforación, es la altura del lodo dentro de la misma; se debe mantener el lodo de perforación en un nivel cercano a la superficie; de lo

contrario, es difícil estabilizar la perforación, independientemente de las propiedades del lodo.

3 ESTABILIDAD EN EL FONDO DE LA PERFORACIÓN

La condición general se muestra en la figura 2 (Ponimatkin, 1996), e incluye la perforación utilizando ademe metálico y lodo bentonítico. Cuando se perfora con ademe, éste debe ser hincado, a la máxima profundidad posible, y posteriormente se hará la extracción de sólo una parte del volumen de suelo. La parte restante del suelo (tapón), se deja en el fondo para crear presión, que en conjunto con la presión del lodo bentonítico, que se vierte durante la perforación, proporcionara la estabilidad del fondo.

La altura mínima del tapón de suelo y la columna de lodo dentro de la perforación se pueden determinar con las ecuaciones que se presentan más adelante, en las que intervienen la posición del ademe, características del lodo bentonítico, así como las propiedades mecánicas del suelo.

El tapón mencionado anteriormente se retirará durante al terminar la perforación o cuando el ademe llegue a suelo estable.

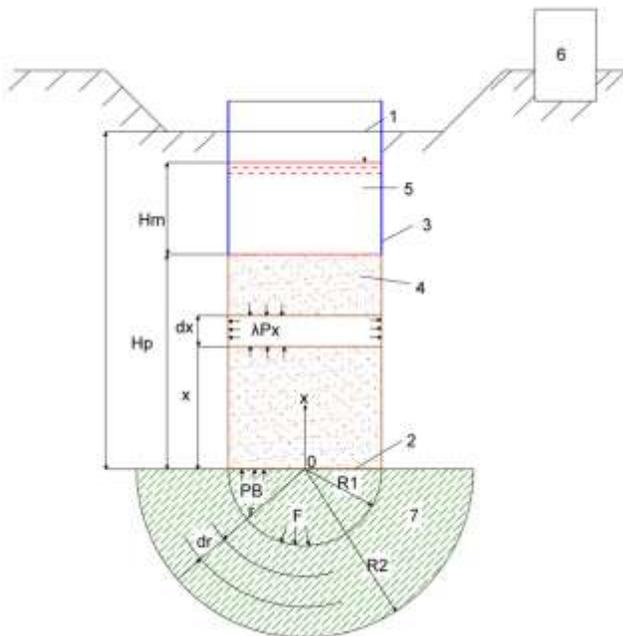


Fig. 3, Diagrama de la perforación donde: (1) y (2) son la superficie y fondo de la excavación, respectivamente, (3) ademe metálico, (4) tapón de suelo, (5) lodo bentonítico, (6) excavaciones vecinas, (7) zona elástica del suelo (Ponimatkin, 1996).

3.1 Condiciones de estabilidad del fondo utilizando ademe y lodo bentonítico.

En términos generales el fondo de la excavación se considera estable sí durante la perforación el volumen de suelo extraído es igual al volumen del ademe que se retira.

La parte mas delicada para la estabilidad del fondo de la excavación con ademe es cuando la primera extracción de suelo termina. Bajo estas circunstancias, será necesario impedir movimiento en el fondo.

En consecuencia, se formará una zona plástica de un radio limitado R1 en el fondo de la perforación. El resto del suelo se encuentra en la fase de deformación elástica, y por lo tanto no se producen deformaciones riesgosas en la superficie del suelo.

Con esta teoría, se crea una ecuación de equilibrio que involucra el empuje del suelo lateral de la excavación y la suma de empujes tanto del tapón del fondo como de el lodo bentonítico, los cuales darán estabilidad al fondo.

Durante el hincado del ademe, se añade la presión del extremo inferior del ademe, a la presión del suelo y a la presión del lodo en la parte inferior, lo que mejora las condiciones de estabilidad. El criterio de estabilidad al hincar el ademe es la ausencia de un aumento en el nivel del fondo de la excavación y, en consecuencia, del nivel de lodo con respecto a la superficie.

Lo anterior permite la conclusión de que el criterio de estabilidad del fondo de la excavación es la siguiente desigualdad, conocida como condición principal:

$$P_B \geq \frac{F\gamma_n}{\gamma_c} \tag{6}$$

P_B es la presión del tapón de suelo y el lodo bentonítico y F es la presión mínima del tapón de suelo que dará estabilidad a la zona de suelo plástico.

$$P_B = (\gamma_m H_m + A) \exp\left(\frac{2\lambda(H_p) \tan(0.5\phi_1)}{0.5}\right) - A \tag{7}$$

$$F = \frac{3P_0(1 - \sin\phi_2) - 4C_2 \cos\phi_2}{3 + \sin\phi_2} \tag{8}$$

Donde:

$$A = \frac{2C_1 + R_1\gamma_P}{2\lambda \tan(0.5\varphi_1)} \quad (9)$$

- C_1 cohesión del tapón de suelo
 C_2 cohesión del suelo en zona plástica
 P_0 presión total del suelo
 R_1 radio del ademe metálico
 R_2 radio en la zona plástica
 φ_1 ángulo de fricción del tapón de suelo
 φ_2 ángulo de fricción del suelo en zona plástica
 λ coeficiente de empuje del suelo
 γ_m peso específico del lodo bentonítico
 γ_p peso específico del suelo
 H_m altura del lodo bentonítico
 H_p altura del tapón de suelo
 γ_n factor de seguridad
 γ_c factor de seguridad

La solución se encuentra por prueba y error utilizando las ecuaciones (6), (7) y (8), a partir de los valores del peso volumétrico del lodo, su posición dentro de la perforación.

Si no se cumple la condición principal (ecuación 6), se deberá aumentar la longitud del tapón del suelo y/o el peso volumétrico del lodo bentonítico.

3.2 Condiciones de estabilidad del fondo utilizando únicamente lodo bentonítico.

De igual forma considerando la condición principal:

$$P_B = \gamma_m Z \quad (10)$$

F la presión del suelo lateral

$$F = [C_1 \tan \varphi_1 - C_2 \tan \varphi_2 + \lambda P_0 (1 - \sin \varphi_2)] * \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{\alpha_1} * C_1 \operatorname{ctg} \varphi_1 \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \frac{2 \sin \varphi_1}{1 - \sin \varphi_1} \quad (12)$$

Para $\varphi_1 = 0$ se simplifica la formula:

$$F = \lambda P_0 (1 - \sin \varphi_2) - C_2 \cos \varphi_2 \quad (13)$$

En este caso, la solución se encuentra por prueba y error utilizando las ecuaciones (6), (10) y (11), a partir de los valores del peso volumétrico del lodo, su posición dentro de la perforación, y la relación $R_1/R_2 \geq 0.4$.

4 CASOS DE APLICACION

Caso 1. Se conoce el caso de la construcción de pilas de cimentación, en un relleno hidráulico, figura 4. La posición del nivel de agua cercana a la superficie, y los rellenos sueltos, motivaron a que la perforación se hiciera utilizando lodos de perforación, y colocando un ademe metálico en una porción de la longitud de la pila.

Durante el proceso de perforación, se presentó una falla del fondo, que se comunicó a la superficie, figura 5. Se considera que este mecanismo de falla, es similar al propuesto por Vésic, figura 6, pero en sentido inverso.



Fig. 4, Construcción de pilas de cimentación en relleno hidráulico, utilizando ademe metálico parcial, y lodos.



Fig. 5, Falla de fondo en la perforación de una pila, comunicada a la superficie.

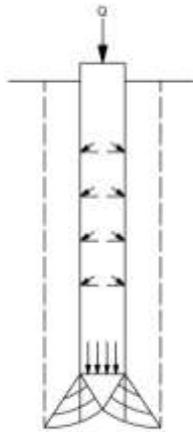


Fig. 6, Mecanismo de falla para un cimientado profundo, según Vésic (tomado de Lambe y Whitman, 1981).

Es posible que este tipo de falla se pueda evitar, extendiendo la longitud del ademe metálico dentro de la perforación, así como incrementando el peso volumétrico del lodo bentonítico.

Caso 2. Se realizó la perforación para pilas de cimentación, en arenas finas sueltas hasta 1.8 m de profundidad, con número de golpes a la penetración estándar entre 2 y 6. Subyaciendo a la arena fina suelta, se encuentra una unidad de arena fina de color gris oscuro, de compacidad mediana, con número de golpes de la penetración estándar entre 23 y 30, que alcanza hasta 7m de profundidad. Finalmente, bajo la arena gris se encuentra una arena densa con más de 50 golpes de la penetración estándar que se extiende hasta la profundidad máxima explorada (30 m).

El objetivo consistía en construir pilas de cimentación de 120 cm de diámetro, hasta 20 m de profundidad. Como primer procedimiento constructivo, se eligió perforación con sistema de hélice continua (CFA), con doble cabeza rotaria, que permitió instalar un ademe metálico, de forma alternada a la perforación, hasta la profundidad de desplante, figura 7.

La perforación se realizó en forma exitosa, conteniendo las paredes con el ademe metálico; sin embargo, al retirar la hélice continua para continuar con la colocación de acero de refuerzo y concreto, se presentó una falla de fondo, llenando el interior del ademe con suelo en estado suelto, entre 6-8 m arriba de la profundidad de desplante. Una posible solución, consistía en colocar el ademe metálico por debajo del nivel de desplante; sin embargo, las limitaciones del equipo no lo permitieron.

Después de intentar sin éxito diversas modificaciones al sistema, se optó por cambiar el procedimiento constructivo por perforación intermitente, utilizando perforadoras con kelly telescópico, y estabilizando la perforación con lodo bentonítico, en toda la longitud, y con ademe metálico los primeros 3 m, figura 8. Con este procedimiento no se tuvieron contratiempos de importancia en la perforación de pilas. Inclusive, se realizaron pruebas de carga (11 pruebas) y de integridad (al 100% de las pilas, 900 ensayos), con lo que quedó demostrada la viabilidad del segundo procedimiento.



Fig. 7, Procedimiento constructivo I: perforación con hélice continua y ademe, utilizando una cabeza rotaria doble.



Fig. 8, Procedimiento constructivo II: perforación con Kelly telescópico, lodo bentonítico y ademe metálico en una porción de la perforación.

Para este caso, en la figura 9 se muestra la variación del factor de seguridad de la estabilidad de

la perforación $P_B/\sigma_n/\sigma_c$, vs la altura del tapón de suelo, representada con la variable H_p , tomada desde el fondo de la excavación. El cálculo se muestra para diferentes ángulos de fricción del suelo.

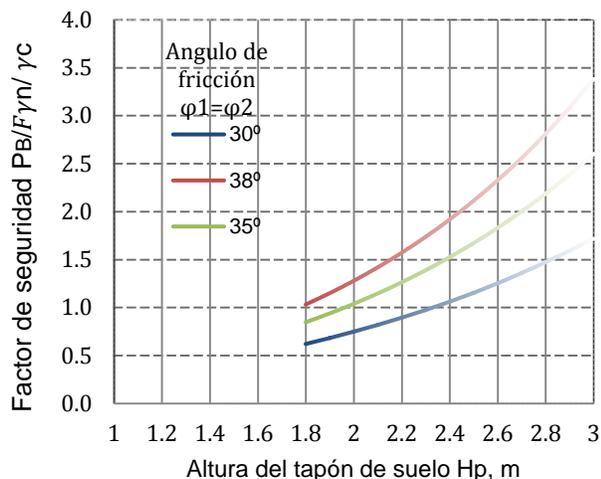


Fig. 9 Factor de seguridad $P_B/\sigma_n/\sigma_c$ vs altura del tapón de suelo.

Se observa que la variable de más influencia en la estabilidad del fondo, es la altura del tapón de suelo, siendo el factor de seguridad directamente proporcional a éste; además, se insiste en la importancia de mantener el lodo de perforación en un nivel cercano a la superficie; de lo contrario, es difícil estabilizar la perforación.

5 CONCLUSIONES

Durante la construcción de pilas de cimentación, en la etapa de perforación, la estabilización de la misma cobra especial importancia. Tomando en cuenta la necesidad de estabilizar las paredes y el fondo de la perforación, se puede comentar lo siguiente:

En este trabajo se presentan herramientas analíticas –desarrolladas por varios autores– para calcular la estabilidad de las paredes de perforación, y del fondo de la misma. Es posible incluir en el cálculo la posición del lodo bentonítico (u otro) y del ademe metálico, en su caso.

Las herramientas están basadas en conceptos clásicos de mecánica de suelos, y utilizan los

parámetros de resistencia no drenada y ángulo de fricción interna del suelo, además del peso volumétrico, y las propiedades físicas del lodo bentonítico (peso volumétrico y posición dentro de la perforación).

En caso de existir variaciones estratigráficas y/o heterogeneidades importantes, este enfoque se verá limitado. Asimismo, el cuidado en la determinación de los parámetros se verá reflejado en los resultados obtenidos.

Se considera conveniente utilizar este enfoque, complementado con los criterios empíricos, para diseñar el procedimiento constructivo más adecuado en cada proyecto.

REFERENCIAS

- Lambe W. y Whitman R.V. (1981). "Mecánica de suelos", *Limusa, México, D.F.*
- Ponimatkin, P.U.(1996), "Stability of the bottom and walls of holes during drilling in weak soils near existing structures", *Hydrotechnical Construction, Vol. 30, N° 8. Traducido de Gidrotekhnicheshoe Stroitel'stvo, N° 8 pp.47-50 Agosto 1996.*
- Schmitter J., Sánchez B., Ponce J.A. y Orozco, M. (1976) "Acción estabilizadora de lodos bentoníticos en cimentaciones". *Memorias del Simposio Cimientos Profundos Colados en Sitio, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.*