



**CGI**

Centro  
Geotécnico  
Internacional

---

## ARTICULO TECNICO

### “Ingeniería geotécnica forense (Casos historia) parte II”

Ing. Luis Bernardo Rodríguez González

Ingeniero Civil de la Academia de Ingeniería de México

## Ingeniería geotécnica forense [Casos historia] parte II

Autor:

Ing. Luis Bernardo Rodríguez González

Ingeniero Civil de la Academia de Ingeniería de México

[www.ai.org.mx/ai](http://www.ai.org.mx/ai)

“No hay gloria en las cimentaciones”

Karl. Terzaghi.

“El que esté libre de una falla geotécnica,  
que tire la primera piedra”

L. B. Rodríguez

### 1. RESUMEN EJECUTIVO

En este trabajo se describe lo que el autor ha conceptualizado como Ingeniería Geotécnica Forense, la cual presenta similitudes con los llamados “Casos Historia” en otros países.

La Ingeniería Geotécnica Forense trata de los casos en los que durante la construcción geotécnica, se han presentado y producido fallas; sobre todo tratándose de las obras de gran magnitud o extensión, donde intervienen grupos interdisciplinarios de profesionistas y las decisiones se comparten. Lo anterior no implica que las fallas se puedan producir únicamente en las obras grandes, sino también en obras pequeñas que no están exentas de los riesgos que implica la construcción geotécnica.

En este trabajo se presentan varios casos, la mayoría de los cuales están relacionados con las obras del Metro, en las que el autor ha desarrollado la mayor parte de su actividad profesional por más de treinta años.

La Ingeniería Geotécnica Forense en cada caso, se analiza y se discute bajo una metodología cuya secuencia comprende los antecedentes, el planteamiento del problema, la presentación de la falla, el análisis de las causas que la originaron y finalmente un enfoque que remarca las lecciones aprendidas. Este último punto se considera la parte medular de la Ingeniería Geotécnica Forense tratada en este trabajo, ya que permite conocer las causas de las fallas y sacar el mayor provecho de ellas con el fin de tomarlas en cuenta en procesos constructivos geotécnicos actuales o futuros similares y al mismo tiempo tomarlas como referencia en la academia para transmitir estas experiencias a los futuros ingenieros.

Finalmente se plantean algunos comentarios breves de tipo técnico y jurídico de la Ingeniería Geotécnica Forense.

## 2. PALABRAS CLAVE

- ✓ Geotecnia: Rama de la ingeniería que estudia la disposición de los materiales de la corteza terrestre y sus condiciones de equilibrio.
- ✓ Ingeniería Geotécnica Forense: el análisis de una falla que ocurrió durante una excavación, o durante la construcción geotécnica de una obra y el planteamiento del análisis minucioso de las causas que la produjeron.
- ✓ Falla: Evento que se presenta durante el diseño o durante la obra, que no concuerda con lo diseñado o lo planeado y que generalmente conduce a una accidente simple o fatal. En el diccionario: Defecto, falta, deficiencia o error, [Geol.]: quiebra que los movimientos geológicos que se han producido en un terreno.
- ✓ Sifón: Estructura con fines hidráulicos que en ingeniería sirve para eludir un obstáculo que se interpone con alguna obra, en este caso, la interferencia de alguna tubería con el cajón del metro. De acuerdo con el diccionario: Tubo encorvado que sirve para sacar líquidos del vaso que los contiene, haciéndolos pasar por un punto superior a su nivel.
- ✓ Colector: Tubería que en ingeniería hidráulica y en zonas urbanas o sub urbanas sirve para conducir los efluentes de aguas negras o grises; generalmente tuberías circulares de concreto de diámetros mayores que 60 cm.
- ✓ Pilote: Elemento de concreto reforzado generalmente de sección cuadrada, de longitud variable, pero siempre muy largo con relación a su ancho, que se construye por tramos y que se hinca dentro de un terreno para que sirva de apoyo a cajones o zapatas de cimentación y que transfiere los esfuerzos a los estratos inferiores del suelo.

## 3. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describen algunos casos de fallas durante la construcción de obras geotécnicas y excavaciones realizadas en algunas obras de las Líneas del Metro de la Ciudad de México y en otras construcciones que implicaron trabajos subterráneos. Las fallas pudieron estar relacionadas con errores, faltas constructivas, descuidos durante la construcción geotécnica, o bien por algunos descuidos u omisiones durante el proyecto o los análisis de estabilidad temporal de los procedimientos constructivos. Las fallas que se analizan en este documento, provienen de esas faltas, deficiencias o errores que se han producido en las obras geotécnicas, todas ellos de manera involuntaria.

Por otra parte el concepto de Ingeniería Forense es un concepto acuñado hace no más de treinta años dentro de la ingeniería. De acuerdo nuevamente con el diccionario, el término forense se asocia a la medicina forense y la definición que más se adapta es aquella que alude al médico forense que el diccionario la define como: “médico encargado por la justicia para dictaminar los problemas de medicina legal”.

Finalmente se buscó el término autopsia el cual se define en el diccionario como: “examen anatómico de un cadáver, o examen analítico minucioso”.

A la luz de estas definiciones, el concepto de Ingeniería Geotécnica Forense se ha considerado en este trabajo como el análisis “post mortem” de una falla que ocurrió durante una excavación, o durante la construcción geotécnica de una obra y el planteamiento de un análisis minucioso de las causas que la produjeron, siempre con la finalidad de no repetir en el futuro las causas que la originaron y de alejarse lo más posible de los riesgos que implica la presencia de este tipo de eventos. Bajo este concepto están planteadas las fallas analizadas en este trabajo, desde un punto de vista estrictamente de la ingeniería.

En algunos países, incluido el nuestro, estos conceptos donde se presentan fallas en la ingeniería, son llamados también Casos Historia y como su nombre lo indica, corresponden a la relatoría de los casos donde se presentaron incidencias o fallas y se analizan sus causas, el autor considera que es más completo el concepto de Ingeniería Geotécnica Forense.

De inmediato surge la pregunta ¿y cómo considerar las repercusiones jurídicas o penales que conllevan este tipo de problemas? La respuesta es compleja, no es fácil, es un enfoque de responsabilidades que no forma parte de los alcances de este trabajo.

En las obras de gran magnitud o extensión, intervienen grupos interdisciplinarios de profesionistas y las decisiones y responsabilidades se entrelazan y comparten, sin embargo la ocurrencia de fallas no es privativa de las grandes obras, las obras pequeñas no están exentas de los riesgos que implica la construcción geotécnica.

Existe por parte de algunos ingenieros la idea de que la Ingeniería Forense debe ser parte de una especialización dentro de la Ingeniería, en la que se estudien las implicaciones legales que tienen las incidencias y fallas de las obras y en la que los estudios legales formen parte de esta especialización.

Estas consideraciones responden a una similitud con la Medicina Forense, sin embargo el autor de este trabajo considera que no se requiere de tal especialidad, pues en general, en el caso de las fallas, se hace necesario hacer un trabajo minucioso de las causas de las mismas y esto se logra a través de la participación de ingenieros expertos que actúen como peritos, que tengan experiencia en la ingeniería geotécnica, que elaboren su dictamen técnico con profundidad, veracidad y ética profesional, pero lo más importante es lo que me decía un amigo abogado: que no dicten sentencia, ese es trabajo propio de los jueces y abogados, para ello están las instancias legales y la especialidad jurídica que debe aplicarse en los casos que sea necesario.

Planteadas las ideas y los conceptos que corresponden a los objetivos de este trabajo, a continuación se describen algunas de las fallas que han ocurrido en el pasado, la mayoría de ellas relacionadas con las obras del Metro de la Ciudad de México, en las que el autor ha participado.

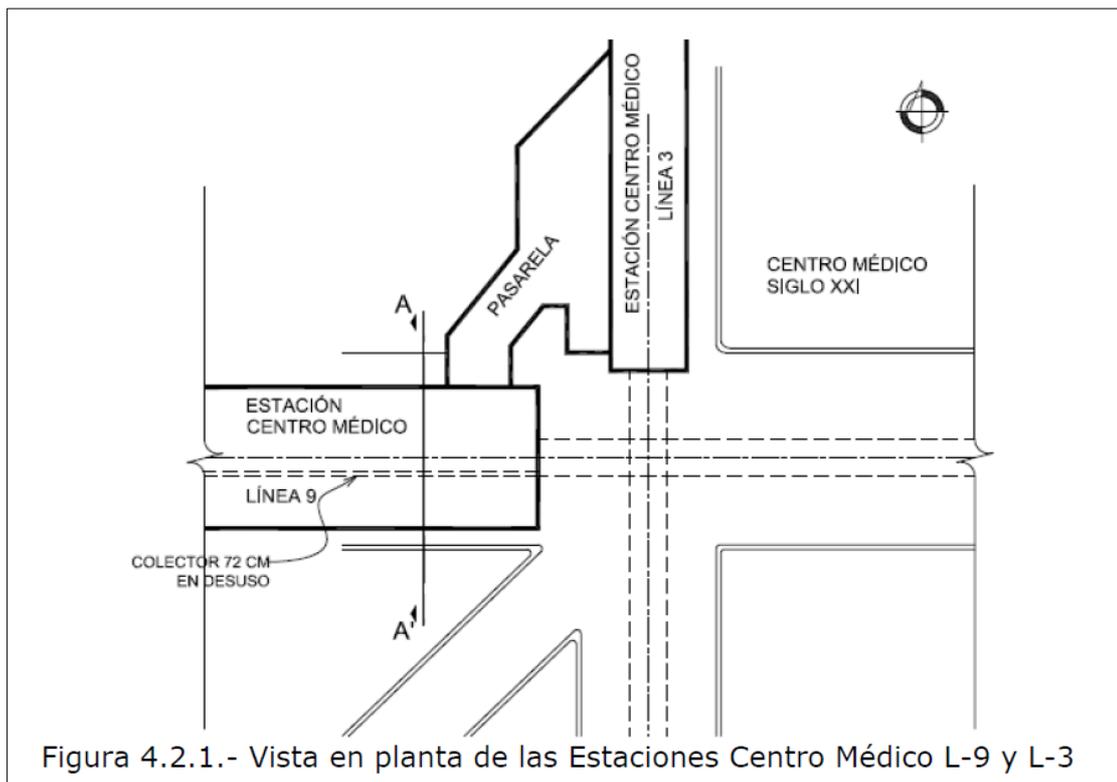
#### 4. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE ALGUNAS FALLAS

A continuación se reseñan algunas fallas relacionadas con la construcción geotécnica, describiendo la obra, el procedimiento constructivo, la falla, el análisis geotécnico de la falla y las Lecciones Aprendidas.

##### 4.2. Falla del talud en la Estación Centro Médico de la Línea 8

###### 4.2.1. Descripción de la obra

La estación Centro Médico de la Línea 8 se construyó sobre la Av. Baja California, al poniente de la Av. Cuauhtémoc. Se aprovechó alojar la estación en la zona de la vialidad para evitar afectaciones a terrenos particulares. La estación tiene aproximadamente 22.0 m de ancho y está unida a la estación de la Línea 3 mediante pasarelas del lado norte que se proyectaron adosadas a la estación [Figura 4.2.1.].



###### 4.2.2. Estratigrafía de la zona

El subsuelo de esta zona corresponde a la Zona III [Lago], indicada en las Normas Técnicas del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. El nivel freático se localiza a 2.50 m. Desde la superficie y hasta los 6.00 m de profundidad existe una capa dura formada por limos y arcillas

arenosas, en algunos casos con presencia de gravillas, y a partir de esta capa se encuentran los depósitos de arcilla muy blanda y con altos contenidos de agua, típica del Valle de México, hasta una profundidad aproximada de 35.0 m que es donde se localiza la primera capa dura en esa zona.

En la tabla 4.2.1 se pueden observar los valores aproximados de la resistencia al corte de la arcilla en cada uno de los estratos.

<b>Estrato (-)</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b><math>\omega</math> (%)</b>	<b><math>\gamma_v</math> (ton/m<sup>3</sup>)</b>	<b>c (ton/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>
A	0.00-2.50	70	1.65	4.60	30
B	2.50-6.00	140	1.40	2.00	25
C	6.00-10.00	250	1.15	3.00	0
D	10.00-14.00	350	1.15	2.60	0
E	14.00-14.50	0	1.35	0.00	30
F	14.50-18.00	380	1.15	2.80	0
G	18.00-26.00	400	1.20	3.00	0
H	26.00-35.00	220	1.18	3.80	0

Tabla 4.2.1.- Estratigrafía de la zona.

#### 4.2.3. Obras inducidas

Antes de proceder a la excavación de la estación, fue necesario reubicar varias tuberías de agua potable y atarjeas hacia las banquetas, así como un colector de 76 cm que se localizaba aproximadamente al centro de la calle. Este colector se reubicó a un costado de la Estación y tenía varios pozos de visita en su trayectoria. Cuando se reubicó ni los pozos de visita ni el colector que quedaba fuera de servicio se sellaron.

#### 4.2.4. Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo de la estación consistió en la construcción de muros Milán en la periferia de la estación, para contener el suelo vecino, con una pata de 4.0 m por debajo de la máxima profundidad de excavación.

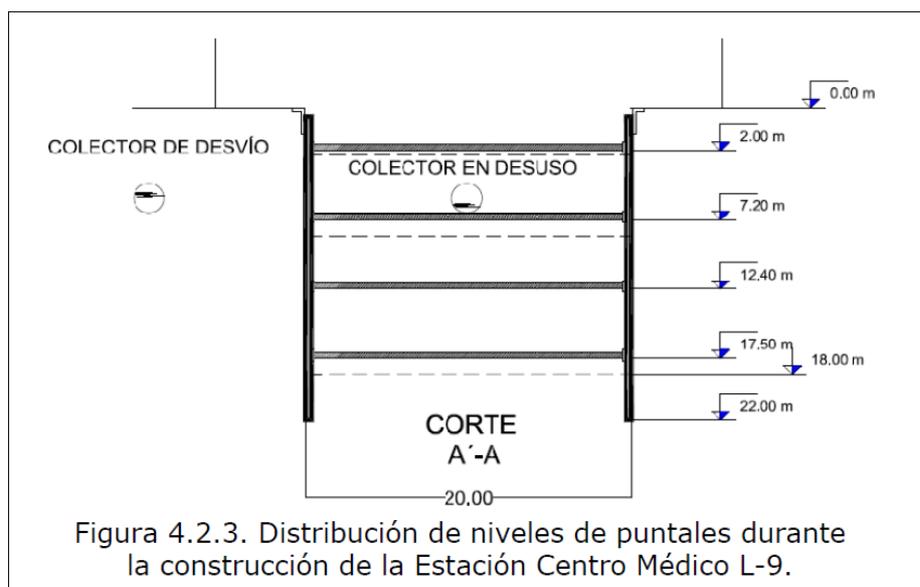
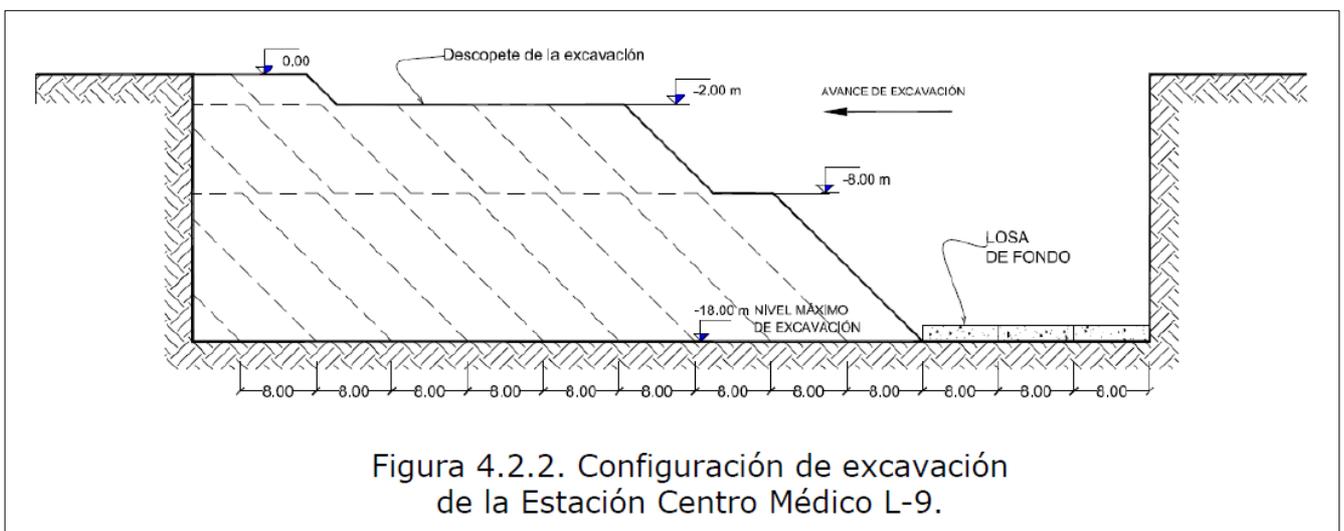
Se instaló un sistema de bombeo con pozos y bombas eyectoras para disminuir la presión de poro en la arcilla durante la excavación. Los pozos estaban localizados al tres-bolillo a una profundidad de 3.00 m por debajo de la máxima profundidad de excavación y separados entre sí aproximadamente 10.0 m

Una vez establecido el bombeo, se procedió a ejecutar una excavación preliminar en toda el área de la estación [“descopete”] de 2.0 m de profundidad.

La excavación de la estación se realizó por etapas de 8.00 m de longitud, llevando un talud frontal con una inclinación de 1:1 y una berma de 4.0 m a 8.0 m de profundidad [Ver figura 4.2.2]

Durante el proceso de excavación se colocaron 4 niveles de puntales a las profundidades que se indican en la figura 4.2.3. Los puntales se colocaron tan pronto la excavación descubrió sus puntos de aplicación y se les aplicó una precarga. Al llegar al nivel máximo de excavación, se coló un aplantilla de concreto pobre y una vez alcanzado el fraguado, se procedió al armado y colado de la losa de fondo por cada una de las etapas.

Los primeros meses de la excavación de la estación se realizaron durante el período de lluvias.



#### 4.2.5. Análisis de estabilidad del talud.

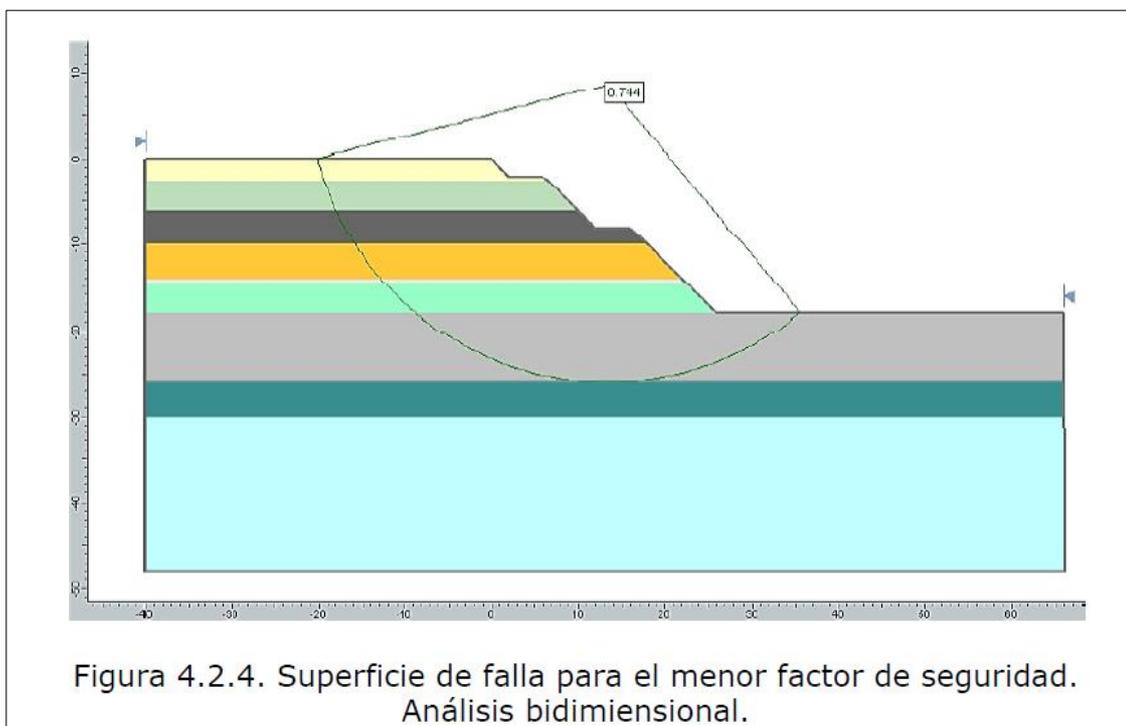
Las preocupaciones de esta excavación fueron las siguientes:

- ✓ Que las expansiones inmediatas no fueran excesivas
- ✓ Que no se fuera a producir una falla de fondo a nivel local, dado el ancho de 22.0 m de la excavación
- ✓ Que no se fuera a producir una falla general del talud
- ✓ Que las estructuras vecinas no se fueran a deformar en exceso, pues había dos edificios de 3 niveles en la colindancia norte de la estación que se estuvieron monitoreando.

La estabilidad del talud era el punto más preocupante de todo el proceso, se pensaba que si salíamos de la construcción de la losa de fondo en la estación ya estábamos “del otro lado”.

El análisis de estabilidad se planteó con los métodos del círculo de falla de Fellenius, [Referencia 3] haciendo los análisis por tanteos hasta encontrar el factor de Seguridad Mínimo, pues en esa época aún no se desarrollaban las computadoras personales ni menos aún el software para analizar este tipo de fallas.

Los resultados del análisis bidimensional arrojaron un Factor de Seguridad cercano a 0.74, y cuando se hizo el análisis considerando la resistencia de las paredes con el método tridimensional, el Factor de Seguridad subió a 1.34. Este factor aún sin llegar a ser un buen valor, ya garantizaba la estabilidad temporal del talud la cual sería crítica entre el momento de alcanzar el fondo y de colar la losa, período que duraba aproximadamente dos días.



Para determinar el factor de seguridad tridimensional se consideraron las características del círculo de falla más desfavorable [geometría, momento motor y momento resistente] obtenido del análisis bidimensional; sumando al momento resistente, el momento producido por la resistencia al corte del suelo en contacto con los muros de la Estación comprendidos dentro del círculo de falla, y afectados por la distancia entre los muros que delimitan transversalmente el talud. El análisis realizado se muestra a continuación:

<b>Estrato (-)</b>	<b>Ac (m<sup>2</sup>)</b>	<b>c (ton/m<sup>2</sup>)</b>	<b>r (m)</b>	<b>M<sub>Ti</sub> (Ton*m)</b>
A	53.20	4.6	24.01	588.06
B	94.50	2.0	21.34	403.33
C	120.00	3.0	22.33	803.88
D	136.80	2.6	22.78	810.24
E	35.74	0	23.05	0
F	121.45	2.6	25.74	812.80
G	243.00	3.0	29.34	2,138.89
<b>M<sub>T</sub></b>				<b>5,557.20</b>

Donde:

$$M_T = \frac{2(A_c)(c)(r)}{B}$$

M<sub>T</sub>: Momento resistente adicional por el efecto tridimensional.

A<sub>c</sub>: El área del estrato en contacto con el muro dentro del círculo de falla.

c: Cohesión del estrato.

r: Distancia del centroide de cada estrato al centro del círculo de falla.

B: Distancia entre los muros laterales de la Estación [20 m]

Del análisis bidimensional, para el círculo de falla más desfavorable, se calcularon los siguientes valores:

$$M_m = 93,671.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_r = 69,663.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F.S. = \frac{M_r}{M_m} = 0.74$$

Donde:

M<sub>m</sub>: Momento motor del círculo de falla.

M<sub>r</sub>: Momento resistente del círculo de falla.

Considerando la cohesión lateral, el factor de seguridad tridimensional es:

$$F.S. = \frac{M_r + M_T}{M_m} = 1.34$$

#### 4.2.6. Presentación de la falla

Una vez que se inició la excavación, se llevaban varios avances de la construcción de la losa de fondo y durante la excavación para la siguiente losa se presentó una lluvia la noche anterior, el colector que estaba fuera de servicio y que no se había sellado, acumuló agua, el cuerpo de la parte superior del talud se deformó con la descarga de la excavación y se produjo una falla local por deslizamiento del talud arriba de la berma que produjo un desprendimiento de una masa importante de suelo, el cual cayó sobre el armado de la losa que se iba a colar [figura 4.2.4.]

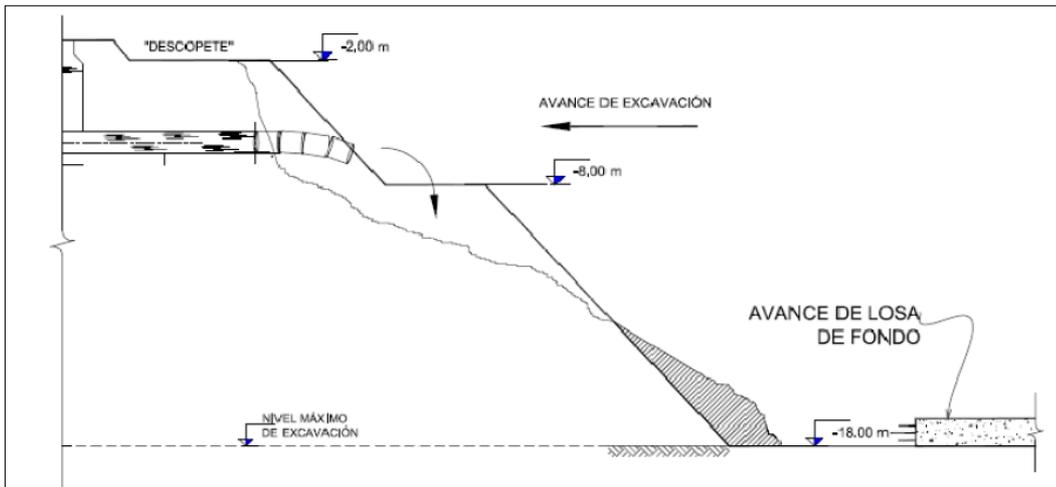


Figura 4.2.5. Falla del talud durante la construcción de la Estación Centro Médico L-9.

#### 4.2.7. Análisis de la falla

Aunque la preocupación era la falla general del talud, la falla que se presentó, fue una “falla local” por deslizamiento del talud arriba de la berma. El análisis de esta falla se puede entender si se aplica la presión hidrostática provocada por la recarga del colector viejo y se compara contra la resistencia al corte del piso y de las paredes de la cuña de falla como se indica en la siguiente figura:

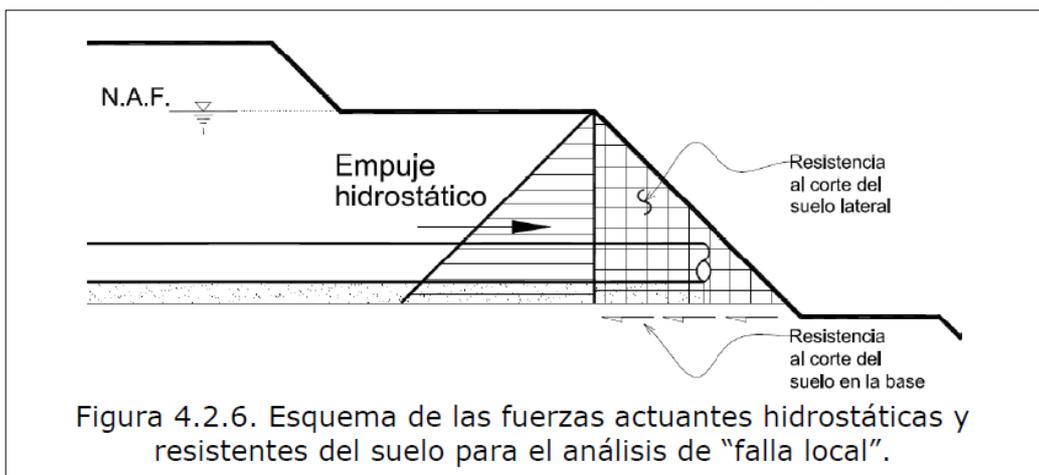


Figura 4.2.6. Esquema de las fuerzas actuantes hidrostáticas y resistentes del suelo para el análisis de “falla local”.

El factor de Seguridad por deslizamiento fue de 0.96, lo que indica claramente la presencia de la falla.

#### 4.2.8. Lecciones aprendidas

La lección aprendida en esta falla fue que era necesario sellar el colector que había quedado en desuso así como los pozos de visita para evitar la aportación del agua de lluvia acumulada en la tubería que estaba fuera de servicio y cuya trayectoria se ubicaba sobre el talud superior de la Estación.

#### 5. Recuperación de la obra

La falla que se relatan en este escrito se corrigió y hoy en día la obra donde se presentó tienen un comportamiento adecuado; a continuación se menciona brevemente el procedimiento que se usó para solucionar el problema.

Para recuperar la excavación se procedió a tapar los pozos de visita del colector que estaba en desuso, evitando así que el agua de lluvia no se introdujera nuevamente en el colector, se afinó la superficie del talud fallado, se retiró el material del fondo, se cubrió con un hule toda la superficie del talud con el fin de evitar que el agua de lluvia se introdujera en el cuerpo del mismo, se dio seguimiento estricto a las nivelaciones del hombro del talud y de las banquetas, y se prosiguió con la excavación.



---

T. 485-1540  
Calle Leo 1180 P5, Los Olivos - Lima  
[informes@centrogeotecnico.com](mailto:informes@centrogeotecnico.com)  
[www.centrogeotecnico.com](http://www.centrogeotecnico.com)