

# Crterios de diseo para determinar factores de seguridad en lumbreras construidas con el procedimiento constructivo de “lumbreras flotadas” en suelos blandos

María Elena ACEVEDO VALLE<sup>a,1</sup> y Mario Arturo AGUILAR TÉLLEZ<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Túneles, Instrumentación y Diseño Especializado S.A. de C.V.*

**Resumen.** El objetivo principal de este artículo es realizar una comparación de los resultados obtenidos considerando dos criterios de diseño para definir los factores de seguridad (estabilidad del fondo por cortante y estabilidad por subpresión) en una lumbrera construida con el procedimiento constructivo de “lumbrera flotada” en suelos blandos.

**Palabras Clave.** Lumbrera flotada, falla de fondo, falla por subpresión.

## 1. Introducción

Para la construcción de túneles mecanizados en zonas urbanas, por lo general, requieren la construcción de obras subterráneas alternas como son las lumbreras o pozos de acceso; cuyo principal objetivo puede ser el montaje y arranque de la TBM, suministro de materiales o en su caso operación o servicio del túnel. Por lo general, para verificar la seguridad de una lumbrera ante un estado límite de falla, la estructura debe revisarse para distintas combinaciones de acciones y los diferentes mecanismos de falla posible, confirmando que los factores de seguridad obtenidos cumplan con los mínimos admisibles. La comparativa de los resultados que se presenta en este documento, considera los dos principales criterios utilizados ampliamente empleados en el diseño de obra subterránea en el Valle de México, de las revisiones analíticas de lumbreras flotadas construidas en suelos blandos: estabilidad del fondo por cortante y subpresión; comparando los criterios de COVITUR [1], y así también los criterios del Manual de Obras Civiles de CFE (MDOC) [2]. En el desarrollo del artículo se describen las consideraciones que tiene cada uno de los criterios y sus principales diferencias, permitiendo dar recomendaciones que den un mayor grado de certidumbre al diseñador en la estabilidad de la estructura durante la construcción. El alcance de este documento se limita a la revisión de dos de los principales mecanismos de falla: fondo y subpresión; sin embargo, es importante indicar que existen más mecanismos que deben ser revisados y analizados para la toma de decisión, como el comportamiento a largo plazo de lumbrera o los criterios de servicio de la estructura.

---

<sup>1</sup> María Elena Acevedo Valle, Calle 7 # 94 Col. San Pedro de los Pinos CP 03800, Ciudad de México, México; E-mail: ma.elena.acevedo@gmail.com, Tel: +52 5534027654

## 2. Descripción de la geometría y modelo geotécnico del caso de estudio

El caso de estudio, se analizó una lumbrera de 7.50 m de diámetro terminado, la longitud total de la lumbrera se desarrolla en el depósito de la formación arcillosa superior la cual presenta una baja resistencia al corte, alta compresibilidad y contenidos de agua promedio de 240%. En la Figura 1 se presentan las características geométricas de la lumbrera flotada analizada y la localización de la estructura en el perfil geotécnico utilizado en el análisis, se puede observar que la estructura se desarrolla a lo largo de la formación arcillosa superior y el estrato permeable más próximo al fondo de la excavación es la capa dura. En el diseño y procedimiento constructivo de la lumbrera se consideró la construcción previa de una pantalla perimetral de lodo fraguante con un espesor de 0.60 m y una longitud de desplante de 19.02 m. Así también, se consideró un tanque metálico con un diámetro exterior de 8.70 m y un peralte de 3.00 m.

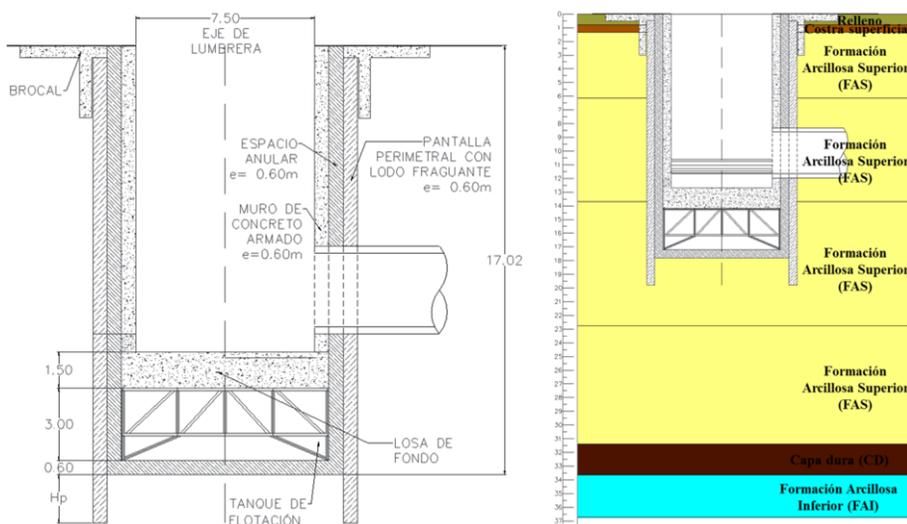


Figura 1. Esquema geométrico de la lumbrera flotada (cotas en m).

El análisis de los mecanismos de falla por cortante y subpresión presentados, corresponden a la etapa constructiva de la excavación del núcleo, sustituido simultáneamente por lodo bentonítico para estabilizar las paredes de la excavación en proceso y que posteriormente permitirá el proceso de inmersión - flotación del tanque metálico con la estructura cilíndrica de la lumbrera que simultáneamente se va construyendo. Un aspecto importante del procedimiento de lumbrera flotada, es la altura de lodo estabilizador durante la excavación del núcleo y construcción de la lumbrera, ya que la presión generada por este fluido ayuda a controlar los mecanismos de falla potenciales que pueden afectar excavaciones profundas en suelos muy blandos, incluyendo falla de en las paredes o el fondo de la excavación.

### 2.1. Modelo geotécnico

Para las revisiones analíticas de estabilidad de la estructura se utilizaron los parámetros mecánicos no drenados presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Modelo geotécnico.

ESTRATO	Profundidad, z		$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Parámetros no drenados		
	de	a		Cu kPa	$\phi$ °	E MPa
Relleno	0.00	0.78	15.00	10.00	50	5.00
Costra superficial	0.78	1.32	15.00	10.00	0	10.00
FAS 1	1.32	6.15	12.60	10.00	0	1.33
FAS 2	6.15	13.68	11.75	12.50	0	1.61
FAS 3	13.68	22.75	11.93	19.50	0	2.39
FAS 4	22.75	31.38	12.40	27.4	0	3.27
Capa dura	31.38	33.64	16.00	29.00	36	23.00
FAI	33.64	36.74	12.33	27.00	0	4.30

Donde  $\gamma$ = Peso volumétrico del suelo, Cu= Resistencia no drenada del suelo,  $\phi$ = Angulo de fricción interna, E= Módulo de elasticidad

### 3. Evaluación de la estabilidad de la excavación empleando el manual COVITUR [1].

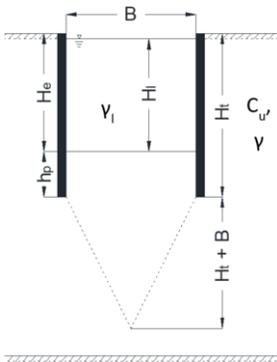
El manual de COVITUR [1] define los criterios de análisis de la estabilidad de la excavación en la zona de lago y transición para los mecanismos de falla general por el fondo y falla del fondo por subpresión.

#### 3.1. Falla general por el fondo

Este criterio de análisis considera la capacidad de carga del suelo al fondo de la excavación y la influencia de la profundidad de la pata en la estabilidad del fondo (Figura 2). La expresión para el cálculo del factor de seguridad considerando el peso del lodo estabilizador al interior de la lumbrera es la siguiente:

$$FS = \frac{c_u \left( N_c + 2 \frac{H_p}{B} \right)}{\gamma_s H_t + q_s - \gamma_l H_l} \tag{1}$$

$$N_c = 5.14 \left( 1 + 0.2 \frac{H_t}{B} \right) \left( 1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) \tag{2}$$



Donde:  $c_u$ = valor medio de la resistencia al cortante no drenada, hasta una profundidad igual a  $H_t + B$ ;  $N_c$ =factor de estabilidad;  $H_p$ =longitud de la pata de la pantalla perimetral;  $\gamma$ =peso volumétrico del suelo,  $H_e$ =altura de excavación;  $q_s$ =sobrecarga por maquinaria;  $H_l$ = profundidad de análisis;  $L=B$ =ancho de la excavación;  $\gamma_l h_l$ =fuerza del lodo estabilizador.

Figure 2. Esquema de falla de fondo, COVITUR,[1].

En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos de la falla general por el fondo utilizando el criterio propuesto por COVITUR [1]. Se observa que en el caso de lumbreras flotadas la altura del lodo estabilizador da mayor estabilidad al sistema evitando grandes profundidades de empotramiento del sistema de retención. La altura del lodo estabilizador, en este caso debe ser mayor a 11.00 m para  $H_p = 2.00$  m, cumple una función importante por lo cual se deben cuidar los niveles del mismo durante toda la construcción, procurando una altura suficiente para obtener un factor admisible ( $FS_{admisible}=1.3$ , el factor de seguridad que se indica en el manual de COVITUR [1] es diferente con respecto a la recomendación de 1.5 que se menciona en el Manual de Obras Civiles de CFE [2]).

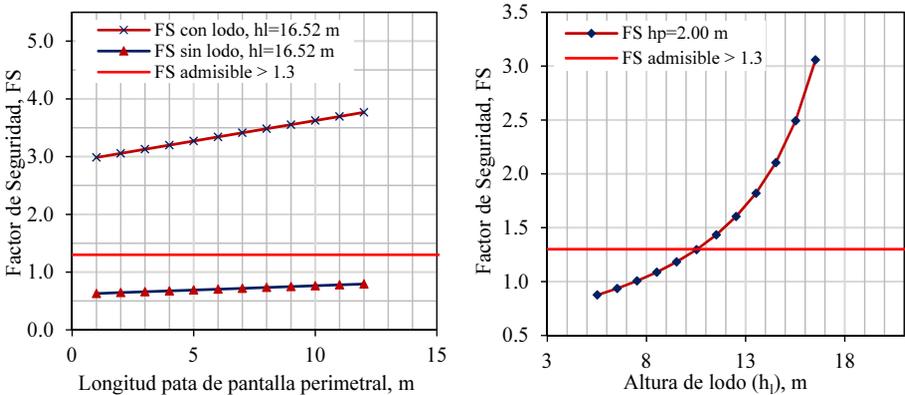
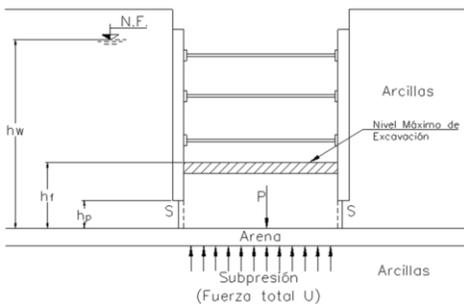


Figure 3. Relación entre la profundidad del empotre del sistema de retención, la altura de lodo estabilizador y el factor de seguridad por falla de fondo, COVITUR [1].

### 3.2. Falla del fondo por subpresión

La falla por subpresión es causada por la presión hidrostática que podría producir el levantamiento del fondo de la excavación, ocasionando la pérdida de equilibrio en el sistema representado por la pérdida del empuje pasivo al que está sometido el empotramiento de la pantalla perimetral. En este análisis se considera la posición del nivel freático, la profundidad del estrato permeable, así como el peso del bloque de suelo bajo el fondo de la excavación hasta el estrato permeable, la altura del lodo al interior de la excavación y la fuerza resistente generada por la fricción que genera el bloque de suelo entre el fondo de la excavación y el estrato (Figura 4).



Donde:  $h_l$  = espesor del bloque de suelo entre el fondo de excavación y el estrato drenante;  $c_u$  = valor medio de la resistencia al cortante no drenada del bloque de suelo;  $\gamma_s$  = peso volumétrico del suelo;  $A_e$  = área del fondo de excavación;  $\gamma h_l A_e$  = peso del lodo.

Figure 4. Esquema de falla por subpresión, COVITUR [1].

Teniendo en cuenta lo anterior la falla por subpresión se determina con la siguiente expresión:

$$FS = \frac{\gamma_s h_1 A_e + 2(P_e h_1 c_u) + \gamma_l h_l A_e}{\gamma_w h_w A_e} \tag{3}$$

En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos para este mecanismo de falla. Se observan factores de seguridad mayores al admisible ( $FS_{\text{admisible}}=1.5$ ) para cualquier altura de lodo estabilizador, inclusive en ausencia del mismo en la excavación es estable.

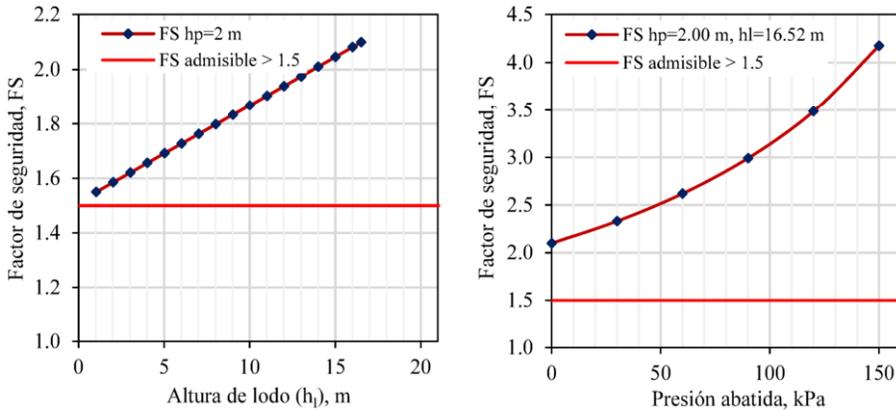


Figure 5. Relación entre la altura de lodo estabilizador, la presión abatida y el factor de seguridad de falla por subpresión, COVITUR [1].

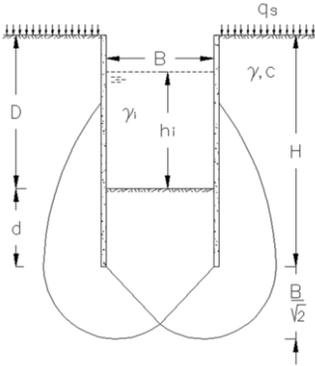
#### 4. Evaluación de la estabilidad con el método de CFE [2].

##### 4.1. Falla general por el fondo

El mecanismo de falla propuesto en el Manual de Obras Civiles de CFE [2] (Figura 6), tienen en cuenta las fuerzas actuantes como el peso de cilindro de suelo hasta el nivel máximo de excavación y la sobrecarga en superficie. La resistencia del suelo está definida por la capacidad de carga en el fondo de la excavación, la fricción que existe entre las patas de las pantallas perimetrales y el suelo, además de la presión que ejerce el lodo bentonítico en el interior de la excavación. Una diferencia importante con respecto al manual de COVITUR [1] es la superficie de falla que se considera, en este caso la superficie de falla es parabólica, mientras que en el manual de COVITUR [1] es rectangular hasta la superficie, además de que en el MDOC de CFE [2] se toma en cuenta la fuerza de fricción que se genera a lo largo de todo el fuste de la lumbrera, mientras que COVITUR [1] toma en cuenta únicamente la fricción generada en el empotramiento del sistema de retención; en ambos casos se considera la capacidad de carga del cilindro por debajo del nivel máximo de excavación.

La expresión propuesta es la siguiente:

$$FS = \frac{c_u(N_c i_c S_c + \alpha f)}{\gamma D + q_s - \gamma_l H_l} \tag{4}$$



Donde:  $c_u$  = resistencia al corte no-drenada;  $N_c$ = factor de capacidad de carga=5.14;  $i_c$  =factor de profundidad=  $1+0.2 H/B$ ;  $\alpha$  = factor de adherencia lumbrera-suelo 0.4 (RAIZ( $\sigma'_v/c_u$ ));  $\sigma'_v$  = presión vertical efectiva debida al peso del suelo a la profundidad media del sistema de retención ( $H/2$ );  $\gamma$  = peso volumétrico del suelo excavado;  $D$  = profundidad de excavación;  $q_s$  = carga superficial uniformemente repartida;  $h_1$  = altura del fluido estabilizador;  $\gamma_f$  = peso volumétrico del fluido estabilizador;  $H$  = Profundidad del sistema de retención;  $B$  = ancho o diámetro de la lumbrera;  $L$  = Longitud de la lumbrera;  $d$  = profundidad de empotre del sistema de retención.

Figure 6. Esquema de falla de fondo, CFE [2].

Tabla 2. Factores de forma y superficie, CFE, [2].

Forma de sección transversal de la lumbrera	Sc	J
Rectangular	$1 + 0.2 \frac{B}{L}$	$2d \left( \frac{1}{L} + \frac{1}{B} \right)$
Cuadrada	1.2	$\frac{4d}{B}$
Circular	1.5	$\frac{4d}{B}$

Los resultados obtenidos utilizando este mecanismo de falla se presentan en la Figura 7. Se observa que la altura de lodo estabilizador necesaria, para alcanzar un factor de seguridad admisible ( $FS_{admisible} > 1.5$ ), es de 10.00 m, sin embargo, se recomienda mantener el nivel de lodo a 0.5 m por debajo del nivel del brocal. Realizando el análisis del factor de seguridad variando la profundidad del empotre del sistema de retención se observa un comportamiento proporcional y se obtienen FS mayores al mínimo admisible, esto debido a la presencia del lodo estabilizador.

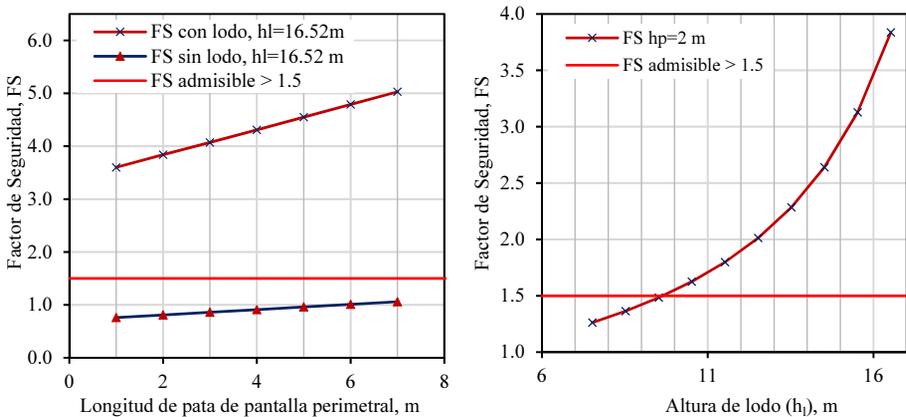


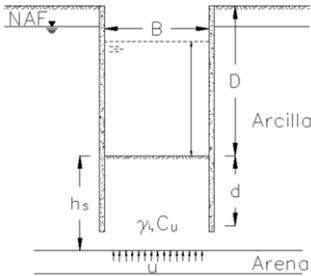
Figure 7. Resultados del factor de seguridad para falla de fondo variando la longitud del empotre del sistema de retención y variando la altura de lodo estabilizador, CFE [2].

En comparación con los resultados obtenidos por los criterios de COVITUR [1], se tienen factores de seguridad más altos para la misma longitud de pata de la lumbrera.

### 4.2. Falla del fondo por subpresión

En este análisis se considera la posición del nivel freático, la profundidad del estrato permeable más próximo al nivel máximo de excavación, así como el peso del bloque de suelo bajo el fondo de la excavación hasta el estrato permeable y la altura del lodo al interior de la excavación.

$$FS = \frac{\gamma h_s + \gamma_l H_l + \alpha c_u J}{u} \tag{5}$$



Donde:  $h_s$  = espesor del bloque de suelo entre el fondo de excavación y el estrato drenante;  $c_u$  = resistencia al corte no-drenada;  $\gamma$  = peso volumétrico del suelo;  $h_l$  = altura del fluido estabilizador;  $\gamma_l$  = peso volumétrico del fluido estabilizador;  $u$  = subpresión en el estrato drenante.

Figure 8. Esquema del mecanismo de falla por subpresión, CFE [2].

Los resultados obtenidos para el mecanismo de falla por subpresión se presentan en la Figura 9. Se observa que la altura de lodo estabilizador presenta un comportamiento proporcional, sin embargo, la altura de lodo estabilizador no es suficiente para alcanzar un factor de seguridad admisible ( $FS > 1.5$ ), debido a que en el análisis de falla por subpresión no se ve afectada por la altura de empotramiento del sistema de retención, se recomienda el uso de un sistema de abatimiento. Realizando el análisis del factor de seguridad variando la presión de abatimiento, se obtienen FS mayores al mínimo admisible a partir de 20 kPa.

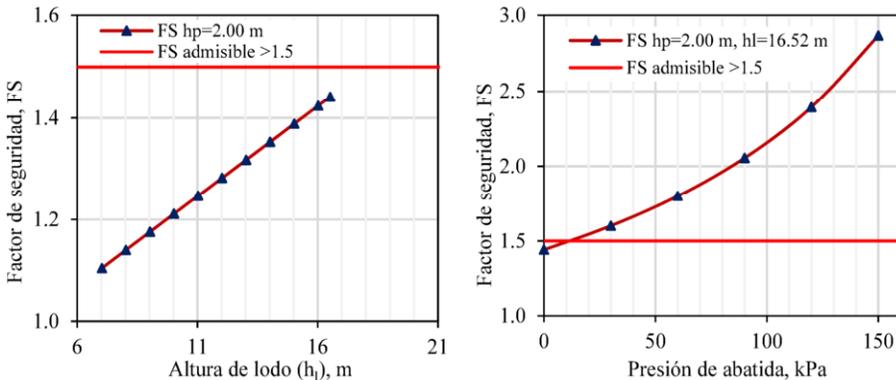


Figure 9. Factor de seguridad de falla por subpresión para diferentes alturas de lodo estabilizador y presiones de abatimiento, CFE [2].

En este ejemplo, para el caso de la falla por subpresión en el caso del criterio de COVITUR [1] no requiere de un sistema de abatimiento para obtener factores de seguridad admisibles, esta diferencia se debe principalmente a que el criterio de CFE [2]

considera factores que reducen en mayor medida el valor de la resistencia no drenada del suelo que se opone a la subpresión en el estrato drenante, impactando de manera directa la fuerza de adherencia del bloque de suelo.

## 5. Conclusiones

Las diferencias entre los criterios utilizados para el análisis se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Comparación de resultados obtenidos por los criterios propuestos por COVITUR [1] y el MDOC [2].

Mecanismo de falla	MDOC [2]	COVITUR [1]	Comentarios
Fondo	3.84 > 1.5	3.057 > 1.3	Debido al uso de lodo estabilizador en el núcleo de excavación, no se ve una influencia importante en la altura del empotramiento del sistema de retención en la estabilidad por falla de fondo, sin embargo, en el caso en que la lumbrera no contara con este sistema de lastre, el criterio de COVITUR [1] demanda de alturas de pata mayores a las demandadas en el criterio del MDOC [2]. Es importante contar con una exploración y caracterización rigurosa de los depósitos de suelo. La determinación de la variación de la resistencia al cortante no drenada en el depósito de suelo evita sobrestimar o subestimar el valor de Cu, por lo tanto, permite realizar una mejor evaluación del comportamiento de la estructura.
Subpresión	1.54 > 1.5 ΔU= 20 kPa (Se requiere bombeo profundo para abatir las condiciones hidráulicas presentes)	2.099 > 1.5 (No requiere bombeo profundo)	El análisis de falla por subpresión, el criterio más conservador es el propuesto por el MDOC [2], en este caso se observó la demanda de un sistema de abatimiento que permitiera obtener factores de seguridad admisibles. Para la evaluación de la seguridad de la estructura ante una falla por subpresión es importante la correcta determinación de las condiciones piezométricas del sitio, que permitan evaluar las condiciones que deben mantenerse durante la construcción de la estructura, para ello es muy importante contar con la suficiente instrumentación que permita conocer cualquier condición que ponga en peligro la seguridad de la estructura.
	<b>COVITUR [1]</b>		<b>CFE (MDOC) [2]</b>
	Criterio aplicado durante los últimos 22 años, en los que se ha observado un buen comportamiento de las estructuras y las experiencias adquiridas han permitido tomar medidas de mitigación y solución de problemas que pudieran presentarse en el diseño y la construcción.		Aun no se tienen experiencias constructivas de diseños que utilizaran dicho criterio, lo cual es importante para emitir una recomendación más amplia sobre las ventajas o desventajas que podría presentar una estructura durante y después de su diseño y construcción.

## Referencias

- [1] Comisión de Vialidad y Transporte Urbano. (s.f.). *Manual de Diseño Geotécnico. Vol. 1*. México. D.F.: Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras. México D.F. 1987.
- [2] Manual de Diseño de Obras Civiles. Cap.B.5.1. Túneles y Lumbrera en suelos. Sección B: Geotecnia. Tema 5. Túneles y Lumbreras. México 2018.
- [3] Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas. "Los túneles perforados en las arcillas blandas de la Ciudad de México". Mesa redonda (1986).
- [4] Vargas, M., Guillen, J., Bernal, R., Luna, O., *Análisis y diseño geotécnico de una lumbrera flotada en la zona lacustre de la Ciudad de México*, XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, SMIG, León Gto. México 2018.