

FACTORES DE FORMA DE PIEZOMETROS CILINDRICOS

Jorge E. Alva Hurtado ⁽¹⁾

Félix Canchán Narrea ⁽²⁾

RESUMEN

Es importante determinar el valor del factor de forma de piezómetros cilíndricos, ya que este valor interviene en el cálculo del tiempo de respuesta de dicho instrumento para determinar la presión de poros del subsuelo, así como en la evaluación de la permeabilidad y el coeficiente de consolidación y expansión in-situ mediante el uso de piezómetros.

Se han llevado a cabo en el mundo diversos estudios para determinar el valor exacto del factor de forma de un piezómetro. Los métodos están basados en: a) fórmulas empíricas, b) analogía eléctrica y c) análisis numérico. Lamentablemente en algunos casos los resultados de los estudios son contradictorios, brindando valores dispersos.

En el presente trabajo se resumen los estudios llevados a cabo para determinar el valor exacto del factor de forma. Se comparan los métodos de cálculo y sus resultados, para asignar mayor confiabilidad a uno u otro método.

Se determina que los valores más confiables del factor de forma son aquellos propuestos por: Smiles y Youngs, Al-Dhahir y Morgenstern, y Brand y Premchitt, recomendándose su utilización en los problemas prácticos de ingeniería. Además, se presentan los factores que influyen en el valor del factor de forma.

INTRODUCCION

En este artículo se presenta un resumen sobre la evaluación del factor de forma de piezómetros cilíndricos, ya que dicho valor interviene en el cálculo del tiempo de respuesta de los mismos para determinar la presión de poros del sub-suelo, así como en la evaluación de la permeabilidad y el coeficiente de consolidación y expansión in-situ de los suelos.

A lo largo de los años se han llevado a cabo diversos estudios para determinar el valor exacto del factor de forma en piezómetros, pero en algunos casos los resultados son tan contradictorios y dispersos, que en la actualidad existen serias dudas sobre la exactitud de algunos de estos estudios.

(1) Profesor Asociado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú.

(2) Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima – Perú.

Los métodos utilizados en la evaluación del factor de forma se dividen en tres grupos (Olson y Daniel, 1979):

- a. Los que emplean fórmulas empíricas obtenidas de reemplazar la geometría cilíndrica de la sonda porosa por elipsoides o esferoides.
- b. Los que utilizan un modelo de analogía eléctrica, simulando las condiciones geométricas del piezómetro y suelo en un tanque electrolítico y evalúan indirectamente el factor de forma por la conductancia del modelo eléctrico.
- c. Los que usan métodos numéricos, tal como el método de diferencias finitas. En este método se representan las condiciones geométricas del piezómetro y del suelo por un modelo matemático que se basa en la distribución de la presión de poros alrededor de la punta porosa para evaluar el factor de forma. También se requiere evaluar el caudal que fluye hacia el piezómetro, mediante una integración de contorno alrededor de superficies concéntricas a la punta.

En este artículo se presentan los estudios de factores de forma revisados de una manera resumida, brindándose los resultados así como las conclusiones alcanzadas por los diferentes autores. Se comparan los métodos de cálculo y sus resultados, para establecer un orden de confiabilidad y recomendar factores de forma a utilizarse en los ensayos geotécnicos con piezómetros.

DEFINICION DEL FACTOR DE FORMA

El factor de forma determina la magnitud de la razón de flujo Q dentro de un piezómetro, bajo una carga hidráulica constante H , como:

$$Q = F k H \quad (1)$$

donde F es el factor de forma adimensional, y k es la permeabilidad del suelo.

El valor de F depende de la geometría del piezómetro, es decir, longitud y diámetro de la cavidad, así como de la proximidad de la napa freática a la sonda porosa y de las condiciones existentes en las fronteras exteriores del piezómetro (distancia a los estratos impermeables).

El factor de forma controla el modelo de flujo en el suelo que rodea la punta piezométrica, es independiente de la permeabilidad del suelo y es una característica de una red de flujo axisimétrica.

Inicialmente se pensaba que el valor de F estaba influenciado por el entubado de la perforación y por los sellos en la base de la punta piezométrica. Al-Dhahir y Morgenstern (1969) determinaron que dichos efectos eran mínimos y que para propósitos prácticos su influencia era despreciable.

DETERMINACION DE LOS FACTORES DE FORMA DE PIEZOMETROS CILINDRICOS

Existe un gran número de estudios realizados para determinar los valores del factor de forma. Desde los primeros estudios de Forcheimer (1930), pasando por Hvorslev (1951) y los más recientes de Brand y Premchitt (1980), se ha discutido sobre los métodos de evaluación del valor de F; sin embargo, recién a partir de Smiles y Youngs (1965) se ha podido obtener valores confiables del factor de forma. Lamentablemente, debido a desconocimiento, algunos usuarios siguen utilizando los valores de Hvorslev (1951) para obtener los valores del factor de forma de piezómetros cilíndricos, sin tener en cuenta que éstos brindan solo valores aproximados que difieren significativamente de los valores más recientes considerados como confiables. Existe también el problema de no especificar el rango de validez de los factores de forma presentados por diferentes autores, que puede conducir a errores.

Por las razones anteriores, este artículo presenta la cronología de los estudios llevados a cabo con este fin, compara los métodos utilizados en su evaluación y recomienda los valores del factor de forma de piezómetros considerados actualmente como más confiables.

FRONTERAS INFINITAMENTE ALEJADAS

Se ha indicado anteriormente que el factor de forma está relacionado directamente con la ubicación de la sonda porosa bajo la napa freática y con la distancia que la separa de las fronteras impermeables. Cuando la punta piezométrica se encuentra suficientemente alejada de ambas fronteras, se puede considerar que está enterrada en un suelo "infinito" totalmente saturado, donde la influencia de la napa freática y de los estratos impermeables es despreciable. Debe indicarse que la mayoría de estudios consideran esta situación, y además la influencia de la napa freática y condiciones de frontera en los valores del factor de forma.

A continuación se detallan las distintas metodologías:

Fórmulas Empíricas.- Estos métodos se basan en el estudio de la red de flujo que se forma alrededor de la punta piezométrica. Se reemplaza la geometría cilíndrica del piezómetro por una elipsoidal o esferoidal, cuyas redes de flujo son bastante conocidas. En estos casos las superficies equipotenciales son elipsoides o esferoides. La exactitud del valor de F obtenido por fórmulas empíricas es generalmente muy pobre, ya que se asume una geometría diferente a la original.

La ecuación de Laplace $\nabla^2 u = 0$, gobierna el estado de flujo permanente en un medio poroso. Esta ecuación se puede resolver analíticamente para un piezómetro esférico de diámetro D, para el cual:

$$F = 2 \pi D \quad (2)$$

Para piezómetros cilíndricos, el estado de flujo permanente está gobernado por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

donde la presión de poros u está expresada en términos de coordenadas cilíndricas (r, z)
Lamentablemente para esta ecuación no existe una solución analítica.

Dachler (1936) derivó una solución aproximada de la ecuación (3) para sondas porosas limitadas en la parte superior por fronteras impermeables, en base a la teoría de fuentes lineales para las que las superficies equipotenciales son semielipsoides. Hvorslev (1951) asumió que las líneas de flujo eran simétricas respecto a un plano horizontal que pasa por el punto medio de la punta cilíndrica y utilizó la fórmula de Dachler (1936), tanto en la mitad superior e inferior de la punta para obtener:

$$F = \frac{2\pi L}{\ln \left(\frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D} \right)^2} \right)} \quad (4)$$

donde L y D son la longitud y el diámetro de la sonda piezométrica. Para relaciones L/D mayores que 4, Hvorslev (1951) presentó la fórmula simplificada inicialmente utilizada por Samsioe (1931):

$$F = \frac{2\pi L}{\ln \left(\frac{2L}{D} \right)} \quad (5)$$

La ecuación (5) tan solo presenta un error del 1% con respecto a la ec. (4). Sin embargo, ambas son aproximadas, ya que el error aumenta cuando la relación L/D decrece (Brand y Premchitt, 1980).

Kallstenius y Wallgren (1956) sugirieron que un piezómetro de cualquier forma podía ser representado por un piezómetro esférico equivalente con la misma área superficial. El factor de forma estaba expresado por:

$$F = 2\sqrt{\pi S} \quad (6)$$

donde S = área superficial. Para piezómetros cilíndricos se tiene la expresión simple:

$$F = 2\pi\sqrt{LD} \quad (7)$$

La ecuación anterior brinda valores menores que la ec. (4). Para el rango práctico ($4 < L/D < 10$) la ec. (7) presenta valores dentro del 5% de aquellos de la ec. (4).

Wilkinson (1968) sugirió que un valor más exacto del factor de forma se lograba al representar el cilindro por un esferoide alargado inscrito con su eje mayor ajustado de tal manera que su volumen fuese igual al del cilindro en la solución de Dachler (1936) y Hvorslev (1951) donde:

$$F = \frac{3\pi L}{\ln \left[1.5 \left(\frac{L}{D} \right) + \sqrt{1 + \left(1.5 \frac{L}{D} \right)^2} \right]} \quad (8)$$

esta ecuación es similar a la ec. (4), en la que se ha reemplazado L/D por $1.5 L/D$.

Brand y Premchitt (1980) encontraron en base a sus estudios experimentales, que el valor del factor de forma puede ser ajustado bastante bien para el rango de L/D entre 2 y 15, si se reemplaza L/D en la ec. (4) por $1.2 L/D$ para dar:

$$F = \frac{2.4\pi L}{\ln \left[1.2 \left(\frac{L}{D} \right) + \sqrt{1 + \left(1.2 \frac{L}{D} \right)^2} \right]} \quad (9)$$

Además, para piezómetros con $L/D \geq 4$ Brand y Premchitt (1980) encontraron que se podía obtener valores del factor de forma con errores despreciables mediante:

$$F = 7 D + 1.65 L \quad (10)$$

Analogía Eléctrica.- Estos métodos se basan en la simulación de las condiciones geométricas del piezómetro y del suelo que se realiza en un tanque electrolítico, y en la evaluación indirecta del factor de forma por medio de la medición de la conductividad específica del modelo eléctrico y de la resistencia del agua.

Los tanques electrolíticos utilizados fueron de acrílico, con dimensiones variables de 900 mm. a 1,700 mm. de diámetro y por lo general de 500 mm. de profundidad y espesores de 6 mm. en el fondo y 3 mm. en las paredes laterales. Como electrolito se utiliza agua para representar al suelo y los modelos piezométricos son de bronce o cobre pulido colocados en el centro del tanque. Las fronteras de drenaje o recarga en el fondo y a los lados (electrodos) son simuladas por mallas de bronce o de cobre. Los piezómetros se representan por una varilla de bronce o cobre (electrodo cilíndrico) de 3 mm. de diámetro, envuelto con cinta aislante de PVC en toda la longitud a excepción de un tramo expuesto. el cual se varia para obtener diversas relaciones de L/D . Para satisfacer la condición de medio poroso "infinito", la relación de diámetro del tanque al diámetro del piezómetro es de 300 (Luthin y Kirkham, 1949; Smiles y Youngs, 1965; Youngs, 1980; Brand y Premchitt, 1980).

El factor de forma se obtiene por:

$$F = \frac{r}{rm} \cdot \frac{1}{\sigma R} \quad (11)$$

donde:

r = radio de la cavidad del suelo

rm = radio del electrodo cilíndrico

σ = conductividad específica del tanque electrolítico

R = resistencia eléctrica entre electrodo cilíndrico y fronteras de drenaje o recarga

La resistencia del electrolito se mide con un puente Wheatstone y se utilizan voltímetros digitales, audífonos u osciloscopios como indicadores de corriente nula. La medición de la conductividad específica del agua es muy importante en la determinación de F, ya que se ha podido determinar que varía significativamente con la temperatura. Además, es de suma importancia la calibración del tanque electrolítico (Smiles y Youngs, 1965; Brand y Premchitt, 1980).

Luthin y Kirkham (1949) presentaron en gráficos los resultados de factores de forma obtenidos por mediciones de analogía eléctrica. En dicho estudio se presentó la variación de F con el diámetro de la cavidad para una longitud constante de 4". También se presentó la variación de F con la longitud de la cavidad para un diámetro constante de 1". En el trabajo de Luthin y Kirkham (1949) no se menciona la forma en que fue calculada la conductividad específica del agua utilizada en el tanque electrolítico, ni la forma en que éste fue calibrado. Por lo anterior, es cuestionable la exactitud de las mediciones llevadas a cabo en dicho estudio.

Smiles y Youngs (1965) y Youngs (1968) emplearon un modelo de analogía eléctrica para medir directamente los valores del factor de forma para cavidades cilíndricas con relaciones de L/D en el rango de 0 a 4.

Los valores del factor de forma determinados en este estudio se consideran confiables, debido a la doble verificación que realizaron los autores al medir la conductividad específica del agua, además de la concordancia encontrada entre los resultados experimentales y teóricos obtenidos al calibrar su tanque electrolítico.

Brand y Premchitt (1980) llevaron a cabo un estudio sobre los factores de forma de piezómetros cilíndricos, que hasta la fecha parece ser el trabajo más completo. Este estudio comprendió modelos de analogía eléctrica y diferencias finitas. Al inicio de las investigaciones de Brand y Premchitt (1980) solamente existían valores confiables del factor de forma para relaciones longitud/diámetro menores de 4. Dichos valores habían sido determinados por Smiles y Youngs (1965) y Al-Dhahir y Morgenstern (1969) utilizando modelos de analogía eléctrica y diferencias finitas, respectivamente. Brand y Premchitt (1980) estudiaron el rango de L/D de 2 a 15 con el método de analogía eléctrica, considerando dos condiciones de frontera distintas que tomaban en cuenta que el régimen de flujo en un piezómetro es de extensión infinita en una dirección vertical. El estrato del

suelo está limitado por una superficie relativamente impermeable por debajo y el nivel freático por encima. Los valores del factor de forma resultaron aproximadamente iguales para las condiciones de frontera estudiadas, lo cual verificó que la distancia a las fronteras fue lo suficientemente grande, por lo que no afectó la medición de los factores de forma.

Los valores de F de Brand y Premchitt (1980) tienen buena concordancia con aquellos obtenidos por Smiles y Youngs (1965) y Al-Dhahir y Morgenstern (1969).

Diferencias Finitas.- Este método consiste en representar las condiciones geométricas del piezómetro y del suelo por un modelo matemático que se basa en la distribución de la presión de poros alrededor de la punta piezométrica para la evaluación del factor de forma. La ec. (3) se reemplaza por una forma de diferencias finitas, resolviendo las ecuaciones lineales simultáneas por un método iterativo como el de la sobre-relajación de Gauss Siedel, desarrollado por Forsythe y Masow (1960). La forma de diferencias finitas de la ec. (3) puede ser escrita para el nudo (i, j) como:

$$u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + \left(1 - \frac{h}{2r_j}\right)u_{i,j+1} + \left(1 - \frac{h}{2r_j}\right)u_{i,j-1} - 4u_{i,j} = 0 \quad (12)$$

donde h es el espaciamiento entre nudos, r es la distancia radial del nudo a los ejes; i y j aumentan en las direcciones z y r respectivamente. El piezómetro se trata como un sumidero donde la presión de poros es nula y a las fronteras de recarga se les asigna un valor de presión de poros constante. Se llevan a cabo iteraciones hasta alcanzar un cierto error dado.

Cuando se establece el flujo permanente, el caudal a través de la superficie del piezómetro será igual al caudal hacia el piezómetro. Esta descarga se obtiene por integración alrededor del contorno. Existen problemas de singularidad en las cuatro esquinas del piezómetro, ya que en la superficie lateral se tienen bordes permeables y en los extremos superior e inferior bordes impermeables, y el modelo debe satisfacer ambas condiciones simultáneamente en las esquinas. Para resolver la singularidad, se calcula factores de forma para ambas condiciones independientemente; los dos valores convergen a un valor único cuando el tamaño de malla tiende a cero. Con lo anterior se elimina tanto el efecto de la singularidad como el del tamaño de la malla.

Debido a que las dimensiones son bastante mayores que las del piezómetro, el valor del factor de forma no se vé afectado por el hecho de asignar a las fronteras exteriores valores de superficie impermeable ($\partial u / \partial r = 0$) ó superficie equipotencial ($u = \text{cte}$). Sin embargo, la solución numérica es más rápida en el segundo caso.

Al-Dhahir y Morgenstern (1969) utilizaron cuatro condiciones de frontera alrededor de piezómetros cilíndricos: extremo permeable y extremos impermeables y perforación entubada y sin entubar. Se determinó que la presencia o ausencia de entubado no tenía mayor influencia en el valor de F. Tampoco tenía influencia el considerar un extremo impermeable o ambos en el valor del factor de forma. Con respecto al tamaño de malla de

diferencias finitas, al comienzo Al-Dhahir y Morgenstern (1969) utilizaron una malla de variación lineal, pero después utilizando una malla con espaciamentos variables obtuvieron considerable economía en tiempo de computación. Debe notarse una gran concordancia entre los resultados de este estudio y aquellos presentados por Smiles y Youngs (1965) y Brand y Premchitt (1980).

Raymond y Azzouz (1969) también utilizaron un modelo de diferencias finitas para obtener valores del factor de forma, pero a pesar de utilizar la misma técnica obtuvieron valores muy por debajo de aquellos presentados por Al-Dhahir y Morgenstern (1969). Desafortunadamente no presentaron detalles de su método de diferencias finitas.

Brand y Premchitt (1980) también utilizaron el método de diferencias finitas para obtener el valor de F y compararlo con su modelo de analogía eléctrica. Estos investigadores utilizaron el método iterativo de sobre-relajación de Gauss-Seidel, considerando cinco condiciones de frontera. Todos los resultados obtenidos por el método de las diferencias finitas fueron verificados con el método de analogía eléctrica, observándose que en ningún caso la discrepancia entre los dos valores del factor de forma excedió del 2%. Es por esta razón que se considera que los valores de F obtenidos en este estudio son confiables.

Comparación de Resultados.- La Tabla 1 presenta un resumen de todos los valores presentados del factor de forma para suelos infinitos, en función de la relación longitud/diámetro de los piezómetros. La Tabla 2 es una modificación de la anterior, en donde los valores del factor de forma están normalizados para poder apreciar el porcentaje de variación. La normalización se efectuó en dos rangos, el primero con los valores de Smiles y Youngs para relaciones longitud/diámetro menores que 2; el segundo con los valores de Brand y Premchitt para relaciones mayores e iguales a 2. Los valores anteriores se escogieron por considerar que son los más confiables.

Como se puede observar, los valores de Smiles y Youngs (1965), Al-Dhahir y Morgenstern (1969) y los de Brand y Premchitt (1980) no difieren en más del 6%, lo que demuestra la buena concordancia de resultados.

Los valores presentados por Samioe (1931) son en promedio 11% menores que los de Brand y Premchitt (1980), mientras que los de Luthin y Kirkham (1949) lo son en un 6.5%. La ecuación de Hvorslev (1951) proporciona valores confiables solo para el rango de L/D de 1 a 2, mientras que la ecuación de Kallstenius y Wallgren (1956) los proporciona para el rango de L/D de 2 a 3. Los valores de Wilkinson (1968) son en promedio 12% mayores que los de Smiles y Youngs (1965) y Brand y Premchitt (1980). Los valores propuestos por Raymond y Azzouz (1969) son en promedio 30% menores que los de Brand y Premchitt (1980).

La Fig. 1 presenta el gráfico de los valores del factor de forma para piezómetros cilíndricos propuestos por los diversos investigadores.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL FACTOR DE FORMA

La determinación de los valores de factor de forma presentados corresponden a condiciones de suelo infinito y homogéneo, esto es, la punta piezométrica se encuentra bastante alejada del nivel freático y de los estratos impermeables, por lo que su influencia es despreciable.

Sin embargo, en condiciones reales se encuentra que el punto en estudio está cerca del nivel freático, o que el estrato de suelo es de poca potencia. Además, se debe considerar la anisotropía de la permeabilidad del suelo. Algunos autores han indicado que existe influencia en el valor de F del sello y del entubado, así como la presencia de rocas y fisuras en el suelo.

Profundidad bajo el Nivel Freático.- La influencia que sobre el factor de forma ejerce la proximidad de la napa freática a un piezómetro es un efecto de frontera, sin embargo, es preferible separarlo de otros efectos de frontera por sus implicaciones prácticas.

Luthin y Kirkham (1949) estudiaron dicha condición, adicionándole el efecto de la proximidad a estratos impermeables, en su tanque electrolítico. Estos investigadores encontraron que si la distancia del extremo inferior de la cavidad al estrato impermeable, y si la distancia desde el extremo superior a la napa freática son muy grandes en comparación a la longitud de la cavidad, el valor del factor de forma no varía considerablemente.

Smiles y Youngs (1965) también realizaron estudios de la variación del factor de forma con respecto a la profundidad de la punta piezométrica por debajo del nivel freático. Se estudió la variación del factor de forma para relaciones longitud/diámetro de 0 a 4 y profundidad al nivel freático/diámetro de 2 a 10. Los resultados presentaron muy poca variación.

Youngs (1980) presentó variaciones del factor de forma con respecto a la profundidad de la cavidad cilíndrica por debajo del nivel freático, para diversas relaciones de longitud/diámetro. En este estudio se extendió el rango de la relación profundidad al nivel freático/diámetro de 0 a ∞ , para el mismo rango de longitud/diámetro de Smiles y Youngs (1965).

Brand y Premchitt (1980) también estudiaron la variación del factor de forma con la profundidad de la sonda piezométrica por debajo del nivel freático, por medio de un tanque electrolítico. Estos investigadores concluyeron que para propósitos prácticos el efecto de la napa freática es despreciable.

Permeabilidad Anisotrópica.- Aunque el factor de forma es independiente de la permeabilidad del suelo, se ha observado que está influenciado por la anisotropía del mismo. En suelos isotrópicos los valores del factor de forma presentados son válidos. Los suelos reales son en la mayor parte anisotrópicos.

Samsioe (1931) y posteriormente Dachler (1936) dedujeron que la anisotropía de permeabilidad del suelo puede ser tomada en cuenta transformando las dimensiones horizontales del modelo piezométrico por el factor $m = \sqrt{k_v/k_h}$, utilizando una permeabilidad promedio $k_m = \sqrt{k_h \cdot k_v}$ donde k_v = permeabilidad vertical y k_h = permeabilidad horizontal. Lo anterior significa que los problemas anisotrópicos pueden ser tratados como isotrópicos si se llevan a cabo las modificaciones anteriores y si se considera que el suelo posee una permeabilidad horizontal predominante (Hvorslev, 1951).

Entubado y Sello.- Al-Dhahir y Morgenstern (1969) estudiaron en detalle la influencia del entubado en el factor de forma, determinando que para propósitos prácticos su efecto es insignificante. Además, también determinaron que el sello en ambos extremos es de poca importancia.

Presencia de Rocas y Fisuras.- Luthin y Kirkham (1949) investigaron la influencia sobre el factor de forma producido por la presencia de rocas y fisuras en las proximidades de la cavidad piezométrica, mediante el modelo de analogía eléctrica. Concluyeron que si la presencia de grietas y agujeros que afloraban desde la cavidad a la superficie del suelo no era continua ni permanente, entonces sus efectos eran insignificantes. También comprobaron que la presencia de rocas cerca de la cavidad no producía variaciones importantes en el factor de forma.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se concluye que un error muy frecuente que cometen los investigadores que han presentado valores de factor de forma en piezómetros cilíndricos es no especificar el rango de validez de sus valores obtenidos.
2. Se concluye que puede existir bastante error en los factores de forma, si el usuario no cuenta con los valores propuestos por Smiles y Youngs (1965). Al-Dhahir y Morgenstern (1969) y Brand y Premchitt (1980), que se consideran confiables.
3. Se concluye que los valores del factor de forma presentados por Hvorslev (1951) y que son los que gozan de mayor difusión entre los usuarios de piezómetros, solo proporcionan valores confiables en el rango de L/D entre 1 y 2, por lo que deberían tomarse con cuidado al evaluar el factor de forma.
4. Se concluye que para propósitos prácticos el efecto del nivel freático sobre el factor de forma es insignificante, a excepción de piezómetros largos cercanos a éste. La influencia del entubado y sellos, así como la presencia de rocas y fisuras, no debería tomarse en cuenta en el factor de forma. La influencia de la anisotropía del suelo sí es un factor importante.
5. Se recomienda utilizar los valores del factor de forma obtenidos por Smiles y Youngs (1965), Al-Dhahir y Morgenstern (1969) o por Brand y Premchitt (1980), ya que son considerados confiables en base a un respaldo científico.

6. Para fines prácticos, se recomienda ignorar la influencia que ejerce el nivel freático sobre el valor del factor de forma, excepto en sondas piezométricas largas cercanas a éste. También se puede ignorar la presencia del entubado y los sellos del piezómetro y la presencia de rocas y fisuras en la zona del suelo en estudio.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a la compañía Instrumentación Geotécnica S.A. por el apoyo económico brindado en la realización del trabajo de tesis de grado del Ing. Félix Canchán, en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería. Este artículo se basa en parte de dicho trabajo.

REFERENCIAS

- Al-Dhahir Z.A. y Morgenstern N.R. (1969), "Intake Factors for Cylindrical Piezometers Tips", Soil Science, Vol. 107, No 1, pp. 17-21.
- Alva Hurtado J.E. (1982), "Un Aparato para Realizar Ensayos de Permeabilidad y de Fractura Hidráulica en el Campo", IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo, Perú.
- Brand E. W. y Premchitt J. (1980), "Shape Factors of Cylindrical Piezometers", Geotechnique, Vol. 30, No. 4, pp. 369-384.
- Canchán Narrea F.A. (1985), "Utilización de los Piezómetros en Ensayos de Medición de la Presión de Poros", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Dachler R. (1936), "**Grundwasserströmung**". Julius Springer, Wien, 141 p.
- Forcheimer P. (1930), "**Hydraulik**" B.G. Teubner, Leipzig, 3 era Edición, 596 pp.
- Forsythe G.E. y Masow W.R. (1960), "**Finite Difference Methods for Partial Differential Equations**". John Wiley, New York.
- Hvorslev M.J. (1951), "Time Lag and Soil Permeability in Ground Water Observations", Bulletin No. 36, Waterways Experiment Station, U.S. Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- Kallstenius T. y Wallgren A (1956), "Pore Water Pressure Measurement in Field Investigations", Proc. Royal Swedish Geotechnical Institute, Vol. 13.
- Luthin J.N. y Kirkham D. (1949), "A Piezometer Method for Measuring Permeability of Soil In Situ Below a Water Table", Soil Science, Vol, 68, pp. 349-358

- Olson R.E. y Daniel D.E. (1979), "Measurement of the Permeability of Fine Grained Soils", ASTM Symposium on Permeability and Ground water Contaminant Transport, Philadelphia, Pennsylvania.
- Raymond G.P. y Azzouz M.M. (1969), "Permeability Determination for Predicting Rates of Consolidation ", Proc. Conference on In Situ Investigations of Soil and Rocks, British Geotechnical Society, Londo, pp. 195-203.
- Samsioe A.F. (1931), "Einfluss Von Rohrbrunnen auf die Bewegungdes Grundwassers", Zeitschrift fur Angewandte Mathematik and Mechanik, Vol. 11, Abril, pp. 124-135.
- Smiles D.E. y Youngs E.G. (1965), "Hydraulic Conductivity Determinations by Several Field Methods in a Sand Tank", Soil Science, Vol. 99, No. 2, pp. 83-87.
- Spangler M.G. (1951), "**Soil Engineering**". International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania.
- Wilkinson W.B. (1968), "Constant Head In Situ Permeability Test in Clay Strata", Geotechnique, Vol. 18, No. 2, pp. 172-194.
- Youngs E.G. (1968), "Shape Factors For Kirkham's Piezometer Method for Determining the Hydraulic Conductivity of Soil In Situ for Soils Overlyin all Impermeable Florr or Infinitely Permeable Stratum", Soil Science, Vol. 106, pp. 235-337.
- Youngs E.G. (1980),"A Note on Hvorslev's Intake Factors", Discussion, Geotechnique, Vol, 30, No. 3, pp. 328-331.

Tabla 1. Comparación de los valores del factor de forma para suelos infinitos

L/D	SAMSIOE (1931) (EC.5)	LUTHIN Y KIRKHAM (1949)	HVORSLEV (1951) (EC.4)	KALLSTENIUS Y WALLGREN (1956) (EC.7)	SMILES Y YOUNGS (1965)	WILKINSON (1968) (EC.8)	YOUNGS (1968)	AL-DHAHIR Y MORGENSTERN (1969)	RAYMOND Y AZZOZ (1969)	BRAND Y PREMCHITT (1980)	BRAND Y PREMCHITT (1980) (EC.9)	BRAND Y PREMCHITT (1980) (EC.10)
0.00		2.50	6.28	0.00	2.80	6.28	2.80					
0.25		3.60	6.35	3.14	4.35	6.42	4.35	4.50				
0.35		4.00	6.41	3.72	4.70	6.55	4.70	5.00				
0.47		4.40	6.50	4.31	5.20	6.74	5.20	5.45				
0.50		4.50	6.53	4.44	5.30	6.80	5.30	5.50				
0.98		6.00	7.08	6.22	6.85	7.84	6.85	7.15				
1.00		6.18	7.13	6.28	6.90	7.89	6.90	7.20	3.61			
1.33		7.31	7.62	7.25	7.80	8.70	7.80	8.05	4.72			
2.00		8.47	8.70	8.89	9.30	10.37	9.30	9.51	5.83	9.10	9.37	
2.67		10.00	9.82	10.27	10.95	12.01	10.95	11.20	7.22	10.75	10.70	
3.00		10.42	10.37	10.88	11.60	12.80	11.60	11.80	7.77	11.40	11.35	
4.00	12.09	12.29	12.00	12.57	13.45	15.13	13.45	13.52	8.88	13.51	13.27	13.60
6.00	15.17	16.20	15.13	15.39		19.54		16.95	11.39	17.21	16.93	16.90
8.00	18.13	20.00	18.10	17.77		23.71		20.00	13.89	20.30	20.39	20.20
10.00	20.97		20.96	19.87		27.70			16.67	23.50	23.71	23.50
12.00	23.72		23.71	21.77		31.55			19.17	26.77	26.92	26.80
15.00	27.71		27.70	24.33		37.13			22.78	30.74	31.55	31.75

Tabla 2. Comparación de los valores normalizados del factor de forma para suelos infinitos

L/D	SAMSIOE (1931) (EC.5)	LUTHIN Y KIRKHAM (1949)	HVORSLEV (1951) (EC.4)	KALLSTENIUS Y WALLGREN (1956) (EC.7)	SMILES Y YOUNGS (1965)	WILKINSON (1968) (EC.8)	YOUNGS (1968)	AL-DHAHIR Y MORGENSTERN (1969)	RAYMOND Y AZZOZ (1969)	BRAND Y PREMCHITT (1980)	BRAND Y PREMCHITT (1980) (EC.9)	BRAND Y PREMCHITT (1980) (EC.10)
0.00		0.89	2.24	0.00	1.00	2.24	1.00	1.03				
0.25		0.83	1.46	0.72	1.00	1.48	1.00	1.06				
0.35		0.85	1.36	0.79	1.00	1.39	1.00	1.05				
0.47		0.85	1.25	0.83	1.00	1.30	1.00	1.04				
0.50		0.50	1.23	0.84	1.00	1.28	1.00	1.04				
0.98		0.88	1.03	0.91	1.00	1.14	1.00	1.04				
1.00		0.90	1.03	0.91	1.00	1.14	1.00	1.04	0.52			
1.33		0.94	0.98	0.93	1.00	1.12	1.00	1.03	0.61			
2.00		0.93	0.96	0.98	1.02	1.14	1.00	1.05	0.64	1.00	1.03	
2.67		0.93	0.91	0.96	1.02	1.12	1.02	1.04	0.67	1.00	1.00	
3.00		0.91	0.91	0.95	1.02	1.12	1.02	1.04	0.68	1.00	1.00	
4.00	0.89	0.91	0.89	0.93	0.96	1.12	0.96	1.00	0.66	1.00	0.98	1.01
6.00	0.88	0.94	0.88	0.89		1.14		0.98	0.66	1.00	0.98	0.98
8.00	0.89	0.99	0.89	0.88		1.17		0.99	0.68	1.00	1.00	1.00
10.00	0.89		0.89	0.85		1.18			0.71	1.00	1.01	1.00
12.00	0.89		0.89	0.81		1.18			0.72	1.00	1.01	1.00
15.00	0.90		0.90	0.79		1.21			0.74	1.00	1.03	1.03

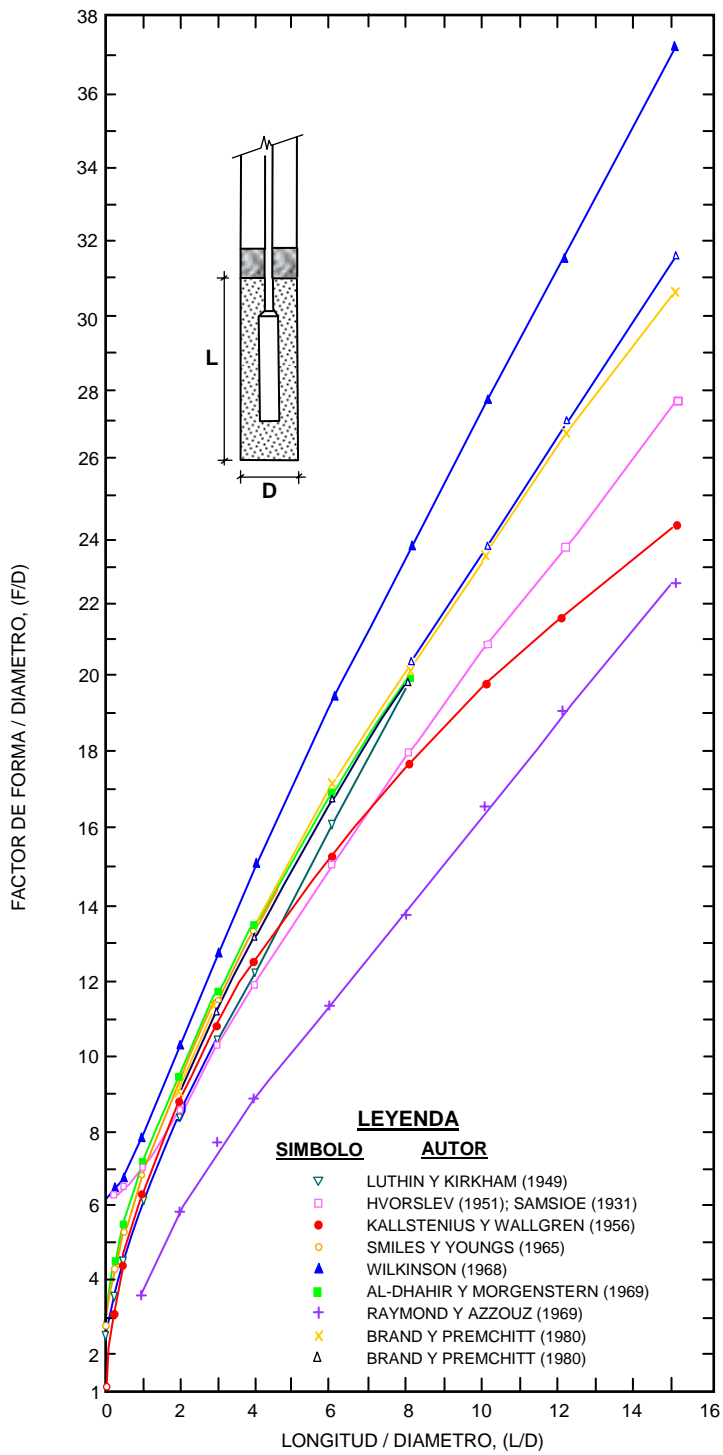


Fig. 1. Valores del factor de forma para piezómetros cilíndricos en suelos infinitos