



CGI

Centro
Geotécnico
Internacional

ARTICULO TECNICO

“Ingeniería geotécnica forense (Casos historia) parte I”

Ing. Luis Bernardo Rodríguez González

Ingeniero Civil de la Academia de Ingeniería de México

Ingeniería geotécnica forense [Casos historia] parte I

Autor:

Ing. Luis Bernardo Rodríguez González

Ingeniero Civil de la Academia de Ingeniería de México

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.

4.1. Falla del Sifón Morena de la Línea 3

4.1.1. Antecedentes

La Línea 3 del Metro de la Ciudad de México realizada en la década de los 80's, sobre la Av. Cuauhtémoc, requirió librar el cruce con el Colector Morena en el tramo comprendido entre las estaciones Eugenia y Etiopía. El Colector Morena corre longitudinalmente sobre la calle del mismo nombre y es perpendicular a la trayectoria del Metro. Para evitar este cruce se diseñó un sifón invertido conocido como "Sifón Morena" construido por debajo del cajón del Metro para permitir su paso.

4.1.2. Descripción de la obra

El Colector Morena está constituido por un tubo de concreto reforzado de 2.10m de diámetro interior. El Cajón del Metro está formado por muros Milán y sus gálibos horizontales y verticales son 8.00m y 6.50m respectivamente. Para la construcción del sifón se propuso bajar el nivel del colector 3.50m y construirlo a una distancia horizontal, medida entre los ejes del colector y del sifón, de aproximadamente 5.00m. En la figura 4.1.1 se muestra en planta la intersección de la Av. Cuauhtémoc y la Calle Morena, en ella se puede observar la solución del desvío del Colector Morena resuelto con dos cajas interceptoras, dos cajas de desvío y dos rampas para el sifón invertido. En la figura 4.1.2 se presenta un corte longitudinal, donde se muestra el cajón de Línea 3 del Metro cuya losa de fondo constituyó también la losa superior del Sifón Morena.

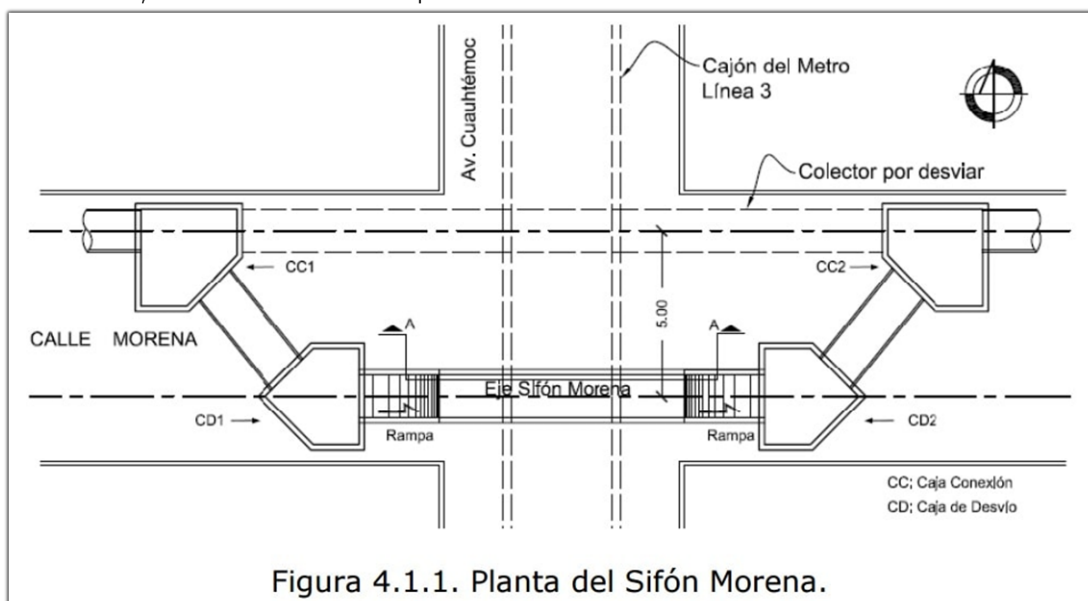


Figura 4.1.1. Planta del Sifón Morena.

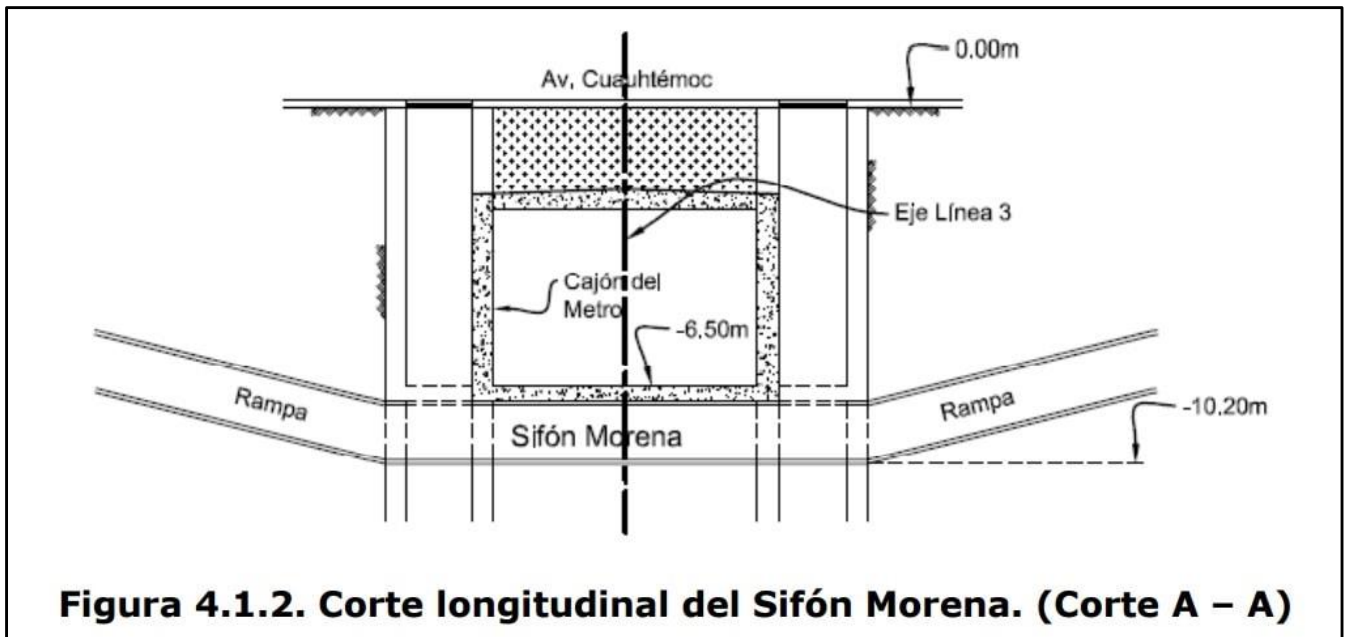


Figura 4.1.2. Corte longitudinal del Sifón Morena. (Corte A - A)

4.1.3. Estratigrafía del sitio

La estratigrafía del sitio corresponde a la Zona III de la Ciudad de México [Zona de Lago] de acuerdo con la caracterización geotécnica del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. Con la exploración realizada en el sitio a partir de sondeos mixtos y de penetración estándar se determinó la siguiente estratigrafía:

Estrato (-)	Prof. (m)	SUCS (-)	ω (%)	γ (ton/m ³)	c (ton/m ²)	ϕ (°)
A	0.00 - 3.00	---	---	1.70	3.00	32
B	3.00 - 7.00	CH	220	1.25	2.50	0
C	7.00 - 10.00	CH	350	1.18	2.00	0
D	10.00 - 14.00	CH	300	1.10	2.20	0

Tabla 1.1. Estratigrafía del sitio.

4.1.4. Procedimiento constructivo planteado

El Procedimiento Constructivo planteado para el Sifón Morena comprendía una excavación de 10.20 m de profundidad y 5.00 m de ancho entre muros tablestaca de concreto reforzado colados en zanja bajo lodo bentonítico, desplantados a un nivel de -12.70 m, y tres niveles de puntales a -1.20 m, -4.00 m y -6.50 m respecto al nivel de terreno natural. El orden de construcción propuesto fue el siguiente [Ver figura 4.1.3]:

- 1.- Construcción de muros Milán tablestaca.
- 2.- Excavación hasta el nivel -2.00m y colocación del primer nivel de puntales.
- 3.- Excavación hasta el nivel -4.50m y colocación del segundo nivel de puntales.
- 4.- Excavación hasta el nivel -7.00m y colocación del tercer nivel de puntales.

- 5.- Excavación hasta el nivel -10.20m, colado de plantilla, y construcción de la losa de fondo, muros interiores del Sifón y losa tapa de sifón, la cual fue parte de la losa de fondo del Cajón del Metro.
- 6.- Retiro del tercer y segundo nivel de puntales, construcción de muros secundarios y construcción de losa tapa del Cajón del Metro.
- 7.- Retiro del primer nivel de troqueles y restitución del pavimento.

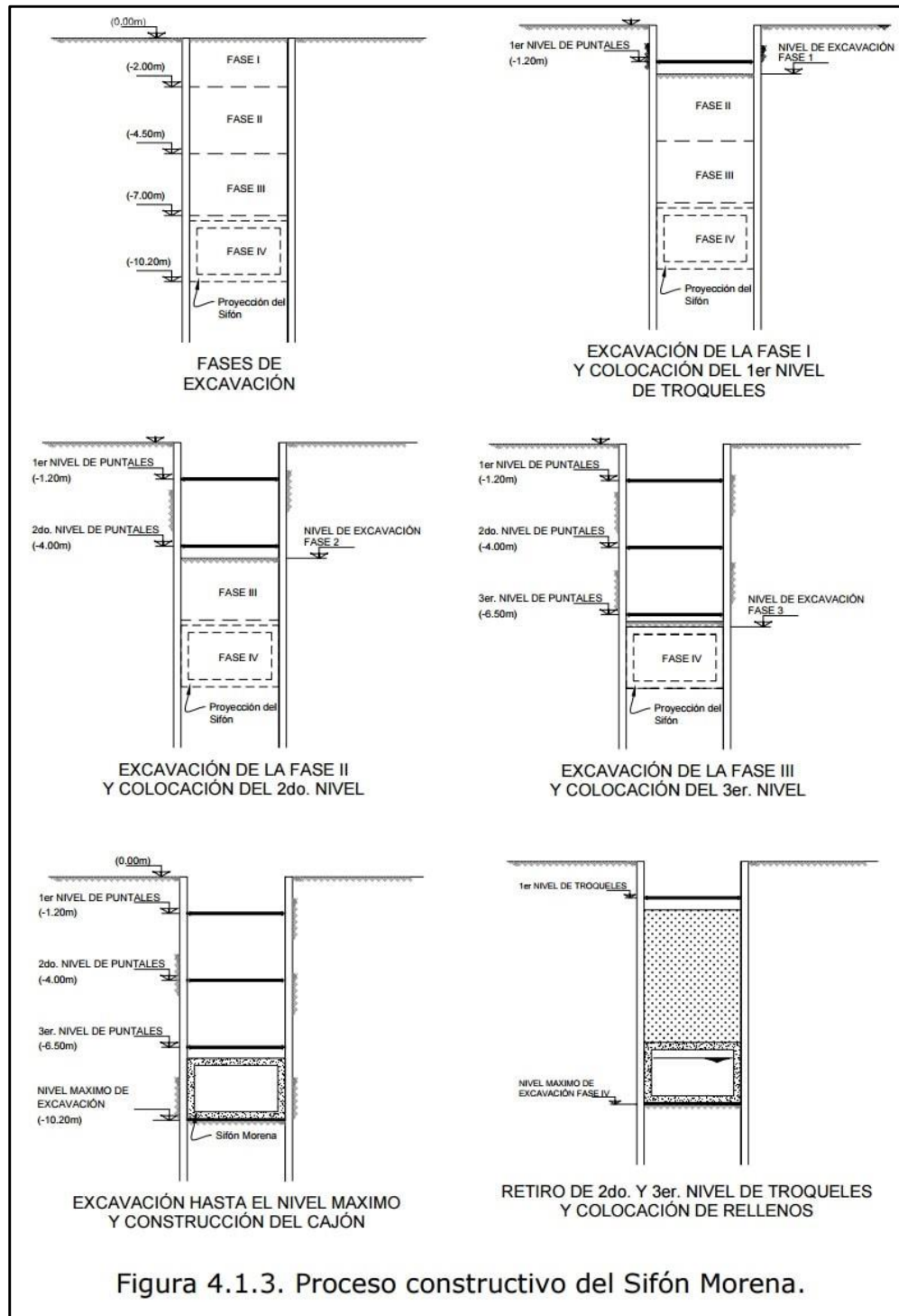


Figura 4.1.3. Proceso constructivo del Sifón Morena.

4.1.5. Presentación de la falla

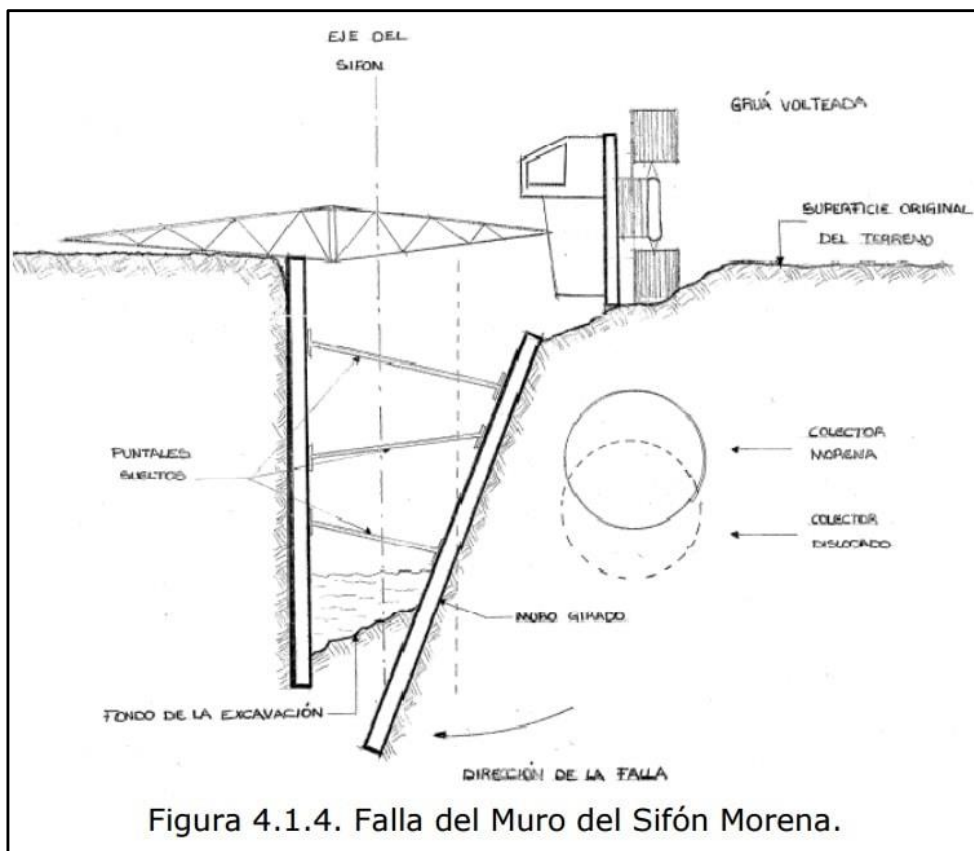
Después de colocar los tres niveles de puntales y durante la excavación de la última fase, el muro tablestaca empezó a desplazarse lateralmente provocando la dislocación del Colector Morena con la consecuente salida del agua negra hacia el subsuelo produciendo una sobrecarga en el respaldo del muro. Figura 4.1.4

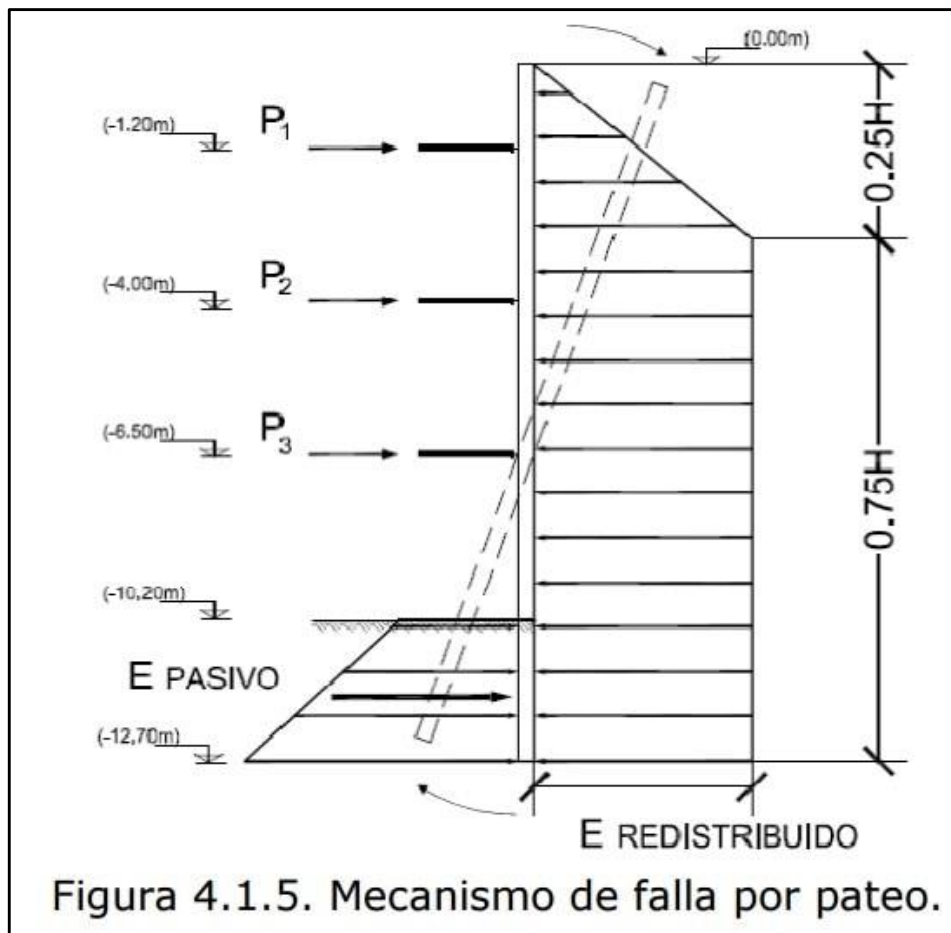
Finalmente la tablestaca giró súbitamente inundando la excavación y volcando la draga hacia la zanja, apoyada lateralmente en un extremo de la excavación y con la pluma extendida en el otro, impidiendo así que cayera hasta el fondo. El accidente ocurrió a las 7:00hr con poco personal en el sitio afortunadamente.

4.1.6. Análisis de la falla

Las características del colapso sugerían una falla por pateo del muro tablestaca. Para evaluar esta hipótesis se realizó el siguiente estudio.

En la figura 4.1.5 se muestra esquemáticamente la forma de analizar la tablestaca contra un riesgo de falla por “pateo”, es decir, cuando la ataguía es rígida y la excavación está próxima a llegar al fondo, existe la posibilidad que el empuje pasivo que produce el suelo en la parte interior de la ataguía [zona de la “pata” del muro], sea insuficiente para resistir los empujes activos del suelo y se produzca un giro en la tablestaca.





Para mantener la estabilidad de la tablestaca se debe verificar que la carga actuante en el empotre del muro no exceda el empuje pasivo del suelo. Con la relación de estas cargas se puede determinar el factor de seguridad para evitar la falla por pateo, mediante la siguiente expresión.

$$F.S. = \frac{E_p}{R} \quad (4.1.1)$$

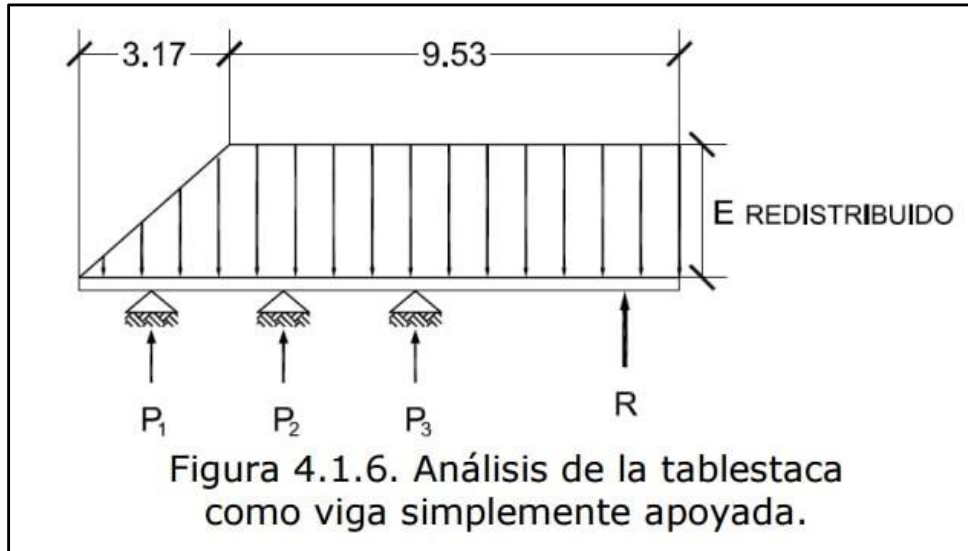
Donde:

E_p = empuje pasivo del interior de la pata del muro en ton/ml; y

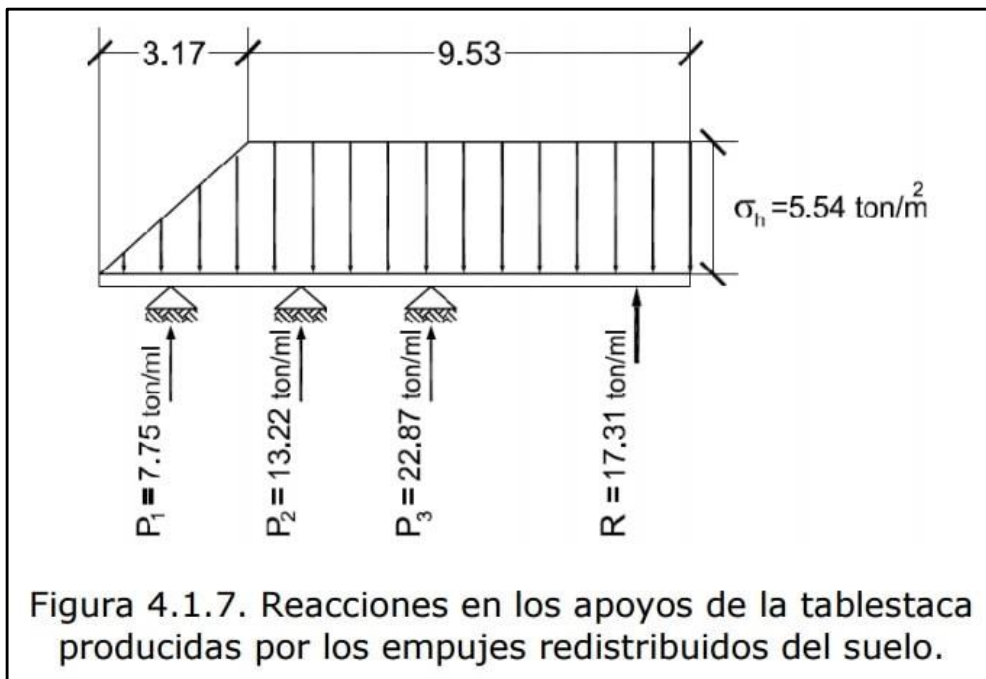
R = reacción necesaria mínima para evitar el pateo en ton/ml.

Las presiones sobre el muro tablestaca se obtuvieron calculando los empujes redistribuidos en toda la longitud del muro empleando las expresiones propuestas por Terzagui – Peck para arcillas blandas [Referencia 1]. Las cargas en los apoyos de la tablestaca se determinaron analizando el muro como una viga horizontal unitaria con cuatro apoyos como se muestra en la figura 4.1.6. Los primeros 3

apoyos corresponden a los puntales y el cuarto apoyo, es la resultante necesaria para lograr el equilibrio, generada por el empuje pasivo sobre la pata del muro.



Las cargas en los apoyos producidos por los empujes redistribuidos sobre la tablestaca se presentan en la figura 4.1.7.



El empuje pasivo del suelo en la parte empotrada se calculó con las expresiones de Rankine [Referencia 1] obteniéndose un valor de $E_p = 14.41 \text{ ton/ml}$.

Con los valores obtenidos del análisis es posible determinar el factor de seguridad contra la falla de pateo. Sustituyendo en la ecuación [4.1.1] los valores antes calculados se tiene que:

$$F.S. = \frac{14.44}{17.31} = 0.83$$

El valor del factor de seguridad menor a uno indica que el sistema de ademe es inestable ante la falla por pateo y se corrobora la hipótesis de la falla ocurrida en la construcción del Sifón Morena.

4.1.7. Lecciones aprendidas

El análisis de falla por pateo muestra que el empuje redistribuido sobre la tablestaca produce en la parte empotrada del muro una carga de 17.31 ton/ml, y el empuje pasivo del suelo para resistirla de 14.44 ton/ml no es suficiente para mantener el equilibrio, siendo esta diferencia de empujes lo que produjo el giro de la tablestaca, la falla del suelo y el giro de la estructura de contención durante la excavación para alojar el Sifón Morena.

Del análisis se desprende que las cargas solicitadas en los puntales son bajas por lo que era posible espaciarlos verticalmente incrementando la profundidad del segundo y tercer nivel de puntales. De particular interés resulta la ubicación del último nivel de troqueles, pues debido al mecanismo de falla por pateo es deseable colocarlo a la máxima profundidad posible, en este caso debió colocarse en la cota - 9.20m, apenas 40cm por encima de la cara superior de la losa de fondo.

Por lo que respecta a la longitud de empotramiento de la tablestaca, hubiese sido suficiente con una adecuada distribución de los 3 niveles de troqueles.

Por último la experiencia de esta falla pone en relieve la importancia de la adecuada colocación del nivel de troqueles y el empotre que se debe considerar para las estructuras de contención.

5.0 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.

Una vez ocurrida la falla y estabilizados los movimientos del terreno, se tapó el colector en sus cajas de entrada y salida, de común acuerdo con la autoridad del manejo del agua de drenaje de la ciudad. Posteriormente se extrajo el agua de la excavación, se hincó una tablestaca metálica paralela al muro milán en la longitud de la zona fallada y se realizó una sustitución de puntales recolocando el nivel inferior a una distancia de 0.50 m arriba de la máxima profundidad de excavación. La excavación continuó en etapas cortas de 5.0 m de longitud hasta terminar la losa de fondo y se procedió a terminar la construcción del sifón.



T. 485-1540
Calle Leo 1180 P5, Los Olivos - Lima
informes@centrogeotecnico.com
www.centrogeotecnico.com