

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Propuesta de solución para resolver la excavación de un túnel somero de sección rectangular en suelos blandos

Sergio VILLAR<sup>a,1</sup> y Juan PAULIN<sup>a</sup>  
<sup>a</sup>Cimentaciones Mexicanas S.A. de C.V.

**Resumen** Se expone una propuesta de solución para realizar la excavación y construcción de un túnel somero de sección rectangular en arcillas blandas por medio del método “*Cut and Cover*”, empleando un muro pantalla como elemento de contención y contrafuertes de mortero para mitigar la falla por resistencia al corte y pateo del muro, dado que, se desplanta en una formación arcillosa.

**Palabras Clave.** Contrafuerte, muro Milán, muro pantalla, excavación en suelos blandos, “*Cut and Cover*”.

## 1. Introducción

La excavación en suelos blandos presenta una alta probabilidad de grandes expansiones y deformaciones de la masa de suelo por el alivio de esfuerzos, en el peor de los casos debido a la carencia de resistencia al corte de estos se puede presentar la inestabilidad, por lo tanto, las soluciones a emplear en este tipo de suelos deben ser integrales, es decir, mitigar más de un problema. Al emplear el método “*Cut and Cover*” debemos tener en cuenta la mitigación de posibles expansiones al interior de la excavación, pateo del muro, falla por resistencia al corte y grandes deformaciones en los muros de contención [1, 2].

## 2. Características del proyecto

Túnel somero con longitud aproximadamente de 1,300.0 m, sobre un suelo lacustre, constituido por tres calzadas; 10.90 m, 10.40 m y 8.0 m, divididas por muros de concreto, a una profundidad de 7.50 m. Se contempla emplear un muro pantalla como sistema de contención, utilizando el método “*Cut and Cover*” para su construcción (Figura 1). Se contempla un nivel máximo de excavación de -11.0 m [3].

### 2.1. Problemática

Realizar de manera estable la excavación y construcción del túnel en suelos conformados por arcillas blandas. Se sabe que, la excavación en este tipo de suelos conlleva a la

---

<sup>1</sup> Autor correspondiente, Cimentaciones Mexicana, S.A. de C.V., Av. Paseo de la Reforma 300 piso, C.P. 06600, Ciudad de México, México; E-mail: villar.sergio@cimesa.net.

inestabilidad por la carencia de resistencia al corte de las arcillas, la probabilidad de que se presente la falla por resistencia al corte y el pateo del muro, al desplantarse en una formación arcillosa, es muy alta.

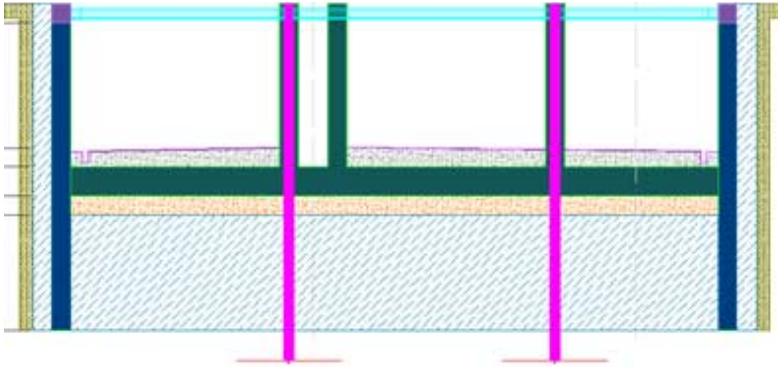


Figura 1. Sección del túnel.

### 3. Características geotécnicas del sitio

El sitio en estudio es un claro ejemplo del suelo tipo Zona III de la Ciudad de México, suelo lacustre, el cual puede ser definido por el siguiente modelo geotécnico. Tabla 1.

Tabla 1. Modelo geotécnico del sitio.

Profundidad (m)		Descripción	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	E (t/m <sup>2</sup> )	$\nu$
0.0	-0.5	Costra Superior	1.60	3	15	1500	0.3
-0.5	-2.5	FAS 1	1.60	1	0	78	0.49
-2.5	-10.0	FAS 2	1.20	1	0	78	0.49
-10.0	-20.0	FAS 3	1.25	1.9	0	188	0.49
-20.0	-25.0	FAS 4	1.25	3.6	0	268	0.49
-25.0	-26.0	FAS 5	1.20	3.6	0	1464	0.49
-26.0	-28.0	Capa Dura	1.55	40	20	5000	0.30
-28.0	-44.0	FAI	1.30	6	0	1000	0.49
-44.0	-55.0	Dep. Profundos	1.80	25	25	8000	0.30

$\gamma$  = peso volumétrico, c = cohesión,  $\phi$  = ángulo de fricción, E = Módulo de elasticidad,  $\nu$  = relación de Poisson

### 4. Propuesta de solución

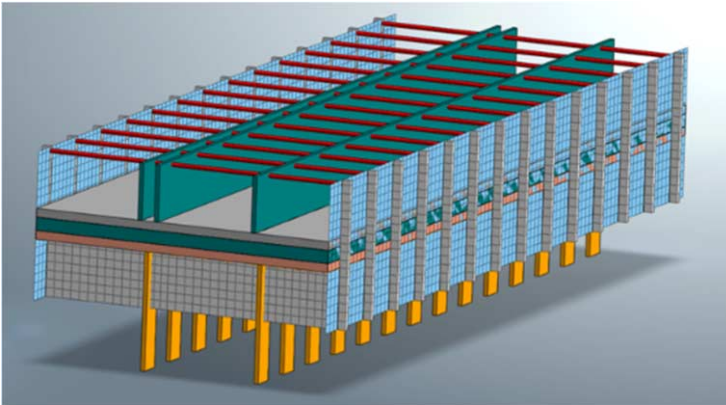
La solución propuesta, consiste en construir contrafuertes de mortero perpendiculares a los muros pantallas a lo largo del túnel a cada 7.0 m, donde se busca generar interacción entre suelo y contrafuertes que mitiguen la falla por resistencia al corte, el desplazamiento al interior del muro y las altas expansiones del suelo por la liberación de esfuerzos, llevando a un comportamiento tipo arqueado en las deformaciones del suelo.

Se contempla construir pilas rectangulares (barretes), perpendiculares al contrafuerte, buscando interrumpir la superficie de falla por resistencia al corte del suelo. Otra función de los barretes, es acortar la longitud de los troqueles ya que se pretende construir estos elementos hasta la superficie buscando optimizar la sección de los troqueles.

## 5. Propuesta de procedimiento constructivo

Como se mencionó anteriormente la propuesta de excavación es mediante el método “*Cut and Cover*”, debido a esto, es necesario construir el sistema de contención anterior a la excavación, con la finalidad de realizar la excavación libremente hasta su nivel máximo, siendo así se exponen las etapas propuestas para la excavación y construcción del túnel (Figura 2) [4, 5]:

- Construcción de muro pantalla y barretes
- Construcción de contrafuertes de mortero
- Construcción de trabe de coronamiento y troqueles
- Abatimiento del nivel freático
- Excavación
- Construcción de losa de fondo
- Muros intermedios
- Construcción de losa tapa



**Figura 2.** Modelo tridimensional del túnel con los elementos que constituyen la solución de excavación y construcción de este.

## 6. Análisis y resultados del proceso constructivo

Fue necesario analizar el comportamiento y la interacción que existe entre muros, contrafuertes y el suelo de manera detallada, por tal motivo se realizó la modelización del proceso constructivo de manera tridimensional (Midas GTS) la cual fue comparada con dos análisis bidimensionales (Plaxis y Phase 2), con la finalidad de conocer el comportamiento y la interacción entre elementos y la masa de suelo. El modelo constitutivo empleado fue Mohr–Coulomb [6].

### 6.1. Modelización del contrafuerte en análisis bidimensional

Se realizó una hipótesis para la representación del contrafuerte, la cual consiste en sustituir el suelo donde reside este elemento por un material equivalente con propiedades ponderadas entre el ancho del suelo y el ancho del contrafuerte de mortero respecto a una longitud igual a 7.0 m que corresponde a la separación entre ellos.

6.2. Análisis 2D – Nivel máximo de excavación (Plaxis / Phase 2)

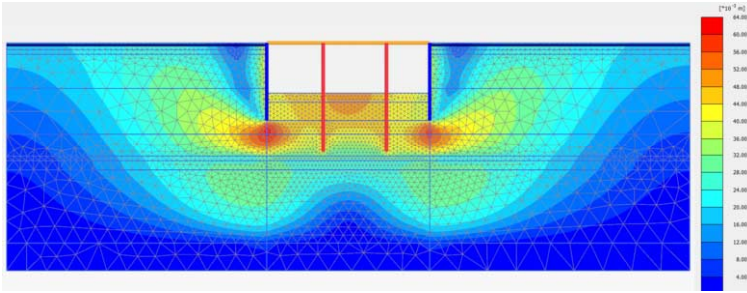


Figura 3. Desplazamientos totales en modelos bidimensionales.

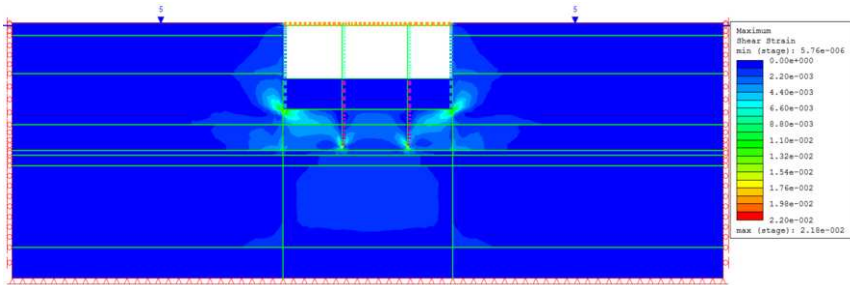


Figura 4. Esfuerzos desviadores en modelos bidimensionales.

6.3. Análisis 3D – Nivel máximo de excavación (Midas GTS)

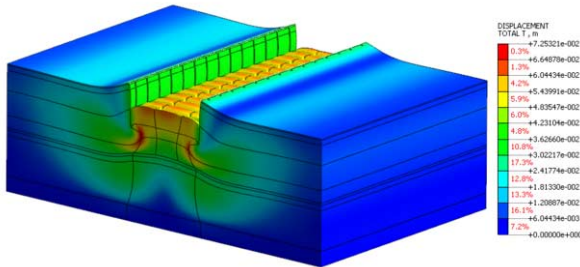


Figura 5. Desplazamientos totales en modelo tridimensional.

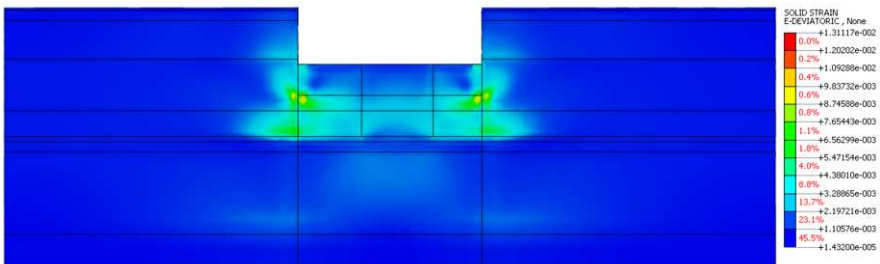


Figura 6. Esfuerzos desviadores en modelo tridimensional.

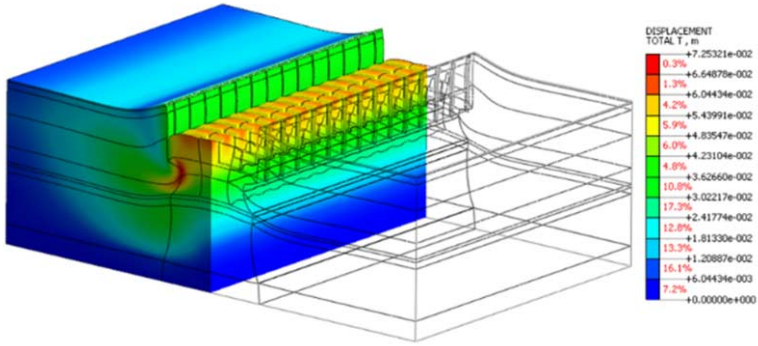


Figura 7. Corte - Desplazamientos totales en modelo tridimensional.

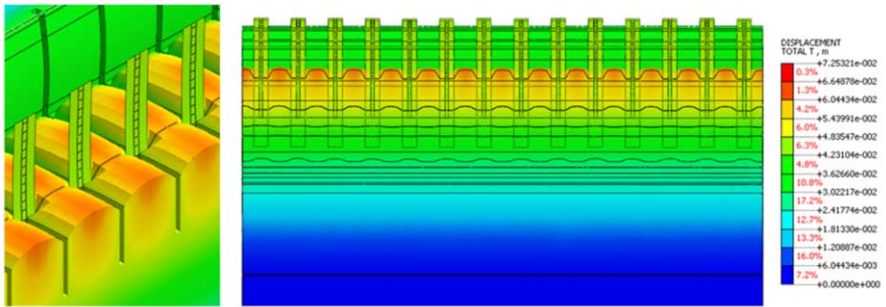


Figura 8. Corte - Interacción suelo – contrafuertes.

Se observa la interacción entre suelo y contrafuertes, presentando un comportamiento tipo arco del suelo ante la presencia de los contrafuertes; en la cresta del arco ubicando al centro entre contrafuertes se observa una expansión del orden de 6.0 cm, este comportamiento va disminuyendo a medida que se acerca al contrafuerte hasta llegar a este donde existe un desplazamiento ascendente del orden de 4.7 cm.

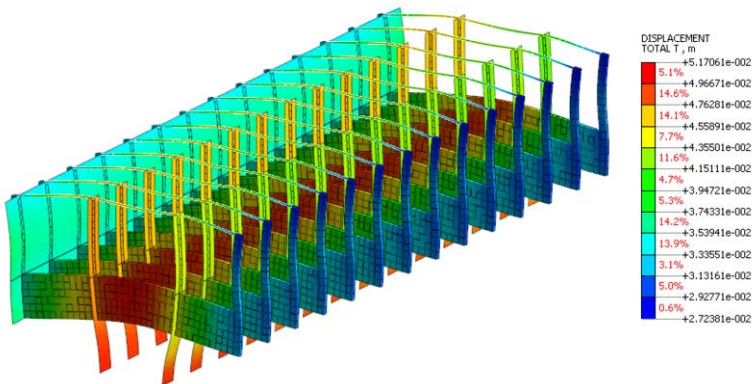


Figura 9. Desplazamientos totales en contrafuertes y barretes.

Se observa una emersión máxima de 5.1 cm en la parte central de los contrafuertes, esta va descendiendo hasta el desplante del muro del orden de 3.5 cm, de igual forma, se

observa el desplazamiento hacia el interior de los barretes en su máxima profundidad del orden de 1.7 cm, lo cual indica que oponen resistencia a la falla por cortante del suelo.

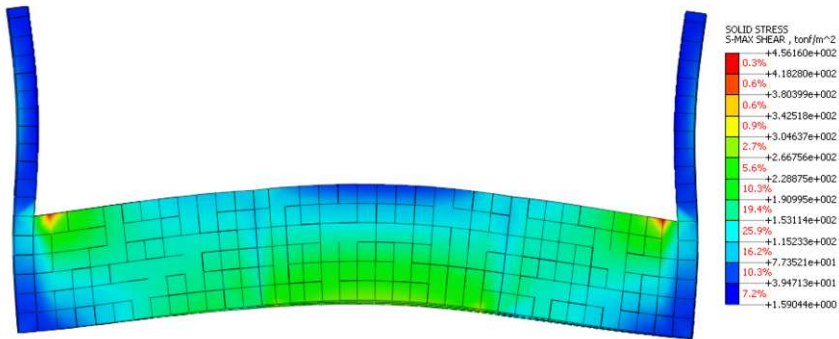


Figura 10. Desplazamientos totales en contrafuertes y barretes.

Se puede observar un esfuerzo a cortante al centro del elemento en la parte superior del orden de 29.3 t/m<sup>2</sup>, en la parte inferior del orden de 288.0 t/m<sup>2</sup>, concluyendo que el contrafuerte únicamente trabaja a compresión, por tanto, se puede sugerir la resistencia del mortero del contrafuerte el cual debe ser mayor o igual a 30 kg/cm<sup>2</sup>.

## 7. Comparación de resultados

### 7.1. Comparación numérica – Desplazamientos de la masa del suelo

Tabla 2. Comparación numérica – Desplazamientos verticales de la masa del suelo.

Desplazamientos Verticales - Nivel Máximo de Excavación			
Zona	Plaxis (cm)	Phase 2 (cm)	Midas GTS (cm)
Superficie del suelo fuera de la excavación (izq)	-2.4	-2.2	-1.2
Superficie del suelo fuera de la excavación (der)	-2.3	-2.2	0.9
Superficie del suelo en la excavación	5.0	6.0	6.5
Hombro del Muro (izq)	3.9	4.6	3.2
Hombro del Muro (der)	3.5	4.2	3.0

(-) Asentamientos, (+) Emersiones

Tabla 3. Comparación numérica – Desplazamientos horizontales de la masa del suelo.

Desplazamientos Horizontales - Nivel Máximo de Excavación			
Zona	Plaxis (cm)	Phase 2 (cm)	Midas GTS (cm)
Hombro del Muro (izq)	0.7	0.7	1.1
Hombro del Muro (der)	-0.7	-0.9	-0.5
Pata del muro (izq)	5.7	5.2	6.7
Pata del muro (der)	-5.4	-5.0	-6.1
Zona a 6 m de profundidad de excavación	1.3	-1.4	1.5

(-) Izquierda, (+) Derecha

## 7.2. Comparación gráfica – Elementos mecánicos en el muro pantalla (Momento flexionante / Fuerza cortante)

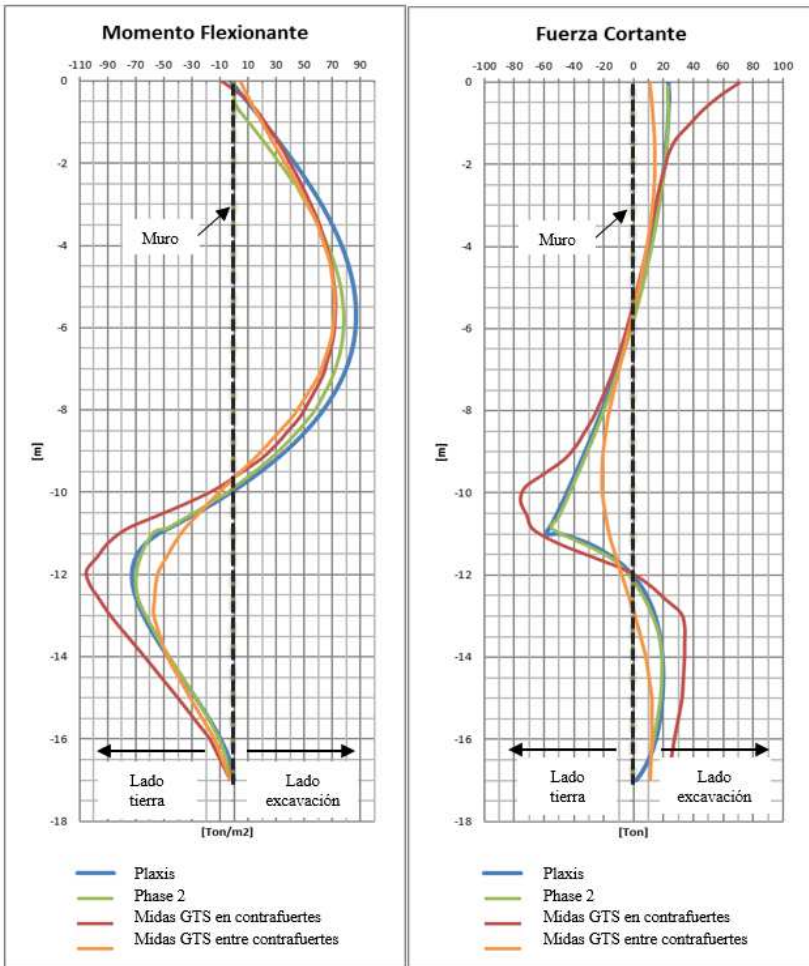


Figura 11. Elementos mecánicos en el muro pantalla – Momento flexionante / Fuerza cortante.

## 8. Conclusiones

Una vez realizado el análisis y la comparación de resultados entre los distintos programas de modelación geotécnica con elementos finitos, se demuestra que la idealización de los contrafuertes, en los análisis bidimensionales, por medio de un material equivalente es correcta, ya que, el comportamiento del suelo tanto en sus desplazamientos como en sus esfuerzos se asemejan a los resultados obtenidos en el análisis tridimensional en la zona entre contrafuertes.

La etapa crítica es al excavar al nivel máximo, existen expansiones máximas en la superficie de excavación del orden de 5.0 a 6.5 cm entre contrafuertes, estas disminuyen a medida que se acerca a la ubicación de dichos elementos del orden de 3.5 cm, el



implemento de estos elementos mitiga el desarrollo de una superficie de falla, manteniendo la excavación estable.

El desplazamiento del muro hacia el interior de la excavación, bajo el nivel máximo de excavación, es mínimo debido a la presencia del contrafuerte, aportando mayor rigidez a todo el sistema propuesto de solución.

La construcción de barretes tiene, de igual forma, aportación para mantener estable la excavación ya que las deformaciones por cortante generadas en el subsuelo bajo el nivel de excavación son interrumpidas debido a la construcción de estos elementos, por otra parte, ayudan a optimizar la sección de troqueles construyendo los barretes hasta superficie acortando la longitud efectiva de los troqueles.

Se puede concluir que se cumple con la mitigación de la problemática anteriormente descrita, puesto que la falla por resistencia al corte del suelo no se presenta, las expansiones son mínimas, no se presenta n desplazamiento importante de la pata del muro, por lo tanto, la excavación se mantiene estable durante todo su proceso constructivo.

## Referencias

- [1] Tamez González E. Ingeniería de cimentaciones, Conceptos Básicos de la Práctica.
- [2] Marsal, R. y Mazari, M. (1959), "El subsuelo de la Ciudad de México". Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- [3] Villar Solares S.D. - Tesis, Posgrado de Ingeniería, Túneles y Obras Subterráneas, UNAM (2018). "Propuesta de solución para la construcción de un túnel de servicio (somero), ubicado en arcillas blandas similares a las del antiguo lago de Texcoco, realizando un análisis de estabilidad por medio de elementos finitos".
- [4] Manual de diseño geotécnico (1987), Volumen 1, Estudios geotécnicos y Diseño del Metro en cajón. Departamento del Distrito Federal, secretaria general de obras.
- [5] Malcolm Puller, Deep Excavations: A Practical Manual, 2nd Edition, FISTrucE, Editorial Thomas Tejford, London.
- [6] Rojas González E. y Romo Organista Miguel: Modelos Constitutivos Utilizados en Geotecnia. Instituto de Ingeniería UNAM pp 1- 11
- [7] Sánchez, F., 2014; Ingeniería de Túneles; En proceso de publicación; Registro número: 03-2015-012110003000-1, SEP-INDAUTOR, Fermín Antonio Sánchez Reyes (2014)
- [8] Braja, M. (1997). "Advanced Soil Mechanics". Sacramento, California. Taylor y Francis.