

geotecnia 280

JUNIO -
AGOSTO 2026



ÓRGANO OFICIAL DE LA SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA, A. C. WWW.SMIG.ORG.MX



CONSTRUCCIÓN DE UN CAJÓN PARA CONECTAR DOS TÚNELES EN EL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

DESEMPEÑO DE DIFERENTES SISTEMAS DE SOPORTE
DE EXCAVACIONES EN DIVERSAS CONDICIONES DEL SUELO



Control de erosión con Geosintéticos:

soluciones que devuelven vida a los taludes.

El cambio climático exige obras más resilientes.

Nuestros **mantos** se adaptan a la forma del terreno y lo protegen frente a la acción del agua y del viento, **controlando la erosión y contribuyendo a la estabilidad de los taludes mediante la revegetación.**

Tenemos para tu proyecto **mantos permanentes** elaborados con polímeros sintéticos de alta durabilidad, resistentes a los rayos UV, no degradables y con excelente permeabilidad, así como **mantos temporales** fabricados con fibras orgánicas biodegradables. Con nuestro respaldo técnico, te brindamos soluciones para el control de erosión que logran el equilibrio ideal entre desempeño y sostenibilidad ambiental.

Cuidamos el suelo, el agua y el entorno.



Escanea el QR y platiquemos sobre tus proyectos.



**Mesa directiva 2025-2026****Presidente**

Miguel Ángel Mánica Malcom

Vicepresidente

Francisco Alonso Flores López

Secretaría

Yoleida del Valle Suárez Arellano

Tesorero

Daniel Martínez Oviedo

Vocales

Alonso Gabriel Lira Álvarez

Miguel Gallardo Contreras

Alexandra Ossa López

Eliza Alejandra Ríos Villarreal

David Enrique Febres Sánchez

Gerente

Brenda Aguilar Silis

Delegaciones regionales

Baja California

Michoacán

Occidente

Puebla

Querétaro

Sureste

Tabasco

Veracruz

Representaciones

Ciudad Juárez

Formación e investigación: el cimiento del futuro en la geotecnia

La ingeniería geotécnica ha evolucionado de manera notable en las últimas décadas. Nuevas herramientas y metodologías de análisis han ampliado nuestras capacidades técnicas para abordarla. Sin embargo, más allá de los avances tecnológicos, el verdadero futuro de la disciplina depende de la solidez con la que formemos a las nuevas generaciones y del rigor con el que generemos conocimiento.

Como académica, investigadora y formadora de estudiantes de licenciatura y posgrado, he constatado que la enseñanza de la geotecnia no puede limitarse a la transmisión de procedimientos de cálculo o al manejo de software especializado. Formar ingenieros implica desarrollar criterio técnico, pensamiento crítico y ética profesional. Significa enseñar a interpretar resultados, cuestionar hipótesis y comprender la complejidad del comportamiento del suelo en contextos reales.

Hoy enfrentamos escenarios particularmente desafiantes. Ante ello, la formación técnica sólida es una condición indispensable. Sin fundamentos claros en mecánica de suelos y rocas, ningún modelo avanzado ni herramienta digital podrá sustituir el juicio profesional.

La investigación juega un papel complementario y estratégico. Cuando el laboratorio dialoga con la obra, cuando la modelación numérica se valida con datos de campo y cuando los resultados se traducen en mejoras normativas o prácticas constructivas más seguras, la disciplina se fortalece. Publicar es importante, pero más relevante aún es que el conocimiento generado sea pertinente, aplicable y contribuya a resolver problemas nacionales.

En este proceso, la mentoría adquiere una dimensión esencial. Acompañar a estudiantes en su tránsito hacia la especialización, fomentar su participación en foros técnicos y promover su inserción en redes profesionales consolidan el relevo generacional con bases firmes. La Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica tiene aquí una oportunidad estratégica: fortalecer su papel como puente entre academia, industria y práctica profesional, promoviendo espacios de actualización continua y diálogo intergeneracional.

La incorporación de tecnologías emergentes —incluida la inteligencia artificial y el análisis masivo de datos— representa una oportunidad significativa. No obstante, estas herramientas exigen fundamentos conceptuales robustos y una ética profesional firme. Innovar no significa sustituir el razonamiento ingenieril, sino potenciarlo con responsabilidad.

El compromiso institucional debe orientarse a consolidar tres ejes fundamentales: formación técnica rigurosa, investigación de alto impacto y actualización permanente con sentido ético. Solo así podremos garantizar que la evolución tecnológica vaya acompañada de criterio profesional y responsabilidad social.

Formar, investigar y ejercer con ética no son tareas independientes, sino expresiones de una misma responsabilidad compartida. En esa convergencia se encuentra el verdadero cimiento del futuro de nuestra disciplina.

Alexandra Ossa López

Vocal de la mesa directiva 2025-2026

Síguenos en



@smiggeotecnia

Sociedad Mexicana
de Ingeniería Geotécnica

inggeotec



Geotecnia, año 16, núm. 280, junio - agosto 2026, es una publicación trimestral editada por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C. Valle de Bravo 19, colonia Vergel de Coyoacán, alcaldía Tlalpan, CP 14340, teléfono (55) 5677 3730 · www.smig.org.mx. Editor responsable: Carlos Roberto Torres Álvarez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. 04-2017-060819470900-102. ISSN: 2594-1542, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Licitud de título y contenido 17156, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa por Copiasgráficas S.A. de C.V. Tochtli 136, Pedregal de Santo Domingo, Coyoacán, CDMX, México. Este número se terminó de imprimir el 29 de mayo de 2026, con un tiraje de 120 ejemplares.

Los artículos firmados son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de la SMIG. Los textos publicados, no así los materiales gráficos, pueden reproducirse total o parcialmente siempre y cuando se cite la revista Geotecnia como fuente.

Costo de recuperación \$70, números atrasados \$79. Suscripción anual \$210. Los socios de la SMIG la reciben en forma gratuita.

Geotecnia está abierta a las colaboraciones de los profesionales vinculados a la especialidad. De igual forma se invita a presentar artículos que permitan inaugurar una nueva sección en la que se haga prospectiva o se aborden casos insólitos en el ejercicio de la especialidad.

Para proponer trabajos debe escribir a norma@xantus.com.mx y será informado de los requisitos para el envío de materiales. Los textos se pondrán a consideración del Consejo Editorial para su publicación.

Contenido

3 CONVERSANDO CON...

Se viene abajo el mito del balance entre la vida y el trabajo

Helen Robinson



8 SEMBLANZA

Jarbas Milititsky: una trayectoria de logros

10 ARTÍCULO TÉCNICO

Portada

Construcción de un cajón para conectar dos túneles en el Metro de la Ciudad de México

Bardomiano Soria

Carlos Olivar

Edwing Flores

Luis Bernardo Rodríguez



20 ARTÍCULO TÉCNICO

Desempeño de diferentes sistemas de soporte de excavaciones en diversas condiciones del suelo

Antonio Marinucci

Evangelia S. Leronymaki

26 ÁMBITO ACADÉMICO

Incorporación de conceptos de suelos no saturados en cursos de licenciatura: la experiencia de la UPC

Alberto Ledesma

Enrique Romero

Pere C. Prat

Anna Ramon

Nuria M. Pinyol

34 TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

Herramienta de perforación vibro-rotacional bioinspirada con juntas flexibles para una penetración energéticamente eficiente en suelos granulares

Pooneh Maghoul

36 NOTA TÉCNICA

«Recomendaciones para la modelización numérica de estructuras geotécnicas», una colaboración entre el Comité Francés de Mecánica de Suelos y Geotecnia y la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica

Miguel A. Mánica Malcom

38 NOTA TÉCNICA

Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos: una herramienta ingenieril de gran utilidad, a veces sobreadaptada

Leandro R. Alejano

40 RESEÑAS - Tesis

42 NORMATIVIDAD

43 CALENDARIO

45 NOTICIAS

PORTADA: Construcción de un cajón para conectar dos túneles en el Metro de la Ciudad de México.

FOTO DE PORTADA: ACERVO INTEGRACIÓN DE PROCESOS DE INGENIERÍA S.A. DE C.V.

Dirección General

Miguel Ángel Mánica Malcom

Dirección Ejecutiva

Natalia del Pilar Parra Piedrahita

Consejo Editorial

Juan de Dios Alemán Velásquez

Gabriel Yves Armand Auvinet Guichard

Roberto Avelar Cajiga

Jorge E. Castilla Camacho

Yoleida del Valle Suárez Arellano

Francisco Alonso Flores López

Moisés Juárez Camarena

Germán López Rincón

Raúl López Roldán

Miguel Ángel Mánica Malcom

Daniel Martínez Oviedo

Héctor Moreno Alfaro

Rodrigo Murillo Fernández

Ricardo Enrique Ortiz Hermosillo

Alexandra Ossa López

Walter Iván Paniagua Zavala

Margarita Puebla Cadena

Luis Bernardo Rodríguez González

Juan Jacobo Schmitter M. del C.

Carlos Roberto Torres Álvarez

Carlos Omar Vargas Moreno

Comercialización

Brenda Aguilar Silis

Edición y diseño



XANTUS, comunicación y diseño
www.xantus.com.mx

Impresión



Copygraphic
www.copygraphic.com.mx



Helen Robinson

Ingeniera Civil con especialización en Geotecnia
 Vicepresidenta y gerente de la oficina de proyectos de GEI Consultants, Inc.

Helen Robinson: se viene abajo el mito del balance entre la vida y el trabajo

Ingeniera Civil con especialización en Geotecnia. Vicepresidenta y gerente de la oficina de proyectos de GEI Consultants, Inc., en Exton, Pennsylvania, localizada en el área de Filadelfia, así como expresidenta del ASCE Geo-Institute, y presidenta del Educational Trust del Deep Foundations Institute (DFI). Fue nombrada Ingeniera Geotécnica 2023 por la Sección de Filadelfia de la ASCE. Especialista en el diseño de micropilotes, anclajes, muros de contención, soporte de excavaciones apuntaladas, métodos de inyección y mejora del terreno.

Del espacio exterior a la incertidumbre del terreno

Helen Robinson es una ingeniera de referencia internacional. Realizó sus estudios de licenciatura y maestría en Ingeniería Civil en Penn State University.

¿Y cuáles fueron las razones por las que se convirtió en ingeniera civil con especialidad en suelos? Así lo expresa:

«No fue un camino lineal. De niña me apasionaba el espacio exterior y quería ser astronauta o ingeniera aeroespacial, así que comencé la universidad en esa carrera. Sin embargo, me di cuenta de que las oportunidades laborales eran limitadas —el programa del transbordador espacial estaba desace-

«No es un equilibrio entre la vida personal y el trabajo: es más bien un péndulo que oscila. Donde más se requiere, allí se enfoca la energía».



Proyecto de reemplazo de pilas del puente de la autopista de peaje de Nueva Jersey.

lerándose— y decidí cambiar a ingeniería estructural, donde podría participar en crear infraestructura y contribuir a la sociedad».

Y complementa los avatares que decidieron su línea de especialización, en la que hoy siente una gran satisfacción personal y profesional:

«Al terminar mi licenciatura en Penn State, quise quedarme a cursar una maestría, pero todos los profesores de estructuras ya tenían estudiantes. Me ofrecieron geotecnia y lo acepté sin mucho entusiasmo. Al graduarme, empecé en una firma de ingeniería estructural, pero la encontré aburrida: los códigos y normas no me motivaban. Poco después me pasé a una firma geotécnica y descubrí que me encantaba: cada problema de suelos es distinto y requiere un verdadero análisis de la información disponible y del riesgo, a diferencia del acero o el concreto, que son materiales muy bien estudiados con propiedades similares en todos los proyectos».

Asimismo, ella enfatiza que gran parte de los ingenieros geotécnicos que ha conocido tuvieron una experiencia similar para encontrar su camino en la geotecnia, muy a menudo por casualidad. Entre sus diversos papeles en la industria, ella trabaja con los jóvenes, padres de familia, maestros, guías y personas clave, concientizando acerca de los retos y beneficios de la ingeniería geotécnica, con el fin de lograr un avance más rectilíneo hacia la geotecnia mediante el contacto directo y temprano.

«Trabajé muy duro, primero como miembro del consejo directivo por varios años, luego como vicepresidenta y, finalmente, como presidenta».

Liderar es abrir la puerta a los que vienen

Sobre su designación y labor como presidenta del Geo-Institute del American Society of Civil Engineers (ASCE), institución técnica especializada dedicada a la ingeniería geotécnica y geoambiental, nos deja un testimonio muy sincero en lo humano y profesional:

«Fue un honor que nunca imaginé tener. Me sorprendió la cantidad de personas que se comunicaron conmigo para felicitarme, hacer sugerencias o simplemente saludar. Trabajé muy duro, primero como miembro del consejo directivo por varios años, luego como vicepresidenta y, finalmente, como presidenta, siguiendo los pasos de mis antecesores en varias iniciativas:

- Presencia internacional: Quería fortalecer las relaciones del Geo Institute con organizaciones de otros países y ampliar su visibilidad global.
- Miembros jóvenes: Sentía que los jóvenes profesionales no tenían un espacio propio: los estudiantes tienen sus competencias y los ingenieros con más trayectoria lideran comités técnicos, pero los recién egresados quedaban en tierra de nadie. Impulsé la creación de un Comité de Miembros Jóvenes.
- Reconocimiento a voluntarios: Innumerables personas dedican su tiempo a revisar artículos, organizar congresos y participar en comités técnicos. Era importante reconocer y agradecer esa labor.



Helen y su hijo Vincent después de un partido de baloncesto.



Helen y su hijo Thomas después de un concierto de la banda.



Helen con sus hijos.

- **Proyección internacional:** Tuve la fortuna de representar al Geo Institute en La Serena (Chile) durante la Conferencia Panamericana, en Valencia (España) para el taller de la Sociedad Internacional de Micropilotes, y en la Ciudad de México durante el Simposio de Cimentaciones Profundas organizado por la SMIG. En todos lados fui recibida con una calidez extraordinaria».

¡Apoyemos a las mujeres en la industria!

Entre los logros más notables de Helen Robinson está el haber sido la primera presidenta del Comité de Mujeres en Cimentaciones Profundas, un papel que desempeñó de 2014 a 2017. Así nos explica la importancia del comité y de su dinamismo y continuidad, con especial convicción:

«En 2014, justo después de tener a mi tercer hijo, sentí que no existía una estructura de apoyo adecuada para las madres que trabajan en ingeniería civil. Las obras de construcción exigen horarios impredecibles y plazos muy ajustados; yo no tenía recursos para enfrentar esos retos. La mayoría de mis colegas eran hombres, quienes se mostraban muy solidarios; sin embargo, eran muy pocos los que entendían los particulares de ser mujer en el ambiente de la ingeniería y la construcción. Además, cuando asistía a conferencias, se veían pocas mujeres y la mayor parte de las que asistían no eran ingenieras. Por eso, al crear el comité, era fundamental no limitarlo a las mujeres: invité activamente a los hombres. No se trataba de que las mujeres se reunieran en un rincón a resolver sus problemas solas. Necesitábamos el apoyo de los hombres, especialmente los que ocupaban posiciones de liderazgo en las empresas y podían impulsar cambios reales. El comité se convirtió en un espacio donde hombres y mujeres, por igual, se sentían cómodos para hablar de conciliación personal, familia y desarrollo profesional».

Logística humana: el soporte detrás de la ingeniería

Helen describió las particularidades de su entorno familiar:

«Crecí en Pensilvania, cerca de Filadelfia. Soy la mayor de cuatro hermanos y tenemos una familia muy unida; nos gusta mucho pasar tiempo juntos. Mis padres viven a unos cuarenta minutos de mi casa y son un apoyo

«El comité se convirtió en un espacio donde hombres y mujeres, por igual, se sentían cómodos para hablar de conciliación personal, familia y desarrollo profesional».

enorme, especialmente cuando viajo: me ayudan a cuidar a los niños. Soy madre separada, y tengo el cargo exclusivo de la crianza de mis tres hijos: Gabriela, de 16 años; Vincent, de 14; y Thomas, de 11. Ellos son muy responsables, cumplen con sus obligaciones y ayudan en casa. También tengo tres perros y me encanta viajar, me gusta mucho la historia y leer».

Por sus compromisos profesionales, en reiteradas ocasiones, necesita alejarse del hogar, pero siempre tiene a la mano el apoyo requerido:

«Cuento con una niñera que se queda con los niños durante las noches cuando estoy fuera. Si ella no puede, mis padres me ayudan. Contrato a alguien que los lleve a sus actividades y los acompañe mientras estoy de viaje».

Manejando su tiempo entre las necesidades de la familia y sus actividades profesionales

Más que un equilibrio entre su vida familiar y profesional, describe sus actividades como una acción pendular:

«Honestamente, no creo que equilibrio sea la palabra correcta para describir lo que hago. Hay semanas en que los niños me necesitan mucho: cuando alguien está enfermo, cuando hay exámenes importantes, cuando mi hija está aprendiendo a manejar y se acerca el baile de graduación, cuando mis



Helen con la profesora Brina Montoya de la Universidad Estatal de Carolina del Norte. Son las presidentas de la conferencia ASCE 2027.

hijos ensayan para la obra escolar o se preparan para acampar con los scouts. Y hay semanas en que el trabajo es el que demanda la mayoría del esfuerzo: un plazo inminente, una propuesta grande que entregar, o un trabajo de recalce y levantamiento de un puente que solo puede hacerse de noche. Entonces no es un equilibrio: es más bien como un péndulo que oscila. Donde más me necesiten esa semana, allí pongo la energía, y la semana siguiente me concentro más, pero nunca únicamente, en lo otro».

Y este punto de vista lo enfatiza hacia las profesionales que recientemente se han convertido en madres:

«No deberíamos esperar que las personas — sobre todo las madres primerizas — mantengan todo en perfecto equilibrio. Esa expectativa es irreal y hace daño. La vida no es así».

La diversidad como un enfoque holístico necesario en la ingeniería

Helen no se limita a una actividad profesional. Está plenamente convencida de la importancia de la perspectiva interdisciplinaria e incorpora también las habilidades humanas:

«Creo firmemente que los equipos diversos toman mejores decisiones. Cuando todas las personas en una sala piensan igual, se pierden perspectivas valiosas. La diversidad —de género, de origen, de experiencia— enriquece la forma de abordar los problemas. Es más cómodo rodearse de personas similares, pero no es la mejor manera de trabajar.

También pienso que en ingeniería nos enfocamos demasiado en reclutar a quienes son buenos en matemáticas y ciencias, pero descuidamos la comunicación. Muchos ingenieros con sólidos conocimientos técnicos no saben comunicarse con el cliente o con el contratista, y eso genera problemas graves. Las habilidades de comunicación, colaboración, trabajo en equipo son tan importantes como las técnicas».

¿Y sus proyectos actuales?

«En este momento hay mucha actividad de mejoramiento de suelos en Estados Unidos. Me dedico principalmente al diseño de inclusiones rígidas —elementos instalados en depósitos de suelo blando— en obras a lo



Helen Robinson con Walter Paniagua en el Geo-Congreso 2026.



Helen con sus hijos y sus padres.

«Muchos ingenieros con sólidos conocimientos técnicos no saben comunicarse con el cliente o con el contratista, y eso genera problemas graves. Las habilidades de comunicación, colaboración, trabajo en equipo son tan importantes como las técnicas».

largo de todo el país, con una concentración importante en instalaciones portuarias en Texas, Louisiana y Georgia.

Recientemente, terminamos un proyecto en Hollywood Studios, en Disney World (Orlando, Florida): diseñamos el mejoramiento de suelos para la nueva zona temática de Monstruos, Inc. y su montaña rusa. También tengo un proyecto en la autopista de peaje de Nueva Jersey, donde diseñamos torres de soporte temporal que sostienen un puente mientras se demuelen y reconstruyen las pilas originales, deterioradas a través del tiempo. La presión es alta porque debemos concluir antes de la Copa del Mundo, que se disputará en estadios de Nueva Jersey y Filadelfia».

El 17º Taller Internacional de Micropilotes y su propuesta temática

Y sobre el 17º Taller Internacional de Micropilotes en 2027, un evento de resonancia internacional que se celebrará en Tequila (Jalisco), ofrece un panorama de temas esenciales que deberían tratarse:

«Sin duda, deben abordarse temas técnicos. En Estados Unidos, por ejemplo, estoy participando como coautora del nuevo manual de micropilotes de la Administración Federal de Carreteras (FHWA), que adopta el diseño LRFD (diseño por factor de carga y resistencia). Ese cambio es significativo y merece espacio en el programa.

Otros temas recurrentes y pendientes de resolución incluyen las uniones o empalmes entre tramos de micropilotes —siempre generan debate—, el uso del concreto Portland calizo, que lleva años empleándose en Europa pero es relativamente nuevo en Estados Unidos, y la promoción de la tecnología en general.

También me gustaría explorar la automatización: herramientas similares a las de medición en tiempo real que existen para otras cimentaciones profundas —que registran velocidad de perforación, presión de inyección de lechada— aplicadas a los micropilotes. Tener esa cantidad de datos permitiría aprender mucho más sobre el comportamiento de estas cimentaciones».

Grandes beneficios se derivan de involucrarse en actividades con la comunidad profesional

A las nuevas generaciones de ingenieros geotécnicos les ofrece orientaciones muy claras y pertinentes:

«Me encanta ser parte de la comunidad. No me conformo con estar sentada en mi escritorio haciendo cálculos: necesito ese sentido de pertenencia y conexión. Mi consejo es que descubran cómo involucrarse y qué pueden aportar, tanto a la industria como a su propio crecimiento.

Participar en organizaciones como ISSMGE, DFI, ISM o el Geo Institute ofrece oportunidades extraordinarias para crecer como profesional y para contribuir con algo significativo. Levanten la mano y ofrézcanse como voluntarios, aunque sientan que les falta experiencia. Los jóvenes de hoy tienen



Helen Robinson y Gabriella, su hija, el día del baile de graduación.

habilidades tecnológicas que muchos no tenemos: pueden crear videos, diseñar contenidos amenos y atraer a otras personas a la profesión. Escribir un artículo, participar en una conferencia, conocer colegas de otros países: todo eso acelera enormemente el desarrollo de un joven profesional».

Finalmente, Helen Robinson destaca que en la geotecnia, al igual que la vida, se trata de gestionar la incertidumbre, ya sea estabilizando un talud o ajustando el péndulo entre la familia, el diseño y la gerencia. Su legado es claro: la verdadera resistencia de una estructura —y de una carrera profesional— no reside en la rigidez, sino en la capacidad de integrar diferentes fuerzas para desarrollar un objetivo común.

Jarbas Milititsky: una trayectoria de logros

La comunidad internacional de ingeniería geotécnica perdió en febrero a uno de sus grandes pilares: el doctor Jarbas Milititsky.

Era graduado en Ingeniería Civil por la Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS). Estudió su maestría en Mecánica de Suelos/Geotecnia en la Universidad Federal de Río de Janeiro (COPPE/UFRJ), concluyendo sus estudios en 1972. En 1983 realizó su doctorado (PhD) en Ingeniería de Cimentaciones en la Universidad de Surrey, Reino Unido.

Fue profesor titular de Ingeniería Geotécnica en la UFRGS, donde dirigió disertaciones y tesis, contribuyendo a la formación de varias generaciones de ingenieros. Trabajó como consultor e ingeniero en Milititsky Geotechnical Consulting, desarrollando proyectos de investigación geotécnica, cimentaciones, muros de contención y patología de cimentaciones. Brindó servicios de consultoría para importantes instituciones como la Financiadora de Estudios y Proyectos (FINEP) y el Ministerio de Educación. Fue responsable de publicaciones técnicas y libros en el campo de la geotecnia, incluyendo temas sobre excavaciones urbanas y cimentaciones de torres, con amplias referencias prácticas para ingenieros.

Como expresidente de la ABMS, Jarbas fue pilar esencial para articular y expandir la presencia nacional de la sociedad, además de fortalecer las relaciones internacionales de la ingeniería geotécnica brasileña. También se desempeñó como vicepresidente de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE) para América Latina, tras su paso por la ABMS.

Traducción y adaptación de la reseña publicada en el sitio web de la Asociación Brasileña de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica: <https://www.abms.com.br/noticia/brasil-perde-grande-engenheiro-jarbas-milititsky>

Como expresidente de la ABMS, Jarbas fue pilar esencial para articular y expandir la presencia nacional de la sociedad, además de fortalecer las relaciones internacionales de la ingeniería geotécnica brasileña.



De izquierda a derecha: Walter Paniagua, Gabriel Auvinet y Jarbas Milititsky.



MASCHINEN

Grupo Luthe Ingeniería



EQUIPO DE PERFORACIÓN

Venta de equipo y herramienta

Refacciones

Servicio

Renta



DRILLMASTER



+52 722 264 2203

www.glimaquinaria.mx

ventas@glimaquinaria.mx

Av. Paseo Monte Miranda
No. 15, Oficina 805, Col.
Miranda, CP 76240
El Marqués Qro. México

Bardomiano Soria

Integración de Procesos de Ingeniería S.A. de C.V., México

Edwing Flores

Integración de Procesos de Ingeniería S.A. de C.V., México

Carlos Olivares

Integración de Procesos de Ingeniería S.A. de C.V., México

Luis Bernardo Rodríguez

Integración de Procesos de Ingeniería S.A. de C.V., México

Construcción de un cajón para conectar dos túneles en el Metro de la Ciudad de México

RESUMEN

Se describen los lineamientos técnicos para el proyecto denominado «Abocinamiento Sassoferato», una compleja conexión subterránea de la Ampliación de la Línea 12 (AL12) con la cola de la estación Mixcoac. Esta estructura, ubicada a 30 metros de profundidad en suelos tobáceos, requirió la demolición parcial del túnel existente y el diseño de un cajón a cielo abierto de grandes dimensiones (hasta 31 m de ancho y 100 m de largo), para integrar tres nuevas vías (dos principales y una de escape). El cajón utiliza un sistema de contención definitivo compuesto por muros de pilas con arcos de concreto lanzado, sistema de techo y tres niveles de troqueles y anclas, para asegurar la estabilidad a largo plazo bajo condiciones de empuje en reposo.

El procedimiento constructivo mixto, que combina elementos definitivos y de contención temporal, se ejecutó bajo la condición de generar deformaciones mínimas en el entorno urbano (viaducto elevado, edificaciones). El monitoreo de las deformaciones validó la pertinencia del método, registrando desplazamientos y asentamientos menores a 5 mm en las colindancias críticas, confirmando la estabilidad de la obra.

Palabras clave: obras subterráneas, conexión túneles.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de Ampliación de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México se desarrolla en el poniente de la capital con una solución subterránea de 4.8 km y se conecta con la Línea 12 existente a un costado del túnel de la cola de la Estación Mixcoac. Este proceso implicó un cambio de las vías secundarias de la cola de maniobras, para dar continuidad a las dos vías principales. Las condiciones geométricas de la vía forzaron la demolición parcial del túnel existente desplantado en una profundidad aproximada de 30 metros en la zona de la nueva intersección, denominada «Abocinamiento Sassoferato».

Los suelos del sitio corresponden a tobas de la formación Tarango, con una alta rigidez y resistencia al corte y ausencia de niveles freáticos. El diseño geotécnico y estructural del cajón de conexión se rigió principalmente por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF, 2017).

2. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

La AL12 del Metro de la Ciudad de México (CDMX) se ubica al poniente de la ciudad. Está constituida por dos estaciones de paso, Valentín Campa y Álvaro Obregón, más la estación terminal y de correspondencia Observatorio, y un depósito de trenes para 12 posiciones. Tiene una longitud de 4.8 km y es una solución subterránea.

La interestación Mixcoac – Valentín Campa de la Ampliación de la Línea 12 corresponde a una solución en túnel de sección circular compuesta, de 85 m² de área transversal, un diámetro horizontal de 10 m y una altura de 8.8 m para la operación del material rodante en dos vías paralelas. Este tramo se conectará con el túnel existente de la cola de maniobras para el depósito provisional de la estación Mixcoac. El túnel de la cola de maniobras tiene un área transversal de 77 m², un diámetro horizontal 11.3 m y una altura de 7.9 m.

Debido al crecimiento del área urbana en la zona del trazo y a las nuevas especificaciones geométricas de la vía establecidas para el material rodante, no fue posible darle continuidad a la Ampliación de la L12 siguiendo el trazo en el extremo del túnel de la cola de maniobras.

Con la AL12, el tramo de la cola de maniobras entre la conexión y la cabecera poniente de la estación Mixcoac cambia su funcionamiento a vía principal, requiriendo un nuevo proyecto que satisfaga la continuidad de dos vías entre Mixcoac y Valentín Campa. El resto del túnel de la cola de maniobras pasará a ser una vía de escape.

En la zona de conexión el túnel se bifurca hacia V. Campa y el nuevo trazo requiere demoler el túnel de la cola de maniobras en dicha zona. Este tramo de túnel se desplanta a una profundidad del orden de 30 m.

Los principales elementos del entorno urbano en la zona de la conexión son: el viaducto elevado del Periférico, edificaciones con uso industrial y habitacional e instalaciones municipales.

3. CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS

A partir de la campaña de exploración de la AL12 y el conocimiento geológico de la zona, Federico Mooser (2018) desarrolló la interpretación geológica que se muestra en la fig. 2 y donde se aprecia que la AL12 se ubica en suelos tobáceos, principalmente de la formación Tarango.

Estos suelos se clasifican dentro de la zona I o Zona de Lomas, de acuerdo con la zonificación geotécnica del RCDF.

La campaña de exploración para la conexión estuvo basada en cinco sondeos mixtos de hasta 40 m de profundidad, combinando las técnicas de la prueba de penetración estándar, la recuperación de muestras con tubo Denison y avance sin recuperación. En todos los sondeos se constató la ausencia de niveles freáticos.

Los parámetros mecánicos de los estratos se establecieron a partir de correlaciones con el número de golpes de



Figura 1. Trazo de la AL-12 y su conexión con la línea actual.

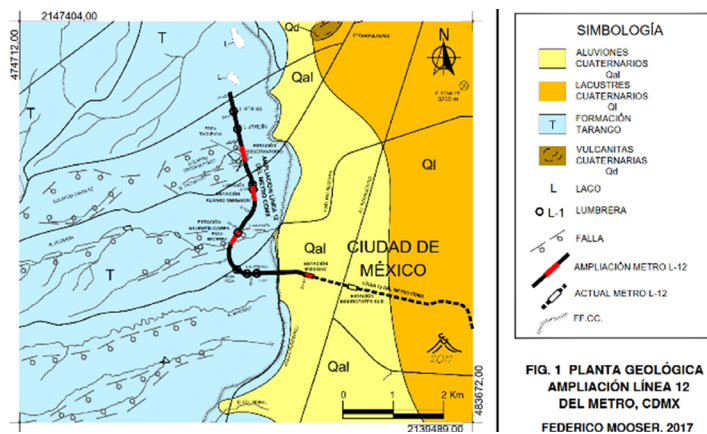


Figura 2. Planta geológica Ampliación Línea 12 del Metro, CDMX. Mooser (2018).

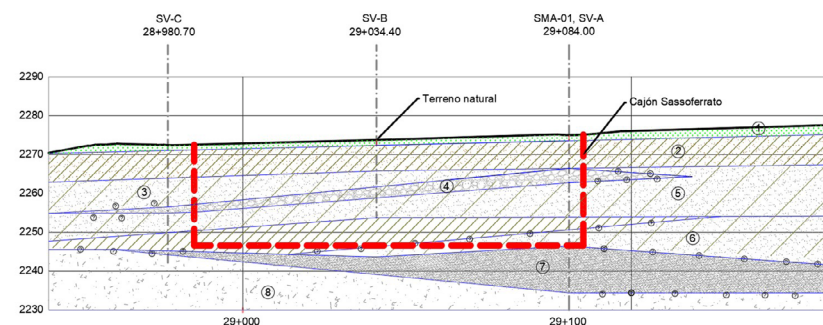


Figura 3. Perfil estratigráfico del sitio.

la prueba de penetración estándar, de los resultados de las pruebas de laboratorio y de los resultados de pruebas de presión y phicómetro realizados en materiales similares contiguos. En la fig. 3 se muestra la estratigrafía y en la tabla 1 los parámetros mecánicos definidos.

Tabla 1. Estratigrafía de diseño.

No.	Descripción	Golpes SPT	γ ton/m ³	c ton/m ²	Φ °	E kg/cm ²
1	Relleno	20 - 30	1.7	2.5	28	350
2	Arcilla arenosa	40	1.7	4.0	36	1300
3	Arena arcillosa con gravas	>50	1.8	5.0	38	1450
4	Boleos empacados en arcilla arenosa	>50	1.9	6.0	40	2000
5	Arena arcillosa con gravas	>50	1.8	5.0	38	1450
6	Arcilla arenosa	30 - 45	1.7	4.0	33	820
7	Boleos empacados en arcilla arenosa	>50	1.9	6.0	40	2000
8	Arena arcillosa con gravas	>50	1.8	5	39	1500

En relación con la evaluación del riesgo sísmico, la CDMX es afectada principalmente por sismos generados por la subducción entre las placas de Cocos y de Norteamérica con un epicentro ubicado a distancias de entre 300 y 700 km respecto a la CDMX. Son las fuentes con mayores energías registradas y que han causado las mayores afectaciones tanto humanas como económicas. El resto de los sismos, originados en la zona de la Cuenca del Valle de México o en sus inmediaciones, suelen caracterizarse por magnitudes y tiempos de duración menores respecto a la primera fuente indicada.

Debido a que los suelos donde se ubica la estructura son compactos, de alta rigidez y resistencia al corte, caracterizados con velocidades mayores a 600 m/s, no se generan amplificaciones de los movimientos sísmicos que requieran consideraciones particulares de diseño.

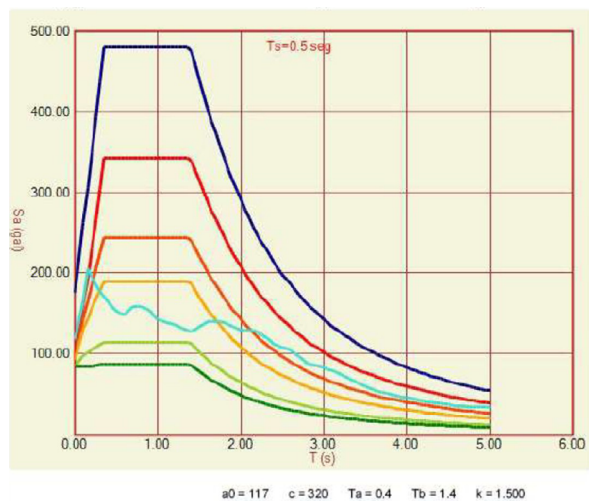


Figura 4. Espectro de diseño del sitio, proporcionado por el SASID.

El espectro de diseño sísmico para el sitio fue obtenido del Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, (2017) y se muestra en la fig. 4.

4. SOLUCIÓN DE LA CONEXIÓN DE LA AL12 CON LA L12, DENOMINADA «ABOCINAMIENTO SASSOFERRATO»

La geometría de la conexión se definió a partir del estudio de vías, aprovechando los espacios del túnel de la cola de maniobras en el extremo hacia Mixcoac y considerando la posición del nuevo túnel de tramo hacia V. Campa, más la del túnel original.

La posición del nuevo túnel se estableció considerando la proximidad del túnel existente y evaluando los principales efectos entre ambos: el desconfinamiento parcial del túnel existente durante la excavación, la sobrecarga del mismo túnel por la construcción del nuevo y el “pilar” que se genera entre las paredes de ambos túneles. De acuerdo con el estudio geotécnico, se decidió una separación mínima de 3 m entre las paredes de ambos túneles.

La solución geotécnica de la conexión se estableció considerando principalmente el requerimiento de demoler el túnel original controlando las deformaciones para no afectar el entorno urbano.

Para lo anterior se determinó una solución en cajón construido a cielo abierto que permitiera la demolición del túnel tras el retiro del material sobre su clave. Las dimensiones de este cajón, para alojar el nuevo trazo, tiene una longitud del orden de 100 m en la dirección paralela a las vías, un ancho de 17 m en el extremo que se unirá con el túnel hacia Mixcoac y un ancho de 31 m en el extremo que se articulará con los dos túneles: el de la vía de escape y el del nuevo tramo hacia V. Campa (ver fig. 5). La profundidad del cajón desde el nivel de terreno natural y hasta el desplante de la losa de fondo varía entre 28 y 30 m.

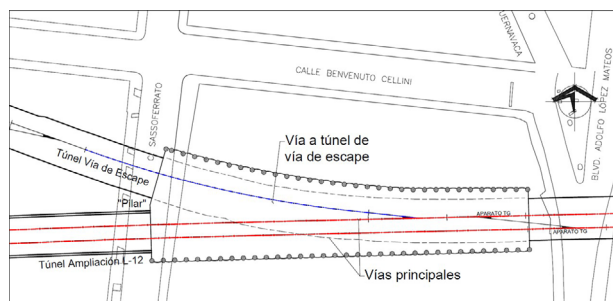


Figura 5. Planta del Abocinamiento Sassoferrato.

La estabilidad de los cortes de la masa de suelo paralelos a las vías se resolvió con muros constituidos por un sistema de 67 pilas de 1.20 m de diámetro espaciadas entre centros a cada 3 m y con arcos de concreto lanzado entre pilas. Estos muros se apoyan en la parte superior con el sistema de techo a base de armaduras metálicas, tabletas y un firme de compresión en la zona intermedia, con tres niveles de madrinas de concreto apoyadas en troqueles de concreto y en la parte inferior con una losa de fondo, también de concreto armado. Adicionalmente, entre la losa de fondo y el tercer nivel de puntales se proyectaron 3 niveles de anclas definitivas que reaccionan contra las pilas (ver fig. 6).

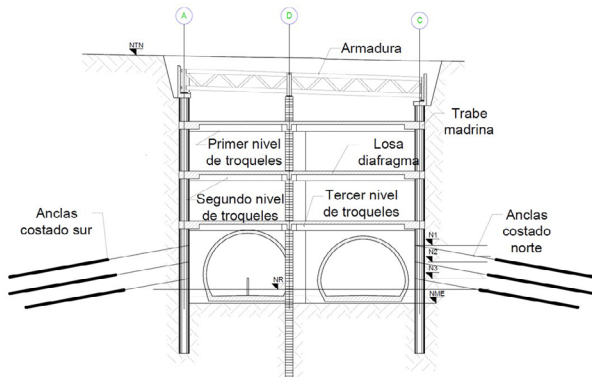


Figura 6. Alzado de la estructuración definitiva.

Para las paredes perpendiculares a las vías —que sirven además de emportalamiento para los túneles— se consideró un muro de concreto armado apoyado horizontalmente sobre el sistema de techo, la losa de fondo y tres losas diafragmas que distribuyen los empujes sobre las pilas en los mismos niveles de troqueles. En esta zona las pilas cuentan además con un muro de acompañamiento de concreto armado.

Sobre el sistema de techo se colocará un relleno para restituir el nivel de terreno natural de 1.20 m de espesor. El sistema de techo se apoya únicamente sobre las pilas laterales en los claros menores a 22 m, y para los claros mayores se apoya también sobre 5 pilas de 0.90 m de diámetro ubicadas en un tercer eje intermedio. Esta condición determina un doble trabajo para las pilas: primero, el de cimentación, y segundo, el de contención para las pilas laterales y el de columna para las centrales.

Finalmente, en el cajón se proyectó una salida de emergencia desde el nivel de las vías hasta la superficie —requerida para la seguridad del tramo—, dos galerías de ventilación natural y un cárcamo de bombeo.

5. ANÁLISIS Y DISEÑO GEOTÉCNICO

El diseño geotécnico y estructural del cajón se realizó considerando los criterios del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) en su versión 2017.

Para el diseño de las anclas se contemplaron los lineamientos indicados en el FHWA (1999). Para la evaluación de la capacidad de trabajo de las anclas se examinaron tanto los criterios para la ejecución de pruebas de aceptación y de desempeño por la normativa FHWA, así como los criterios indicados para las pruebas de carga sostenida por la norma de la SICT vigente.

5.1 Empujes en reposo

El diseño de los sistemas de muros de la estructura se estableció observando los empujes en reposo que corresponden al comportamiento previsto a largo plazo. Para su definición se evaluaron análisis de estado límite de falla, la interacción del suelo con la estructura valorando las teorías de la elasticidad y de la plasticidad, y el estado límite de falla establecido por el RCDF (2017). El resultado del estudio mostró que la condición más desfavorable corresponde a la especificada por el RCDF y fue la que rigió el diseño.

El estado límite de falla del RCDF para el empuje en reposo (P_{h0}), cuando está restringido el desplazamiento horizontal, se establece a partir de la siguiente ecuación $P_{h0} = K_0 (\gamma z + q)$, donde $K_0 = 0.5$ (valor mínimo de los esfuerzos horizontales respecto a los verticales), γ , corresponde al peso volumétrico de los estratos involucrados, z , a la profundidad respecto a la superficie del terreno natural y q , a la sobrecarga en la superficie.

La fig. 7 muestra el diagrama de empujes en reposo hasta una profundidad de 30 m, considerando los pesos volumétricos indicados en la tabla 1, $K_0 = 0.5$, y una sobrecarga $q = 1.5 \text{ ton/m}^2$, que satisface las condiciones de la vía pública y las impuestas por las edificaciones colindantes. Es conveniente reiterar que no existe nivel freático.

Todos los elementos estructurales se diseñaron considerando las cargas verticales y los empujes del suelo.

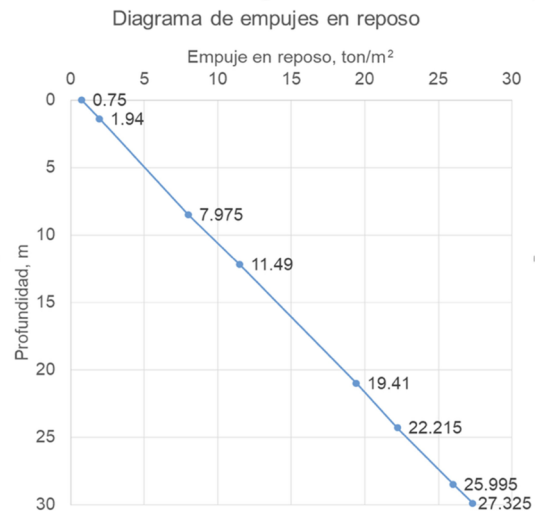


Figura 7. Diagrama de empujes en reposo de diseño.

5.2 Anclas definitivas

Las anclas definitivas se diseñaron sopesando las áreas tributarias que le corresponden a una profundidad comprendida entre 20 y 30 m (ubicación entre el tercer nivel de troqueles y la losa de fondo), con una separación horizontal de 3 m (en cada pila) y una separación vertical de 2 m. De acuerdo con estas áreas tributarias las anclas definitivas se diseñaron para una capacidad de trabajo de 130, 140 y 150 toneladas, para los niveles superior, intermedio e inferior, respectivamente.

Las características de las anclas son las siguientes: una inclinación respecto a la horizontal de 10°, una longitud de hasta 22 m compuesta por un tramo de longitud libre y 12 m de longitud de bulbo, torones de baja relajación de 0.6" de diámetro alojados en un barreno de 8", un bulbo constituido por lechada con una relación en peso agua-cemento < 0.45. La cabeza de cada ancla está compuesta por un sistema placa-pila.

En la fig. 8, se muestran los principales elementos del diseño de las anclas, así como la superficie de falla crítica y la distancia considerada detrás de esta para alojar el bulbo.

5.3 Capacidad de carga reducida en pilas

Atendiendo a las características estratigráficas del sitio y el nivel de deformación que se producirá en el empotramiento de las pilas se examinó un comportamiento para suelos friccionantes de acuerdo con lo establecido en el RCDF. Para la revisión de la capacidad de carga reducida de las pilas, se contempló la aportación, tanto de la fricción lateral en la longitud de empotramiento que se encuentra por debajo de la losa de fondo como la generada en la punta.

Los factores de reducción de resistencia fueron de 0.65 para la aportación por fricción lateral y de 0.35 para la aportación por punta, de acuerdo con el RCDF.

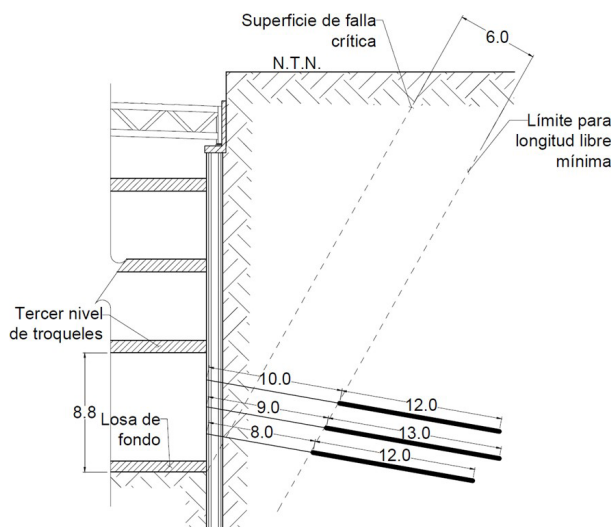


Figura 8. Configuración del sistema de anclas definitivas.

Examinando las magnitudes de los parámetros mecánicos indicados en la estratigrafía (tabla 1), para las pilas de 1.20 m de diámetro con 6.20 m de empotramiento, se obtuvo una capacidad de carga reducida, de 1,059 toneladas (96 t por fricción y 963 t por punta), la cual es mayor respecto a la mayor carga factorizada actuante sobre la pila, determinada por el análisis estructural, y que corresponde a 950 toneladas.

Para el caso de las pilas de 0.90 m de diámetro y con un empotramiento de 11.20 m, la capacidad de carga reducida corresponde a 1,592 toneladas (204 t por fricción y 1,388 t por punta), la cual es mayor que la máxima carga factorizada para este tipo de pila, determinada por el análisis estructural, y que corresponde a 1,500 toneladas.

5.4 Módulo de reacción de subgrado horizontal

Para el análisis estructural de los elementos mecánicos de las pilas se empleó un método de interacción suelo-estructura, donde el comportamiento del suelo se emuló con módulos de reacción de subgrado definidos a partir de los resultados mostrados en la tabla 1 y la iteración de resultados con los análisis geotécnicos.

Para la determinación de los módulos de reacción de subgrado se empleó el criterio sugerido por Bowles (1997) para suelos estratificados. Los resultados para los valores de kh de cada estrato se muestran en la tabla 2.

6. DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Como se indica en el apartado 4, se condicionó el procedimiento constructivo del cajón para que generara deformaciones despreciables al entorno urbano.

Se estableció un procedimiento mixto que combina, para la estabilización de la masa de suelo durante las excavaciones, la construcción de elementos definitivos para la contención de las paredes longitudinales y un sistema de contención temporal en las cabeceras.

Tabla 2. Módulos de reacción de subgrado horizontal.

Estrato	kh kg/cm ³
Arcilla arenosa	16.62
Boleos empacados en toba	35.04
Arena arcillosa con gravas	16.49
Arcilla arenosa	15.47
Arena arcillosa	21.11
Boleos empacados en toba	24.47

Tras la construcción de cada nivel de puntales definitivos, las excavaciones a cielo abierto se ejecutan entre los puntales colocados a cada 6 m y solo por debajo de las losas diafragmas, en las cabeceras se realizaron subexcavaciones (ver fig. 9).



Figura 9. Subexcavación por debajo de la losa diafragma.

Antes de las excavaciones se efectuaron obras inducidas para reubicar un colector de 61 cm de diámetro y una tubería de agua potable de 4" fuera de la zona de excavación. La posición del primer y segundo nivel de las anclas se determinó sin afectar estas instalaciones.

La primera etapa constructiva consistió en la construcción de todas las pilas, mismas que constituyen los elementos definitivos, tanto para la contención temporal como para la cimentación del sistema de techo. En el caso de las 5 pilas centrales, 4 de ellas atraviesan el túnel por demoler, por lo que fue necesario efectuar perforaciones en la bóveda y en la losa de túnel para el paso de la herramienta de perforación y el empleo de una cimbra para el colado de la pila dentro del túnel (ver fig. 10)

6.1 Secuencia de excavación

La excavación se cumplió en etapas verticales, permitiendo la construcción de los elementos de sostenimiento, tanto



Figura 10. Pilas centrales que atraviesan el túnel.



Figura 13. Excavación por debajo del segundo nivel de puntales.

definitivos como temporales tras descubrir cada posición. Luego de la excavación entre separación de pilas se estableció la masa entre ella con un arco de concreto lanzado de 20 cm de espesor. Se limitó cada avance de excavación a la colocación del sistema de contención previsto en cada nivel.

El sistema de contención temporal en las cabeceras se constituye por un muro de concreto lanzado de 15 cm de espesor, $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$, reforzado con malla electrosoldada y apuntalado por anclas, con una separación horizontal de 2.8 m y vertical de 3 m. Se emplearon 7 y 8 niveles de anclas para los muros oriente y poniente, respectivamente.

Este procedimiento permite excavar con profundidades desfasadas entre los muros cabeceros y los muros laterales, dada la diferencia de elevaciones de los sistemas de apuntalamiento. Para lo anterior se utilizaron taludes de avance longitudinales con altura máxima de 6 m.



Figura 14. Puntales instalados en el interior del túnel.

6.2 Estabilización del túnel existente

La excavación a cielo abierto conduce a un desconfinamiento gradual del túnel original modificando el estado de esfuerzos del suelo que lo confina y, por tanto, los elementos mecánicos de su revestimiento, toda vez que la carga vertical disminuye hasta desaparecer, mientras que los empujes laterales presentan cambios poco significativos.

Para garantizar la estabilidad del túnel y su capacidad de trabajo lateral, el procedimiento constructivo estableció la colocación de dos niveles de puntales temporales en el interior del túnel (ver figs. 13 y 14).

Una vez descubierta la clave del túnel existente, siguiendo la secuencia de excavación, se procedió a su demolición por etapas verticales. En esta etapa se realizó el retiro de los puntales temporales tras la estabilización de las pilas en la altura del túnel con los tres niveles de anclas definitivas para alcanzar el nivel máximo de excavación (ver fig. 15).

En esta última etapa de excavación, antes de construir la losa de fondo, la estabilidad de las paredes necesita el empostramiento de las pilas, por lo que dicha longitud en el diseño considera tanto el fenómeno de “pateo” como su trabajo normativo para soportar las cargas verticales del sistema de techo y la componente vertical derivada de los 3 niveles de anclas definitivas utilizadas para la contención a largo plazo.

Alcanzado el nivel máximo de excavación se construye la losa de fondo, que trabaja solo como puntal transversal de los sistemas de muros de la estructura y también de cimentación solo en la zona de los muros cabeceros, de los muros de acompañamiento y de las escaleras de la salida de emergencia. La losa de fondo considera las preparaciones para la construcción del cárcamo de bombeo y, sobre ella, se instala el sistema de vía.

Finalmente se construye el sistema de techo, la salida de emergencia y las galerías de ventilación. Sobre el sistema de techo se restituye el nivel del terreno natural con rellenos controlados de 1.20 m de espesor.



Figura 15. Tramo de túnel descubierto tras la excavación.

6.3 Diseño de muros y monitoreo de deformaciones

Para el diseño del sostenimiento temporal ante los empujes horizontales sobre los muros cabeceros se empleó el «Método de la Cuña», considerando una profundidad de 18.9 m correspondiente desde el nivel de terreno natural y la clave del túnel. Para la acción sísmica se utilizó el método pseudoestático de Mononobe - Okabe, con la información del espectro del SASID (ver diagrama de empujes en la fig. 16).

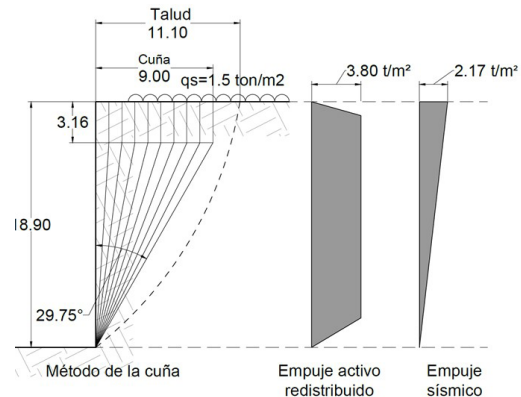


Figura 16. Empujes de diseño.

Las anclas temporales se diseñaron con capacidades de carga comprendidas entre 25 y 45 toneladas. La geometría de las anclas respetó la superficie potencial de falla ubicando los bulbos de anclaje detrás de esta. Se emplearon torones de baja relajación de 0.5” de diámetro. La ubicación, la inclinación de las anclas y la presión de inyección de los bulbos se definieron a partir de los empujes por contener, de la presencia de las instalaciones municipales y del túnel (ver fig. 17 y 18).

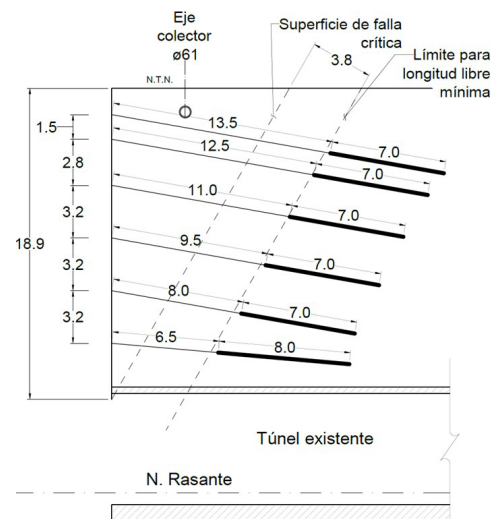


Figura 17. Corte transversal de diseño del sistema de anclaje oriente.



Figura 18. Anclas activas instaladas.

Para conocer el comportamiento de las deformaciones y el trabajo de los elementos establecidos en el procedimiento constructivo, se diseñó un sistema de monitoreo de deformaciones cuyos resultados se presentan en el siguiente apartado.

7. PRUEBAS EN ANCLAS

Para la verificación del trabajo de las anclas y su adecuado comportamiento se establecieron pruebas de desempeño, de aceptación (normativa FHWA) y de carga sostenida (normativa SICT).

Tanto en las pruebas de desempeño como en las pruebas de aceptación de cada ancla se evalúan dos diferentes criterios de aprobación: las deformaciones elásticas y las deformaciones registradas en el tiempo bajo carga sostenida (*creep*), verificando en ambos casos que se cumplan los límites permisibles establecidos en el proyecto. Al satisfacer ambos criterios, se procede a realizar la carga de bloqueo de cada ancla, la cual es 1.05 veces de la carga de trabajo.

El criterio de aceptación de la deformación elástica del ancla consiste en verificar que la deformación elástica medida en cada prueba de carga sea mayor que la deformación elástica mínima especificada (δ_{eme}) que le corresponde a cada ancla de acuerdo con su constitución, y menor a 1.5 veces la deformación δ_{eme} . Cuando se cumplen estos criterios se infiere que la longitud libre del ancla se ha respetado manteniendo la posición del bulbo fuera de la zona de falla generalizada.

El monitoreo de deformaciones en el tiempo bajo carga sostenida se realiza para evaluar que las deformaciones entre el bulbo del ancla y el suelo sean menores a los límites establecidos. Este criterio se considera a partir del último ciclo de carga para las pruebas de desempeño y aceptación, manteniendo la carga especificada durante un periodo de 10 minutos y registrando una deformación menor a 1mm. En caso de no cumplir con lo anterior, es factible mantener la carga especificada durante 50 minutos y se verifica que la deformación registrada sea menor a 2 mm.

Se establecieron 8 pruebas de desempeño para las anclas temporales y 14 para las anclas definitivas; para el resto de las anclas se decidieron pruebas de aceptación.

Las pruebas de carga sostenida se especificaron para el 10 % del total de las anclas, escogiendo un ancla aleatoriamente por cada lote de diez. En estas pruebas se verifica que al término de las 72 horas se mantenga en el ancla una carga mayor al 85 % de la carga inicial aplicada y que corresponde a una tensión de 1.2 de la carga de trabajo para las anclas temporales y de 1.33 para las anclas definitivas. De no cumplirse esta condición se considera que el ancla ha fallado y se realiza otra prueba del mismo lote; si esta segunda ancla falla, se prueban todas las anclas de dicho lote. Por el contrario, de registrarse que el ancla presenta un relajamiento menor al 15 % de la carga inicial aplicada se procederá a disminuir el tensado y se aplica la carga de bloqueo.

A la fecha de este escrito se han ejecutado pruebas de desempeño y de aceptación en todas las anclas temporales del muro cabecero oriente y del 80 % de las anclas de la pared poniente, así como 8 pruebas de carga sostenida. En todos los casos se ha cumplido con los criterios de aprobación establecidos por las normativas de la FHWA y de la SICT.

La fig. 19 muestra las gráficas de una prueba de desempeño y la fig. 20 una de aceptación, realizadas durante la construcción y que son representativas del resto de las pruebas.

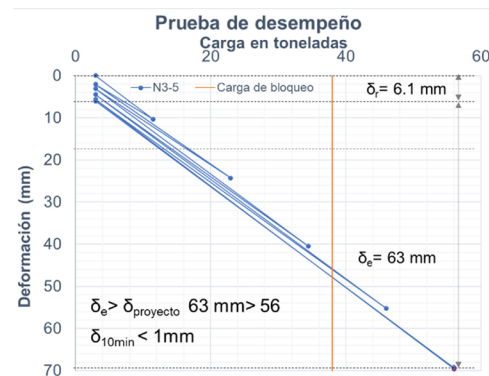


Figura 19. Gráfico de la prueba de desempeño, ancla N3-5.

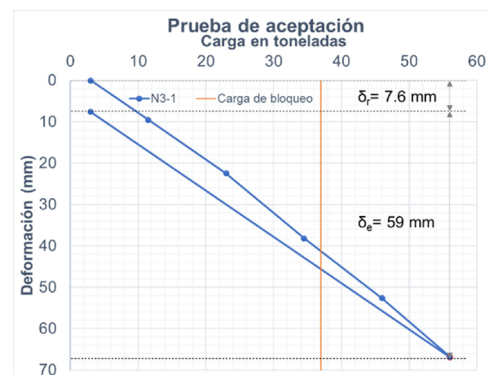


Figura 20. Gráfico de la prueba de aceptación, ancla N3-1.

8. SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y RESULTADOS REPRESENTATIVOS

El sistema de instrumentación estableció mediciones e interpretaciones periódicas, inspecciones visuales cotidianas y definición de umbrales para la evaluación del riesgo para las edificaciones colindantes, las paredes verticales (tanto definitivas como temporales), el viaducto elevado y en el interior del túnel por demoler.

La fig. 21 muestra la ubicación de los puntos de control para la elaboración de los historiales de deformación generados por la construcción del cajón.



Figura 21. Planta de ubicación de referencias topográficas.

Los historiales de deformación constatan la premisa de proyecto para generar deformaciones mínimas con el procedimiento constructivo empleado.

Para ilustrar lo anterior se presentan los siguientes gráficos representativos:

La fig. 22 muestra los asentamientos verticales del apoyo del viaducto elevado más cercano a la excavación (13.5 m), que registra una magnitud menor a 4 mm.

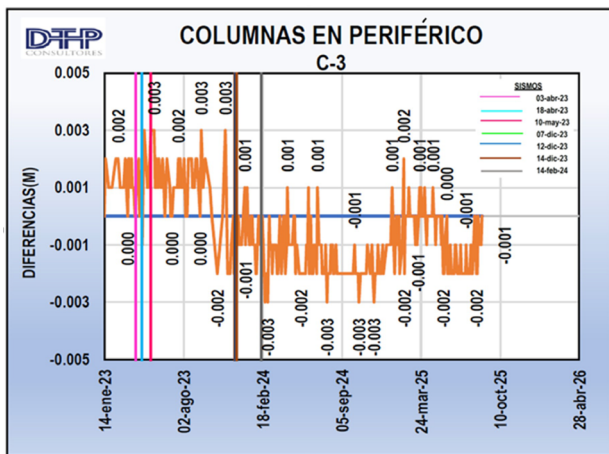


Figura 22. Historial de deformación en referencia C-3 en columna de Periférico. (Figura proporcionada por la ATTRAPI y la SE).

La fig. 23 muestra que las deformaciones horizontales hacia la excavación en el sistema de contención temporal de la cabecera hacia Mixcoac, contigua a Periférico, no excede los 2 mm.

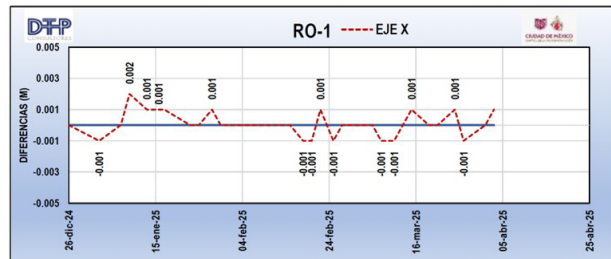


Figura 23. Historial de deformación horizontal en referencia RO-1 sobre el muro cabecero poniente. (Figura proporcionada por la ATTRAPI y la SE).

La fig. 24 muestra que las deformaciones horizontales de una pila contigua en la zona de demolición de la clave del túnel no exceden los 3 mm.

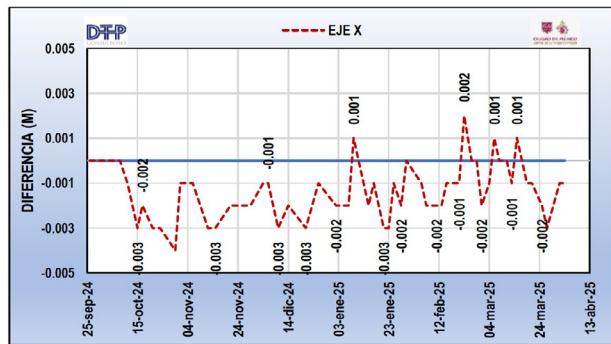


Figura 24. Historial de deformación horizontal en pila A-30. (Figura proporcionada por la ATTRAPI y la SE).

Con base en los resultados de instrumentación se observó un comportamiento estable sin riesgos para la estabilidad de la estructura y de las colindancias.

9. CONCLUSIONES

Tras la excavación de 22 m de profundidad del cajón se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- Durante las excavaciones se constató que el modelo geotécnico adoptado se correspondió con los materiales encontrados durante las excavaciones.
- El procedimiento constructivo establecido resolvió la problemática de unir dos túneles, demoliendo el tramo de uno de ellos, en condiciones favorables de seguridad.

Los elementos de la estructura definitiva fueron usados durante las excavaciones como elementos de contención y mostraron un comportamiento satisfactorio.

- Los historiales de las deformaciones de las colindancias y de los elementos de contención han registrado deformaciones de 5 mm a la fecha con un avance de excavación de 22 m de profundidad y faltando 8 m para alcanzar el fondo. La construcción del cajón no ha afectado el comportamiento del viaducto elevado.
- A la fecha se han realizado pruebas de desempeño, de aceptación y de carga sostenida en todas las anclas de la pared oriente y del 80 % de las anclas de la pared poniente, satisfaciendo en todos los casos los criterios de aprobación establecidos por las normativas de la FHWA y de la SICT.
- La demolición del túnel se ha ejecutado en las condiciones de seguridad establecidas en el proyecto y no ha generado inestabilidades en las paredes de contención del cajón. A la fecha se han demolido 18 m de la clave del túnel.

REFERENCIAS

Bowles, J.E. (1997). Foundation analysis and design. 5th edition. McGraw-Hill, Singapore.

Gobierno de la Ciudad de México (2017). "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones". Ciudad de México.

Mooser F. (2018). "Geología del Valle de México y otras regiones del país. Volumen I." Publicación Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C., Ciudad de México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT (2000). "Construcción de Carreteras, capítulo: anclas". Norma No. N•CTR•CAR•1•01•016/00. México.


US Department of Transportation: Federal Highway Administration, USDT: FHWA (1999). "Geotechnical Engineering Circular No. 4: Ground anchors and anchored systems". Publication No. FHWA-IF-99-015. Washington DC.

Apreciamos su opinión e información sobre el tema de este artículo.

✉ Escribanos a norma@xantus.com.mx



Pilotec
Cimentaciones Profundas



Pilas
Muros milán
Tablestacas
Pruebas de carga estática
Pruebas de carga bidireccional
Pilotes
Anclas
Pantallas flexoimpermeables
Sistemas de anclaje
Pruebas de integridad
Consultoría y diseño geotécnico

Antonio Marinucci

V2C Strategists, Inc.

Evangelia S. Leronymaki

Maze Analysis, Inc.

Desempeño de diferentes sistemas de soporte de excavaciones en diversas condiciones del suelo

Artículo publicado originalmente en Foundation Drilling Magazine, ADSC, August/September 2025.

El uso generalizado de los sistemas de soporte de excavaciones (SOE, por sus siglas en inglés) en excavaciones profundas y complejas se debe a su rentabilidad y a sus tiempos de construcción más cortos en comparación con los muros de contención tradicionales. Los avances tecnológicos recientes en modelación analítica y en equipos de construcción han ampliado su uso, especialmente en zonas urbanas, donde el control preciso del movimiento del terreno es crucial para proteger las estructuras circundantes. Aunque existen amplias guías técnicas para diseñar muros SOE en términos de estabilidad estructural, evaluar los movimientos del terreno y del muro sigue siendo un desafío. Las prácticas actuales suelen basarse en correlaciones empíricas o en software especializado, pero criterios de desempeño excesivamente conservadores pueden conducir a mayores costos y limitar la aplicabilidad práctica.

A pesar de los avances, cuantificar los diversos factores que influyen en los movimientos del terreno y del muro es complejo. Estos factores incluyen la variabilidad geotécnica, las técnicas de construcción, la robustez del diseño del sistema, los efectos dependientes del tiempo, la mano de obra y el control de calidad. Aunque las relaciones empíricas, como las definidas por Peck (1969) y Clough y O'Rourke (1990), aún se usan ampliamente, los métodos de diseño actuales carecen de orientación detallada y respaldada por datos sobre tolerancias de deformación. Esto hace necesario integrar métodos analíticos modernos con datos medidos de desempeño para refinar las especificaciones de proyecto.

Este estudio de investigación abordó esa brecha mediante la consolidación de un conjunto extenso de datos y la formalización de criterios prácticos de deformación para sistemas de muros SOE a través de diferentes condiciones del terreno.

Las recomendaciones basadas en datos para valores límite superiores de desplazamientos proporcionan un marco racional y empíricamente respaldado para los propietarios y las partes interesadas del proyecto. Este marco permite ofrecer orientación personalizada según los requisitos específicos del proyecto, equilibrando la practicidad, la seguridad y la flexibilidad en la aplicación. Este artículo presenta el análisis y los resultados únicamente para los desplazamientos horizontales de muros SOE.

CONJUNTOS DE DATOS Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Como parte de este esfuerzo de investigación, se compiló una base de datos extensa, que consistió en 1,515 conjuntos de datos publicados de casos históricos globales, los cuales comprenden muros SOE, profundidades de excavación (o alturas de muro), sistemas de soporte lateral, rigidez del sistema, tipos de suelo predominantes, desplazamientos horizontales del muro y movimientos verticales del terreno. El estudio analizó varios tipos de sistemas de muros SOE, como muros pantalla y muros de pilas secantes/tangentes, así como diferentes mecanismos de soporte lateral, incluidos anclajes, puntales y losas de piso. Las condiciones del terreno encontradas en los casos analizados fueron perfiles estratificados complejos y roca, y se agruparon de forma general en cuatro categorías basadas en las características predominantes del suelo: suelos granulares gruesos, suelos finos, suelos blandos mixtos y suelos blandos sobre roca.

Es importante señalar que en algunos conjuntos de datos faltaba información debido a limitaciones en la recopilación o en el reporte de datos por parte de los autores originales. Aunque amplia, la literatura técnica disponible a menudo carecía de detalles cruciales sobre la intención del diseño del proyecto, las especificaciones del diseño y los procedimientos y la metodología de construcción, lo que dificultaba explicar plenamente los comportamientos observados en los muros. Si bien la mayoría de los casos reportados no indicaron fallas del sistema, algunos de los movimientos significativos documentados podrían constituir un diseño inadecuado.

El análisis del desempeño de los muros SOE incluyó la evaluación cuantitativa de parámetros clave, tales como H_e , EI , $\delta_{h,max}$ y $\delta_{v,max}$. La notación y abreviaturas se presentan en la tabla 3. Al observar el conjunto de datos en su totalidad, los rangos de los valores reportados son los siguientes: $H_e = 7.5$ a 128 pies; $EI = 708,410$ a 11,847,847 kips-in²; $\delta_{h,max} = 0.01$ a 17.3 pulgadas; y $\delta_{v,max} = -0.3$ (expansión) a 39.4 pulgadas. Los datos se clasificaron según los tipos de muros SOE, las condiciones del terreno y los sistemas de soporte

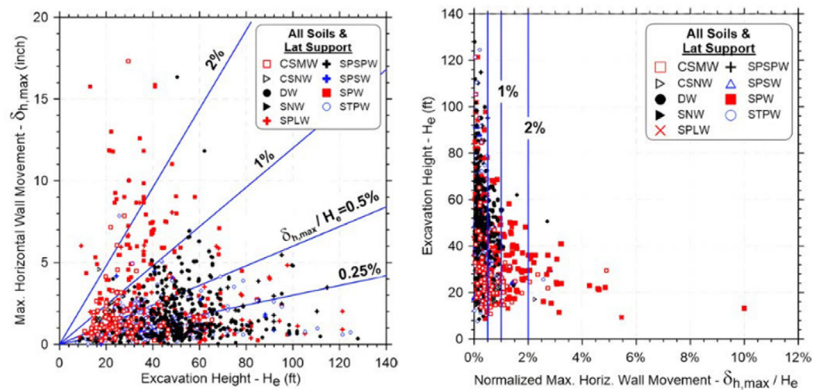


Figura 1. Desempeño para diferentes tipos de muros SOE – (izquierda) $\delta_{h,max}$ y (derecha) $\delta_{h,max}/H_e$ vs. H_e , sin importar las condiciones del suelo ni el mecanismo de soporte lateral.

lateral del muro, lo que permitió que el análisis considerara la amplia variedad de condiciones de sitio y configuraciones de muro encontradas en la práctica. Para facilitar la comparación entre escenarios diversos, $\delta_{h,max}$ y $\delta_{v,max}$ se normalizaron por H_e , obteniéndose $\delta_{h,max}/H_e = 0.01\%$ a 10.0% y $\delta_{v,max}/H_e = -0.05\%$ a 10.3% , respectivamente. Este marco sistemático proporcionó una base coherente para evaluar el desempeño —permitiendo identificar tendencias y variaciones tanto en los movimientos horizontales como verticales del muro y en los desplazamientos del terreno bajo diferentes condiciones— y confirmar su influencia en el comportamiento.

INTERPRETACIÓN BASADA EN EL TIPO DE MURO SOE

Al considerar todos los tipos de muros SOE, la gran mayoría de los datos mostró $\delta_{h,max}/H_e$ por debajo del 1% (fig. 1, izquierda), con una mediana de 0.30%, pero un promedio de 0.47%. Los tipos de muro más rígidos, como los DW y STPW, generalmente presentaron deformaciones horizontales menores, con la mayoría de los puntos de datos por debajo de $\delta_{h,max}/H_e = 0.5\%$, y con valores de mediana y promedio de aproximadamente 30 mm y 43 mm, respectivamente. Por el contrario, los sistemas más flexibles, como los SPLW y SPW, mostraron deformaciones mayores, con muchos casos que superaron $\delta_{h,max}/H_e = 2\%$, particularmente en excavaciones someras (menos de 45 pies). A pesar de estos porcentajes más elevados, la mediana y el promedio de $\delta_{h,max}$ para los muros flexibles fueron de aproximadamente 12 mm y 24 mm, respectivamente, valores que numéricamente resultaron menores que los de los muros más rígidos.

INTERPRETACIÓN BASADA EN EL MECANISMO DE SOPORTE LATERAL

Los desplazamientos del muro y del terreno también variaron considerablemente dependiendo del tipo de sistema de soporte lateral utilizado para sostener el muro SOE. En

general, $\delta_{h,max}$ y $\delta_{h,max}/H_e$ aumentaron conforme disminuyó la profundidad de excavación. Algunos muros más cortos (menores de 50 pies) sostenidos con puntales, anclas o losas de piso mostraron valores de $\delta_{h,max}/H_e$ entre 2% y 5%, lo que sugiere posibles diseños inadecuados o problemas de instalación (fig. 2). Algunos muros en voladizo, a pesar de no contar con soporte y exceder sus límites prácticos de diseño, exhibieron movimientos dentro del mismo rango.

Al agruparlos según el tipo de soporte lateral, los muros SOE sostenidos con anclas y puntales + vigas madrina fueron los sistemas más frecuentemente reportados, junto con los muros en voladizo. En los muros sostenidos con anclas, aunque la mayoría de los valores de $\delta_{h,max}/H_e$ fueron inferiores a 0.5%, la dispersión aumentó conforme disminuyó la altura del muro, con algunos valores atípicos que superaron el 2%. Los muros SOE sostenidos con anclas + puntales y puntales + bermas generalmente mostraron deformaciones muy pequeñas, con la mayoría de los datos por debajo de $\delta_{h,max}/H_e = 0.25\%$. Los muros sostenidos con riostras inclinadas + anclajes, puntales + riostras inclinadas, losas de piso, o solo riostras inclinadas, presentaron valores promedio cercanos a $\delta_{h,max}/H_e = 0.5\%$. Cabe destacar que los muros sostenidos con losas de piso exhibieron una amplia gama de movimientos, y algunos DW mostraron desplazamientos significativos.

Los muros sostenidos con puntales + arriostramiento también mostraron una variabilidad considerable, con muchos puntos de datos que superaron $\delta_{h,max}/H_e = 2\%$ en muros más cortos, y los SPW presentaron los mayores desplazamientos normalizados. De manera sorprendente, los muros en voladizo no mostraron consistentemente los mayores valores de $\delta_{h,max}$ en comparación con algunos muros arriostrados o anclados, particularmente en aquellos con alturas menores a 50 pies. Aunque los datos de muros en voladizo fueron dispersos, el promedio de $\delta_{h,max}/H_e$ fue de aproximadamente 0.45%, con algunos valores atípicos que se acercaron o incluso superaron el 2%.

INTERPRETACIÓN BASADA EN LAS CONDICIONES DEL TERRENO

Para los suelos finos (fig. 3), los valores de $\delta_{h,max}/H_e$ fueron bastante variados, con algunos datos atípicos que alcanzaron hasta 10% en muros SOE con baja rigidez. Además, estos movimientos fueron al menos el doble de grandes que los observados en otros tipos de suelo, independientemente de la rigidez del muro. Los muros más rígidos (DW y STPW) generalmente mostraron valores menores de $\delta_{h,max}/H_e$ (promedio = 0.33%) en comparación con los muros más flexibles

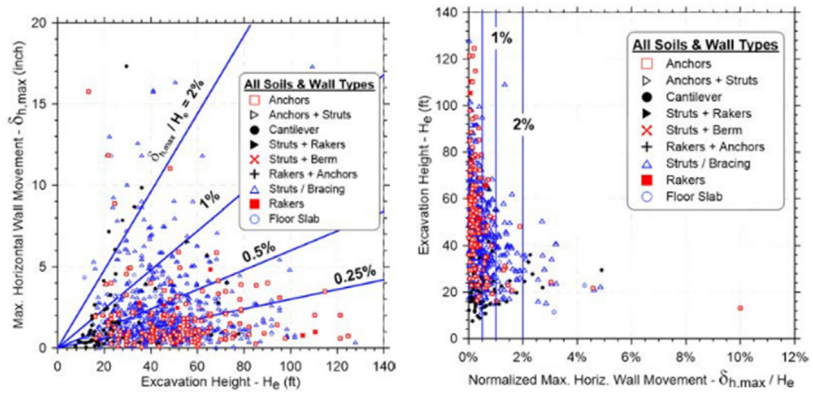


Figura 2. Desempeño para diferentes sistemas de soporte lateral – (Izquierda) $\delta_{h,max}$ y (derecha) $\delta_{h,max}/H_e$ vs. H_e , sin importar las condiciones del suelo ni el tipo de muro.

(SPLW y SPW), que presentaron valores notablemente mayores (promedio = 1.0%), con algunos SPW alcanzando el 10%. Al considerar el impacto de los sistemas de soporte lateral en los movimientos y la rigidez del muro, se observó que los DW apoyados con puntales + arriostramiento en suelos finos presentaron movimientos aproximadamente tres veces mayores que los DW con rigidez comparable en suelos blandos mixtos. Los DW apoyados con anclas produjeron consistentemente los valores más pequeños de $\delta_{h,max}/H_e$ (promedio cercano a 0.1%). Los muros en voladizo y aquellos sostenidos mediante losas de piso, puntales o arriostramiento mostraron movimientos aproximadamente 20% mayores que los muros apoyados con anclas, observándose los desplazamientos más grandes en los DW con puntales + arriostramiento (promedio $\delta_{h,max}/H_e = 0.25\%$).

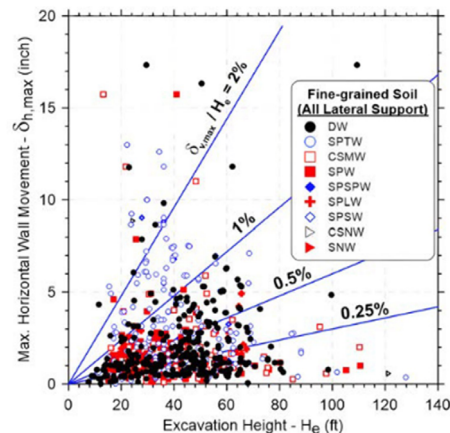


Figura 3. Desempeño en suelos finos – $\delta_{h,max}$ vs. H_e , sin importar el tipo de muro ni el sistema de soporte lateral.

En los suelos gruesos, los valores de $\delta_{h,max}/H_e$ generalmente se mantuvieron por debajo de 0.6 %, con los muros más rígidos mostrando deformaciones horizontales menores que los sistemas de muro más flexibles, aunque hubo algunos SPW con $\delta_{h,max}/H_e > 1.0$ % (fig. 4). Además, no se observó una tendencia clara relacionada con la rigidez. Los movimientos de los muros más rígidos (DW, STPW) promediaron $\delta_{h,max}/H_e = 0.20$ %, mientras que los movimientos de los muros flexibles (SPW) promediaron $\delta_{h,max}/H_e = 0.6$ %. Los DW sostenidos con anclas mostraron desplazamientos horizontales aproximadamente 60 % menores en comparación con aquellos sostenidos con puntales + arriostramiento y con rigidez similar. Esta reducción de desplazamientos con el uso de anclas también se observó en los DW en suelos finos.

Para suelos blandos mixtos se observó una gran dispersión en los movimientos horizontales del muro, en la cual los desplazamientos mayores correspondieron a sistemas con menor rigidez, y la mayoría de los datos se ubicaron por debajo de $\delta_{h,max}/H_e = 0.6$ % (fig. 5). Los muros más rígidos (DW, STPW) presentaron un promedio de $\delta_{h,max}/H_e = 0.33$ %, pero los valores atípicos de los muros más flexibles alcanzaron desplazamientos normalizados significativamente mayores (por ejemplo, $\delta_{h,max}/H_e = 4.6$ % para SPW y 5.5 % para SPLW).

Para suelos blandos sobre roca, los datos disponibles indicaron una respuesta mucho más rígida, con $\delta_{h,max}/H_e$ en su mayoría por debajo de 0.5 % (fig. 6). Los DW mostraron movimientos normalizados del muro principalmente menores a 0.1 %, mientras que los STPW y los muros Berlín también presentaron movimientos relativamente bajos (entre 0.2 % y 0.5 %). Sin embargo, un solo caso de SPW mostró desplazamientos horizontales significativamente mayores ($\delta_{h,max}/H_e = 1.3$ %).

LÍMITES ADMISIBLES DE DESPLAZAMIENTO

El análisis indicó que los sistemas de muros SOE pueden soportar un amplio rango de desplazamientos horizontales del muro y movimientos verticales del terreno sin daños reportados en el muro ni en las estructuras cercanas. Este hallazgo cuestiona la práctica actual de utilizar valores absolutos como criterios de aceptación para los movimientos horizontales del muro y los movimientos verticales del terreno (por ejemplo, 1 o 2 pulgadas). Como alternativa, este estudio propone un enfoque más matizado para los criterios de diseño de muros SOE, centrado en límites máximos normalizados ajustados a las condiciones específicas de cada proyecto, en lugar de límites absolutos excesivamente conservadores y restrictivos.

La recomendación es utilizar valores límite superiores basados en datos

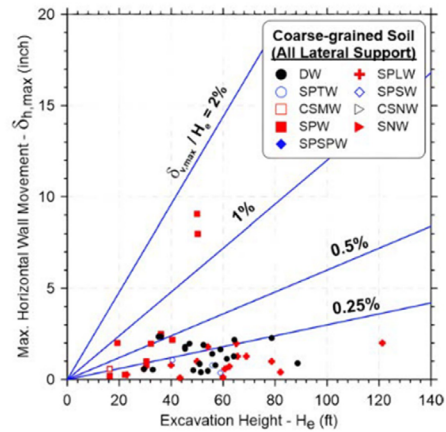


Figura 4. Desempeño en suelos gruesos – $\delta_{h,max}$ vs. H_e , sin importar el tipo de muro ni el sistema de soporte lateral.

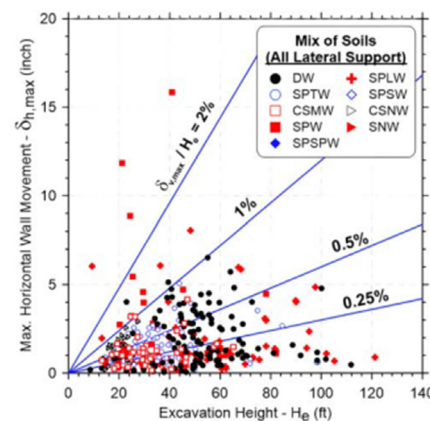


Figura 5. Desempeño en suelos blandos mixtos – $\delta_{h,max}$ vs. H_e , sin importar el tipo de muro ni el sistema de soporte lateral.

Tabla 1. Valores límite superiores observados de $\delta_{h,max}/H_e$ basados en los datos reportados.

Tipo de muro	Suelo fino	Suelo granular grueso	Suelo mixto	Suelo blando sobre roca
DW	1.0 %	0.5 %	1.0 %	0.1 %
STPW	1.0 %	0.2 %	1.0 %	0.4 %
SPLW, SPSPW, SPSW	2.0 %	0.2 %	1.5 %	0.5 %
SPW	3.5 %	1.0 %	3.0 %	-
CSMW	2.0 %	-	1.0 %	-
CSNW	1.5 %	-	1.0 %	-

para los movimientos de muro y de terreno (tablas 1 y 2), los cuales están normalizados por la profundidad de excavación (H_e) y ajustados de acuerdo con el tipo de suelo predominante y el sistema de soporte lateral. Estos umbrales se derivaron de análisis estadísticos para diversos escenarios, excluyendo valores atípicos y valores únicos excepcionalmente altos. Estos valores límite superiores representan los movimientos máximos observados del muro en los cuales no se reportó falla del muro ni daños estructurales. En los casos donde no existieron datos o estos fueron limitados, no se reportan los umbrales recomendados. Si bien estos valores no representan límites estrictos, estas directrices buscan reducir el riesgo, definiendo “falla” como el colapso del muro con pérdida asociada de terreno. Es importante señalar que la literatura no indicó de manera consistente si se aplicaron medidas correctivas cuando, o si, se excedieron los movimientos permisibles.

Fue evidente que el tipo de suelo es uno de los factores cruciales que gobiernan los umbrales límite. Las deformaciones en suelos finos y suelos blandos mixtos fueron mucho mayores que aquellas medidas en suelos gruesos y en suelos blandos sobre roca, independientemente del tipo de muro SOE y del sistema de soporte lateral. Además, para un mismo tipo de suelo, los SPW presentaron las deformaciones más grandes, lo cual también correspondió a mayores movimientos verticales del terreno detrás del muro. Al comparar las respuestas del mismo tipo de muro para cada uno de los sistemas de soporte lateral en diferentes condiciones de terreno, se observaron mayores movimientos horizontales en los

Tabla 2. Valores límite superiores observados de $\delta_{h,max} / H_e$ en los DW, STPW y SPW para diversos sistemas de soporte lateral, según los datos reportados.

Tipo de suelo	Sistema de soporte	DW	STPW	SPW
Suelo fino	Puntales / Arriostres	1.0 %	1.0 %	3.2 %
	Anclas	0.6 %	0.7 %	4.6 %
	Top-Down	0.8 %	0.4 %	-
	Voladizo	0.4 %	-	-
Suelo grueso	Puntales / Arriostres	0.6 %	-	1.5 %
	Anclajes	0.4 %	0.5 %	2.0 %
Suelo mixto	Puntales / Arriostres	0.3 %	0.1 %	1.0 %

muros SOE soportados con puntales y arriostres. En general, los mayores desplazamientos horizontales de los muros se observaron en muros de tablestacas soportados con anclas.

CONCLUSIONES

Esta investigación analizó 1,515 casos estudio de todo el mundo y presentó aportaciones para propietarios de proyectos y profesionales, destacando la influencia del tipo de muro, los mecanismos de soporte lateral, las condiciones del terreno y la rigidez del sistema sobre las deformaciones horizontales del muro y verticales del terreno. Algunos de los puntos clave de este trabajo incluyen:

- La rigidez del muro es importante: Los muros más rígidos (DW, STPW y SPSW) generalmente presentaron deformaciones horizontales menores en comparación con los muros más flexibles (SPW y SPLW).
- Impacto del soporte lateral: Las anclas y los puntales generalmente resultaron en deformaciones menores, mientras que los arriostramientos mostraron una variabilidad considerable. En algunos casos, los muros en voladizo tuvieron un desempeño mejor que los muros SOE con un soporte lateral (aparentemente) inadecuado.
- Las condiciones del terreno son fundamentales: Las deformaciones fueron consistentemente mayores en suelos finos y en suelos blandos mixtos, en comparación con suelos granulares gruesos y suelos blandos sobre roca, independientemente del tipo de muro SOE o del sistema de soporte lateral empleado.

El estudio propone reemplazar los límites absolutos de desplazamiento por valores umbral normalizados máximos, ajustados según el tipo de suelo y el sistema de soporte lateral. Para lograrlo, el componente crítico es la necesidad de una recopilación de datos exhaustiva, de alta calidad y consistente durante la construcción y operación, que incluya el proceso de excavación, las características del muro, los detalles del soporte lateral y los desplazamientos espaciales y temporales del muro y del terreno, todos vinculados con la

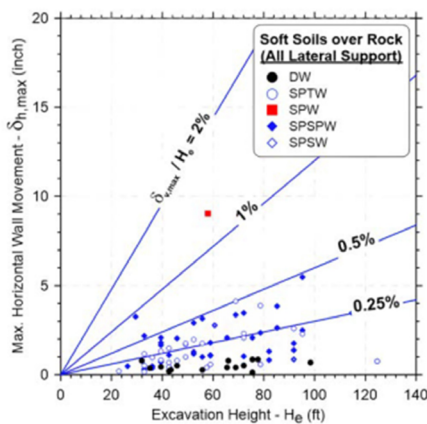


Figura 6. Desempeño en suelos blandos sobre roca – $\delta_{h,max}$ vs. H_e , sin importar el tipo de muro ni el sistema de soporte lateral.

secuencia constructiva y los factores externos. Esta recopilación meticulosa de datos es fundamental para refinar futuros modelos y desarrollar parámetros de desempeño específicos del proyecto, orientados hacia diseños de muros SOE más resilientes.

REFERENCIAS

Clough, G. y O'Rourke, T. (1990). «Construction-induced movements of in situ walls, Design and Performance of Earth retaining Structures», ASCE Special Publication No. 25.

Peck, R. (1969). «Deep excavation and tunneling soft ground». Proceedings VII International Conference on Soil mechanics and Foundation Engineering, México, D.F.

Documento traducido por Miguel Mánica y revisado por Walter Paniagua.

Apreciamos su opinión e información sobre el tema de este artículo.

✉ Escribanos a norma@xantus.com.mx

Tabla 3. Lista de símbolos y abreviaciones.

$\delta_{h,max}$	Desplazamiento horizontal máximo del muro
$\delta_{h,max} / H_e$	Desplazamiento horizontal máximo normalizado del muro
$\delta_{v,max} / H_e$	Desplazamiento vertical máximo del suelo detrás del muro SOE normalizado
CSMW	Muro de soil mixing compuesto
CSNW	Muro de soil nailing compuesto
DW	Muro pantalla
H_e	Altura del muro o profundidad de la excavación
EI	Rigidez ante el momento flexionante
SOE	Sistemas de soporte de excavaciones
SNW	Muro de soil nailing
SPW	Muro de tablestacas
SPLW	Muro de tablestacas con muro Berlín
SPSW	Muro Berlín con tablestacas
SPSPW	Muro Berlín y/o de tablestacas
STPW	Muro de pilotes secantes/tangentes



Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.
Mesa Directiva 2025-2026

HISTORIAS QUE CONSTRUYEN INGENIERÍA

En el marco del Día Internacional de la Mujer en la Ingeniería

 **05:00 PM**
(Hora de la Ciudad de México)

 **Modalidad:** Virtual
REGISTRO LIBRE
https://us02web.zoom.us/join/register?reg=WN_c7TMbD_9Qq-Q7j0Jc6ZzRQ

 **Moderadoras:**
Alexandra Ossa
Yoleida Suárez Arellano



Elvira León Plata



Erika Elaine Bernal



Tania García Mejía



**Marijessus Contreras
Urreta**



Mayra Camacho Godínez



Andrea Medina Ramírez

23 de
JUNIO
2026

Alberto Ledesma

Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España

Enrique Romero

Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España

Pere C. Prat

Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España

Anna Ramon

Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España

Nuria M. Pinyol

Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España

Incorporación de conceptos de suelos no saturados en cursos de licenciatura: la experiencia de la UPC

Traducción al español del artículo

Ledesma, A., Romero, E., Prat, P. C., Ramon, A. & Pinyol, N. M. (2025). Including unsaturated soil concepts in undergraduate courses: The UPC experience. En Proceedings of the International Conference “Charting the Path Toward the Future” (GEE 2025 – Geotechnical Engineering Education 2025), Nancy, France, 2–4 de julio de 2025. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

RESUMEN

El desarrollo de la mecánica de suelos no saturados en las últimas décadas ha sido notable, principalmente en el ámbito de la investigación. Aún queda camino por recorrer en lo que respecta a las aplicaciones prácticas o a la incorporación de estos conceptos en la enseñanza. Muchos departamentos universitarios alrededor del mundo han participado en proyectos de investigación que han contribuido a desarrollar el conocimiento sobre la mecánica de suelos no saturados, pero, en general, incluir los resultados de investigación en el plan de estudios de la carrera de Ingeniería Civil no es sencillo. De hecho, es un tema que rara vez aparece en la mayoría de los libros de texto sobre mecánica de suelos. Sin embargo, los autores consideran que el tema ha alcanzado un grado de madurez suficiente para ser incorporado no solo en cursos de maestría, sino también en asignaturas de licenciatura. El

artículo incluye una breve perspectiva histórica del tema y presenta la experiencia de los autores en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), al incorporar conceptos de suelos no saturados en la asignatura Mecánica de Suelos del programa de licenciatura en Ingeniería Civil.

1. INTRODUCCIÓN

La definición de los contenidos de un curso de Mecánica de Suelos en el contexto de una licenciatura en Ingeniería Civil parece ser un tema controvertido. De hecho, no existe un consenso sobre qué enseñar a nivel de licenciatura y, en ocasiones, surgen debates intensos al respecto (Wesley, 2015; Airey y Miao, 2016). La elección depende también de factores externos: cuánto tiempo (“créditos”) se tiene disponible,

cuántas asignaturas relacionadas con la geotecnia se incluyen en el plan de estudios, si el programa tiene una orientación profesional o científica, cuál es el conocimiento previo de los estudiantes inscritos en la asignatura, etc.

En algunos países (como en España), la licenciatura permite ejercer a cierto nivel, el cual está regulado y supervisado por un colegio profesional. No es necesario presentar un examen adicional ni obtener una licencia adicional, por lo que, al definir los contenidos de los cursos universitarios, es necesario tener esto en cuenta. En otros países, sin embargo, los egresados deben aprobar un examen del colegio profesional local o demostrar cierta experiencia supervisada para convertirse en ingenieros profesionales. En este caso, la universidad tiene, quizás, mayor libertad para definir los contenidos de las asignaturas.

Además de estas restricciones, la tradición juega un papel importante al definir qué enseñar. Las universidades presentan una gran inercia frente a los cambios. El contenido actual de la asignatura Mecánica de Suelos depende en gran medida de las tradiciones de cada país, lo cual incluye no solo tradiciones técnicas, sino también aspectos culturales (Wirth, 2017). En Europa, por ejemplo, y en términos generales, la tradición británica solía centrarse en los experimentos y las aplicaciones prácticas, mientras que la tradición francesa tendía a enfocarse en conceptos abstractos y desarrollos matemáticos.

Combinando todas estas condiciones, es posible entender cómo cada escuela o departamento de Ingeniería Civil define el contenido de un curso de Mecánica de Suelos. Sin embargo, algunos conceptos fundamentales coinciden en la mayoría de los programas de licenciatura. El problema surge cuando se requiere incorporar nuevos conceptos.

La actualización de los temas que deben enseñarse en cada asignatura a nivel de licenciatura no es evidente, ya que el tiempo es limitado y el conocimiento crece continuamente. Incluir un nuevo tema implica que otro debe excluirse. En consecuencia, los cambios en los contenidos de los cursos de Mecánica de Suelos son limitados con el tiempo.

Además de estas dificultades, la mayoría de las organizaciones e instituciones que influyen en la mejora de los planes de estudio de ingeniería no están particularmente enfocadas en incorporar nuevos temas de investigación bien establecidos en programas tradicionales. Por el contrario, se centran en desarrollar ciertas habilidades en los estudiantes de licenciatura orientadas a su futura práctica profesional (Passow y Passow, 2017; Mitchell *et al.*, 2021). Estas habilidades se consideran importantes en un mundo globalizado y cambiante, pero los contenidos en sí también deberían adaptarse a ese futuro. De hecho, el Consejo de Acreditación para Ingeniería y Tecnología de Estados Unidos (ABET) definió desde el año 2000 una lista de habilidades que todo estudiante de ingeniería a nivel de licenciatura debería adquirir (Engineering Criteria 2000 o EC2000), la cual sigue siendo una referencia (ABET, 2025; Rugarcía *et al.*, 2001). De acuerdo con los crite-

rios Engineering Criteria 2000 de ABET, los futuros egresados de programas acreditados deberían poseer:

- a. Capacidad para aplicar conocimientos de matemáticas, ciencias e ingeniería.
- b. Capacidad para diseñar y conducir experimentos, así como analizar e interpretar datos.
- c. Capacidad para diseñar un sistema, componente o proceso que satisfaga necesidades específicas.
- d. Capacidad para trabajar en equipos multidisciplinarios.
- e. Capacidad para identificar, formular y resolver problemas de ingeniería.
- f. Comprensión de la responsabilidad profesional y ética.
- g. Capacidad para comunicarse de manera efectiva.
- h. Formación amplia necesaria para comprender el impacto de las soluciones de ingeniería en un contexto global y social.
- i. Reconocimiento de la necesidad y capacidad para involucrarse en el aprendizaje a lo largo de la vida.
- j. Conocimiento de los problemas contemporáneos.
- k. Capacidad para utilizar las técnicas, habilidades y herramientas modernas de ingeniería necesarias para la práctica profesional.

Obsérvese que estas capacidades pueden considerarse fundamentales para un ingeniero. Sin embargo, solo existe una referencia indirecta a la necesidad de estar en la frontera del conocimiento en el campo de especialidad (en el punto i), relativo al aprendizaje a lo largo de la vida). Los organismos de acreditación están más preocupados por el resto de las habilidades, delegando casi por completo a las universidades la responsabilidad de la formación en ingeniería. Probablemente, consideran que las universidades ya se encargan de actualizar los contenidos de las asignaturas y, por ello, se centran en aquellas habilidades que son más difíciles de enseñar. No obstante, muchas de las habilidades de la lista anterior pueden fomentarse en la educación secundaria o adquirirse durante el trabajo en una empresa como ingeniero junior. Por lo tanto, la responsabilidad debería ser compartida, y no asignarla únicamente a las universidades.

Este artículo se centra en este punto en particular. No trata sobre cómo fomentar dichas habilidades ni sobre cómo mejorar la forma de enseñar. Asume que el contenido de nuestras asignaturas debería enfocarse en presentar conceptos de vanguardia. Los autores consideran firmemente que es esencial enseñar algunos conceptos fundamentales a nivel de licenciatura, en lugar de proporcionar demasiada información sobre aplicaciones prácticas o técnicas que pueden adquirirse en el ámbito laboral. De hecho, existe cierto consenso al respecto entre académicos (Santamarina, 2015). Si se adopta este enfoque, los conceptos principales relacionados con la mecánica de suelos no saturados deberían incluirse en

el material docente de un curso introductorio de Mecánica de Suelos. Sin embargo, en muchas universidades esto aún no ocurre.

Como presentación del desarrollo de los planteamientos, seguiremos la siguiente estructura: en primer lugar, se presenta una breve perspectiva histórica de la introducción de los conceptos de suelos no saturados en los programas de Mecánica de Suelos; posteriormente, se expone la experiencia particular de los autores en la UPC, indicando los contenidos de la asignatura y la forma en que se introducen los conceptos de suelos no saturados y, se presentan algunas conclusiones que pueden resultar útiles en diversos contextos.

2. PERSPECTIVA HISTÓRICA DE LOS SUELOS NO SATURADOS EN LOS LIBROS DE TEXTO DE MECÁNICA DE SUELOS

Se acepta ampliamente que dos obras fundamentales en Mecánica de Suelos —al menos desde un punto de vista teórico— son el libro de Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics* (Terzaghi, 1943), y el libro de Taylor, *Fundamentals of Soil Mechanics* (Taylor, 1948). Ambos textos han tenido durante décadas una gran influencia en los ingenieros geotécnicos y aún se consideran obras plenamente vigentes. Un ejercicio interesante consiste en revisar el índice de contenidos de ambos libros desde una perspectiva actual. El libro de Terzaghi (1943) incluye los siguientes capítulos:

Sección A. Principios generales involucrados en las teorías de la Mecánica de Suelos

- I. Introducción
- II. Condiciones de falla en suelos
- III. Equilibrio plástico en una masa semiinfinita con superficie plana
- IV. Aplicación de teorías generales a problemas prácticos

Sección B. Condiciones de falla por cortante en suelos ideales

- V. Arqueo en suelos ideales
- VI. Problemas de muros de contención
- VII. Empuje pasivo de tierras
- VIII. Capacidad de carga
- IX. Estabilidad de taludes
- X. Presión de tierras sobre soportes temporales en excavaciones, túneles y lumbreras
- XI. Tablestacas ancladas

Sección C. Interacción mecánica entre el sólido y el agua en suelos

- XII. Efecto de la infiltración sobre las condiciones de equilibrio en arenas ideales
- XIII. Teoría de la consolidación
- XIV. Fuerzas capilares
- XV. Mecánica del drenaje

Sección D. Problemas de elasticidad en Mecánica de Suelos

- XVI. Teorías que involucran un coeficiente de reacción del terreno, del suelo o de pilotes
- XVII. Teoría de sólidos elásticos semiinfinitos
- XVIII. Teoría de capas elásticas y cuñas elásticas sobre una base rígida
- XIX. Problemas de vibraciones

El índice de contenidos hace referencia a numerosas aplicaciones prácticas, como muros de contención, capacidad de carga o tablestacas, pero también incluye conceptos teóricos, como la elasticidad y la plasticidad o la teoría de la consolidación. Cabe destacar la mención de las fuerzas capilares en el capítulo XIV como un precursor de los conceptos de suelos no saturados. Aunque dicho capítulo se limita a conceptos básicos, como la tensión superficial, el ascenso capilar y la presión del gas en burbujas, constituye un punto de partida para los conceptos de suelos no saturados en esa obra fundamental. No obstante, no se encuentra ninguna referencia a suelos compactados. El libro de Taylor (1948) incluye los siguientes temas en su índice de contenidos:

1. Introducción
2. Consideraciones preliminares
3. Ensayos simples de suelos y ensayos de clasificación
4. Clasificación
5. Investigaciones del subsuelo
6. Permeabilidad
7. Pesos, esfuerzos y cargas hidráulicas, fuerzas de filtración
8. Capilaridad
9. Filtración
10. Consolidación unidimensional
11. Uso de la teoría de la elasticidad para estimar esfuerzos en suelos
12. Análisis de asentamientos
13. Teoría de la resistencia
14. Métodos de ensayo de corte, características de corte de las arenas
15. Resistencia al corte de suelos cohesivos
16. Estabilidad de taludes
17. Presiones laterales, estabilidad de muros de contención
18. Consideraciones de Mecánica de Suelos relativas a presas
19. Comportamiento de cimentaciones superficiales, capacidad de carga
20. Comportamiento de pilotes, cimentaciones profundas

Este libro fue publicado cinco años después del de Terzaghi, pero prácticamente de manera simultánea al libro

Soil Mechanics in Engineering Practice, de Terzaghi y Peck (1948), orientado a ingenieros geotécnicos y concebido como complemento del libro inicial *Theoretical Soil Mechanics*.

El libro de Taylor (1948) tiene una perspectiva académica, típica de un texto para una carrera de ingeniería. El calificativo “Fundamentals” resulta adecuado, considerando su contenido. Nótese que incluye un capítulo sobre capilaridad, en el que se introducen conceptos como la tensión superficial y la presión capilar. El concepto de “presión capilar” utilizado por Taylor, y que sigue empleándose en la actualidad, es similar a la idea de “fuerza capilar” descrita en el libro de Terzaghi. Nuevamente, no se hace ninguna referencia a suelos compactados.

Es importante señalar que ambos libros constituyen obras visionarias, ya que incluyen los temas fundamentales de un curso típico de Mecánica de Suelos. Evidentemente, después de 80 años, el lenguaje y algunos procedimientos han evolucionado, pero muchos de los conceptos mantienen su vigencia. A pesar de ello, no es aceptable enseñar Mecánica de Suelos hoy en día considerando únicamente los temas cubiertos en esos libros. Es necesario incorporar parte de los conceptos desarrollados hasta la actualidad para tener una visión moderna de la Mecánica de Suelos.

Por lo tanto, el concepto de capilaridad presentado en Terzaghi (1943) y Taylor (1948) debe incluirse y desarrollarse de manera moderna en los cursos actuales. Sorprende que muchos libros de texto publicados posteriormente no incluyeron el concepto de presión capilar, y la capilaridad fue, durante muchos años, un tema anecdótico.

De hecho, el libro de Lambe y Whitman (1969), utilizado en varias universidades como texto base y traducido a varios idiomas, no incluye ninguna referencia a la capilaridad ni a la compactación de suelos: el libro presenta una sección sobre suelos secos y otra sobre el comportamiento de suelos saturados. Sin embargo, actualmente se reconoce que las características críticas del comportamiento de los suelos no saturados ocurren durante cambios hidráulicos. La referencia a la capilaridad es muy heterogénea dependiendo del país y de la tradición local. Un libro de texto ruso publicado en 1963, revisado en 1973 y editado en inglés en 1976 (Tsyto-vich, 1976), dedica apenas una línea a la idea de capilaridad. El libro de Atkinson, *An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations: through Critical State Soil Mechanics* (1993), presenta un solo párrafo sobre la presión del agua por encima del nivel freático y justifica no incluir una sección sobre suelos no saturados porque «...las principales estructuras de ingeniería civil suelen estar saturadas, al menos en climas templados o húmedos». Otro libro ampliamente utilizado en el Reino Unido, el de Craig, incluye en su séptima edición (2004) solo algunas líneas sobre capilaridad y una página de desarrollo al concepto de esfuerzo efectivo a condiciones no saturadas (Craig, 2004).

Un grupo de libros de texto presenta conceptos relacionados con suelos no saturados desde el punto de vista de las

aplicaciones. Por ejemplo, el *Textbook of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, de Murthy (2017), de la India, incluye un capítulo sobre capilaridad, pero también desarrolla un capítulo adicional sobre suelos colapsables y expansivos, un tema relacionado con condiciones no saturadas. También es el caso del libro clásico de Smith (2021) en su décima edición, donde una sección sobre capilaridad y suelos no saturados se complementa con otra sobre compactación de suelos.

En algunas regiones donde los suelos no saturados son muy comunes, los índices de los libros de texto reflejan esta condición. En México, el libro de Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez (3.ª edición, 1998) incluye un capítulo sobre capilaridad y contracción por desecación, una sección sobre resistencia al corte en suelos no saturados y un capítulo sobre compactación. En España, el libro de Jiménez-Salas y Justo-Alpañes (1975) desarrolla el concepto de capilaridad y tensión superficial e incluye un capítulo sobre compactación de suelos y otro sobre resistencia al corte en suelos no saturados.

Así, es posible observar una evolución en los contenidos de los libros de texto, aunque desde una perspectiva global esta evolución es desigual y heterogénea. En ocasiones, esto depende del público objetivo del libro, sean estudiantes de licenciatura o de posgrado. Paralelamente, la investigación en el tema fue creciendo y se produjo un desarrollo considerable de la Mecánica de Suelos No Saturados a finales del siglo XX.

Tras la publicación de varios libros sobre suelos no saturados, que van desde la obra seminal de Fredlund y Rahardjo (1993) hasta Blight (2013) y Ng *et al.* (2025), el libro de Jean-Louis Briaud, *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*, publicado por primera vez en 2013, ofrece una perspectiva conjunta del comportamiento de suelos saturados y no saturados.

En 1987 se celebró en Dublín (Irlanda) la 9.ª Conferencia Europea de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cementaciones. En ella hubo una sesión sobre «Suelos con Problemas Especiales», cuyo informe general fue elaborado por Alonso, Gens y Hight (1987). En dicha conferencia, estos suelos incluían suelos parcialmente saturados, así como suelos muy blandos y orgánicos. El informe general presentó ambos tipos de suelos en secciones separadas, debido a la disparidad de sus propiedades y la casuística derivada. Cabe destacar que en ese momento los suelos no saturados eran considerados “suelos especiales”, es decir, no muy relevantes en el contexto general de la conferencia. Los autores sostenían que los suelos no saturados deberían considerarse “suelos normales”, ya que la no saturación es una condición y no un tipo de suelo.

Desde la publicación del primer libro sobre suelos no saturados, se han celebrado una serie de conferencias sobre este tema, como la 1.ª Conferencia Internacional sobre Suelos No Saturados, en París (Alonso y Delage, 1995), seguida de conferencias regionales como la 1.ª Conferencia Asiática sobre Suelos No Saturados, en Singapur (Rahardjo *et al.*, 2000), y la 1.ª Conferencia Europea sobre Suelos No Saturados, en Durham, Reino Unido (Toll *et al.*, 2008).

No cabe duda de que hoy en día la Mecánica de Suelos No Saturados es una disciplina bien establecida dentro de la Mecánica de Suelos y constituye el tema de un Comité Técnico (TC106) dentro de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE, 2025). Este comité pertenece a la categoría de “Fundamentos”, al igual que los comités sobre «Ensayos de laboratorio esfuerzo-deformación-resistencia de geomateriales», «Caracterización de propiedades del terreno mediante ensayos *in situ*», «Métodos numéricos», «Modelación física en geotecnia», «Geomecánica de micro a macro» y «Suelos residuales tropicales». Cabe destacar que la mayoría de los nombres de los «Comités de Fundamentos» corresponden a temas bien establecidos en los cursos de Mecánica de Suelos. Sin embargo, el tema de «Suelos no saturados» aún está ausente en muchos de esos cursos.

3. LA EXPERIENCIA EN LA UPC

3.1 Introducción a la Mecánica de Suelos para estudiantes de licenciatura

El Grupo de Geotecnia de la UPC participa en las actividades docentes de la Escuela de Ingeniería Civil de Barcelona (España), contribuyendo a los programas de licenciatura y maestría en Ingeniería Civil. El programa de maestría conduce al título profesional tradicional español de “Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos”. El grupo también ofrece una maestría específica en Ingeniería Geotécnica.

Las asignaturas de la licenciatura en Ingeniería Civil relacionadas con el tema de este artículo son: Geología Aplicada (primer año, 6 créditos), Hidrología Subterránea (tercer año, 3 créditos), Geotecnia (tercer año, 6 créditos) e Ingeniería Geotécnica (cuarto año, 4.5 créditos) (Camins-UPC, 2025). Cada crédito corresponde a la definición del Sistema Europeo de Transferencia de Créditos (ECTS, 2025) y típicamente implica 10 horas de clase. Aquí se describen los detalles de la asignatura Geotecnia, en la que se introduce a los estudiantes en los conceptos fundamentales de la Mecánica de Suelos. La asignatura de Ingeniería Geotécnica desarrolla aplicaciones convencionales, como la investigación de campo, los muros de contención y las cimentaciones superficiales y profundas.

El contenido del curso de Geotecnia ha sido bastante constante en los últimos 10 años, aunque recientemente se ha modificado la secuencia de los temas. El orden original incluía el capítulo sobre flujo en medios porosos al inicio del curso; ahora, gracias a la coordinación con la asignatura de Hidrología Subterránea —que se imparte simultáneamente a Geotecnia—, el tamaño de esa unidad se ha reducido y se ha trasladado hacia el final del curso (OCW Camins, 2025). De esta manera, es posible enfocarse en los conceptos mecánicos, que resultan particularmente difíciles de comprender para los estudiantes.

Al inicio se presenta la “película” de la Mecánica de Suelos, es decir, el hecho de que, al aplicar una carga a un suelo saturado,

una parte de la carga se transfiere a la presión del agua y, posteriormente, parte del agua se desplaza (el volumen de agua permite la deformación), manteniendo el suelo saturado. Este problema dependiente del tiempo se simplifica en la mecánica de suelos clásica considerando condiciones a corto plazo (no drenadas) y a largo plazo (drenadas), sustituyendo toda la “película” por dos imágenes fijas esenciales. Este fenómeno puede explicarse mediante una geometría muy simple (una capa horizontal de suelo saturado).

A continuación, se listan las unidades que actualmente se imparten. Para cada unidad, se indica también el número de horas de clases teóricas (T), de resolución de problemas (P) y de laboratorio (L).

Primera parte:

0. Introducción. Ejemplos de problemas geotécnicos. Organización del curso. (2T).

1. Caracterización de suelos. Fases del suelo y estructura del suelo. Distribución granulométrica. Consistencia, límites de Atterberg, carta de plasticidad. Clasificación de suelos. (3T, 1P, 2L).

2. Conceptos fundamentales. Esfuerzos y deformaciones, invariantes. Círculo de Mohr. Esfuerzos totales y efectivos. Representaciones de Lambe y Cambridge. Trayectorias de esfuerzo. Conceptos de elasticidad y plasticidad. Soluciones elásticas. (6T, 2P).

3. Comportamiento experimental de los suelos. Ensaye triaxial. Ensaye edométrico. Ensayos de corte. Comportamiento experimental de arenas y arcillas. (6T, 2P).

4. Suelos no saturados y suelos compactados. Tensión superficial y ascenso capilar. Efecto de la succión en suelos no saturados (cambios volumétricos por humedecimiento y secado). Suelos compactados, microestructura y macroestructura. Ensaye Proctor. (2T, 2L). Evaluación parcial (examen de 3 horas).

Segunda parte:

5. Comportamiento esfuerzo-deformación-resistencia. El modelo Cam-Clay. Resistencia al corte de Mohr-Coulomb. Resistencia al corte no drenada. Equilibrio límite. Problemas de estabilidad de taludes. (8T, 6P).

6. Flujo en suelos saturados y no deformables. Carga hidráulica. Ley de Darcy y ecuación de balance de agua. Fuerzas de filtración, gradiente crítico y licuación. Problemas de flujo, método gráfico. (6T, 4P, 2L).

7. Consolidación de suelos saturados. Teoría unidimensional de la consolidación. Enfoque adimensional. Consolidación debida a cambios piezométricos. Grado de consolidación. Flujo radial y drenes verticales. (4T, 2P). Evaluación final (examen de 3 horas).

Las unidades incluyen no solo clases teóricas, sino también la resolución de ejercicios y la realización de prácticas de laboratorio. Esto se complementa con tareas opcionales

(un ejercicio por cada tema se evalúa de manera individual y se considera en la calificación final de los estudiantes).

Las sesiones de laboratorio se realizan en grupos pequeños, típicamente de 16 a 20 estudiantes. Cada uno debe elaborar un informe individual por sesión, el cual es evaluado. El número total de estudiantes que cursan la asignatura es de aproximadamente 150, por lo que solo se programan 3 sesiones de laboratorio, que consisten en:

- L1. Identificación de suelos. Límites de consistencia. Los estudiantes disponen de varias muestras de suelo (arena, arcilla de baja plasticidad y de alta plasticidad, suelos no uniformes, etc.) y deben clasificarlas utilizando técnicas simples (textura, tamaño de grano, efecto del agua, etc.).
- L2. Suelos compactados. Los estudiantes realizan un ensayo de compactación tipo “Proctor miniatura” utilizando suelo del campus con diferentes contenidos de agua. Las muestras compactadas del lado seco colapsan al humedecerse. Se incluye una visita al laboratorio principal para observar equipos triaxiales, edométricos y de corte. Solo los estudiantes de maestría o doctorado utilizan estos equipos.
- L3. Flujo de agua. En un permeámetro, los estudiantes realizan ensayos de carga constante y de carga variable. Al modificar el gradiente, deben inducir la licuación.

3.2 Introducción a la mecánica de suelos no saturados

En la UPC existe una larga tradición en el estudio de suelos no saturados desde la creación de la Escuela de Ingeniería Civil, en 1974. El trabajo inicial de Lloret y Alonso (1980) es consecuencia de ello. Rápidamente, los desarrollos de investigación se incorporaron a los contenidos de los cursos de licenciatura y posgrado. La actualización de los planes de estudio para considerar los avances en el campo es una responsabilidad esencial de los académicos, ya que la investigación y la docencia están estrechamente relacionadas.

Los suelos no saturados son comunes en climas mediterráneos, y los suelos compactados también son no saturados. La compactación se enseñaba tradicionalmente en asignaturas específicas de transporte o construcción de carreteras, basada en el empirismo y sin una perspectiva de mecánica de suelos. La incorporación de los aspectos conceptuales de la compactación en el programa de Mecánica de Suelos fue un logro fundamental.

En las unidades mencionadas en la sección 3.1, los suelos no saturados están presentes en varias partes. La unidad 1, sobre caracterización de suelos, incluye la descripción de las fases del suelo, el concepto de contenido de agua y el grado de saturación. Los límites de consistencia incluyen el límite de contracción debido a condiciones de desecación. En la unidad 2 se presentan los conceptos de presión de agua y esfuerzo efectivo, lo que plantea la interrogante de cuál es la presión del agua por encima del nivel freático, un punto que se explica con detalle en la unidad 4. La unidad 3 se centra en ensayos mecánicos de laboratorio en suelos saturados y presenta los resultados típicos obtenidos en estos ensayos realizados en arenas (sueltas y densas) y arcillas (normalmente consolidadas y sobreconsolidadas).

La unidad 4 está completamente dedicada a los suelos no saturados. Esto incluye la enseñanza del concepto de succión, la curva de retención y las propiedades de los suelos no saturados, en términos de permeabilidad y resistencia (de manera cualitativa, ya que aún no se han presentado modelos mecánicos). La unidad también aborda aspectos conceptuales de la compactación, es decir, el ensayo Proctor en relación con el efecto de la succión, y la microestructura del suelo generada dependiendo de las condiciones de contenido de agua (ramas seca y húmeda de la curva). Un defecto bastante frecuente en terraplenes en climas secos es el colapso del suelo compactado después de lluvias intensas y la posterior saturación (Alonso *et al.*, 2010). Por ello, el curso incluye una sesión de laboratorio basada en este fenómeno. Para agilizar dicha sesión, los estudiantes utilizan una versión pequeña del molde cilíndrico Proctor diseñada en la UPC. Es posible aplicar una carga vertical y añadir agua, de modo que eventualmente se puede mostrar de forma directa la expan-

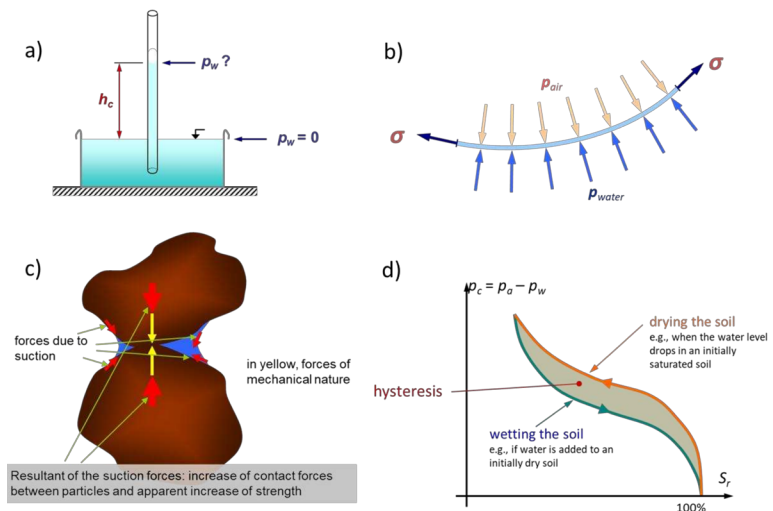


Figura 1. Esquemas utilizados en las notas de clase: a) ascenso capilar h_c y presión de agua nula; b) concepto de tensión superficial, ($p_{aire} > p_{agua}$); c) efecto mecánico de la succión; d) curva característica o curva de retención (succión o presión capilar, p_c , en función del grado de saturación, S_r).

sión de muestras muy densas o el colapso de muestras de baja densidad. La importancia de los cambios en el esfuerzo total, por un lado, y de los cambios en el contenido de agua, por otro, pone de manifiesto que ambas variables controlan el comportamiento de los suelos no saturados, y resalta la ausencia de un “esfuerzo efectivo” como en los suelos saturados. La fig. 1 muestra algunos esquemas utilizados en las presentaciones, relacionados con conceptos fundamentales como el ascenso capilar, la succión y su efecto mecánico en la resistencia y las propiedades de retención de agua. Además, también se muestra a los estudiantes fotografías de trabajos de compactación.

La unidad 5 es el tema central de la asignatura y se refiere al comportamiento mecánico de los suelos, particularmente de las arcillas. Se presentan el concepto de estado crítico y el modelo Cam-Clay. Consideramos fundamental enseñar a los estudiantes de licenciatura los conceptos principales de la plasticidad, y el modelo Cam-Clay es el marco más sencillo disponible para presentarlos. Se introduce una versión simple, enfocándose en el comportamiento cualitativo más que en las expresiones numéricas. Es fundamental comprender el comportamiento drenado y no drenado de arcillas normalmente consolidadas y sobreconsolidadas, y relacionar las predicciones del modelo con los resultados experimentales presentados en la unidad 3. A continuación, se presentan el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb y el concepto de resistencia al corte no drenada. Sin embargo, se abordan de manera crítica, resaltando sus limitaciones y usos indebidos (Ledema, 2024). La resistencia de suelos no saturados no se enseña a nivel de licenciatura, sino de maestría, debido al tiempo disponible, dado que los estudiantes conocen cualitativamente que la succión tiende a incrementar la resistencia al corte.

Las unidades 6 y 7 se refieren únicamente a suelos saturados. La unidad 6 introduce el contenido clásico del flujo en medios porosos saturados, considerando que los estudiantes ya han cursado un curso breve de hidrología de aguas subterráneas. Por lo tanto, el enfoque está en los aspectos mecánicos, como las fuerzas de filtración, el gradiente crítico, los fenómenos de licuación y el riesgo de levantamiento en excavaciones. Finalmente, la unidad 7 presenta la teoría clásica de la consolidación, aunque el término consolidación ya ha sido introducido a los estudiantes en la unidad 3, al presentar el ensayo triaxial. Este tema se presentaba anteriormente en una versión previa del programa. Es razonable explicar el concepto de consolidación al inicio y dejar la teoría matemática para una unidad final del curso.

La experiencia de los últimos 10 años con esta organización es razonablemente buena, pero también presenta algunas desventajas. En particular, el curso, tal como está definido, es bastante intenso y la retroalimentación de los estudiantes revela que incluye demasiados conceptos nuevos para un semestre, y que una cuarta parte de los estudiantes tiene dificultades para asimilarlos y aprobar la asignatura

en un año. Esta no es una buena tasa para una materia de tercer año de la licenciatura, considerando que las asignaturas más selectivas son los cursos de matemáticas ubicados en primer y segundo año. Este es otro debate relacionado con la admisión de nuevos estudiantes a la licenciatura y con el decreciente interés por la ingeniería civil entre los jóvenes en la última década, al menos en España.

4. COMENTARIOS FINALES

Este artículo ha presentado una visión de la incorporación de conceptos de mecánica de suelos no saturados en el programa de un curso introductorio de Mecánica de Suelos a nivel de licenciatura. Los autores consideran que los académicos tienen la responsabilidad de actualizar los contenidos de los cursos, incorporando el estado del arte de la disciplina. De esta manera, la enseñanza se enriquece con la investigación. Desde esta perspectiva, un contenido mínimo sobre suelos no saturados —un tema lo suficientemente maduro en la actualidad— debería incluirse en este tipo de cursos. Dicha tarea no es sencilla, ya que la incorporación de nuevos contenidos generalmente implica que otros deban excluirse.

La experiencia particular de los autores en la UPC se ha mostrado a través del artículo. Probablemente existan restricciones dependientes del contexto, pero consideramos que es posible impartir un curso introductorio de Mecánica de Suelos que incluya conceptos modernos como la mecánica de suelos en estado crítico y los suelos no saturados. La inclusión de conceptos de suelos no saturados ha sido un tema fundamental para ingenieros que trabajan en contextos de clima mediterráneo, donde el nivel freático generalmente no se encuentra cercano a la superficie. Además, es un requisito a nivel global para ingenieros involucrados en la construcción de terraplenes, o al considerar la ingeniería civil como una profesión global en un mundo globalizado, de modo que incluso profesionales formados en climas húmedos pueden trabajar en regiones secas. En este contexto, el cambio climático representará un reto que deberá enfrentarse mediante la incorporación de temas como el comportamiento de suelos no saturados en nuestros cursos.

5. REFERENCIAS

- ABET (2025). Accreditation Board for Engineering and Technology. https://www.abet.org, access 15th January 2025.
- Airey, D., Miao, G. (2016). Why Critical State Soil Mechanics should be taught to all civil engineers. Shaping the Future of Geotechnical Education: International Conference on Geo-Engineering Education – TC-306. SFGE-2016. Belo Horizonte, Brazil.
- Alonso, E.E., Delage, P. (1995). Proc. 1st International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Alonso, E.E., Pinyol, N.M., Puzrin, A.M. (2010). Collapse of Compacted Soil: Girona Road Embankments, Spain. In Geomechanics of Failures. Advanced Topics. Springer, Dordrecht.

- Alonso, E.E., Gens, A., Hight, D.W. (1987). General Report. Groundwater effects in Geotechnical Engineering: Proc. of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hanrahan E.T., Orr, T.L.L., Widdis, T.F., vol. 3, pp. 1087-1146. Dublin. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Atkinson, J. (1993). An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations: through Critical State Soil Mechanics. McGraw Hill, London, UK.
- Blight, G.E. (2013). Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.
- Briaud, J.L. (2013). Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. John Wiley & Sons, Hoboken NJ, USA.
- Camins-UPC (2025). Plan of the Civil Engineering Degree, School of Civil Engineering at Barcelona (Spain). [https://camins.upc.edu/en/Studies/bachelor/civil-engng-20/civil-engng?set_language=en] (https://camins.upc.edu/en/Studies/bachelor/civil-engng-20/civil-engng?set_language=en), access 22nd January 2025.
- Craig, R.F. (2004). Craig's Soil Mechanics. 7th edition. Spon Press, London, UK.
- ECTS (2025). European Credit Transfer System. [<https://education.ec.europa.eu/education-levels/higher-education/inclusive-and-connected-higher-education/european-credit-transfer-and-accumulation-system>] (<https://education.ec.europa.eu/education-levels/higher-education/inclusive-and-connected-higher-education/european-credit-transfer-and-accumulation-system>), access 22nd January 2025.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, New York, USA.
- ISSMGE (2025). International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. [<https://www.issmge.org/committees/technical-committees>] (<https://www.issmge.org/committees/technical-committees>), access 16th January 2025.
- Juárez-Badillo, E., Rico-Rodríguez, A. (1998). Mecánica de suelos - vol. 1, Fundamentos de la mecánica de suelos. 3rd edition, Ed. Limusa, México D.F.
- Jiménez-Salas, J.A., Justo-Alpañes, J.L. (1975). Geotecnia y cimientos - I, Propiedades de los suelos y las rocas. 2nd edition, Ed. Rueda, Madrid, Spain.
- Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1969). Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Ledesma, A. (2024). The difficult task of teaching shear strength of soils. *Soils and Rocks*, 47(2), e2024003424.
- Lloret, A., Alonso, E.E. (1980). Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behavior. *Géotechnique*, 30(4), pp. 449-477.
- Mitchell, J.E., Nyamapfene, A., Roach, K., Tilley, E. (2021). Faculty wide curriculum reform: the integrated engineering programme. *European Journal of Engineering Education*, 46(1), pp. 48-66.
- Murthy, V.N.S. (2017). Textbook of Soil Mechanics and Foundation Engineering. CBS Publishers, New Delhi, India.
- Ng, C.W.W., Zhou, C., Ni, J. (2025). Advanced Unsaturated Soil Mechanics. Theory and Applications. 2nd edition. CRC Press Taylor & Francis Group, Abingdon, UK.
- OCW Camins (2025). Open Course Ware from School of Civil Engineering at UPC. [<https://ocw.camins.upc.edu/ocw/assignatura/2500020/2024/temari>] (<https://ocw.camins.upc.edu/ocw/assignatura/2500020/2024/temari>), access 22nd January 2025.
- Passow, H.J., Passow, C.H. (2017). What competencies should undergraduate engineering programs emphasize? A systematic review. *Journal of Engineering Education*, 106(3), pp. 475-526.
- Rahardjo, H., Toll, D.G., Leong, E.C. (2000). Unsaturated Soils for Asia. Proc. of the 1st Asian Conference on Unsaturated Soils, Singapore. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Rugarcia, A., Felder, R.M., Woods, D.R., Stice, J.E. (2000). The Future of Engineering Education. Part 1: A vision for a new century. *American Society for Engineering Education - Chemical Engineering Education Journal*, 34(1), pp. 16-25.
- Santamarina, J.C. (2015). (What) to teach or not to teach - that is the question. *Geotechnical Research*, 2(4), pp. 135-138.
- Smith, I. (2021). Elements of Soil Mechanics. 10th edition. Wiley-Blackwell.
- Taylor, D.W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Toll, D.G., Augarde, C.E., Gallipoli, D., Wheeler, S.J. (2008). Unsaturated Soils. *Advances in Geo-Engineering: Proc. of the 1st European Conference, E-UNSAT 2008, Durham (UK)*. CRC Press.
- Tsyvovich, N. (1976). Soil Mechanics. Mir Publishers, Moscow.
- Wesley, L. (2015). (What) to teach or not to teach - from theory to practice. *Geotechnical Research*, 2(4), pp. 139-147.
- Wirth, X., da Silva, T., Della Vecchia, G., Evans, J., Romero, E., Bhatia, S.K. (2017). Undergraduate Geotechnical Engineering Education of the 21st Century. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, ASCE, 143(3), pp. 1-8.

Pooneh Maghoul

Universidad de Manitoba

Herramienta de perforación vibro-rotacional bioinspirada con juntas flexibles para una penetración energéticamente eficiente en suelos granulares

Artemis II lleva a cabo una misión hacia la Luna, y la NASA ha redirigido formalmente el programa Artemis hacia el establecimiento de infraestructura permanente en la superficie lunar, con un primer alunizaje tripulado ahora previsto para Artemis IV, en 2028, y misiones lunares anuales a partir de entonces.

Este cambio convierte en apremiante un desafío geotécnico: ¿cómo caracterizamos las propiedades mecánicas y físicas del regolito lunar antes de construir sobre él? La investigación del sitio es la base de todo proyecto de infraestructura en la Tierra. No será diferente en la Luna.

Los métodos convencionales de exploración del subsuelo, como la perforación rotatoria o los sistemas de percusión, dependen de altas cargas axiales, maquinaria pesada y, a menudo, agua o aire para la eliminación de detritos. Ninguna de estas opciones es viable en un entorno de baja gravedad, con recursos limitados y restricciones de masa como la superficie lunar. En un trabajo reciente (Alaei *et al.*, 2025) se propone un enfoque fundamentalmente apropiado.

Inspirados en la locomoción ondulatoria lateral del esli-zón pez de arena (*Scincus scincus*), que utiliza ondas de flexión de baja frecuencia para desplazarse a través de medios granulares del desierto, se desarrolló una sonda que genera

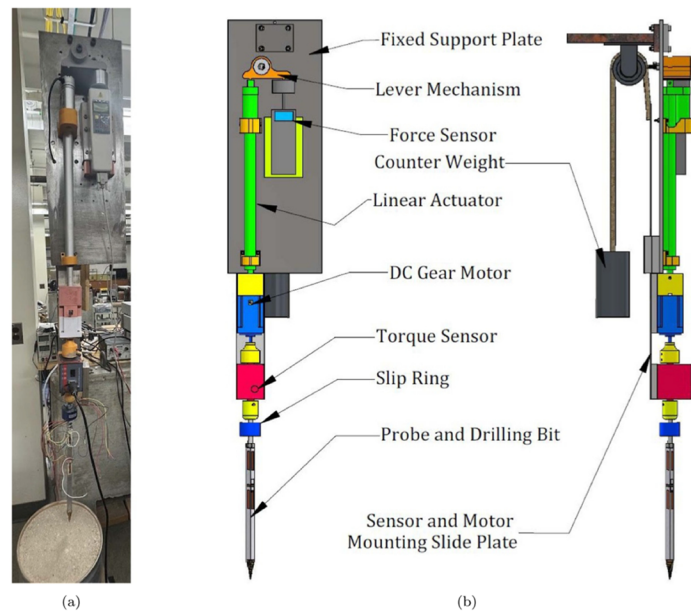


Figura 1. Configuración de la fuerza y el sensor (a) arreglo real; (b) esquema de detección y actuador.

vibraciones de flexión rotacional de alta frecuencia (~4,400 Hz) mediante actuadores piezoeléctricos PZT adheridos a la superficie, sin aumentar el diámetro de la sonda ni requerir precarga axial (fig. 1). La innovación estructural clave es una articulación flexible de ácido poliláctico (PLA), ubicada en el antinodo de flexión, del modo de resonancia dominante. El análisis por elementos finitos mostró que esta articulación reduce la rigidez global a la flexión de la sonda, al tiempo que produce un aumento de casi diez veces en el cuadrado de la velocidad en la punta, lo cual es un indicador directo del flujo de potencia vibracional hacia el medio granular (fig. 2).

Se diseñó y probó un prototipo en arena de piedra caliza subangular de densidad media para demostrar la eficacia del diseño en la práctica.

El mecanismo difiere fundamentalmente de las perforadoras ultrasónicas de vibración longitudinal, ya que las sondas resonantes en flexión no están limitadas por la geometría de tipo cuerno, generan una mayor flexibilidad en la punta para una longitud equivalente de sonda y permiten la agitación de granos a escala microscópica en toda la circunferencia del pozo.

A medida que las agencias espaciales avanzan hacia aterrizajes lunares anuales y la construcción de bases en la superficie, las herramientas geotécnicas de ensayo *in situ* —análogas al ensayo de penetración de cono (CPT) utilizado en la práctica terrestre— serán esenciales para el diseño de cimentaciones, la planificación de excavación del regolito y la evaluación de la viabilidad de ISRU (utilización de recursos *in situ*). Este trabajo demuestra que las sondas basadas

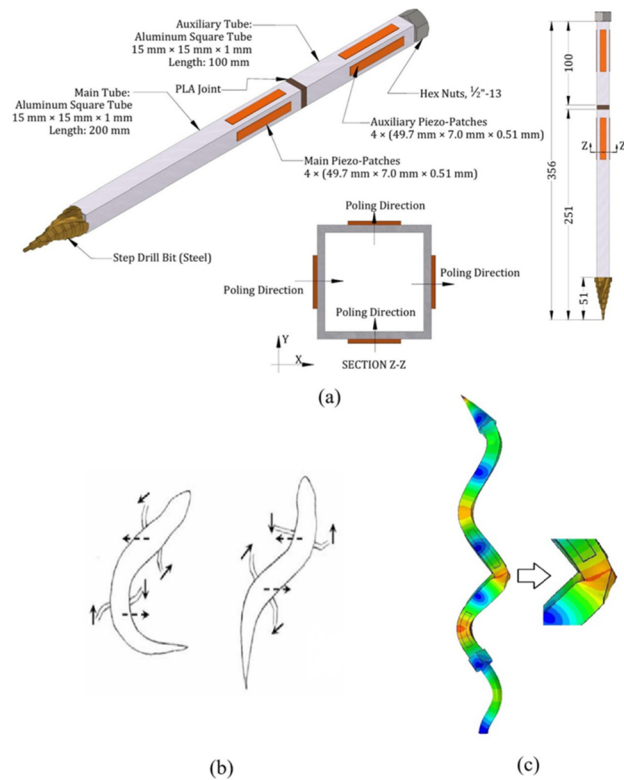


Figura 2. (a) Diferentes vistas de la probeta vibroperforante; (b) locomoción ondulatoria del pez de arena; (c) modo de flexión ondulatoria magnificado en la junta flexible de ácido poliláctico (PLA).

en resonancia de flexión representan una vía técnicamente viable, eficiente en masa y consumo energético para alcanzar ese objetivo.

REFERENCIA

Alaei, M., Hanzehi, R., Wu N. and Maghoul P. (2025) "Bio-inspired vibro-rotational-drilling tool with compliant-joints for energy-efficient penetration in granular soils", *Smart Materials and Structures* 34 (2025) 125037 (16 pp).

Perforadora Rotaria Mobile Drill B-53

EN VENTA \$1,250,000 + IVA

- ✓ Año 1990
- ✓ Único Dueño
- ✓ Camión Dina 128,000 km
- ✓ Funcionando



HSA Augers 10 1/4 diametro interno
Seminuevos EN VENTA \$450,000 + IVA

MARCA MILLS MACHINE USA

- 15 piezas x 5 in
- 1 broca piloto
- 1 corona
- 1 campana (adaptador)

INFORMES AL 333-147-06-68

Miguel A. Mánica Malcom

Instituto de Ingeniería, UNAM

«Recomendaciones para la modelización numérica de estructuras geotécnicas», una colaboración entre el Comité Francés de Mecánica de Suelos y Geotecnia y la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica

Los métodos numéricos son hoy ubicuos prácticamente en todas las áreas de la ciencia y la ingeniería: la ingeniería geotécnica no es la excepción. Los programas de cálculo — usualmente basados en el método de elementos finitos o de diferencias finitas— se emplean de manera rutinaria en los despachos de ingeniería para analizar y resolver problemas geotécnicos. Sin embargo, existen pocos recursos en español que ayuden al ingeniero diseñador a comprender las bases teóricas de estas herramientas, y menos aún que ofrezcan recomendaciones prácticas para una modelización objetiva, eficiente y representativa del problema que se desea analizar.

En este contexto, la Comisión Científica y Técnica del Comité Francés de Mecánica de Suelos y Geotecnia (CFMS) coordina equipos de trabajo orientados al análisis de problemáticas específicas, para las cuales los conocimientos disponibles resultan insuficientes u obsoletos frente a la evolución de las técnicas y de la normativa. En consecuencia, uno de sus objetivos principales es la elaboración de documentos de síntesis o de recomendaciones que permitan difundir conocimiento actualizado y buenas prácticas entre los profesionales

del área, y que contribuyan a una aplicación más rigurosa y coherente de las herramientas y métodos disponibles.

Entre los múltiples documentos que pueden consultarse de forma gratuita en el sitio web del CFMS se encuentra uno cuyo título puede traducirse del francés como «Recomendaciones para la modelización numérica de estructuras geotécnicas». Este documento, elaborado por un grupo de especialistas de reconocida trayectoria a nivel mundial y dirigido a ingenieros que ejercen en despachos de ingeniería, tiene como objetivo proporcionar recomendaciones prácticas para el uso adecuado de modelos numéricos en la ingeniería geotécnica.

Los capítulos del 1 al 5 abordan los fundamentos científicos asociados a la construcción y al uso de la modelización numérica en geotecnia. En ellos se tratan aspectos clave como la elección del tipo de análisis (bidimensional o tridimensional), las hipótesis de deformación adoptadas, la consideración de acoplamientos hidráulicos y térmicos y la definición adecuada de las condiciones de frontera. Asimismo, se analiza el papel central de los modelos constitutivos,

cuya correcta selección y comprensión resulta esencial para interpretar de manera adecuada los resultados numéricos. También se presentan los métodos de solución numéricos, con el objetivo de proporcionar al ingeniero una visión general del funcionamiento del método de elementos finitos y de la terminología asociada. Estos capítulos incluyen, además, el estudio de la interacción suelo-estructura, considerando tanto la representación de los elementos estructurales como el uso de elementos de interfaz o enfoques alternativos. Finalmente, se desarrollan los distintos tipos de acoplamientos hidromecánicos, incluyendo cálculos drenados, no drenados y de consolidación, aplicables a problemas de cimentaciones y excavaciones.

Por otra parte, los capítulos 6 y 7 se centran en los aspectos de diseño y justificación de estructuras geotécnicas mediante modelos numéricos. En ellos se ofrece la modelización como una herramienta efectiva de apoyo al diseño, destacando la necesidad de seleccionar y calibrar adecuadamente los modelos constitutivos, así como de analizar los mecanismos de deformación y falla. Asimismo, se examina la relación entre los cálculos numéricos y los procedimientos normativos de verificación, en particular los establecidos en el Eurocódigo 7. Se incluye, de igual manera, el uso del método de reducción de la resistencia al corte para la evaluación de factores de seguridad, cuyos resultados deben interpretarse con especial cuidado.

Aunque en el contexto mexicano el Eurocódigo no tiene implicaciones legales, el capítulo 7 sigue siendo de gran valor, ya que constituye una referencia sólida para el uso de métodos numéricos dentro de un marco normativo. En particular, resulta pertinente en relación con la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Cimentaciones (2023) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, la cual contempla el empleo de métodos numéricos en diversas situaciones.

Dada la relevancia práctica de este documento, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG) contactó al CFMS con el objetivo de obtener la autorización para su traducción al español y ponerlo —en forma gratuita— a disposición de la comunidad geotécnica mexicana. Esta solicitud fue amablemente aceptada por el CFMS, que, en conjunto con la SMIG, colaboró en la traducción del documento, realizada originalmente por el MSc. Rafael Ortiz Hernández y revisada por varios miembros del CFMS y de la SMIG. Se espera que este documento contribuya al fortalecimiento del uso de los métodos numéricos en la práctica profesional para la solución de problemas geotécnicos en nuestro país. La SMIG agradece de manera especial a todas las personas que participaron en este importante esfuerzo.

El documento puede descargarse en el siguiente enlace: <https://www.smig.org.mx/archivos/rec-mod-num.php>



Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.
Mesa Directiva 2025-2026

TARIFAS DE PUBLICIDAD - REVISTA GEOTECNIA



COSTO POR EDICIÓN

PAQUETE DE 2 EDICIONES

PAQUETE DE 4 EDICIONES

1/4 DE PÁGINA	\$ 3,250.00	\$ 5,850.00	\$ 10,400.00
1/3 DE PÁGINA	\$ 4,350.00	\$ 7,830.00	\$ 13,920.00
1/2 DE PÁGINA	\$ 6,550.00	\$ 11,790.00	\$ 20,960.00
PAGINA INTERIOR	\$ 12,950.00	\$ 23,310.00	\$ 41,440.00
3a DE FORROS	\$ 14,950.00	\$ 26,910.00	\$ 47,840.00
2a DE FORROS	\$ 17,250.00	\$ 31,050.00	\$ 55,200.00
4a DE FORROS	\$ 19,750.00	\$ 35,550.00	\$ 63,200.00

Leandro R. AlejanoDepartamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente
Universidad de Vigo, Vigo, España

Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos: una herramienta ingenieril de gran utilidad, a veces sobreutilizada

Palabras clave: clasificaciones geomecánicas (CG), RMR, Q, aplicación, estabilidad de taludes, túneles, excavaciones subterráneas, minas.

RESUMEN

Las clasificaciones geomecánicas (CG) de los macizos rocosos, o sistemas de clasificación geomecánica, son técnicas desarrolladas para agrupar los macizos en distintas categorías, basándose en la valoración de ciertas características geométricas y geomecánicas de estos componentes geológicos naturales de la corteza terrestre.

Los macizos rocosos son conjuntos naturales de bloques de roca separados por discontinuidades y fallas. Numerosas obras de ingeniería se construyen dentro o sobre estos entramados rocosos naturales, que son variados y complejos. En la ingeniería de rocas, los macizos rocosos constituyen el material de construcción; sin embargo, a diferencia de otros campos de la ingeniería, sus propiedades no pueden seleccionarse, sino que deben conocerse y aprovecharse al máximo para los fines del proyecto en cuestión.

Las relaciones empleadas en las CG contribuyen a sistematizar la caracterización de los macizos rocosos, ya que generan un valor numérico único asignado al macizo, lo que permite su clasificación en una clase o tipo que, a su vez, indica tendencias de comportamiento y propiedades geomecánicas. En la mayoría de las CG esta clasificación puede utilizarse adicionalmente con fines de diseño preliminar, especialmente en el sostenimiento de túneles.

Las CG intentan considerar los aspectos geomecánicos más relevantes que afectan el comportamiento y la respuesta

mecánica del macizo rocoso, incluyendo parámetros relacionados con su estructura y con las condiciones superficiales de las discontinuidades. No obstante, para su aplicación como herramientas de diseño también incorporan parámetros no estrictamente vinculados al propio macizo, como la orientación de la excavación o el estado tensional.

Desde su desarrollo en las décadas de 1960 y 1970, las CG se han utilizado con diversos propósitos, entre ellos guiar el proceso de caracterización de macizos rocosos, identificar dominios geomecánicos, clasificar macizos en grupos, obtener propiedades específicas del macizo a escala de obra y diseñar sistemas de sostenimiento en túneles. Este uso multipropósito ha generado, en ocasiones, cierta confusión entre los usuarios, lo que ha llevado a cuestionar su fiabilidad y robustez.

En este artículo, el autor revisa inicialmente el desarrollo histórico de las CG, explicando su origen en el contexto de la evolución de la mecánica de rocas y de la ingeniería de macizos rocosos, así como los motivos por los cuales algunos sistemas alcanzaron una amplia difusión. Posteriormente, se analizan las clasificaciones más utilizadas, identificando sus distintos propósitos y destacando las principales fortalezas y debilidades señaladas en la literatura existente.

Entre las fortalezas cabe destacar que las CG son herramientas sencillas y eficaces que permiten evaluar la calidad de los

macizos rocosos, anticipar posibles problemas de excavación, apoyar el diseño geotécnico en etapas iniciales y realizar una primera evaluación de costes de la obra. De igual modo, permiten estimar propiedades mecánicas y facilitar significativamente la comunicación tanto entre geólogos e ingenieros, como entre profesionales de distintos ámbitos y países.

Entre las debilidades es necesario señalar que, aunque las CG son muy útiles en el ámbito de la mecánica de rocas, su uso indiscriminado, basado en datos limitados o fuera de su base empírica, puede conducir a resultados erróneos. Por ello, deben aplicarse de manera crítica, complementarse con otros métodos de análisis y considerar siempre sus limitaciones y su carácter típicamente conservador.

Se ofrece una evaluación personal basada en la experiencia del autor, en la que los problemas identificados se clasifican tanto en relación con las características del macizo rocoso potencialmente mal representadas como según sus posibles aplicaciones (clasificación, zonificación, cuantificación de parámetros y diseño de sostenimiento).

Asimismo, se presenta una discusión sobre la aplicación de las CG en la resolución de problemas de ingeniería de rocas, abordando tanto los antecedentes geológicos como sus aplicaciones prácticas. En cuanto a los antecedentes geológicos, resulta fundamental contar con un conocimiento adecuado de la geología local, especialmente desde el punto de vista estructural, antes de aplicar las clasificaciones, con el fin de interpretar correctamente las mediciones e identificar distintos dominios estructurales. Por otra parte, factores como la variabilidad y heterogeneidad natural de algunos macizos, la ausencia de discontinuidades medibles (por ejemplo, en rocas ígneas poco fisuradas o en materiales tipo bloques en matriz, BIM) y el grado de anisotropía tienden a complicar y a reducir la utilidad o eficacia de las clasificaciones.

Puede ocurrir que un macizo rocoso se clasifique razonablemente bien, pero que la aplicación específica de los resultados plantee problemas. Por ejemplo, identificar zonas con una clasificación similar, pero que se comportan de manera muy diferente, como macizos muy fisurados con juntas muy resistentes frente a otros poco fisurados con juntas débiles. También es posible que surjan dificultades en la selección del sostenimiento, cuyo éxito o fracaso puede depender de la posición concreta de la excavación dentro del macizo, así como en la estimación de propiedades resistentes y deformacionales, condicionadas por orientaciones específicas de las discontinuidades, el tipo de obra y los efectos de escala. En el documento principal se comentan errores representativos mencionados en estas líneas.

El autor expone las valoradas como principales contribuciones de estos métodos a la disciplina, e igualmente los posibles problemas derivados de su uso indebido o excesivo. Estas cuestiones se ilustran adicionalmente mediante una revisión de doce estudios prácticos de ingeniería de rocas donde se manifiestan tanto las fortalezas como las debilidades de las CG.

Si bien un enfoque de “diseño sobre la marcha”, basado en CG obtenidas en el frente del túnel y combinado con observaciones, mediciones y la experiencia de los ingenieros, ha resultado a menudo exitoso, su aplicación directa con fines de diseño, sin consideraciones adicionales, tiende a generar problemas. Aunque las CG son muy útiles y casi imprescindibles para fines comparativos, estos enfoques simplificados no siempre proporcionan respuestas adecuadas a las preguntas de diseño y pueden conducir a decisiones erróneas si se utilizan de forma aislada.

Las CG representaron en los años setenta del siglo XX un avance significativo en los estudios de ingeniería relacionados con la excavación de materiales complejos como los macizos rocosos, al permitir considerar la mayoría de las características relevantes que podían afectar al diseño de excavaciones en roca. No obstante, la obtención de las clasificaciones puede variar según el tipo de macizo, lo que exige experiencia, especialmente cuando se aplican con fines de diseño. Además, debido a la complejidad inherente de los macizos rocosos, las CG no siempre pueden abordar todos los aspectos relevantes de cada proyecto, por lo que, en general, basar las decisiones de diseño exclusivamente en estos enfoques no es recomendable.

El lector debe tener en cuenta que —en ocasiones— el factor desencadenante de la inestabilidad puede depender de detalles aparentemente menores, como la presencia, orientación o persistencia de una discontinuidad en una posición específica del macizo respecto a la excavación, la extensión de una zona alterada o la longitud y calidad de un elemento de refuerzo. Estos aspectos pueden no ser considerados con el nivel de detalle necesario por las CG, e incluso por otros enfoques de diseño más avanzados, como los modelos numéricos.

Las CG son, sin duda, una herramienta necesaria para avanzar hacia soluciones adecuadas en la ingeniería de rocas; sin embargo, no proporcionan respuestas a todas las cuestiones requeridas. En última instancia, el éxito del diseño depende de la reflexión y el juicio ingenieriles, basados en una combinación adecuada de enfoques de diseño, así como en un control apropiado mediante observaciones, mediciones y monitorización durante el proceso de excavación y sostenimiento.

En general, se concluye que la reflexión, junto con la observación, las CG y otras técnicas analíticas y numéricas, deben guiar a los ingenieros hacia soluciones adecuadas en los estudios y diseños de excavaciones en el ámbito de la ingeniería de rocas. Como señalaron Hoek y Londe: «La responsabilidad del ingeniero de diseño no es calcular con precisión, sino juzgar con rigor».

Puede consultar la versión extendida de este trabajo en: <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/clasificaciones-geomecanicas-de-los-macizos-rocosos-leandro-alejano.pdf>



TESIS

DESARROLLO DE UN MODELO DEL MÓDULO DE RESILIENCIA EN SUELOS NO SATURADOS ANTE VARIACIONES CLIMÁTICAS UTILIZANDO EL ÍNDICE DE THORNTHWAITE

Universidad Nacional Autónoma de México

Programa: Maestría y Doctorado en Ingeniería
Grado obtenido: Maestría

Autor

Jordan Reyes

Director

Roberto Hernández

Resumen

El módulo de resiliencia (MR) es un parámetro fundamental en el diseño de pavimentos, ya que representa la capacidad de los materiales del suelo para resistir y recuperarse ante cargas repetidas. Sin embargo, muchos modelos existentes son de carácter empírico y no consideran de manera integral variables ambientales que influyen en el comportamiento del suelo. En el presente estudio se propone un modelo predic-

tivo que integra la succión del suelo y las condiciones climáticas regionales utilizando el índice de Thornthwaite, con el objetivo de estimar las variaciones del módulo de resiliencia en suelos compactados. La investigación se fundamenta en el enfoque empírico-mecanicista del diseño de pavimentos, el cual reconoce la influencia de factores climáticos, especialmente el contenido de humedad, en el desempeño estructural de los pavimentos. El modelo desarrollado incorpora variables hidráulicas, climáticas y mecánicas relacionadas con el comportamiento de suelos no saturados. Utiliza datos experimentales sobre estos en diferentes condiciones de humedad y temperatura reportados en la literatura correspondiente. Los resultados muestran que el modelo propuesto logra una adecuada capacidad predictiva del módulo de resiliencia en comparación con los datos experimentales recopilados. Este trabajo contribuye a conocer mejor el comportamiento mecánico de los suelos no saturados al integrar la succión y las condiciones climáticas en la estimación del módulo de resiliencia. Además, proporciona una herramienta útil para el diseño de pavimentos bajo diferentes condiciones ambientales, destacando la importancia de considerar las variaciones de humedad en la evaluación estructural de los pavimentos.

Palabras clave: módulo de resiliencia, diseño empírico-mecanicista, succión del suelo, índice de Thornthwaite.



INTERACCIÓN ESTÁTICA SUELO-ESTRUCTURA DE CIMENTACIÓN INCLUYENDO ELEMENTOS PLACA

Universidad Nacional Autónoma de México

Programa: Maestría y Doctorado en Ingeniería
Grado obtenido: Maestría

Autor

Luis Enrique Muciños Hernández

Directores

Rigoberto Rivera Constantino

Juan José Pérez-Gavilán Escalante

Carmelino Zea Constantino

Resumen

Pese a que la interacción estática suelo-estructura constituye un aspecto fundamental en el análisis de cimentaciones superficiales, muchos enfoques prácticos simplifican el análisis considerando la cimentación como una retícula de vigas, lo cual excluye el comportamiento mecánico de los claros. En este contexto, la presente investigación desarrolla y valida un modelo numérico que incorpora explícitamente

la rigidez de los elementos que conforman la estructura de cimentación. Para tal efecto, se desarrolló una formulación de elemento finito para placas delgadas que condujo a una solución algebraica simbólica, la cual se acopla con una formulación matricial para elementos viga con efecto de cortante. Este ensamble se integra posteriormente con la matriz de rigidez del suelo, bajo el principio de compatibilidad de desplazamientos. La implementación del modelo se realizó mediante un código en lenguaje Python, diseñado como una herramienta práctica en la generación de parámetros de rigidez, útiles en modelos estructurales desacoplados. De las conclusiones derivadas de este trabajo, destaca que el modelo reproduce con amplia concordancia los patrones de desplazamiento y esfuerzos de contacto respecto a un modelo tridimensional de referencia (PLAXIS 3D). Asimismo, se demostró que, aunque un modelo de vigas equivalentes aproxima razonablemente los desplazamientos, su uso podría inducir errores en modelos desacoplados, ya que tiende a localizar la rigidez únicamente en los ejes de vigas, ignorando el efecto de los claros. Esto demuestra la importancia de modelar explícitamente los elementos tipo placa cuando se busca una estimación adecuada de las reacciones para el diseño del refuerzo en los tableros de la cimentación.



CONTROL DE COMPACTACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAJAS DE ARENA DISIPADORAS DE DEFORMACIONES EN PRESENCIA DE GRIETAS

Universidad Nacional Autónoma de México

Programa: Maestría y Doctorado en Ingeniería
Grado obtenido: Maestría

Autor

Cinthya Cervantes Barranco

Director

Moisés Juárez Camarena

Resumen

El agrietamiento del suelo asociado al hundimiento regional en el valle de México afecta significativamente a las edificaciones y la infraestructura urbana. Con el propósito de contribuir a su mitigación, el II-UNAM propuso construir "Cajas de arena disipadoras de deformaciones", que consisten, básicamente, en excavar una trinchera y posteriormente rellenarla con arena limpia. De esa forma, debido a que la arena no transmite esfuerzos de tensión, conforme a la evolución de la grieta, la arena se reacomoda evitando que se presenten discontinuidades bruscas o escalones en la superficie del terreno. Estas estructuras funcionan como elementos de disipación de la deformación.

El objetivo de esta investigación ha sido proponer un procedimiento estandarizado para la construcción y el control de calidad de estas estructuras de arena, empleando el penetrómetro dinámico ligero PANDA. La metodología consistió en tres etapas: 1) análisis granulométrico de la arena como material de relleno; 2) determinación del espesor óptimo de capa (20 cm) y 3) definición del número de pasadas con el equipo de compactación (10 pasadas).

Los resultados, basados en la construcción de 140 trincheras experimentales, en la alcaldía Iztapalapa, permitieron definir límites de aceptación de resistencia (4 a 14 MPa) y construir una carta de calibración con la que se logra establecer los límites máximo y mínimo de resistencia para la aceptación.

Aplicando la metodología geoestadística es posible identificar la heterogeneidad del material compactado. Asimismo, mediante análisis de modelado numérico, empleando el método de elementos finitos (MEF), se determinó que la eficiencia de la compactación depende de las condiciones de frontera y que la ubicación ideal de la grieta es el centro de la base de la caja disipadora.

Con base en los resultados obtenidos se concluye que el equipo PANDA es una alternativa adecuada y confiable respecto a métodos tradicionales empleados para evaluar el grado de compactación. Por otra parte, fue posible establecer una metodología para la mitigación de grietas aplicable en las zonas de potencial agrietamiento en la Ciudad de México.

Palabras clave: agrietamiento de suelos, cajas disipadoras de deformaciones, control de compactación, penetrómetro PANDA, método de elementos finitos, geoestadística.



LIBROS TÉCNICOS

Karsticidad en Los Andes. Explicación desde la perspectiva de la geotecnia

Jaime Suárez Díaz

Primer libro sobre la karsticidad de las rocas en Los Andes publicado en español. Esta obra ofrece una explicación comprensiva de los fenómenos kársticos en la región andina, abordados desde la perspectiva de la geotecnia. A través de estudios de campo, análisis geológicos y casos prácticos, el autor expone los desafíos que la karsticidad representa para la ingeniería, creando una referencia básica para la comprensión de la presencia de fenómenos kársticos y de agua subterránea en las rocas calcáreas. Una obra dirigida

a geotecnistas, ingenieros civiles, geólogos y personas interesadas en comprender la relación entre la geología, la ingeniería, la espeleología y los recursos hídricos subterráneos.

Disponible en acceso abierto en www.erosion.com.co



Walter I. Paniagua

Comité Asesor de Seguridad Estructural, CDMX

Norma Técnica Complementaria de Construcción y Supervisión

A finales del 2025 se planteó la propuesta de elaborar una nueva Norma Técnica Complementaria de Construcción y Supervisión (NTC-CyS) al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, enfocada en la construcción y supervisión de obras. A partir del primer trimestre de 2026 se integró un equipo de trabajo que la desarrollará, con el propósito de publicarla en 2029. Esta nueva NTC será de carácter técnico, no administrativo, legal o contractual.

La nueva NTC-CyS se preparará con base en los capítulos sobre construcción correspondientes en las otras NTC (capítulo 7, en el caso de la NTC-Cimentaciones) y se complementará con nuevos requisitos, según se necesite. Así, las NTC existentes quedarán exclusivamente como normas de diseño.

1. Justificación de la Norma

- Enfoque predominante en diseño. Las normas actuales se concentran principalmente en criterios de diseño, olvidando aspectos de ejecución que quedan sin regulación específica.
- Falta de homogeneidad en obra. Criterios heterogéneos entre proyectos generan inconsistencias en la calidad constructiva y procedimientos de control.
- Riesgos técnicos y legales. La ausencia de estándares claros incrementa la exposición a responsabilidades legales y compromete la seguridad estructural.

2. Objetivos de la NTC-Construcción y Supervisión

- Regular construcción y supervisión. Establecer lineamientos técnicos obligatorios para todos los actores involucrados en el proceso constructivo de estructuras.
- Criterios claros y verificables. Definir parámetros cuantificables y procedimientos específicos que permitan la evaluación objetiva del cumplimiento normativo.
- Protección al interés público. Garantizar la seguridad estructural de las edificaciones y la protección de los usuarios mediante estándares de calidad en la ejecución.

3. Principios rectores

La elaboración de esta NTC se fundamenta en tres pilares estratégicos que definen su alcance y orientación metodológica:

- No duplicar diseño. La norma complementa las especificaciones de diseño existentes sin replicar contenidos, enfocándose exclusivamente en aspectos de ejecución y control de obra. En el caso de la NTC-Cimentaciones, se extraerá el material pertinente a la nueva NTC, conservando lo que sea adecuado en el aspecto del diseño (e.g., el factor de reducción por perforación previa en pilotes, diámetros mínimos de pilas de acuerdo con la profundidad, etc.).

- Enfoque práctico. Prioriza la aplicabilidad directa en campo, con criterios operativos que respondan a las condiciones reales del proceso constructivo en la Ciudad de México.
 - Claridad para contratistas, DRO, corresponsables en seguridad estructural y supervisión. Redacción dirigida específicamente a contratistas, directores responsables de obra y supervisores, facilitando la interpretación y aplicación de los requisitos normativos.
4. Alcance de la NTC
- Aplicación en obras. Se implementará en construcciones nuevas y modificaciones estructurales en edificaciones existentes dentro de la CDMX.
 - Procesos regulados. Se busca regular la ejecución de trabajos, procedimientos de control de calidad y medidas de seguridad durante la construcción.
 - Exclusiones definidas. No incluirán criterios de diseño estructural o geotécnico, análisis sísmico ni dimensionamiento de elementos, ya contemplados en otras NTC.

El contenido preliminar es el siguiente:

1. Disposiciones generales
2. Trabajos preliminares
3. Cimentaciones
4. Estructuras de concreto
5. Estructuras de acero
6. Mampostería estructural
7. Estructuras de madera
8. Control de calidad
9. Seguridad
10. Medio ambiente
11. Supervisión técnica
12. Documentación y registros
13. Rehabilitación estructural
14. Demoliciones
15. Recepción de obra
16. Responsabilidades

De esta manera, se busca contar con una NTC autocontenida en materia de construcción y supervisión, donde los profesionales en estas especialidades dispongan, en un solo documento, de los requisitos mínimos necesarios que les permita interpretar los planos y especificaciones, para ejecutar las obras de manera adecuada.



CALENDARIO

2026

Junio

23

Historias que construyen ingeniería
Ciudad de México - Virtual
https://us02web.zoom.us/webinar/register/WN_c7TMbD_9Qq-Q7j0Jc6ZzRQ

Agosto

6 - 10

12º Simposio Internacional sobre Monitoreo de Campo en Geomecánica (ISFMG 2026)
Indore, India
<https://isfmg2026.com>

Septiembre

16 - 18

4º Simposio Internacional sobre Preservación de Monumentos y Sitios Históricos
Atenas, Grecia
<https://tc301-athens.com/>

Octubre

30 - 6

Noviembre

XV Congreso de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica y Medio Ambiente
Delft, Países Bajos
<https://www.iaeg2026.org/150970/home>

2027

Noviembre

4 - 6

Conferencia Internacional sobre diseño basado en el desempeño en Ingeniería Geotécnica Sísmica
Puerto Varas, Chile
<https://www.pbd-v-chile.com/>

Noviembre

11

XXXIII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica y XXIV Reunión Nacional de Profesores de Ingeniería Geotécnica
Palacio Mundo Imperial
Acapulco, Guerrero
<https://www.smig.org.mx/archivos/eventos-smig-2026/flyer-promo-rnig-rnpig.pdf>

Marzo

17 - 19

3º GEOMANDU 2027
11º AYGEC & 1º SACG
Katmandú, Nepal
<https://geomandu.ngeotechs.org/>

Agosto

6 - 10

9º Conferencia Internacional sobre Suelos No Saturados
Boston, Estados Unidos
<https://www.issmge.org/publications/review-platform/conferences/unsat2027>

LIBROS



IR A TEXTO CORRIDO

Historia secreta de la bomba atómica

Peter Watson

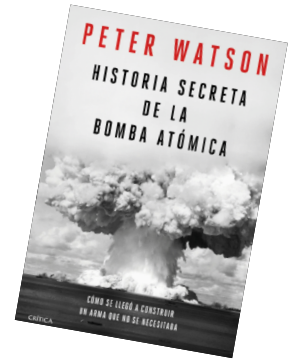
El autor —historiador y periodista— se basa en documentos recientemente desclasificados para explicar la historia de cómo sucedió la ideación y construcción de la bomba atómica.

Inicialmente plantea el contexto mundial —años previos a la Segunda Guerra Mundial— caracterizando a los principales científicos del momento y sus investigaciones, explicando cómo las distintas aportaciones permitieron concebir el uso de la energía nuclear para fines bélicos.

En forma paralela a lo anterior, el autor expone la posición de los políticos, tanto del bando alemán como de los aliados y esclarece el modo como la comunidad científica expresó reservas, e incluso oposición, a la construcción de un arma

nuclear. Asimismo, esa comunidad pugnó por la cooperación internacional para evitar lo que a la postre fue la “guerra fría”.

El libro por momentos parece un thriller cuyos personajes son los científicos (en especial Niels Bohr), los políticos (Churchill, Roosevelt, Truman), los militares (Groves) y donde no faltan los espías (ingleses, alemanes y rusos). Aunque el resultado final es conocido, no por eso deja de ser importante saber cómo y por qué sucedió este invento de tanto impacto para el mundo.

**Y uno se cree**

Jordi Soler

El libro trata del proceso de creación de una canción. Relata la historia de cómo se escribió una canción “al alimón” entre el mexicano de origen catalán Jordi Soler y el famoso Joan Manuel Serrat, también catalán.

Se inicia cuando Soler, que se encontraba en Barcelona, recibe una llamada de Serrat, quien se encontraba en México y le propuso escribir una canción en forma colaborativa. Soler aceptó y en el proceso de realización recordó su infancia en Veracruz y cómo en esa época las canciones de Serrat le permitieron, a él y a su entorno, vincularse con la identidad española en general y catalana en particular.

Una característica de la novela es que plasma los colores, nombres, palabras y demás factores que se relacionan con la filiación mexicana del autor. En fin, que a través del proceso de escribir una canción, se forja una amistad en el proceso mismo de crear.



IR A TEXTO CORRIDO

**NUEVOS SOCIOS**

Juan Aldo Chávez Gómez
Sergio Enrique Soto Aparicio
Felipe Vázquez Guillén
Iván Zacarías Hernández

Audini Montoya Orozco
Víctor Manuel Carbajal Piña
Manuel León Pérez
Ámbar Andrea Arvayo Díaz

Eduardo José García Romero
Luis Mariano Cerca Martínez
Félix Antonio Herrera Pérez
Javier Francisco Báez Satizábal

1^{ra} Conferencia Internacional en Mecánica de Rocas e Ingeniería de Rocas

Los días 19 y 20 de febrero de 2026, en el Auditorio José Luis Sánchez Bribiesca de la Torre de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, en la Ciudad de México, se llevó a cabo con gran éxito la 1^a Conferencia Internacional de Mecánica de Rocas e Ingeniería de Rocas, organizada por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG) y la Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas (AMITOS). Se contó, además, con la colaboración de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas e Ingeniería de Rocas (ISRM) y la Asociación Internacional de Túneles y Espacios Subterráneos (ITA-AITES).

Este evento reunió a especialistas y profesionistas nacionales e internacionales de relevante trayectoria, quienes presentaron avances, investigaciones y experiencias en temas como la caracterización y propiedades de la roca intacta y de los macizos rocosos, aplicables a obras civiles, mineras y de geomecánica profunda (para campos geotérmicos y de hidrocarburos). Los destacados ponentes compartieron sus conocimientos y el estado del arte en el uso de los métodos empíricos, analíticos, numéricos y los basados en la inteligencia artificial aplicados al análisis y diseño de obras en roca.

En las sesiones se destacó la complejidad y la importancia de realizar una caracterización detallada de los macizos rocosos. Los ponentes señalaron, con recurrencia, la importancia del criterio para la identificación y definición de características de las discontinuidades y se refirieron a las variables de mayor influencia en el comportamiento y la estabilidad de toda obra de infraestructura y/o minera.

Respecto a los temas del diseño geotécnico, la modelación numérica, si bien ha tenido avances significativos, aún enfrenta grandes retos asociados a la definición de parámetros representativos —en ocasiones intangibles— y la incorporación de la complejidad inherente de los macizos rocosos para modelar el comportamiento del terreno. En este contexto se enfatizó que los modelos presuponen una realidad



Asistentes y ponentes del evento.

relativa y que representan una herramienta de apoyo para el diseño geotécnico.

En cuanto a los temas de geomecánica profunda, se presentaron tópicos acerca de la caracterización de formaciones sedimentarias e ígneas, resaltando que aún queda mucho por realizar e investigar en estas áreas. Finalmente, cabe destacar la presentación sobre los enfoques integrados y multifuncionales que, al alinear las consideraciones técnicas, ambientales y sociales, permiten mejorar la toma de decisiones y la planificación del espacio subterráneo para reducir riesgos a largo plazo.

El evento resaltó, asimismo, por una numerosa asistencia conformada por estudiantes, docentes, proveedores y profesionistas en las áreas de geología, geotecnia y de minería, quienes intercambiaron opiniones, conocimientos y experiencias. Esto permitió conocer el contexto actual y las tendencias de la mecánica de rocas e ingeniería de rocas.

¡Gracias a los ponentes y asistentes por su participación en esta primera conferencia internacional! Ello reafirma el interés de las comunidades académica y profesional por impulsar el desarrollo de la ingeniería de rocas en México.



2° Simposio Internacional sobre Depósitos de Jales

El 2° Simposio Internacional sobre Depósitos de Jales se celebró del 11 al 13 de marzo de 2026 en el Centro de Convenciones La Cascada, en Hermosillo, Sonora, México, bajo la organización del comité técnico de presas y depósitos de jales de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG). El encuentro reunió a más de 380 participantes de Argentina, Brasil, Chile, Canadá, Estados Unidos, España, Perú y México, consolidándose como un espacio de referencia para el intercambio de conocimientos y experiencias en torno a la planeación, diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de jales.

Las actividades iniciaron el 11 de marzo con cuatro cursos presimposio de alto nivel técnico, enfocados en temas clave para la gestión segura y eficiente de estas estructuras. Entre los principales contenidos se abordaron la respuesta dinámica ante sollicitaciones sísmicas, la caracterización geotécnica, la evaluación de estabilidad, la gestión del riesgo mediante métodos semicuantitativos y la aplicación de criterios internacionales de seguridad para el análisis y la toma de decisiones. Estos cursos contaron con la participación de 165 asistentes y 17 instructores de reconocido prestigio (fig. 1).

El programa técnico se desarrolló durante los días 12 y 13 de marzo. Comenzó con la ceremonia de inauguración (fig. 2), en la que participaron autoridades gubernamentales, académicas y representantes de organizaciones profesionales vinculadas con la ingeniería geotécnica y la minería. Destacó la presencia del Lic. Roberto Gradillas Pineda, secretario de Economía y Turismo del estado de Sonora.



Figura 1. Ponencia sobre caracterización geotécnica y estabilidad de depósitos de jales.



Figura 2. Ceremonia de inauguración.

Uno de los principales atributos del simposio fue la calidad de su contenido académico y técnico. El programa incluyó 12 conferencias magistrales, orientadas a presentar avances, tendencias y mejores prácticas en el diseño, la evaluación y la gestión de depósitos de jales, así como 29 ponencias distribuidas en sesiones paralelas, en las que se expusieron estudios de caso, desarrollos metodológicos y experiencias de aplicación, que reflejan el nivel de la ingeniería que se ha logrado en México y otros países.

Asimismo, se contó con una exposición de pósters y con la integración de las contribuciones técnicas en las Memorias del Simposio. Estas se encuentran disponibles para descarga gratuita en la biblioteca digital de la SMIG (fig. 3), lo que amplía el alcance de los conocimientos compartidos durante el evento.

De manera complementaria, se organizaron mesas redondas que propiciaron el intercambio técnico y estratégico en torno a la gobernanza y operación de depósitos de jales, así como al análisis del marco normativo y regulatorio aplicable. También se llevó a cabo una sesión educativa enfocada en la formación de nuevos especialistas en esta área, además de una exposición técnico-comercial que despertó un significativo interés entre los asistentes.

El éxito de esta segunda edición fue posible gracias al trabajo coordinado del Comité Organizador y de los comités Técnico, Editorial, Local y Asesor, cuya dedicación hizo posible una experiencia académica y profesional de gran calidad.

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica y el Comité Organizador expresan su más sincero agradecimiento a los ponentes, instructores, patrocinadores, expositores y asisten-



tes por su valiosa participación. Su entusiasmo y compromiso contribuyeron de manera decisiva al fortalecimiento de este foro especializado, que hoy se reafirma como un espacio fundamental para impulsar el conocimiento, la seguridad y las mejores prácticas en materia de depósitos de jales.

Con esta segunda edición, el simposio consolida su relevancia en la agenda técnica internacional y refrenda el compromiso de la comunidad geotécnica y minera con el desarrollo responsable de infraestructuras esenciales para la sociedad.

 **IR A TEXTO CORRIDO**

2° Simposio Bahía de Salsipuedes

El pasado 25 de marzo, en las instalaciones del Colegio de Ingenieros Civiles de México, se celebró el 2° Simposio Bahía de Salsipuedes, organizado, de manera conjunta, por la Asociación Mexicana de Vías Terrestres (AMIVTAC) y la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG), como un importante espacio de análisis técnico y de reflexión en torno a la problemática geotécnica asociada a la Autopista Escénica Tijuana-Ensenada. A casi diez años del primer simposio, este segundo encuentro dio continuidad a la discusión sobre los mecanismos de inestabilidad que han afectado históricamente a esta obra.

Uno de los momentos centrales del evento fue la participación del Ing. Enrique Santoyo Reyes como decimotercer conferencista magistral Alfonso Rico Rodríguez. Su conferencia permitió no solo profundizar en el análisis de los trabajos de estabilización desarrollados en la carretera, sino también rendir homenaje al legado del Ing. Alfonso Rico Rodríguez, figura fundamental de la ingeniería geotécnica mexicana y referente obligado en el estudio de esta problemática. En este sentido, el simposio logró establecer un valioso vínculo entre la trayectoria de ambos ingenieros, unidos por un mismo desafío técnico: la Autopista Escénica Tijuana-Ensenada.

En el marco de esta conferencia, el Ing. Enrique Santoyo Reyes presentó un detallado contexto histórico del origen de la carretera, así como la geomorfología a lo largo de su trazo en el tramo correspondiente a la bahía. Asimismo, expuso los principales deslizamientos históricos registrados en la zona y las soluciones implementadas para su estabilización, brindándoles un reconocimiento a los ingenieros que participaron en dichos trabajos.



Figura 4. Asistentes a conferencias plenarias.

Descarga en: <https://smig.org.mx/archivos/eventos-smig-2026/2sisdj/2sisdj-memorias.php>

En el transcurso de la jornada las ponencias abordaron la geología del sitio, desde una perspectiva regional hasta el análisis detallado de zonas específicas con presencia de deslizamientos. Se evaluaron las condiciones de estabilidad en distintos puntos, destacando la importancia de comprender tanto la cinemática del movimiento como las propiedades de resistencia a lo largo de la superficie de deslizamiento.

De igual forma, se subrayó la relevancia de una adecuada supervisión y control durante la ejecución de las obras de estabilización, con el fin de asegurar la calidad de los trabajos, el cumplimiento de los plazos y la optimización de costos, elementos indispensables para mantener la operabilidad de la carretera.

Se discutió también el papel de la instrumentación geotécnica, así como los desafíos asociados a su instalación e interpretación, destacando su contribución en la identificación de superficies de deslizamiento y en la evaluación del desempeño de las obras.

El simposio incluyó además una mesa redonda en la que se analizaron distintos temas relacionados con las condiciones del proyecto, las estrategias de estabilización y su monitoreo, así como las perspectivas para garantizar la seguridad y funcionalidad de la vía.

Fue una jornada muy valiosa e interesante, que mostró de modo fehaciente la calidad de la ingeniería mexicana y su capacidad para resolver los desafíos más complejos. Si bien el ser humano no es capaz de controlar la naturaleza, sí puede aplicar su ingenio para coexistir con ella, lo que permite disponer de obras tan destacadas como la Autopista Escénica Tijuana-Ensenada.



5° Simposio Internacional de Suelos No Saturados

Durante los días 29 y 30 de abril de este año, la comunidad geotécnica global puso sus ojos —y sus tensiómetros— en el 5° Simposio Internacional de Suelos No Saturados, organizado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica SMIG y el Departamento de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato.

En la inauguración del evento, el Dr. Eduardo Rojas González, presidente del Comité Técnico de Suelos No Saturados de la SMIG; el Dr. Miguel Ángel Manica Malcolm, presidente de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, y la Dra. María de la Luz Pérez Rea, directora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, dieron la bienvenida a los asistentes.

Las ponencias magistrales subrayaron cómo la interacción entre las fases sólida, líquida y gaseosa determinan desde la estabilidad de un talud hasta el agrietamiento de una cimentación superficial. Iniciaron las participaciones el día 29 de abril con la intervención magistral del profesor Enrique Romero, director del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Politécnica de Cataluña, quien en su ponencia titulada *New challenges and opportunities for unsaturated soil mechanics*, describió los retos en predecir cómo se comportan los suelos bajo condiciones extremas, específicamente sobre el acoplamiento Termo-Hidro-Mecánico (THM).

El día 30 de abril, la doctora Sandra Orlandi, de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, impartió la conferencia magistral *Expansive soils: how to identify, classify and quantify them*. Su intervención se caracterizó por defender la aplicación de la ciencia de materiales y la mecánica de suelos para resolver problemas geológicos específicos de la Patagonia, promoviendo el uso de materiales sustentables en la construcción civil. Describió el uso de lignosulfonatos de calcio y otros subproductos de la industria forestal como estabilizantes ecológicos.

La segunda sesión magistral culminó con la ponencia de la doctora Angelica Tuttolomondo, del Instituto Politécnico Federal de Lausana, quien describió su enfoque en el estudio de la mecánica de suelos no saturados mediante la integración de la experimentación avanzada con la modelación constitutiva, abordando el concepto de esfuerzo efectivo, no como un valor estático, sino como una variable dependiente de la estructura del suelo. Esto genera herramientas numé-

ricas y experimentales que permiten predecir el comportamiento de suelos en presar, terraplenes, bentonita bajo condiciones no saturadas y gradientes térmicos, así como lluvias que activan fallas en laderas. En su conferencia, titulada *New insights into water retention mechanics and hydro-mechanical coupling*, describe los alcances logrados en la descripción de la histéresis en la curva de retención y su impacto en el esfuerzo efectivo.

El simposio tuvo un marcado acento en la sostenibilidad. Se discutió extensamente cómo los suelos no saturados son nuestra primera línea de defensa ante las inundaciones repentinas y las sequías prolongadas. La capacidad de entender la infiltración en suelos parcialmente saturados es hoy la diferencia entre una ciudad resiliente y una vulnerable.

Hubo una crítica constructiva hacia la normativa actual: muchos códigos de edificación siguen ignorando el estado no saturado, lo que conduce a diseños sobredimensionados o, peor aún, a fallos inesperados por expansión o colapso del suelo.

El cierre del evento nos dejó una sensación de urgencia y optimismo. El 5° Simposio Internacional no fue solo una reunión de académicos, sino un llamado a la acción para los ingenieros de práctica. El mensaje fue directo: el mundo real no está saturado y nuestra ingeniería tampoco debería estarlo.

El simposio contó con la participación de asistentes provenientes de distintos países, entre los cuales destacaron: México (238 participantes), Perú (50), Colombia (26), Bolivia (16), Ecuador (10), España (7), Argentina (5), Guatemala (4), Chile (3) y Estados Unidos (3). Como se evidencia, la participación internacional representa aproximadamente 37 % del total de asistentes, lo que confirma el carácter global del evento y su capacidad de convocatoria más allá del contexto nacional.



El profesor Enrique Romero durante su presentación.



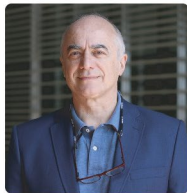
ACAPULCO 2026

XXXIII REUNIÓN NACIONAL DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA
XXIV REUNIÓN NACIONAL DE PROFESORES DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA

25 al 28 NOV 2026

Palacio Mundo Imperial
Acapulco, Guerrero

Conferencia Magistral
Nabor Carrillo Flores



Dr. Carlos Santamarina
Instituto de Tecnología
de Georgia

Conferencia Magistral
Leonardo Zeevaert Wiechers



Dr. Youssef M. A. Hashash
Universidad de Illinois en
Urbana-Champaign

Conferencia Magistral
Raúl J. Marsal Córdoba



Dr. Giovanni Grasselli
Universidad de Toronto

Conferencia Magistral
Eulalio Juárez Badillo



Dr. Jean Vaunat
Universidad Politécnica
de Cataluña

Cursos pre-congreso

Fechas Importantes

- Fecha límite para recepción de artículos
21 de junio de 2026



Fecha límite de inscripción VII Olimpiada en Geotecnia
30 de septiembre de 2026



Fecha límite de inscripción V Reto en Geotecnia
01 de julio de 2026



Fecha límite de inscripción I Concurso en Modelación Numérica
01 de julio de 2026

Sesiones Técnicas

- Presas y depósitos mineros.
- Cimentaciones profundas, sitios históricos y recimentaciones.
- Modelación numérica.
- Ingeniería geotécnica forense.
- Ingeniería geotécnica sísmica.
- Mecánica de rocas.
- Mejoramiento de suelos.
- Suelos no saturados.
- Caracterización geotécnica de ciudades.
- Obras subterráneas.
- Geotecnia costa fuera.
- Exploración y ensayos de laboratorio.
- Interacción suelo - estructuras.
- Vías terrestres (taludes y laderas, geosintéticos).
- Flujo de agua y de calor en medios porosos.

Pago anticipado hasta el 15 de Julio de 2026

CATEGORÍAS	XXIII RNPI	COMIDA XXIII RNPIG	CURSO*	XXXII RNIG	XXXII RNIG + CURSO*
Socio	\$ 0.00	\$ 400.00	\$ 1,800.00	\$ 8,300.00	\$ 9,100.00
No socio	\$ 0.00	\$ 400.00	\$ 2,200.00	\$ 9,000.00	\$ 10,100.00
Estudiante	\$ 0.00	\$ 400.00	\$ 950.00	\$ 3,000.00	\$ 3,600.00
Capítulo estudiantil	\$ 0.00	\$ 400.00	\$ 650.00	\$ 2,600.00	\$ 2,900.00
	CUOTAS +IVA	CUOTAS +IVA	CUOTAS +IVA	CUOTAS +IVA	CUOTAS +IVA

A partir del 16 de Julio de 2026

CATEGORÍAS	XXIII RNPI	COMIDA XXIII RNPIG	CURSO*	XXXII RNIG	XXXII RNIG + CURSO*
Socio	\$ 0.00	\$ 400.00	\$ 2,400.00	\$ 10,600.00	\$ 11,700.00
No socio	\$ 0.00	\$ 400.00	\$ 2,800.00	\$ 11,500.00	\$ 12,900.00
Estudiante	\$ 0.00	\$ 400.00	\$ 1,500.00	\$ 4,200.00	\$ 5,100.00
Capítulo estudiantil	\$ 0.00	\$ 400.00	\$ 1,100.00	\$ 3,700.00	\$ 4,300.00
	CUOTAS +IVA	CUOTAS +IVA	CUOTAS +IVA	CUOTAS +IVA	CUOTAS +IVA

Información General

Brenda Aguilar
Gerente SMIG

- administracion@smig.org.mx
- contacto@smig.org.mx
- +52 56 1059 2690 (Sólo WhatsApp)

Información de Exposición

Leticia Bernal

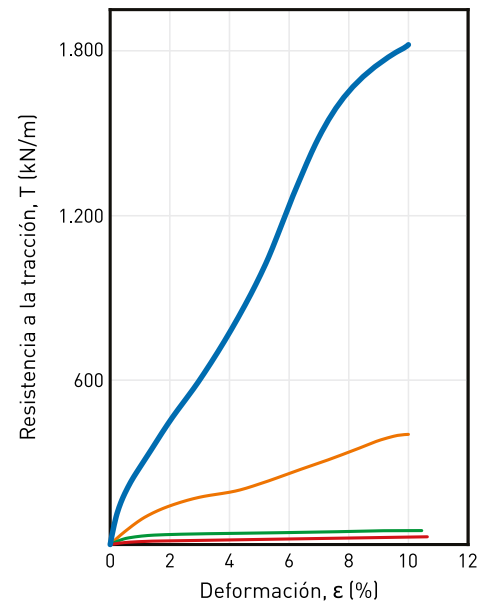
- lety.bernal@ecodsa.com.mx
- +52 55 5599 2860

Stabilenka® 1800

EL GEOTEXTIL MÁS RESISTENTE
FABRICADO EN AMÉRICA.

- # Resistencia a la tracción superior a 1.800 kN/m
- # 5x más resistente que una geomalla uniaxial típica de PET
- # 20x más resistente que un GTX tejido típico de PP de "alta resistencia"
- # 50x más resistente que una geomalla típica de PP biaxial o triaxial

Comparativo con otros
geosintéticos: valores máximos



■ Stabilenka 1800 (GTX tejido de PET) ■ GTX tejido típico de PP de "alta resistencia"
■ Geomalla uniaxial típica de PET ■ Geomalla típica de PP biaxial o triaxial

Departamento de Transportes de Florida (2025): terraplén sobre suelos blandos

HUESKER

Teléfono: +52 442 868 9456
Correo electrónico: orivas@huesker.com
Sitio web: www.huesker.lat
LinkedIn: HUESKER LATAM

 **HUESKER**
Ideas. Ingenieros. Innovación.