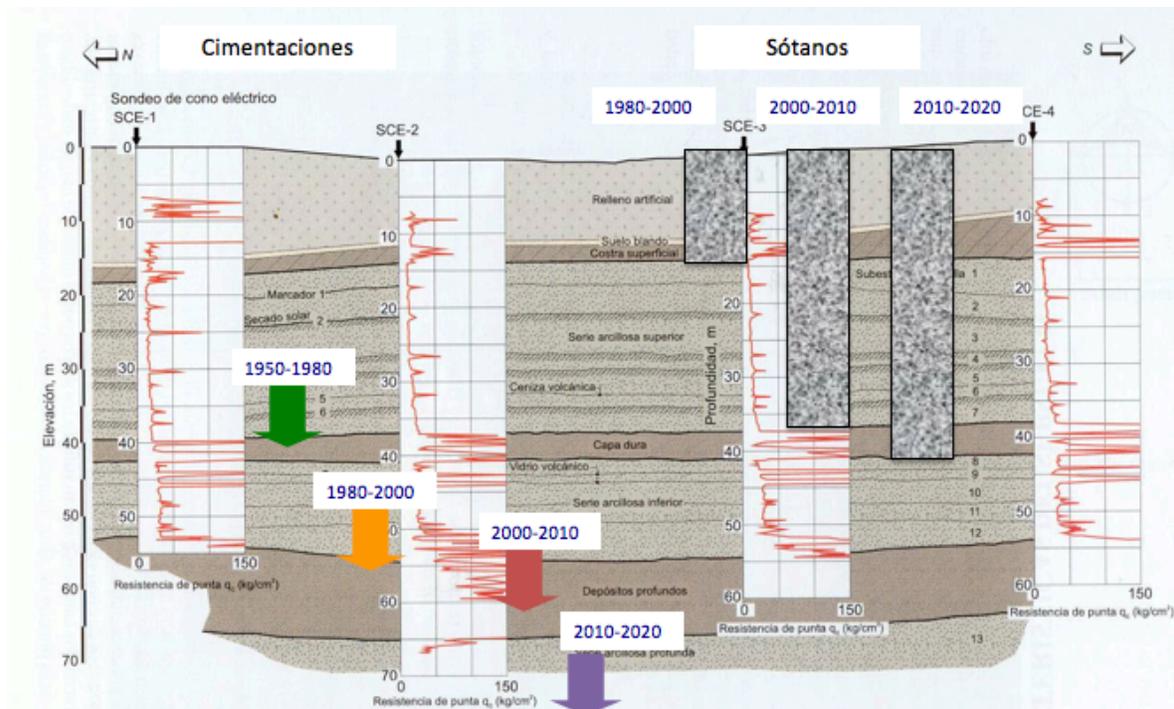


Fracturamiento hidráulico en suelos cohesivos, durante la construcción de cimientos profundos

Walter I. Paniagua
Pilotec, SA de CV

1. Introducción. Debido a la creciente demanda de edificaciones altas en zonas urbanas, se ha extendido la necesidad de construir cimientos cada vez más profundos. Para el caso particular de la Ciudad de México, en la Figura 1, se muestra el incremento de profundidad de desplante de cimentaciones profundas -pilas o pilotes-, así como la profundidad de construcción de sótanos desde mediados del siglo XX, a la fecha.



Perfil del suelo: Santoyo et al, 2005

Figura 1, Evolución de profundidad de cimentaciones y sótanos con el tiempo, en la ciudad de México.
Corte estratigráfico en la Zona del Lago de la CDMX (Paniagua, 2018).

Esta circunstancia ha obligado a desarrollar procedimientos constructivos que permitan atender estas necesidades, incluyendo los equipos con capacidad adecuada, así como los procedimientos constructivos pertinentes.

En el caso de pilas -cimientos profundos colados en el lugar-, el procedimiento más común es el de la perforación con barretón, estabilizando la perforación con lodos, bentonítico o con polímeros. Tomando en cuenta la baja resistencia al corte de los suelos mostrada en la Figura

1, se ha observado que durante la perforación de estos elementos, se presenta el fenómeno de fracturamiento hidráulico de las arcillas blandas, lo que genera pérdida del fluido de perforación, con la consecuente inestabilidad del barreno. Este fenómeno ha sido estudiado anteriormente para otras condiciones (Massarsch, 1978). En este trabajo se muestran expresiones analíticas simplificadas para evaluar el problema, además de un ejemplo de aplicación de las mismas en un caso real, y algunos comentarios para enfrentar el problema.

Se conoce que el fenómeno de fracturamiento hidráulico se presenta también en otros procesos de perforación: perforación rotatoria de pozos de agua o de pozos petroleros. Inclusive, es una técnica utilizada actualmente para la explotación de hidrocarburos. Estas aplicaciones se encuentran fuera del alcance de este trabajo.

2. Fracturamiento hidráulico de arcillas. Los modelos de fracturamiento hidráulico se desarrollaron inicialmente para la industria petrolera. La producción de un pozo de gas o petróleo puede mejorarse fracturando la roca circundante. El fracturamiento se hace por inyección de agua. Las fracturas que se crean se llenan con arena, manteniéndolas abiertas. Se puede manejar un área mayor con un solo barreno, incrementando la producción del pozo. Los problemas en presas de tierra y enrocamiento también condujeron a más investigación en la formación de fracturas en la cimentación de presas. En este escrito, se presenta un modelo general de fracturamiento y reglas para el cálculo en suelos cohesivos (Grotenhuis, 2004).

Existen diferentes mecanismos (por tensión o por falla al corte) y suposiciones en los modelos de inyecciones fluidas en suelos cohesivos, Figura 2. En todos los modelos se hacen las siguientes suposiciones:

- Esfuerzos isotrópicos
- Condiciones del suelo homogéneas

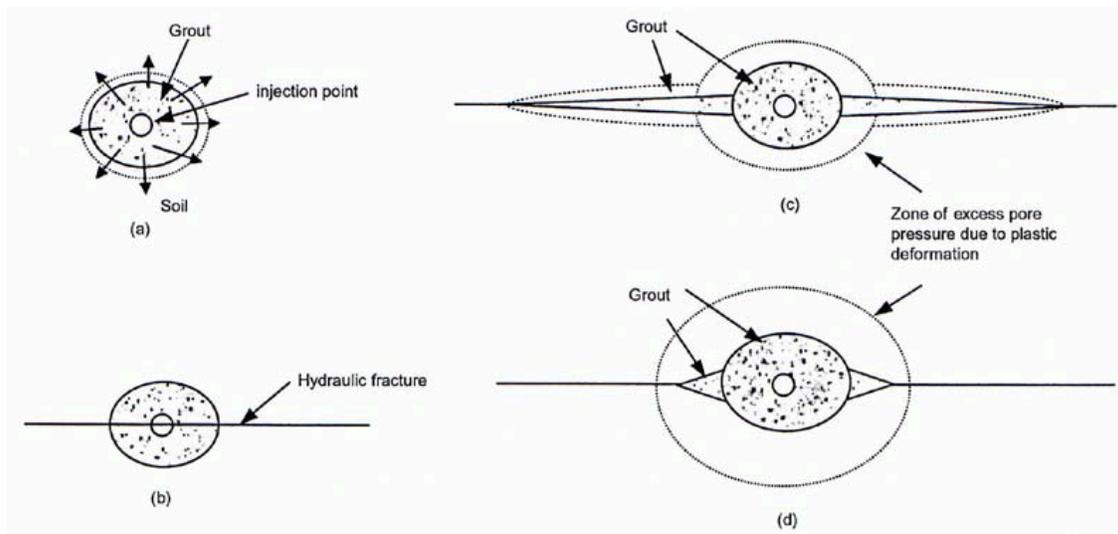


Figura 2, Modelo conceptual de la inyección en arcilla: (a) estado inicial de la inyección; (b) inicio del fracturamiento hidráulico; (c) penetración del producto de la inyección en la fractura (baja viscosidad); (d) penetración del producto de inyección en la fractura (alta viscosidad), Grotenhuis (2004).

La mayoría de los modelos tienen una expresión similar. Con algunas simplificaciones y utilizando parámetros representativos del suelo, la ecuación general es:

$$p_f = A\sigma_{min} + Bc_u \quad (\text{ec. 1})$$

donde:

- p_f presión de fracturamiento hidráulico
- σ_{min} esfuerzo principal menor
- c_u resistencia al corte no drenada
- A y B parámetros

Los valores de A y B dependen de cambios en la tasa de presión y en la relación de preconsolidación (OCR).

La ec. (1) se aleja de la discusión teórica del mecanismo de fractura: tensión vs. falla por cortante. Puede ser fácilmente utilizada y es congruente con los resultados experimentales. Una ventaja es su simplicidad; no hay que determinar parámetros complicados del suelo. En la Tabla 1 se muestran diversos valores de los parámetros A y B, encontrados por diversos autores.

Tabla 1, Valores de los parámetros A y B

Autor(es)	Valor de A	Valor de B	Rango de OCR
Bjerrum et al. (fracturamiento directo)	≈ 1.1	?	-
Bjerrum et al. (fracturamiento después de la expansión)	≈ 1.4	?	-
Andersen et al.	1	≈ 1.2 – 1.6	1 – 1.35
Panah and Yanagisawa	1	1	0.2 – 1-0
Mori and Tamura	1	1 – 2	0.5 – 1.5
Overy and Dean	1	1 - 2	≈ 1
Yuan and Koisumi	1	1 - 2	-

Se puede considerar el modelo como “la presión de fracturamiento es igual a (varias veces) el esfuerzo principal menor, más una cierta (aparente) resistencia a la tensión”, donde el término Bc_u equivale a la resistencia a la tensión. El valor de B se incrementa al incrementarse la tasa de presión y tiene un valor entre 1 y 2. Esto coincide con experimentos relativos a la resistencia a la tensión de la arcilla, donde la resistencia a la tensión varió entre 0.4 y 3 veces la resistencia no drenada, dependiendo de la velocidad de deformación (Kesteren and Greeuw, 1989). Para el caso de las arcillas blandas de la zona del Lago de la Ciudad de México, Marsal y Mazari (1959) encontraron que la relación entre la resistencia entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la tensión, presenta valores promedio de 0.5,

con valores máximos y mínimos de 0.64 y 0.38, respectivamente. La variación en esta resistencia se puede explicar por la transición de falla frágil ($B = 0.4 - 1.5$) a falla plástica ($B \geq 1.5$). Los valores de A se ajustan razonablemente bien. Esta consideración muestra que la presión de fracturamiento se puede ver como “el esfuerzo principal menor más una resistencia a la tensión”, que se indica que la falla a la tensión es el mecanismo representativo en arcillas.

Criterio de Cambefort. Cuando el cambio de esfuerzos en una distribución radial pasa de compresión a tensión, se inicia la fractura y la presión de fracturamiento estará dada por la siguiente expresión, debida a Cambefort (1964), citado por Ovando y Santoyo (2002).

$$pf = \left(\frac{\nu}{\nu - 1} \right) \gamma z + c_u \quad (\text{ec. 2})$$

donde

- ν relación de Poisson
- γ peso volumétrico del suelo
- z profundidad
- c_u cohesión del medio o su resistencia no drenada

Es importante señalar que en esta expresión no influyen el radio de la perforación, la permeabilidad del medio ni la naturaleza del fluido. Además implica que el fracturamiento de un suelo cohesivo se presenta aún con presiones relativamente bajas. Experimentalmente, se ha observado que la presión necesaria para provocar el fracturamiento tiende a ser algo mayor que el valor teórico anterior.

La ecuación de Cambefort puede plantearse de diferentes formas; Ovando y Santoyo (2002) la expresan, después de algunas simplificaciones como:

$$pf = \left(\frac{q_c}{5} \right) + u \quad (\text{ec. 3})$$

donde

- u presión de poro a la profundidad de interés
- q_c resistencia de punta del cono eléctrico

3. Ejemplo de aplicación. Se presenta el caso de un depósito arcilloso de consistencia muy blanda, como se muestra en la Figura 3. Las propiedades mecánicas asignadas a los diferentes estratos se muestran en el modelo geotécnico de la Tabla 2.

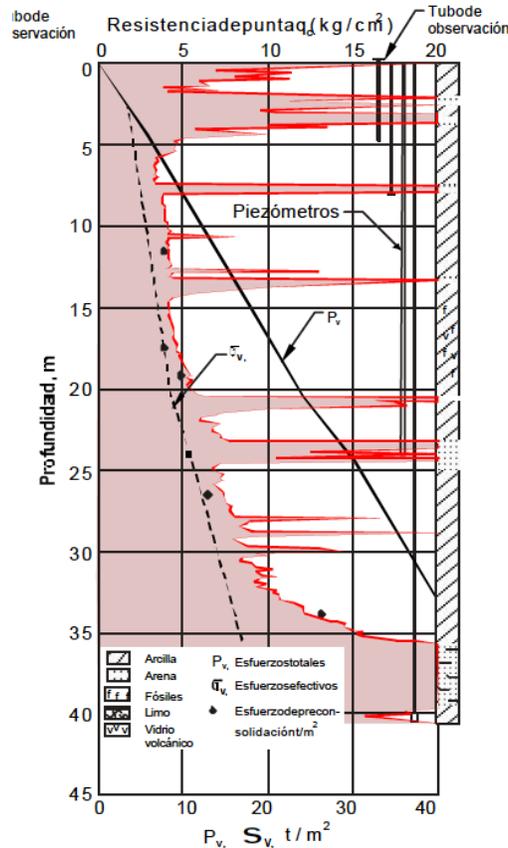


Fig. 3 Sondeo en la zona del Lago Centro I, Santoyo et al (2007).

Tabla 2 Modelo geotécnico para el ejemplo de fracturamiento hidráulico

Estrato	Profundidad m		Peso Volumétrico t/m ³	Resistencia no drenada t/m ²	Ángulo de fricción °	Relación de Poisson -	k _o -
	de	a					
I	0.0	1.8	1.6	6	0	0.35	0.5
II	1.8	4.2	1.5	6	0	0.35	0.5
III	4.2	29.8	1.2	5	0	0.45	0.6
IV	29.8	32.5	1.5	15	0	0.3	0.3

Para el análisis a la susceptibilidad al fracturamiento hidráulico, se aplicaron las ecuaciones (1) y (2). Los resultados se muestran en forma gráfica en la Figura 4; se aprecia que la presión hidrostática del lodo de perforación es muy similar a la presión para fracturar el suelo alrededor de 12 m de profundidad, independientemente del criterio de cálculo utilizado, e inclusive superior a partir de 15 m de profundidad. Este cálculo concuerda con lo observado por Rangel e Ibarra (2018) en condiciones similares. Se considera que las diferencias mostradas a profundidades menores de 10m, en los resultados calculados con las ecuaciones (1) y (2) son irrelevantes, tomando en cuenta que convergen a la misma profundidad, aproximadamente, además de que destacan la existencia del fracturamiento hidráulico en las condiciones existentes.

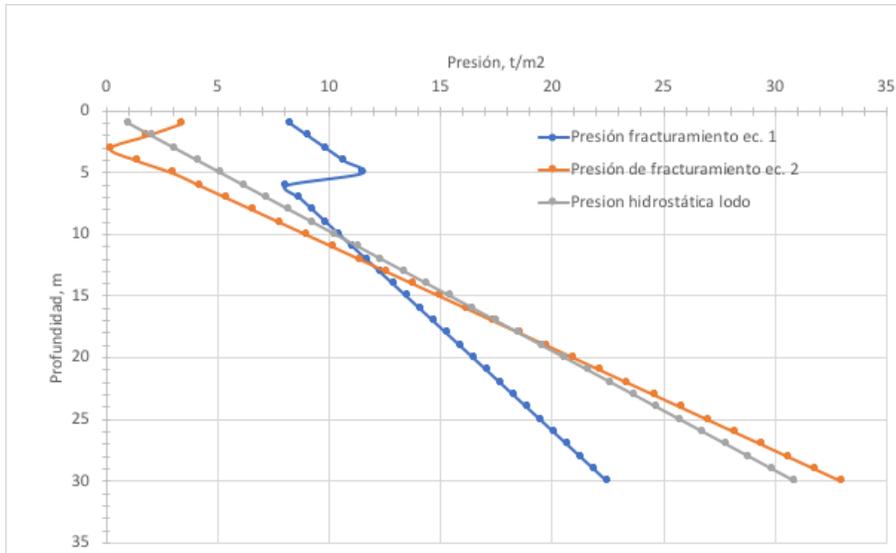


Figura 4, Presiones calculadas para el ejemplo de fracturamiento hidráulico.

Para perforar con ayuda de lodos en las condiciones geotécnicas señaladas, evitando el fracturamiento hidráulico del suelo, se han reportado una o varias de las siguientes soluciones:

- Combinar la perforación con ademes metálicos recuperables o permanentes, analizando cuidadosamente la longitud de los ademes para controlar el problema (Paniagua, 2017).
- Utilizar aditivos en el lodo bentonítico o lodo de polímeros, para obturar las fracturas que se presentan, como el cloruro de potasio (KCl) o un copolímero de poliácralamida. Esta solución se ha aplicado recientemente (2018) con éxito por el autor.
- Realizar inyecciones previas en el suelo, con lechadas de cemento-agua, o con productos químicos que mejoren las propiedades mecánicas del suelo en el sitio, León (2018).

Comentario final. El problema del fracturamiento hidráulico durante la construcción de pilas de cimentación en suelos blandos, es un reto para el procedimiento constructivo de estos elementos. Es conveniente evaluar la posibilidad de que se presente este problema-con las herramientas analíticas mostradas, antes del inicio de los trabajos, para evitar sorpresas durante el desarrollo de los mismos, y de esta manera plantear una solución viable. Inclusive, es deseable la ejecución de perforaciones de prueba, en las que se implemente la solución prevista, para realizar los ajustes necesarios al procedimiento de detalle.

Referencias

Cambefort, H. "Injection des sols, principes et méthodes", Paris, Editions Eyrolles.

Grotenhuis, R.T. (2004), "Fracture grouting in theory. Modelling of fracture grouting in sand", M.Sc. Thesis, Civil Engineering, Delft University of Technology, Neederlands.

Kesteren, W.G.M. van, Greeuw, G. "The undrained tensile behaviour of clay, Direct tensile strength measurements on Clay", GeoDelft; Proc. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989.

León, E. (2018). Comunicación personal.

Marsal R.J. y Mazari M. (1959) "El subsuelo de la ciudad de México", capítulo V, pp 80-82, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Massarsch, K. (1978) "New aspects of soil fracturing in clay", Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 104, N° GT8, August 1978.

Ovando E. y Santoyo E. (2002), "Inyecciones por fracturamiento hidráulico", capítulo 19 en *Manual de Construcción Geotécnica*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.

Panah, A.K., Yanagisawa, E. "Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil", Soils and Foundations Vol. 29, No. 4, 14 – 22; December 1989.

Paniagua, W.I. (2017) "Procedimientos constructivos", capítulo 5 de *Ingeniería de Cimentaciones Profundas*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, México.

Paniagua, W.I. (2018) "Optimización en la perforación de pilas de cimentación", Trabajo de ingreso a la Academia de Ingeniería, México.

Rangel, J.L. e Ibarra E. (2018). Comunicación personal.

Santoyo E., Ovando E., Mooser F. y León E. (2007), "Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México", TGC, México.