

geotecnia

DICIEMBRE 2024
- FEBRERO 2025

274



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



CONCEPTOS GENERALES DE REOLOGÍA DE JALES

RESISTENCIA AL CORTE DE LOS JALES
BAJO CARGA MONÓTONA

Sin membresías, sin pagos adicionales, ni trucos.

Geosoft, la herramienta de diseño con Geosintéticos más completa.

Nuestro equipo técnico está listo
para ayudarte, ¡contáctanos!
662 433 7011

    
Amanco Wavin Geossinteticos



Descárgalo gratis
desde el primer instante.



**Mesa Directiva 2023-2024****Presidente**

Ricardo Enrique Ortiz Hermosillo

Vicepresidenta

Natalia del Pilar Parra Piedrahita

Secretario

Miguel Ángel Mánica Malcom

Tesorera

Maria del Carmen Cabrera Velázquez

Vocales

Maria Elena Acevedo Valle

Jorge Armando Rábago Martín

Yary Yanela López Calix

Giovanni A. Quintos Lima

Voleida del Valle Suárez Arellano

Gerente

Brenda Aguilar Silis

Delegaciones Regionales

Baja California

Michoacán

Occidente

Puebla

Querétaro

Sureste

Tabasco

Veracruz

Representaciones

Chiapas

Ciudad Juárez

Irapuato

Monterrey

Colaboración y desarrollo en geotecnia: un compromiso compartido

La experiencia acumulada en nuestros proyectos es muestra de la importancia de formar alianzas y colaborar con disciplinas diversas. Las sinergias enriquecen nuestra perspectiva y nos permiten enfrentar retos significativos, ofreciendo soluciones efectivas a los inversionistas. Esta es la visión que ha guiado la labor de la actual Mesa Directiva.

Durante nuestra gestión, para mejorar nuestra comunicación con los asociados y ofrecer contenido valioso y accesible, hemos transformado el boletín informativo pasando de publicación semanal a publicación mensual. Luego de abrirlo al público a través de LinkedIn, hasta el momento, hemos registrado un incremento de más del 112% en nuestros seguidores.

Además, renovamos nuestra página web, organizando su contenido de manera más amigable y creando un micrositio para exponer las soluciones que cada miembro institucional ofrece. El acceso a este espacio de diálogo se suma a los beneficios de los miembros institucionales, permitiéndoles hacer enlaces comerciales.

Respecto a los beneficios de la membresía, los actualizamos e introducimos dos nuevas categorías: la membresía académica y plata consultoría, esta última dirigida a PYMES y/o consultores. Adicional a las membresías institucionales existentes, hasta ahora, se han asociado dos empresas y una universidad, lo que fortalece nuestras relaciones con el sector empresarial.

Otro aspecto crucial ha sido nuestro enfoque en el papel de la mujer en nuestra práctica. Desarrollamos diversas actividades con el objetivo de actualizar y dar visibilidad al trabajo de las ingenieras, maestras y doctoras. Consideramos que el trabajo en equipo con nuestros colegas hombres es esencial para avanzar en nuestra profesión y, desde ahí, enunciamos la voluntad de continuar el legado de nuestras compañeras de mesas directivas anteriores de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.

Estoy orgullosa de ser parte de esta mesa directiva en la que hemos generado sinergia entre las afiliadas y afiliados, pues tengo la convicción de que juntos fomentamos el conocimiento geotécnico como un factor clave para el desarrollo de nuestro país.

Yary Yanela López Calix

Vocal de la Mesa Directiva 2023 - 2024 de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, AC

Síguenos en



@smiggeotecnia



Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica



inggeotec



Geotecnia, año 13, núm. 274, diciembre 2024 - febrero 2025, 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 16 de diciembre de 2024, con un tiraje de 100 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...

El puente entre las humanidades y la ingeniería: una formación completa

Margarita Puebla Cadena



7 SEMBLANZA

Profesor François Schlosser

9 ARTÍCULO TÉCNICO

Conceptos generales de reología de jales

Alexandra Ossa López y Javier Valenzuela Hernández

17 ARTÍCULO TÉCNICO

Portada

Resistencia al corte de los jales bajo carga monótona

Andy Fourie, Ramón Verdugo, Annika Bjelkevik, Luis Alberto Torres Cruz y Dobroslav Znirdarcic



28 TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

Equipo multiaxial para modelos a escala con tomografía computarizada

Thomas Riccio, Tomás Romero-Olán, Marco Previtali, Matteo O. Ciantia y Miguel A. Mánica

32 CALENDARIO

33 NUEVOS SOCIOS

33 RESEÑAS - Tesis

36 RESEÑAS - Libros técnicos

37 NOTA INFORMATIVA

38 CULTURA

39 NOTICIAS

PORTADA: RESISTENCIA AL CORTE DE LOS JALES BAJO CARGA MONÓTONA

FOTO DE PORTADA:
ING. VIOEL ESPINO E ING. OCTAVIO RODRÍGUEZ

Dirección General

Ricardo Enrique Ortiz Hermosillo

Dirección Ejecutiva

Natalia del Pilar Parra Piedrahita

Consejo Editorial

Juan de Dios Alemán Velásquez
Gabriel Yves Armand Auvinet Guichard
Roberto Avelar Cajiga
María del Carmen Cabrera Velázquez
Jorge E. Castilla Camacho
Francisco Alonso Flores López
Moisés Juárez Camarena
Germán López Rincón
Raúl López Roldán
Miguel Ángel Mánica Malcom
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.
Guillermo Springall Cáram †
Carlos Roberto Torres Álvarez

Comercialización

Brenda Aguilar Silis

Edición y Diseño



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

Impresión



Copygraphic
www.copygraphic.com.mx

**Margarita Puebla Cadena**

El puente entre las humanidades y la ingeniería: una formación completa

Margarita Puebla Cadena, ingeniera con una perspectiva de formación profesional muy particular.

Ingeniera Civil por la Facultad de Ingeniería, licenciada en Pedagogía y maestra en Enseñanza Superior por la Facultad de Filosofía y Letras, sus tres títulos fueron obtenidos en la UNAM. Es especialista en diversos tipos de terapia y tiene una larga trayectoria como docente, no solo de materias relacionadas a la geotecnia sino también de corte humanista. Su labor formativa trasciende el rol de profesora, debido a que cuenta con proyectos de investigación y crónica en los que cuestiona la idea y pensamiento de la comunidad ingenieril con el fin de encauzarlos hacia mejores horizontes.

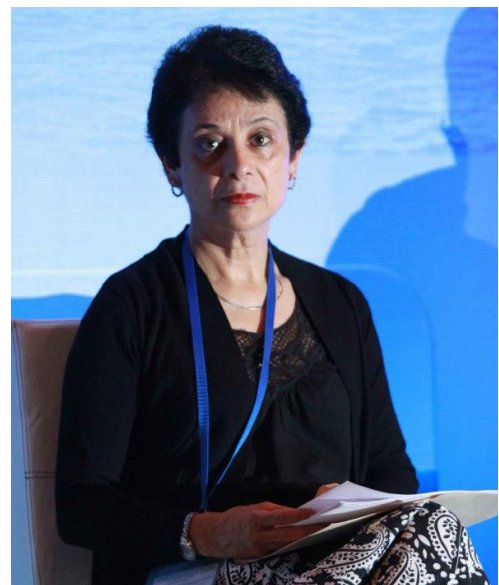
El punto de partida

Hacia un camino que la llevaría a disciplinas aparentemente lejanas, la profesora Margarita Puebla encontró su punto de partida en la influencia de su padre. “Mi papá fue ingeniero civil. Trabajó mucho tiempo en la Secretaría de Recursos Hidráulicos, dio clases en el Politécnico, en la Vocacional 2 y en la Facultad de Ingeniería para los geofísicos”.

“Debido a que entre la secundaria y la prepa me tocó un desfase por motivos de una huelga, cuando entré a la prepa decidí adelantar materias con exámenes extraordinarios. Sin darme cuenta, terminé los tres años de preparatoria en dos”.

El momento de elegir la carrera llegó más pronto de lo que pensaba y, tomándola por sorpresa, se decantó por las matemáticas. “La primera que elegí, influenciada también por la familia, fue matemáticas. En aquella época te llegaba un sobrecito con la aceptación. Y así recibí yo el mío: Bienvenida a la Facultad de

Ciencias, bienvenida a la carrera de Matemática. Pero, ya con esto en las manos, dije: ¿Cómo? No. Esto no es lo que quiero estudiar”.



Acudió a servicios escolares y, nuevamente, se encontró con la pregunta sobre qué era lo que le interesaba. Habiendo cursado en la preparatoria el área de físico-matemática le pareció que la carrera más adecuada era la ingeniería; la que le resultaba más cercana, por su padre, la civil. Dos semanas después de que iniciaran las clases, ella había quedado formalmente inscrita. “De la carrera, me molestaba que las materias de matemáticas se enseñaran sin demostraciones; pero había temas muy interesantes y grandes profesores. Debido a la influencia de algunos de ellos fue que me interesé en la mecánica de suelos”.

Humanidades para todo y para todos

Con una profunda pasión por la lectura y la cultura, la ingeniera fue abriendo caminos alternos a lo técnico, que la acercaban a su vocación más humanista.

“También fue cosa familiar. Mi papá tenía una biblioteca en la casa y así tuve alcance a todos los clásicos. Ya en la carrera de ingeniería, si

“También fue cosa familiar. Mi papá tenía una biblioteca en la casa y así tuve alcance a todos los clásicos. Ya en la carrera de ingeniería, si tenía horas libres, me brincaba a la Facultad de Filosofía y Letras para tomar clases de las materias que me interesaban.”

tenía horas libres, me brincaba a la Facultad de Filosofía y Letras para tomar clases de las materias que me interesaban. Cursé muchas sin ningún crédito, pero no me importaba, porque era algo que disfrutaba mucho. En lugar de socializar con mis compañeros de ingeniería, me escapaba a tomar otras clases”.

Ese puente construido entre la Facultad de Ingeniería y la de Filosofía y Letras acabó por consolidarse en su segunda carrera: Pedagogía. El vínculo resultó muy lógico. “Cuando terminé Ingeniería Civil, pensé en estudiar una maestría. Mi primera opción fue mecánica de suelos, pero seguía llamándome mucho la parte humanística. Entré a dar clases y todo fue más claro. Dije: Si voy a dar clases, voy a hacerlo bien preparada. Así que me inscribí a la carrera en sistema abierto.” Con ese impulso estudiantil al máximo, continuó con una maestría en Enseñanza superior y, un poco después, ingresó a la Facultad de Psicología, cursando varias especialidades en psicoterapia.

“Mucha gente me ha preguntado qué relación encuentro entre las humanidades y la ingeniería. Y yo a todos les digo que las humanidades tienen un lugar preponderante, muy fuerte, muy importante, en cualquier carrera. El alumno, antes que ingeniero es ser humano y la cultura es el ADN de la humanidad. La cultura forma a las personas, forma la mente, la estructura; forma el modo de pensar, abre la posibilidad de entender esta y otras realidades”.

A lo largo de su trayectoria como docente e investigadora, Margarita Puebla ha defendido que la literatura y la cultura permiten entender los problemas de la humanidad gracias a la reflexión que detonan. “Para resolver hay que reflexionar y, en ese sentido, tiene un valor tan formativo como la matemática. Es importante que los ingenieros lo entiendan y lo transmitan a los alumnos, que las humanidades son valiosas además de divertidas, que es importante no encerrarnos en nuestras materias”.

Indagar para mejorar

Fiel a su quehacer de naturaleza diversa, actualmente las actividades de la ingeniera Margarita en la Facultad incluyen dos líneas muy interesantes. “Por un lado estoy investigando las habilidades del pensamiento de los estudiantes. Trabajo con psicólogos y pedagogas, pero también con físicos. Diseñamos y aplicamos cuestionarios sobre el desarrollo de habilidades para



Carlos Roberto Torres Álvarez y Margarita Puebla Cadena.

monitorear la capacidad de síntesis, de análisis, de separar y controlar variables, entre otras. Y también estudiamos las prenociones, aquellas ideas que se tienen sin que uno esté consciente de ellas, ideas que influyen en el trabajo y en el rendimiento académico de los alumnos. Los instrumentos diseñados se aplican a estudiantes en tres momentos: al inicio, a la mitad y al final de la carrera. Así podemos ver si estas se van fortaleciendo, cuáles sí y cuáles no. Los resultados nos ayudan a mejorar el diseño de los planes de estudio y formar mejores profesionales”.

Inmersa en la Facultad, como observadora participante, ha encontrado otra forma, una muy especial, de analizar lo que sucede dentro. “Analizo a la comunidad completa; a los alumnos, pero también a los profesores y directivos. Busco entender cómo funcionamos en términos de lo que se conoce como el currículum oculto que es, digamos el inconsciente, la parte inconsciente social de la vida cotidiana en la facultad”.

Del material que recoge mediante su observación directa del día a día y de acontecimientos específicos, pero también de las conversaciones con otras personas, conforma crónicas literarias. “Sí, hago escritos que son pequeñas crónicas que ilustran cómo se vive en la Facultad de Ingeniería, cuál es la identidad de los ingenieros, cómo piensan. Un retrato más allá de la idealización y el discurso”. Esta especie de trabajo etnográfico hecho crónica ha resultado en una colección de cinco audiolibros –hasta ahora–.

Del mismo modo que la investigación de las habilidades del pensamiento, sus crónicas buscan ayudar a mejorar el nivel de la facultad, pues indagan en el inconsciente colectivo y traen a la superficie asuntos que deben replantearse en miras de mejorar las dinámicas de enseñanza y convivencia.

Ética para la humanidad

Como docente de ingeniería, pero sobre todo como pedagoga con maestría en Educación superior, considera que cualquier profesional debe tener una formación obligatoria en Ética. Principio que ha seguido personalmente en su formación. Defiende que el contenido de esta materia no debería ser meramente teórico ni aplicado de forma exclusiva a la carrera en cuestión. “Yo soy partidaria de impartir la ética en general, no de los ingenieros civiles o de los ingenieros, sino de los seres humanos.

Margarita Puebla es reconocida en el medio como protagonista del papel de las mujeres en la actualidad, una persona siempre atenta con los demás, con rapidez de análisis y excelente conversadora.

Por eso me enfoco en los problemas éticos de la humanidad. Entonces trabajamos filósofos como Sánchez Vázquez; psicólogos como Erich Fromm y otros de generaciones más jóvenes como Zygmunt Bauman con su idea de la generación líquida y de la ceguera moral”.

Respecto al tema de la equidad de género, toma una postura optimista. “Yo creo que ha habido cambios fuertes. Si pongo el ejemplo de mi propia experiencia, como mujer en la facultad de Ingeniería, puedo decir que ahora hay muchísima conciencia y apoyo hacia la equidad de género. Sé que hay quien no estará de acuerdo y es importante traerlo a colación y pensarlo. Pero yo sí veo cambios favorables, no solo entre mi generación y esta, sino con respecto a la de hace cinco o seis años”.

En su convivencia con los alumnos percibe mayor sensibilidad respecto al trato y respeto a la mujer y, aunque, muchas veces han sido sus propias alumnas las que la han hecho abrir los ojos a la normalización de situaciones que deben cambiar, le alegra darse cuenta de que las más jóvenes están reflexionando y están llamando al progreso.

“Noto también que les interesa aterrizar los entendimientos a casos reales. En las clases se acercan a la teoría y a los conceptos, pero piden muchísimo que los apliquemos a situaciones concretas. Esta reflexión ayuda. No es algo tan fácil, pero, defendiendo el lugar de la ética y de las humanidades, seguirán los cambios y las mejoras”.

Ejemplos e inspiración

Cercana al arte y a la cultura, ha tenido siempre un amplio panorama de inspiración. Sin embargo, además de su padre, otros de sus grandes ejemplos han sido de carne y hueso. “Ha habido influencias muy importantes en mi vida. Una de ellas, el ingeniero Francisco Zamora Millán. Fue una persona brillante, bondadosa y con mucha visión, y mi esposo Agustín Demeneghi, quien también disfruta de la cultura y ha sido decisiva influencia en mi vida”.

“También hay personajes memorables. A mis alumnos siempre les cuento del Quijote, por ejemplo; de cuando le dice a Sancho que la libertad es de los dones más importantes que le fue dado a los hombres. Pienso también, cuando hablamos de relaciones humanas y les cito a Otelo, que, frente al cadáver de Desdémona, le dice: Claro, te quise mucho, pero te

quise mal. Cuando pensamos en abrirse a otras posibilidades y a otras visiones, recurrimos a Hamlet, cuando el protagonista le dice a Horacio: Recuerda que hay muchas cosas en el cielo y en la Tierra que aún ignora tu filosofía. Está también el ejemplo del Rey Lear, ciego, guiado por su bufón y, pues, ¿a cuántos ciegos guiados por locos conocemos todos?

Su amplio bagaje literario se ha convertido en una gran herramienta de enseñanza y conversación. Tomando un ejemplo dado precisamente por ella podemos acudir a Goethe, que afirma que el mundo no es mudo para el ser humano inteligente. La cultura está llena de imágenes y mensajes para quien acude a ellos.

El futuro de la ingeniería

“La ingeniería es una profesión importantísima. ¿Por qué? Porque es creativa, porque está entre la parte científica y las necesidades sociales, humanas. Tiene que ver con el goce, con la

pasión por la ciencia, pero resulta en la resolución de cosas. Interroga a la ciencia para resolver problemas reales”. Desde ese entendimiento, Puebla Cadena afirma que los ingenieros deberían ser personas profundamente apasionadas y críticas, perfiles inquietos que logren trascender lo convencional.

“¿Qué futuro le veo? Uno muy grande, enorme. Pero tendremos que insistir en la formación del pensamiento, en ir en contra de la mecanización de las visiones y las ideas. Necesitamos estudiantes apasionados, llenos de vitalidad, llenos de curiosidad”.



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

+(52)(55) 9150-1208 ,
9150-1209, 9150-1210
www.pilotec.com.mx
pilotec@prodigy.net.mx



Profesor François Schlosser

In Memoriam: fallecido el pasado 12 de agosto de 2024.

Uno de los mejores embajadores de la geotecnia francesa. Fue profesor de mecánica de suelos y geotecnia en la Escuela Nacional de Puentes y Caminos (École nationale des ponts et chaussées) y en la Escuela Nacional de Ingenieros de Túnez (L'École nationale d'ingénieurs de Tunis); también dio clases en la Escuela Politécnica (École polytechnique) en París, donde trabajó en el Laboratorio de Mecánica de Sólidos. Dirigió la División de mecánica de suelos del Laboratorio Central de Puentes y Caminos y creó el Centro de Docencia e Investigación en Mecánica de Suelos.

En 1980 fundó CERMES, el Centro de Investigación Geotécnica de la Escuela Nacional de Puentes y Caminos. Fue presidente del French Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering CFMS de 1990 a 1994.

Así mismo, François Schlosser fue fundador del estudio de diseño Terrasol, al cual le dio el enfoque “multicriterio” que permitió un avance considerable en el conocimiento de las masas clavadas.

Además de participar activamente en la promoción mundial del manómetro y de la tierra armada, fue consultor en numerosas estructuras complejas –el viaducto de Millau, por citar sólo una–, y, con esa autoridad, desempeñó un papel decisivo en numerosos proyectos de investigación: Clouterre

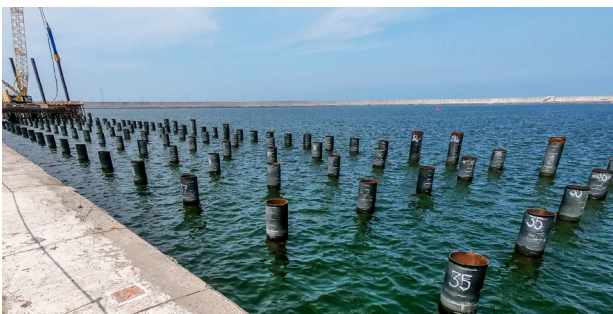
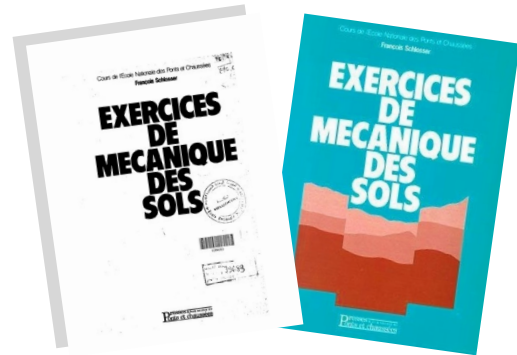
Autor de varios libros técnicos que contribuyeron a la mejora y difusión de los conocimientos en geotecnia y mecánica de suelos, podemos señalar, como uno de los más reconocidos, *Elements de mécanique des sols*.



para los muros de tierra clavados, Asiri para las cimentaciones en suelo armado y Forever para los micropilotes.

En una sesión plenaria del Congreso Internacional de Mecánica de Suelos y Geotecnia, celebrado en París, en 2013, Schlosser presentó los detalles de la innovación francesa en geotecnia.

Autor de varios libros técnicos que contribuyeron a la mejora y difusión de los conocimientos en geotecnia y mecánica de suelos, podemos señalar, como uno de los más reconocidos, *Elements de mecanique des sols*.



Apóyate en nosotros

www.cimesa.net

**Alexandra Ossa López**Instituto de Ingeniería
UNAM**Javier Valenzuela Hernández**Instituto de Ingeniería
UNAM

Conceptos generales de reología de jales

La reología estudia la deformación y flujo de materiales como los jales mineros, residuos sólidos de procesos extractivos. El comportamiento reológico de los jales es clave para entender su flujo en caso de rotura de depósitos. Estos pueden actuar como fluidos newtonianos o no newtonianos, según superen o no su esfuerzo de fluencia, el cual es el mínimo necesario para que fluyan. Su comportamiento depende de factores como la viscosidad, el esfuerzo de fluencia, la granulometría, el tipo de mineral y la concentración de sólidos. Para analizar estos aspectos, se realizan pruebas físicas y mineralógicas que ayudan a mejorar la gestión y análisis de los depósitos de jales.

Este artículo presenta conceptos generales sobre la reología de los jales, así como los factores que influyen en sus propiedades reológicas. Además, describe brevemente las técnicas para determinar la viscosidad y el esfuerzo cortante de estos materiales.

1. INTRODUCCIÓN

La acumulación de residuos sólidos mineros, llamados también jales o relaves, representa una de las mayores fuentes de peligro en una mina (Wei *et al.*, 2013). La falla de un depósito de jales puede causar daños catastróficos y, en algunos casos, irreparables (Hudson-Edwards *et al.*, 2003). Las fallas de depósitos de jales suelen ocurrir de manera repentina, por ello, estas estructuras se han convertido en un foco de

atención para la ingeniería geotécnica, la cual busca evitar las fallas y, así, catástrofes. Cuando ocurre una falla en un depósito, los jales y el agua contenida en ellos se descargan juntos, generando un inmenso flujo de lodo y arena que afecta el área aguas abajo. Para comprender mejor la estabilidad de un depósito de jales y el impacto de sus fallas, es necesario estudiar las propiedades reológicas de los materiales.

La reología de los jales es uno de los factores más influyentes y, al mismo tiempo, más inciertos en los resultados de la modelación de roturas de depósitos de jales. Una elección inadecuada de los parámetros reológicos durante un análisis de rompimiento de un depósito de jales (TDBA, por sus siglas en inglés) podría generar grandes discrepancias en los resultados. Además de la reología, otros factores como la hidrología del sitio, la topografía del terreno, la duración de la descarga y el volumen de la inundación, entre otros, también influyen en los resultados del análisis (figura 1). Sin embargo, la metodología para obtener estos factores es más conocida que la asociada a la reología (Román *et al.*, 2022).

Un análisis de rompimiento de un depósito de jales estudia escenarios hipotéticos de falla e implica una serie de análisis para evaluar las características del flujo para el cálculo del impacto que provocarían los jales al ser descargados aguas abajo. Esta representa una condición catastrófica pues sucesos de esta naturaleza suelen implicar la descarga de grandes volúmenes. En este sentido, uno de los principales objetivos del análisis de rompimiento es estimar el volumen de material descargado y obtener los hidrogramas de flujo. Para estimar los volúmenes de flujo se necesita entender los procesos físicos del rompimiento y las propiedades del material involucrado. Los volúmenes del flujo estimados y la correcta selección de los parámetros de rompimiento, son indispensables para obtener los hidrogramas de flujo y, posteriormente, la estimación de caudales, mapas de velocidades y niveles de escurrimiento de los jales que fluyen aguas abajo. Todo esto es elaborado utilizando herramientas de modelado hidrodinámico, tomando como base los principios de la mecánica de fluidos (Tailings Dam Breach Analysis, 2021).

2. REOLOGÍA DE JALES

El término reología, del griego “rheos” (flujo) y “logos” (estudio), fue presentado en 1929 por el profesor Eugene Cook Bingham y se define como el estudio de la deformación y el flujo de la materia (Barnes *et al.*, 1993). La reología, como ciencia, se originó a partir de la observación de materiales reales, que difieren considerablemente de los sólidos ideales (elásticos) y los líquidos ideales (viscosos), tal como lo propusieron los modelos de Hooke y Newton, respectivamente (Malkin, 1994). Los sólidos ideales presentan un comportamiento elástico, el cual hace referencia a la capacidad de un cuerpo para recuperar su forma y volumen una vez que ha dejado de estar sometido a un esfuerzo externo. Por otro lado, los líquidos ideales presentan un comportamiento

no viscoso, esto significa que fluyen, aún cuando no se le esté aplicando algún esfuerzo; en estos materiales la deformación es irreversible (Tsugawa *et al.*, 2019). Existen materiales que presentan una combinación de ambos comportamientos mencionados anteriormente, este es el comportamiento plástico. El comportamiento plástico se presenta en aquellos materiales que son capaces de deformarse de manera irreversible, pero sin alcanzar la falla.

En la Tercera Conferencia Internacional sobre Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, llevada a cabo en Zúrich, en 1953, la reología del suelo fue reconocida como una rama independiente de la mecánica de suelos (Meshchyan, 1995) y, desde entonces, con ella se ha desarrollado investigación aplicada a suelos blandos, deslizamientos de tierra, flujos de detritos y flujos de lodo (Boniello *et al.*, 2010; Campos *et al.*, 2016; Carotenuto *et al.*, 2015; Coussot *et al.*, 1998; Jeong, 2010; O’ Brien *et al.*, 1993; O’ Brien y Julien, 1988; Pellegrino *et al.*, 2010, 2015).

Actualmente, la ingeniería geotécnica tiene un interés especial en la gestión de jales, lo que se ha implicado su acercamiento a la reología de estos materiales. Los jales que se liberan cuando ocurre una rotura en un depósito, pueden presentar un comportamiento reológico de flujo newtoniano o no newtoniano (figura 2), dicho comportamiento puede describirse a través de modelos reológicos. En caso de que la relación entre el esfuerzo y la velocidad de corte sea lineal, el fluido es newtoniano; en cualquier otro caso, el fluido es no newtoniano. Si el yield stress (esfuerzo de fluencia) es superado, los jales comenzarán a fluir tal como lo describe la mecánica de fluidos convencional. En los jales fluidizados la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte generalmente no es constante. Por esto, en un análisis de

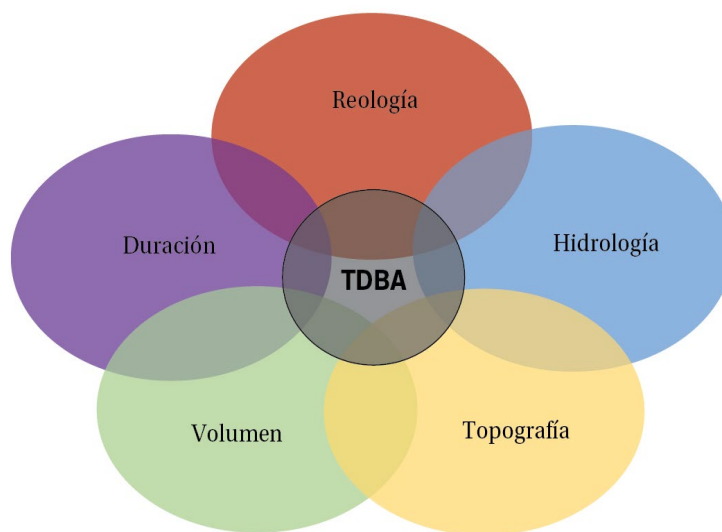


Figura 1. Factores más influyentes en los resultados de un TDBA (modificada de Román *et al.*, 2022).

rotura, es importante estudiar el comportamiento reológico de los jales desde el inicio de la movilización hasta el punto en que alcanzan el reposo (Tailings Dam Breach Analysis, 2021).

En la figura 2 se grafican los diferentes comportamientos de los fluidos y ahí se observa que los fluidos newtonianos tienen un esfuerzo de corte proporcional a la velocidad de corte. Mientras que los fluidos tipo Bingham alcanzan un valor constante de viscosidad hasta que superan un esfuerzo mínimo –esfuerzo que se conoce como resistencia crítica o esfuerzo de fluencia (Locat y Demers, 1988)–, cuando el fluido está sometido a esfuerzos menores al esfuerzo de fluencia, la viscosidad tenderá a infinito y dicho fluido se comportará como un material sólido (Tsugawa et al., 2019).

Para el caso de los otros grupos de fluidos no newtonianos, los pseudoplásticos y dilatantes, los fluidos pseudoplásticos tienen un comportamiento en el que la viscosidad aparente disminuye cuando la velocidad de corte aumenta de forma lineal (Jeong, 2010). Existen también los fluidos pseudo-plásticos con resistencia crítica, llamados fluidos Casson o Bingham plásticos; estos se caracterizan por tener una resistencia crítica y una lenta disminución de la viscosidad a altas tasas de deformación (Locat y Demers, 1988).

Por otro lado, los fluidos dilatantes se caracterizan por el aumento en la viscosidad aparente con el incremento de la velocidad de corte (Jeong, 2006), y, cercanos a ellos, también existen los fluidos dilatantes con resistencia crítica.

2.1. Parámetros reológicos

Los parámetros reológicos de los jales, tales como la viscosidad (η) y el esfuerzo de fluencia (σ_y), están estrechamente relacionados con el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de corte (du/dy). Estos parámetros son necesarios para poder describir el comportamiento de la respuesta de los jales ante las fuerzas aplicadas.

En la actualidad, al realizar un TDBA, los parámetros reológicos no suelen discutirse ni cuestionarse; no obstante, a menudo se obtienen de referencias desactualizadas o se adquieren erróneamente de los criterios de diseño. Esto impacta directamente en los resultados del análisis (Román et al., 2023).

2.1.1. Viscosidad

La viscosidad se define como la resistencia de un fluido al flujo y se describe mejor mediante un modelo de dos placas como el mostrado en la figura 3 (Coghill, 2003; Paterson y Cooke, 2000; Slatter et al., 2002). La figura 3 muestra el corte de un fluido entre dos placas paralelas. El espacio entre las dos placas paralelas, a una distancia (H) entre sí, está lleno de un fluido. La placa superior, con un área de superficie (A), se mueve con una velocidad (V) bajo la fuerza (F), mientras que la placa inferior permanece estacionaria. La capa superior del fluido adyacente a la placa superior se mueve con la placa a una velocidad (V), mientras que la capa inferior del fluido adyacente a la placa inferior permanece estacionaria.

2.1.2. Esfuerzo de fluencia

El esfuerzo de fluencia, resistencia crítica o *yield stress* es una característica importante de los fluidos que se puede definir como el valor del esfuerzo mínimo necesario para hacer que un material fluya. Un valor alto del esfuerzo de fluencia significa que el material fluye con dificultad. En reología, el esfuerzo de fluencia se define como el esfuerzo aplicado sobre un material en el cual se observa por primera vez una deformación irreversible, y se suele representar como (σ_y). Este generalmente se determina ajustando las curvas de esfuerzo de corte/velocidad de corte con los modelos de Bingham, Casson o Herschel-Bulkley. Y también se utiliza con frecuencia la extrapolación manual de la curva de esfuerzo de corte a una velocidad de corte cero (TA Instruments RH025).

2.1.3. Esfuerzo de corte

Se define como la fuerza por unidad de área (F/A) requerida para producir la acción de corte. Su unidad de medida puede ser N/m^2 (Tonderai, 2016). La ecuación 1 es utilizada para calcular el esfuerzo de corte.

$$\tau = F / A \quad \text{ec. 1}$$

Por lo tanto, la viscosidad dinámica (μ) se puede definir utilizando la ecuación 2.

$$\mu = \tau / \gamma \quad \text{ec. 2}$$

La unidad de medida de la viscosidad dinámica es Pa-s para un fluido newtoniano; mientras que, para un fluido no newtoniano, es llamada viscosidad aparente (μ_a).

2.1.4. Velocidad de corte

Velocidad de corte, velocidad de deformación o tasa de corte es la medida de la velocidad a la que las capas intermedias se mueven entre sí. Esto describe el efecto de corte que experimenta el material y su unidad de medida se denomina segundos recíprocos (s-1).

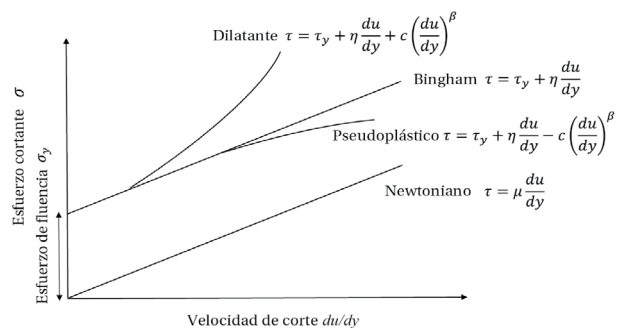


Figura 2. Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte para los modelos de deformación de fluidos (Manual del programa FLO-2D).

2.2. Factores que afectan la reología de los jales

Los principales factores que influyen en los valores de los parámetros reológicos de los jales son la granulometría del material, la forma de las partículas, la concentración de sólidos, el tipo de mineral y la densidad de sólidos.

Las figuras 4 y 5 muestran el efecto del tipo de mineral de los jales en los valores de la viscosidad y el esfuerzo de fluencia. En la figura 4 se puede apreciar que la viscosidad disminuye rápido con el tiempo y, posteriormente, tiende a estabilizarse.

En la figura 5 se muestran las curvas de esfuerzo de fluencia de tres diferentes jales con distinto origen mineralógico. Como se ve, el valor del esfuerzo de fluencia aumenta rápidamente al inicio y posteriormente tiende a estabilizarse.

En las figuras 6 y 7 se muestran las curvas de viscosidad y esfuerzo de fluencia, respectivamente, para los jales de oro, a diferentes concentraciones de sólidos. Se puede apreciar que, para la misma concentración de sólidos, cuanto mayor es el tamaño de partículas, menor es la viscosidad y el esfuerzo de fluencia.

A continuación, las figuras 8 y 9 muestran las curvas de viscosidad y esfuerzo de fluencia, respectivamente, de la muestra de jales de oro con base en la concentración de sólidos. En ellas se ve que el valor de la viscosidad y del esfuerzo de fluencia aumentan cuando se incrementa la concentración de sólidos.

Como ya se mencionó anteriormente, son varios los factores que influyen en las propiedades reológicas de los residuos sólidos mineros y dichas propiedades aún deben ser estudiadas con más detalle.

3. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Para realizar una caracterización reológica de una muestra de jales es necesario, antes, obtener una caracterización física y mineralógica, para conocer el tamaño y forma de las partículas, así como el tipo de mineral presente en el material.

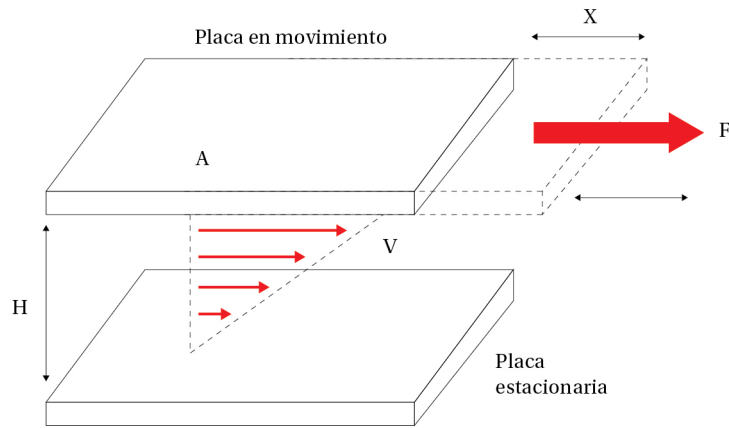


Figura 3. Definición de viscosidad según el modelo de dos placas (modificada de Tonderai, 2016).

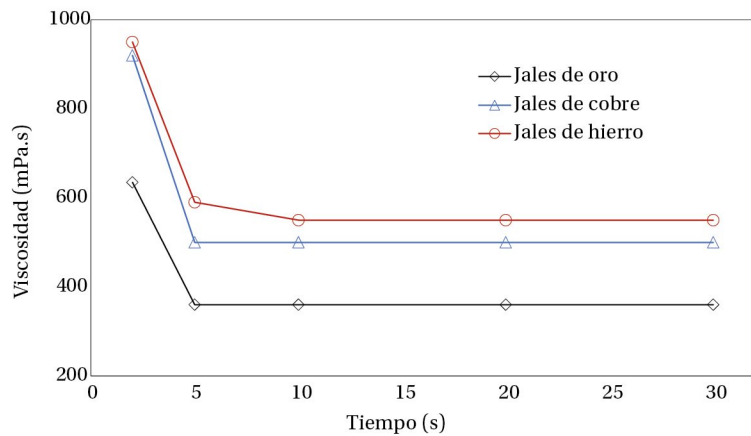


Figura 4. Viscosidad de jales de diferentes tipos de minerales (modificada de Wang et al., 2018).

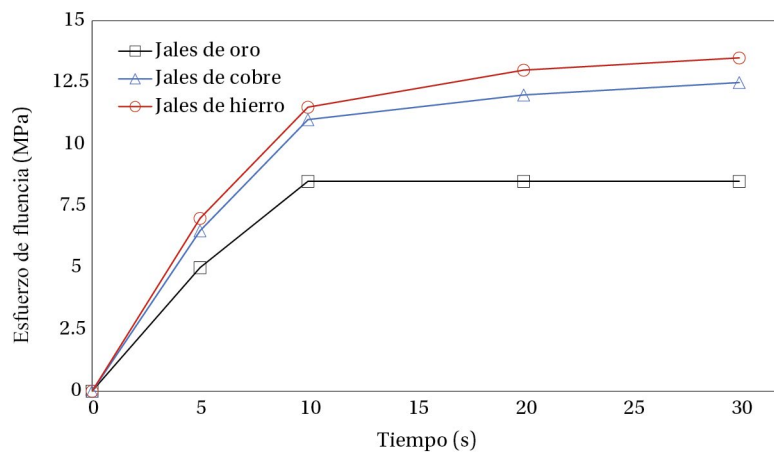


Figura 5. Curvas de esfuerzo de fluencia de jales de diferentes tipos de minerales (modificada de Wang et al., 2018).

3.1. Caracterización física

Para la caracterización física se realizan pruebas relacionadas con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), esto con el fin de clasificar y analizar el material. Estos ensayos de laboratorio se describen brevemente a continuación.

3.1.1. Densidad de partículas (Ss)

La densidad de partículas del material es una de las propiedades físicas básicas. Esta influye significativamente en el comportamiento mecánico y su valor depende del tipo de mineral del material. Su procedimiento está establecido en la norma ASTM D854-14.

3.1.2. Límites de Atterberg

Los Límites de Atterberg están estrechamente relacionados con la consistencia del material, y con el grado de cohesión y adhesión de los materiales finos. Por esta razón, son considerados un parámetro importante. Estos límites –límite líquido y límite plástico– son utilizados para clasificar y caracterizar los jales (Saad, 2008) y se obtienen siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D4318. El límite líquido se define como el contenido de agua en el cual dos secciones de una misma muestra, separadas por una ranura de dimensiones estándar, se unen, al someterla al impacto de 25 golpes bien definidos en la copa de Casagrande. Debido a las características propias del material, no siempre es posible utilizar el método de percusiones sobre los jales por lo que se vuelve necesario utilizar el método de conos penetrantes (sueco o inglés). El límite plástico se define como el contenido de agua que permite formar cilindros de 3 milímetros de diámetro sin que se rompan o se desmoronen.

3.1.3. Granulometría

El ensayo consiste en la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas del material. La clasificación de los tamaños de partículas mayores a 75 μm (retenido en la malla N° 200) se efectúa por tamizado, mientras que la determinación de los

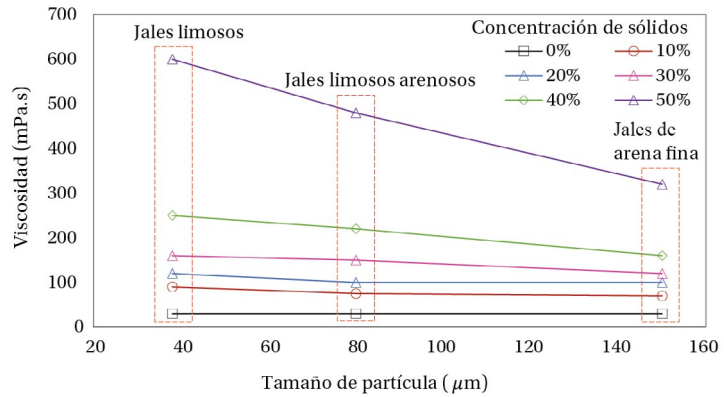


Figura 6. Efecto del tamaño de partícula en la viscosidad para diferentes concentraciones de sólidos (modificada de Wang *et al.*, 2018).

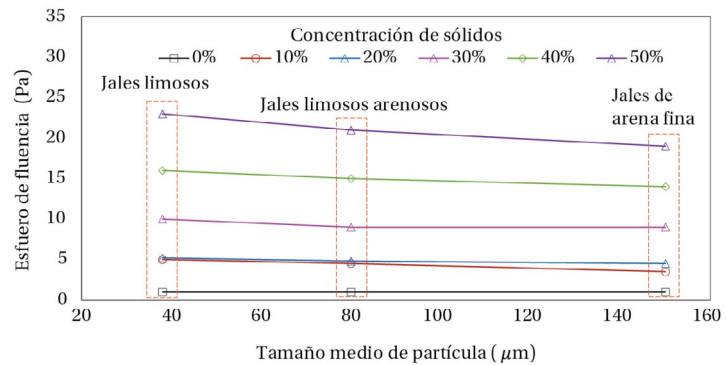


Figura 7. Efecto del tamaño de partícula en el esfuerzo de fluencia de jales de diferentes tipos de minerales (modificada de Wang *et al.*, 2018).

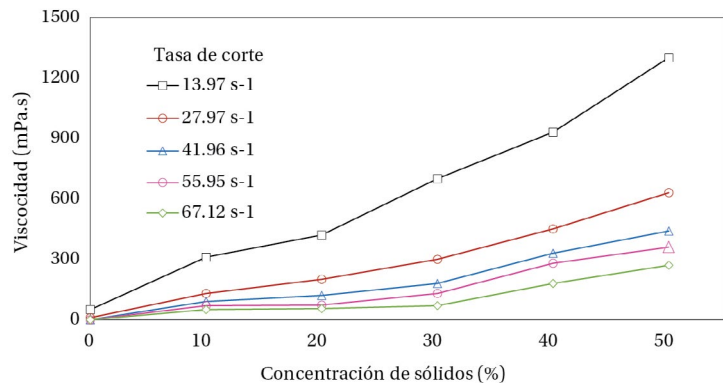


Figura 8. Efecto de la concentración de sólidos en la viscosidad (modificada de Wang *et al.*, 2018).

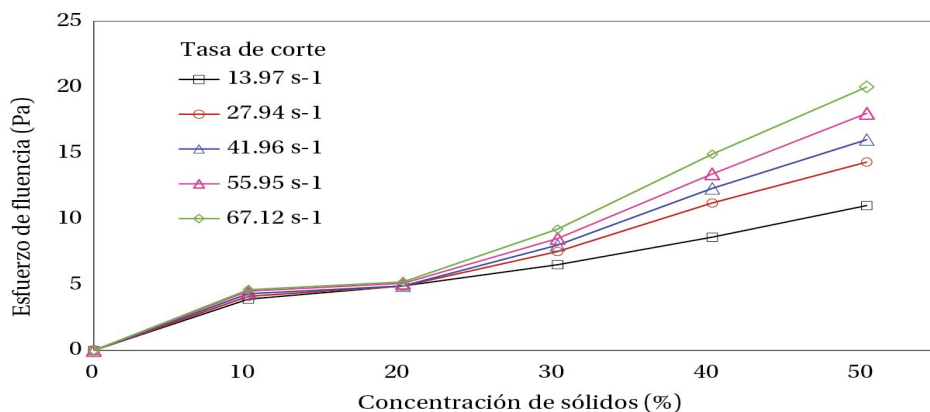


Figura 9. Efecto de la concentración de sólidos en el esfuerzo de fluencia (modificada de Wang *et al.*, 2018).

tamaños de las partículas menores a 75 μm es determinada por un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro. Todo conforme a lo descrito en la norma ASTM D422-63.

3.2. Caracterización mineralógica

Como ya se mencionó anteriormente, los parámetros reológicos de los jales están directamente relacionados con la composición mineralógica del material. Esto hace que impliquen la realización de las siguientes pruebas de carácter químico sobre los jales (Ramos y Pérez, 2021):

3.2.1. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X consiste en determinar la composición química de la muestra en estudio, mediante el uso de un difractómetro.

3.2.2. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Esta prueba se utiliza para complementar la técnica de difracción de rayos X cuando las fases mineralógicas de los compuestos cristalinos presentes en la muestra tienen concentraciones superiores al rango 3-5%. Para llevar a cabo la fluorescencia de rayos X se utiliza un fluoroscopio. Este procedimiento es una técnica espectroscópica no destructiva basada en la emisión de rayos X.

3.3. Caracterización reológica

Los parámetros reológicos de los jales se pueden obtener mediante el uso de un viscosímetro (figura 10), bajo diferentes tasas de corte y diferentes concentraciones de sólidos. El ensayo permite obtener la viscosidad y el esfuerzo de corte, parámetros que permiten la obtención del esfuerzo de fluencia, lo que conlleva a conocer el tipo de fluido que representa

el material en estudio. Para la obtención de estos parámetros también es posible la utilización de un reómetro.

Las figuras 11 y 12 muestran gráficas típicas de viscosidad y esfuerzo de corte, respectivamente, ambas en función de la tasa de corte, de una muestra de jales a una concentración de sólidos determinada. Estas gráficas se construyen tomando valores de viscosidad y esfuerzo de corte en cada segundo, a lo largo del ensayo. De acuerdo con la norma ASTM D2196-20, la prueba se realiza aplicando un esfuerzo de corte rotacional a una velocidad constante determinada, utilizando una geometría de tipo veleta, como concéntrico, plato, entre algunos otros, dependiendo la elección de las características del material y de la capacidad de torque del viscosímetro.

Los valores de viscosidad y esfuerzo de corte se obtienen una vez que la curva se ha estabilizado con el tiempo, como se muestra en la figura 4. Este proceso se repite para cada tasa de corte analizada. La gráfica esfuerzo de corte-tasa de corte (figura 12), muestra la curva que permite identificar la tendencia del comportamiento del tipo de flujo del material en estudio, el cual corresponderá a alguno de los mostrados en la figura 2.

4. COMENTARIOS FINALES

Los parámetros reológicos de los jales son fundamentales para describir su comportamiento en caso de una rotura. Una vez obtenidos, se puede llevar a cabo un análisis TDBA utilizando los parámetros reológicos obtenidos en laboratorio, específicos para los jales estudiados. Esto genera una mejora significativa en los resultados del análisis, ya que evita la necesidad de recurrir a correlaciones generalizadas.



Figura 10. Viscosímetro rotacional (elaboración propia).

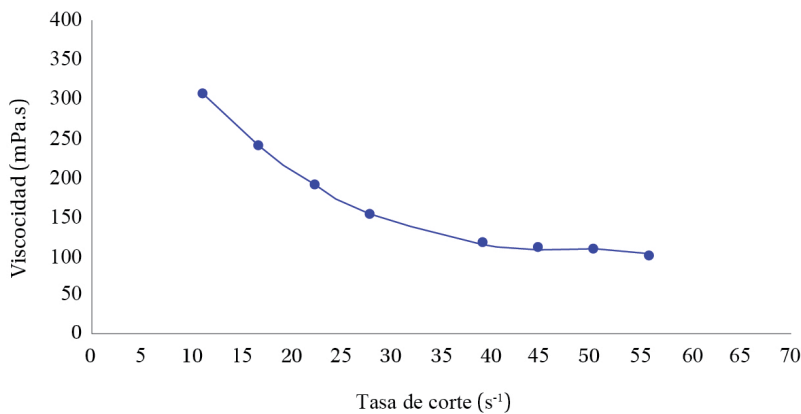


Figura 11. Viscosidad-tasa de corte de una muestra de jales (elaboración propia).

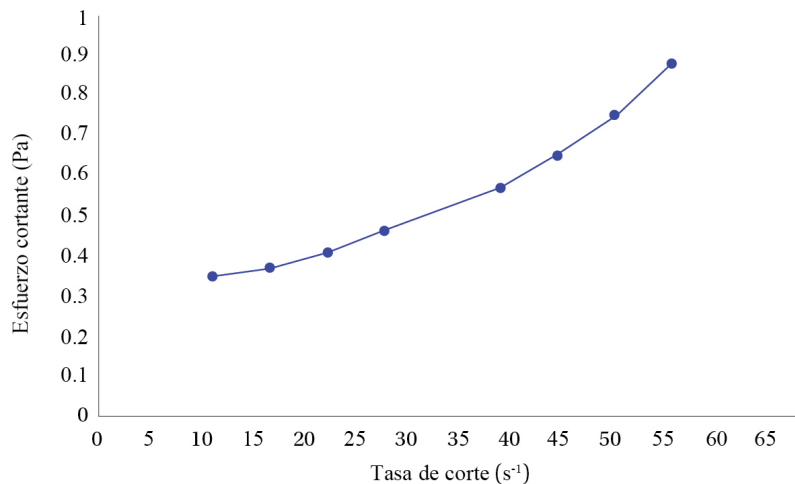


Figura 12. Esfuerzo de corte-tasa de corte de una muestra de jales (elaboración propia).

5. REFERENCIAS

ASTM D2196 (2020). Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer.

ASTM D854 (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.

ASTM D4318 (2018). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

ASTM D422-63 (1998). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.

Barnes H.A., Hutton J.F., Walters K. F.R.S. 1993. An introduction to rheology, Elsevier Science, 1.

Boniello M.A., Calligaris C., Lapasin R., Zini L. 2010. Rheological investigation and simulation of a debris-flow event in the Fella watershed, Natural Hazards and Earth System Science, 10:5, 989-997.

Campos T.M., Galindo M.S.V. 2016. Evaluation of the viscosity of tropical soils for debris flow analysis: a new approach, Géotechnique, 66:7, 533-545.

Cao, S., Yilmaz, E., Song, W. 2018. Evaluation of Viscosity, Strength and Microstructural Properties of Cemented Tailings Backfill. Minerals MDPI.

Carotenuto C., Merola M. C., Álvarez-Romero M., Coppola, E., Minale, M. 2015. Rheology of natural slurries involved in a rapid mudflow with different soil organic carbon content, Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 466, 57-65.

Coghill, M. 2003. What is rheology?. First Mineral Processing & Tailings Rheology Workshop.

Coussot P., Laigle D., Arattano M., Deganutti A.M., Marchi, L. 1998. Direct determination of rheological characteristics of debris flow, Journal of Hydraulic Engineering, 124:8, 865-868.

FLO-2D. 2018. FLO-2D Reference Manual. Nutrioso, AZ: FLO-2D.

Hudson-Edwards, K. A., Marklin, M. G., Jamieson, H. E. 2003. El impacto de los derrames de las presas de relaves y las operaciones de limpieza en los sedimentos y la calidad del agua en los sistemas fluviales: Ríos Agrío-Guadamar, Aznalcóllar, España. Appl Geochem 18(2):221-239.

Jeong, S. 2006. Influence of physico-chemical characteristics of fine-grained sediments on their rheological behavior. Laval University, Canada, pp: 229.

Jeong S.W. 2010. Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows, *Geoscience Journal*, 14:4, 359-369.

Locat, J., Demers, D. 1988. Viscosity, yield stress, remolded strength and liquidity index relationships for sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 25, pp 799-806. <https://doi.org/10.1139/t88-088>

Malkin A.Y. 1994. *Rheology fundamentals*, Chem.Tec. Publishing.

Meschyan S.R. 1995. *Experimental rheology of clayey soils*, A.A. Balkema.

O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton W.T. 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119:2, 244-261.

O'Brien J.S., Julien, P. Y. 1998. Laboratory analysis of mudflow properties, *Journal of Hydraulic Engineering*, 114:8, 877-887.

Paterson y Cooke Consulting Engineers. 2000. *Design of Slurry Pipeline Systems*. Course notes.

Pellegrino A.M., Scotto di Santolo A., Evangelista A., Coussot P. 2010. Rheological behaviour of pyroclastic debris flow, *Third International Conference on Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flow "Debris Flow III"*, WIT Transactions on Engineering Science, 67:1, 51-62.

Pellegrino A.M., Scotto di Santolo A., Schippa L. 2015. An integrated procedure to evaluate rheological parameters to model debris flows, *Engineering Geology*, 196, 88-98.

Ramos, M., Pérez, M. 2021. Characterization of mine tailings in their natural state and stabilized with cement, focused on construction. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XXII (2). <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2021.22.2.010>

Román, C., Barbosa, G., Lombardo, M., Cortés, C. 2022. Importance of tailings rheology in dam failure consequence classification. *CDA 2022, Annual Conference Congrès annuel 2022 de l'ACB*.

Román, C., Kovács, V., Kunoh, F., Echeverría, N., Gutiérrez, I. 2023. Influence of tailings rheological parameters on the estimation of runout distances. *1st International conference on geotechnics of tailings and mine waste*. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

Saad, B. (2008). *Transient coupled analysis of upstream tailings disposal facilities construction*. Department of Mining and Materials Engineering, McGill University of Montreal. Tesis Doctoral.

Slatter, P., Malkin, A., Masalova, I., Perrett, D. 2002. *Practical Rheology of Polymer Systems*. Course notes, Cape Technikon Rheology Centre, Paar Physica.

Tailings Dam Breach Analysis: Technical Bulletin, 2021. Canadian Dam Association.

TH Instruments RH025. *Rheological Techniques for Yield Stress Analysis*.

Tonderai, B. 2016. Master Thesis, Dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree and which counts towards 50% of the final mark. Faculty of Engineering at the Cape Peninsula University of Technology.

Tsugawa, J., Romano, R., Pileggi, R., Boscov, M. 2019. A rheological approach for the evaluation of geotechnical use of water treatment sludge. *Environmental Science and Engineering Book Series*, Vol. 1: 264-272.

Wang, X., Wei, Z., Li, Q., Chen, Y. 2018. Experimental research on the rheological properties of tailings and its effect factors. *Environmental Science and Pollution Research* 25:35738-35747.

Wei, Z.A., Yin, G.Z., Wang, J.G., Wan, L., Li, G.Z. 2013. Diseño, construcción y gestión de instalaciones de almacenamiento de relaves para disposición superficial en China: estudios de casos de fallas. *Gestión de residuos Res.* 31(1):106-112.

GEOTECNIA
TOPOGRAFÍA
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

GEOFÍSICA
GEORADAR
CONSTRUCCIÓN GEOTÉCNICA

GEOLOGÍA
SUPERVISIÓN GEOTÉCNICA
SÍSMICA

SGI
SOLUCIONES GEOTÉCNICAS INTEGRALES
"Soluciones, con Calidad"

www.solucionesgeotecnicas.com

Oficinas en Irapuato y León, Guanajuato
462 621 5609, 462 152 2157, 462 100 3343, 477 127 1469, 951 244 1313.
presupuestos@solucionesgeotecnicas.com, direcciongeneral@solucionesgeotecnicas.com, soluciones.geotecnicas@prodigy.net.mx

Soluciones Geotécnicas Integrales
 soluciones.sgi
 soluciones.sg

**Andy Fourie**

School of Engineering
University of Western Australia
Australia
andy.fourie@uwa.edu.au

Ramon Verdugo

CMGI
Santiago, Chile
rverdugo@cmgi.cl

Annika Bjelkevik

Tailings Consultants Scandinavia AB
Sweden

Luis Alberto Torres-Cruz

School of Civil and Environmental Engineering
University of the Witwatersrand
South Africa

Dobroslav Znidarcic

Department of Civil
Environmental and Architectural Engineering
University of Colorado Boulder
USA

Resistencia al corte de los jales bajo carga monótona

Traducción del artículo "Geotechnics of mine tailings: a 2022 state of the art".
Versión corta realizada por el maestro Juan de Dios Alemán.

4.3. Resistencia al corte bajo carga monótona

Las pruebas de los jales (relaves) para determinar los parámetros de resistencia adecuados han evolucionado rápidamente en la última década. Antes de discutir, con cierto detalle, la aplicación del Marco de la mecánica de suelos del estado crítico (CSSM, por sus siglas en inglés) en las pruebas de relaves, se analizarán otros aspectos de las muestras de relaves cargadas monotónicamente.

4.3.1. Parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivo (drenados)

Las evaluaciones de estabilidad de los depósitos de jales o relaves (TSF, por sus siglas en inglés) estuvieron limitadas durante muchos años a los análisis de estabilidad de taludes basados en esfuerzos efectivos, donde los principales factores considerados eran los parámetros de resistencia c' (cohesión aparente) y ϕ' , el ángulo de fricción interna, así como la posición del nivel freático. Los esfuerzos efectivos se evaluaban en función de la

posición del nivel freático. No se tenían en cuenta las presiones de agua intersticial (presión de poro) generadas por esfuerzos cortantes, las cuales son cruciales al considerar la estabilidad de los jales sueltos, contractivos y especialmente frágiles, mismas que discutiremos a profundidad más adelante.

Todavía es común ver evaluaciones de estabilidad basadas únicamente en consideraciones de esfuerzos efectivos (a veces denominadas drenadas), ignorando las evaluaciones de estabilidad no drenadas, a pesar de que se han advertido muchas veces los peligros de este enfoque. Afortunadamente, esto está cambiando.

Los parámetros de resistencia al corte drenado se derivan, casi invariablemente, de los resultados de pruebas de compresión triaxial, drenadas o no drenadas. Un tema a considerar, incluso con estas pruebas relativamente simples, es el uso de pruebas de carga multietapa, donde se toma una sola muestra a partir de tres valores de esfuerzo de confinamiento y solo se determina el esfuerzo desviador máximo.

La justificación presentada para la elección de pruebas de carga multietapa suele ser la limitación en el número de muestras disponibles. Sin embargo, se debe reconocer que cualquier pérdida de resistencia al corte post-pico y la deformación en la que ocurre, se pierden, lo que hace que los datos sean inútiles para su implementación en cualquier forma de modelado numérico.

4.3.2. Parámetros de resistencia no drenada

Cuando la tendencia intrínseca al cambio de volumen se suprime en una masa de suelo saturado, por ejemplo, debido a una carga rápida por perturbaciones sísmicas, la respuesta del suelo es no drenada y, por lo tanto, la tendencia al cambio de volumen se transforma en alteraciones en la presión del agua intersticial. Cuando se les aplican esfuerzos de corte en condiciones no drenadas, los suelos sueltos y los jales pueden producir grandes incrementos en la presión de poro en exceso, a menudo denominadas presiones de poro inducidas por el esfuerzo de corte. En la siguiente sección discutiremos más lo que constituye un "suelo suelto".

Las pruebas de compresión triaxial no drenadas en muestras sueltas generalmente movilizarán un esfuerzo desviador máximo antes de que se alcance la envolvente de resistencia en términos de esfuerzos efectivos. Esto se explica mejor mediante un gráfico de trayectoria de esfuerzos, como se muestra en la figura 19, que presenta el esfuerzo efectivo medio p' en función del esfuerzo desviador q . La muestra se consolidó isotrópicamente a un esfuerzo efectivo medio p_0' y luego se cargó en compresión no drenada. Al ser suelta, la trayectoria de esfuerzo efectivo alcanza un esfuerzo desviador máximo en una proporción mucho menor de lo que se lograría en una prueba de compresión sin drenaje en una muestra más densa (indicada en la figura por la línea más oscura). Una línea recta que pasa por el origen y el valor del esfuerzo desviador máximo, o pico, preferiblemente con múltiples pruebas triaxiales realizadas a diferentes esfuerzos de confinamiento efectivos para obtener más puntos, marca la línea de inestabilidad, a menudo definida por:

$$\eta_{IL} = q_{peak} / p' \quad (10)$$

Los análisis de estabilidad no drenados, realizados en términos de esfuerzos efectivos, se realizan a menudo utilizando la relación de resistencia al corte no drenada en términos del esfuerzo efectivo vertical,

$$C_u / \sigma'_v$$

Muchas directrices nacionales para el diseño y análisis de TSF ahora solicitan puntualmente tanto análisis de estabilidad drenados (esfuerzos efectivos) como no drenados (ANCOLD, 2012, CDA, 2020), con el mismo Factor de Seguridad (1.5) requerido para ambas condiciones. En el caso de

ANCOLD, esto se aplica específicamente a TSF propensos a la pérdida de contención en caso de que ocurra una inestabilidad del talud.

Los primeros resultados experimentales que muestran la respuesta excepcional de esfuerzo-deformación de un suelo arenoso suelto sometido a una carga no drenada se muestran en la figura 20 (Castro 1969). Esta muestra de suelo arenoso fue consolidada isotrópicamente bajo una presión de 400 kPa, alcanzando una relación de vacíos después de la consolidación igual a 0.714, lo cual está asociado a una densidad relativa del 37%. Durante 14 minutos, la muestra fue cargada axialmente mediante incrementos pequeños de carga muerta, lo que produjo una curva típica de esfuerzo-deformación con un esfuerzo vertical máximo de alrededor de 230 kPa a aproximadamente 1% de deformación axial. Luego, el siguiente incremento pequeño de carga desencadenó una falla repentina de la muestra y en una fracción de segundo (0.18 segundos) alcanzó aproximadamente un 20% de deformación axial y la resistencia se redujo a un valor de 80 kPa.

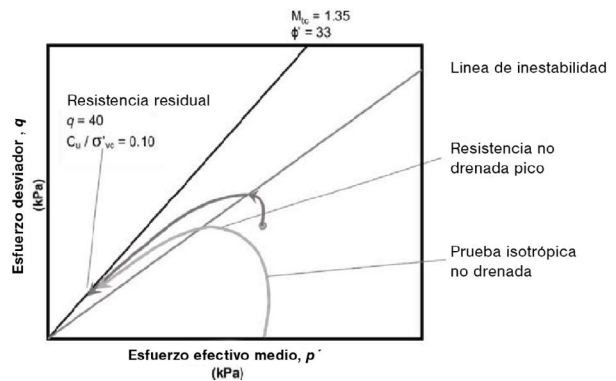


Figura 19. Ilustración de la trayectoria de esfuerzo de una prueba de compresión triaxial no drenada, en una muestra que inicialmente era más suelta que la relación de vacíos en el estado crítico.

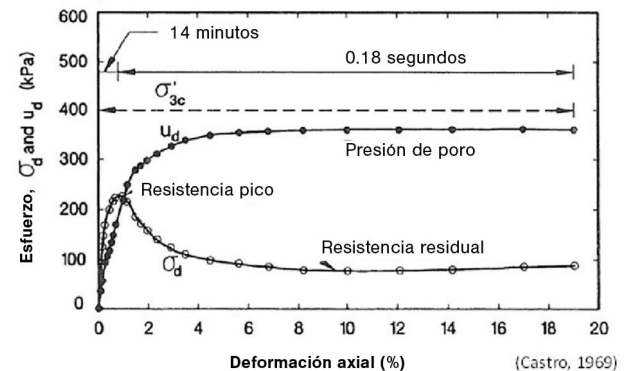


Figura 20. Ensayo triaxial CIU (carga controlada, consolidado isotrópicamente, no drenado) en arena suelta (modificado, según Castro 1969).

Como se puede observar, la presión de poro aumenta significativamente durante el ensayo, alcanzando un valor constante cercano al 90% de la presión de confinamiento. A partir de este tipo de resultados, se estableció la licuación verdadera (true liquefaction) o licuación por flujo, así como el concepto de estado crítico que proporciona el marco para describir el comportamiento de los suelos arenosos y limos de baja plasticidad. Los resultados experimentales han demostrado que es posible establecer una línea de inestabilidad (Figura 19) que, si se alcanza in situ bajo un régimen de carga drenada (condiciones de esfuerzo controlado), desencadenará un aumento repentino en las deformaciones y generará presiones de poro en exceso positivas. Debido a que la tasa de generación de presión de poro es mayor que el tiempo requerido para disipar estas presiones de poro inducidas por esfuerzo cortante, la condición drenada se modifica casi instantáneamente en una respuesta no drenada del suelo, reduciendo los esfuerzos a la resistencia residual no drenada.

Se ha establecido una distinción entre muestras "sueltas" y "compactas". Dado que estos son términos relativos, debemos aclarar qué constituye un suelo suelto y uno compacto. Invocar el concepto de la mecánica de suelos del estado crítico es útil para hacer esta distinción y aplicar las diferencias resultantes al comportamiento en el diseño y en los análisis rutinarios e interpretaciones de datos de laboratorio y campo.

4.3.3. Aplicación de los principios de la mecánica de suelos del estado crítico

La mecánica de suelos del estado crítico (CSSM) se adopta comúnmente como un marco teórico dentro del cual comprender las características de resistencia y cambio de volumen de los jales (Jefferies y Been, 2015, Robertson *et al.* 2019, Bedin *et al.* 2012). El principio clave de la CSSM es que cuando los suelos se someten a deformaciones cortantes grandes, eventualmente alcanzan su línea de estado crítico (CSL) que generalmente se define en un espacio tridimensional: relación de vacíos (e), esfuerzo efectivo medio (p') y esfuerzo desviador (q). Es común modelar la proyección e - p' de la CSL mediante una linealización semilogarítmica:

$$e = \Gamma p^* - \lambda_{10} \log_{10} \left(\frac{p'}{p^*} \right) \quad (11)$$

donde λ_{10} es la pendiente y, por lo tanto, una medida de compresibilidad; p^* es un esfuerzo de referencia que asegura un argumento adimensional para el logaritmo, y Γp^* es la relación de vacíos cuando $p' = p^*$. La ecuación se utiliza a menudo sin incluir explícitamente a p^* , lo que, efectivamente, equivale a adoptar p^* como un esfuerzo unitario. El valor de p^* no afecta la CSL resultante, aunque surgen correlaciones más fuertes entre Γp^* y las propiedades del suelo cuando p^* toma valores de p' en los cuales los ensayos triaxia-

les subyacentes alcanzaron el estado crítico (Cho *et al.* 2006, Torres-Cruz 2019). En cuanto a la base del logaritmo, además de la base 10 utilizada en la ecuación 11, también es común utilizar el logaritmo natural. Cambiar la base b del logaritmo produce una pendiente diferente λ_b :

$$\lambda_b = \lambda_{10} \log_{10} b \quad (12)$$

No hay fundamento físico para la ecuación 11, sino que está destinada a ajustarse empíricamente a los datos de las pruebas. De hecho, la ecuación 11 predice valores físicamente inadmisibles, a muy bajos esfuerzos ($e \rightarrow \infty$) y a muy altos esfuerzos ($e \leq 0$). Existen alternativas empíricas a la ecuación 11 para modelar las CSLs que exhiben curvatura en el espacio e - $\log(p')$ (por ejemplo, Li y Wang 1998, Bauer 1996). Naturalmente, la mayor versatilidad de estas ecuaciones alternativas conlleva la introducción de un tercer parámetro de ajuste. La elección entre la ecuación 11 o alternativas más elaboradas depende en gran medida de la inspección visual de los datos y de la aplicación prevista de la CSL. En última instancia, se trata de qué tan de cerca necesita seguir la CSL idealizada a los datos subyacentes y si la dispersión y curvatura de dichos puntos justifica la adopción de una alternativa más compleja a la ecuación 11. Es interesante señalar que incluso al caracterizar los mismos jales, algunos laboratorios adoptan la ecuación 11, mientras que otros adoptan alternativas más elaboradas, como una ley potencial (Reid *et al.* 2021).

4.3.3.1. El estado estable de deformación

Los términos "estado estable" (steady state) y "estado crítico" se utilizan para describir el comportamiento de los suelos frente a deformaciones importantes. A menudo se sugiere que son lo mismo, pero, en este documento aprovechamos la oportunidad para señalar que existen diferencias. Esto porque los coautores del documento han concluido que dichas diferencias son relevantes en la caracterización del comportamiento ingenieril de los relaves.

El término "estado estable de deformación" fue introducido por Poulos (1971) y se definió como el estado en el que un material particular se deforma continuamente bajo un estado constante de esfuerzo efectivo, a velocidad y con relación de vacíos constantes. El estado estable de deformación se logra solo después de que la orientación de las partículas ha alcanzado una condición estadísticamente estacionaria y después de que se haya completado la rotura de las partículas –si la hubiera–, de modo que el esfuerzo cortante necesario para continuar la deformación y la velocidad de deformación se mantengan constantes (Poulos 1981).

Roscoe y colaboradores (Roscoe *et al.* 1958) introdujeron la línea de relación de vacíos crítica para referirse a la posición o locus en el espacio e - p' - q , asociada al estado final alcanzado por un suelo al que se le aplica esfuerzo cortante y continúa deformándose a esfuerzo y relación de vacíos constantes.

Más tarde, Schofield y Wroth (1968) acuñaron el término "mecánica de suelos del estado crítico", afirmando que el núcleo de este concepto es que el suelo y otros materiales granulares, si se deforman continuamente hasta fluir como lo haría un fluido friccional, alcanzarán un estado crítico bien definido que puede representarse mediante dos líneas rectas. Una en el plano q-p' y otra en el plano e-log p'.

De acuerdo con estas definiciones, ambas condiciones (estado estable y estado crítico) parecen ser idénticas en el sentido de que ambas enfatizan la condición de un estado final resultado de grandes deformaciones, de deformación continua, a relación de vacíos y esfuerzos constantes. Sin embargo, la definición dada por Poulos (1981) para el estado estable tiene más condiciones que cumplir. A saber:

- Velocidad constante
- Orientación de partículas para alcanzar una estructura específica

- Rotura completa de todas las partículas, si las hubiera

Según estas definiciones, el estado crítico sería un estado que no incluye la tasa de deformación ni la orientación de las partículas, factores importantes que afectan el comportamiento mecánico de los materiales arcillosos. Cabe mencionar que, debido a que el concepto de estado crítico se aplicó con éxito para desarrollar el conocido modelo Cam-Clay, su aplicabilidad para suelos arcillosos a menudo se considera completamente válida, independientemente de los efectos de la tasa de deformación y reorientación de partículas. Esta situación necesita una explicación más detallada, especialmente relacionada con el comportamiento complejo de los materiales arcillosos; parte de lo cual se resume a continuación.

Se ha ensayado la arcilla Kawasaki japonesa ($G_s = 2.69$, $LL = 55.3$, $IP = 29.4$, $FC = 83.9\%$) a diferentes velocidades de deformación (Nakase y Kamei, 1986). La figura 21 muestra los resultados de una serie de ensayos triaxiales no drenados iniciados a partir de una trayectoria de consolidación K_0 (deformación lateral cero) y cargados en compresión o extensión. Se aplicaron tres velocidades de deformación durante la carga: 7×10^{-1} , 7×10^{-2} y 7×10^{-3} %/minuto.

Estos resultados muestran claramente que la velocidad de deformación tiene un efecto importante en las curvas de esfuerzo-deformación y en la resistencia no drenada; a mayor velocidad de deformación, mayor es la resistencia no drenada. Sin embargo, el ángulo de fricción movilizado en el estado último o estado crítico no se ve influenciado por la velocidad de deformación. Esto significa que la línea de estado crítico en el plano q-p' no se ve afectada por la velocidad de deformación, pero la línea de estado crítico en el plano e-log p' definitivamente sí es influenciada por esta. Para suelos arcillosos, la dependencia sistemática de la resistencia no drenada con la velocidad de deformación ha sido reportada por diferentes investigadores (por ejemplo, Bjerrum 1969; Sheahan et al. 1996; Díaz-Rodríguez et al. 2009; Chow et al. 2012).

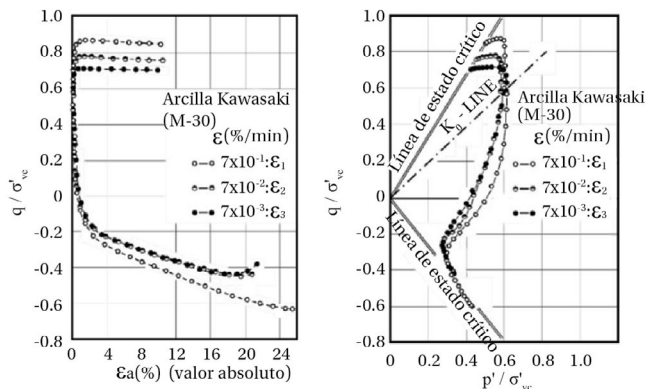


Figura 21. Respuesta no drenada de la arcilla Kawasaki a diferentes velocidades de deformación (según Nakase y Kamei, 1986).

Por otro lado, la orientación de partículas laminares en las arcillas se ha identificado como la causa del desarrollo de una "resistencia residual" que se alcanza con deformaciones significativamente grandes y a muy bajas velocidades de deformación (Bishop et al. 1971; Lupini et al. 1981; Skempton 1985). Como ejemplo, en la figura 22 se presenta la curva de relación de esfuerzo-desplazamiento obtenida de un ensayo de anillo de corte, donde, después de aproximadamente 30 días de corte, se movilizó una resistencia residual asociada a un ángulo de fricción de $\phi_r = 8.6^\circ$ en la arcilla de Kalabagh.

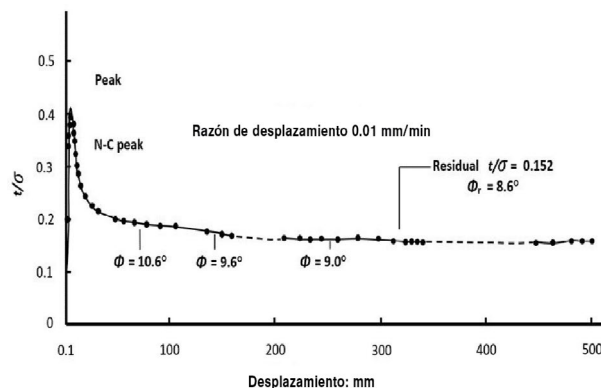


Figura 22. Desarrollo de la resistencia residual en la arcilla de Kalabagh. Publicada con permiso de ICE Publishing, de Skempton (1985); permiso otorgado a través del Copyright Clearance Center, Inc.

Además, se reproduce un ejemplo presentado por Schofield y Wroth (1968), en la figura 23, con el que se demuestra que la resistencia residual desarrollada por suelos arcillosos con partículas laminares difiere de la resistencia establecida en el estado crítico.

Respecto al requisito asociado con la completitud de la ruptura de partículas, si existe, consideramos que no es relevante en el caso de los materiales de grano fino.

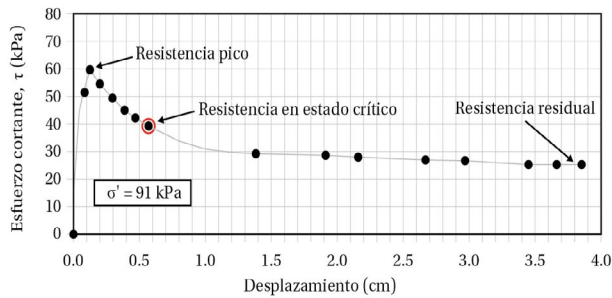


Figura 23. Resistencia en estado crítico y resistencia residual. Reproducido con el permiso de ICE Publishing, de Skempton (1964), otorgado a través de Copyright Clearance Center, Inc.

Derivado de la discusión anterior sobre el comportamiento de los suelos arcillosos, es posible afirmar que el estado crítico se aplica a estos suelos sin lograr realmente un comportamiento en estado estable. Por lo tanto, el estado crítico es un marco menos riguroso, pero suficientemente satisfactorio incluso para aplicaciones prácticas en materiales finos.

Conceptualmente, la definición de estado estable representa mejor el comportamiento fundamental de los suelos. Sin embargo, si se aplica rigurosamente, se obtendrá un estado estacionario no único (dependiente de la velocidad) en el caso de suelos de finos, aunque en el caso de suelos arenosos su aplicación es más directa, porque el efecto de la velocidad y la reorientación de partículas laminares no son particularmente relevantes para estos suelos. La ruptura de partículas puede ocurrir en suelos arenosos, y si ocurre, este efecto se refleja en la línea de estado estable resultante.

Por lo tanto, es posible concluir que el estado crítico implica dos condiciones: que el estado último del suelo se pueda representar por una línea recta en el plano q - p' y por otra en el plano e - $\log p'$. Esta simplicidad es probablemente la clave de la aplicabilidad práctica de la mecánica de suelos en estado crítico, incluso en suelos finos.

En el caso de los depósitos de jales, la aplicabilidad de cualquiera de estos marcos dependerá de si el comportamiento se acerca más a un suelo fino o a un suelo granular. Considerando que los fallos que han afectado más catastróficamente a los depósitos de jales están asociados con la licuefacción, los jales que se comportan como materiales arenosos son los de mayor interés en términos de su respuesta mecánica, al evaluar su estabilidad física.

Un estudio exhaustivo que demuestra el marco teórico sólido proporcionado por el estado estable de deformación fue reportado por Ishihara (1993) utilizando la arena Toyoura estándar japonesa. En la figura 24 se presentan una serie de resultados de ensayos triaxiales CIU en términos de curvas de esfuerzo-deformación y trayectorias de esfuerzo efectivo para muestras con diferentes relaciones de vacíos consolidadas a la misma presión isotrópica de 1 MPa. El tremendo efecto de la densidad es evidente en la resistencia al corte residual no drenada movilizada, que, en este caso, varía de cero a 2 MPa, asociada con respuestas del suelo que van de contractivas a dilatantes.

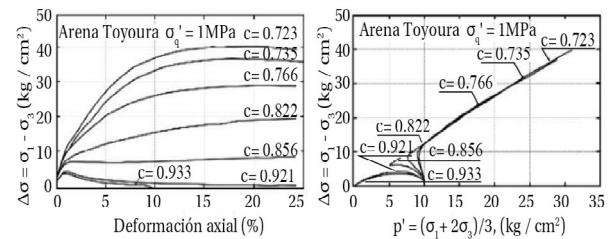


Figura 24. Resultados de ensayos triaxiales CIU con una presión de confinamiento de 1 MPa y diferentes relaciones de vacíos (siguiendo a Verdugo 1992).

Otra serie de resultados de ensayos triaxiales CIU se presentan en la figura 25, donde las muestras se probaron con la misma relación de vacíos, $e = 0.833$ (después de la consolidación), y a presiones de consolidación de 0.1, 1, 2 y 3 MPa. Estos resultados experimentales muestran que, para una relación de vacíos dada, la resistencia no drenada movilizada a grandes deformaciones es única, independientemente de la presión de confinamiento inicial. Además, las trayectorias de esfuerzo efectivo varían de dilatantes a contractivas según la presión de confinamiento inicial en relación con el estado último o estado estable de deformación.

4.3.3.2. Implicaciones de una CSL curva

Aunque es razonable utilizar la representación semi-logarítmica de la CSL (ecuación 11), es importante tener en cuenta la curvatura de la CSL. Como plantea Robertson (2017), los jales que muestran una CSL curva son menos frágiles frente a mayores esfuerzos efectivos que frente a bajos esfuerzos. Cuando se le aplica un esfuerzo cortante en condición no drenada, un elemento de jal suelto a un esfuerzo efectivo promedio alto, p' , disminuirá a un valor más bajo, pero aún sustancial, de p' , mientras que, si p' tiene un valor inicialmente bajo, este se reducirá a un valor muy pequeño, tal vez incluso cero, llegando entonces a la licuefacción real.

Se ha atribuido la curvatura de la CSL a la fragmentación de partículas (Bedin et al. 2012 y Schnaid et al. 2013, entre otros). Valenzuela (2015) sugiere que, a presiones (presumiblemente esfuerzos verticales) superiores a 1 MPa, ocurre la fragmentación de los bordes más angulares de las partículas de jales. Sin embargo, la curvatura de la CSL puede, en muchos casos, ser simplemente un artefacto al trazar los datos experimentales con un eje horizontal logarítmico. Por ejemplo, Ishihara (1993) reporta la proyección e - p' de la línea de estado estable (SSL, por sus siglas en inglés), esencialmente la misma que la CSL, como se discutió anteriormente, de la Arena de Toyoura para valores de p' que superan los 3 MPa (Figura 26). Cuando p' se grafica en una escala aritmética, la SSL es casi lineal, con una forma ligeramente convexa hacia arriba. No hay evidencia de un punto de inflexión. Por el contrario, si p' se grafica en escala logarítmica, los datos en la figura 26 se representan como una SSL (o CSL) claramente curva. En este caso al menos (y probablemente, en

muchos más), la curvatura de la SSL (o CSL) no está necesariamente relacionada con la fragmentación de partículas. Esta afirmación queda respaldada por los resultados de un estudio numérico que utiliza el Método de Elementos Discretos (DEM, por sus siglas en inglés) reportado por Nguyen et al. (2018). Ellos simulaban ensayos de compresión triaxiales drenados y no drenados para determinar la CSL de una colección de partículas elipsoidales de diferentes tamaños. La distribución de tamaños de partículas resultante tenía un $d_{50} = 1 \text{ mm}$ y un coeficiente de curvatura de 1.5, lo que produjo un material simulado similar a un material de relaves de tamaño uniforme (excepto por la forma de la partícula). El aspecto clave de este trabajo es que no se permitió la fragmentación de partículas. Sin embargo, se produjo una CSL claramente curva, lo que indica que la curvatura de la CSL puede no estar relacionada con la fragmentación de partículas.

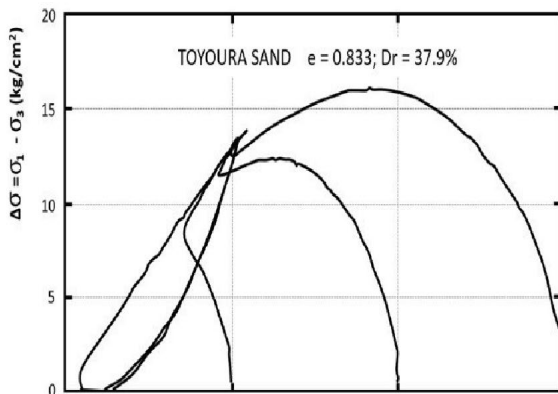
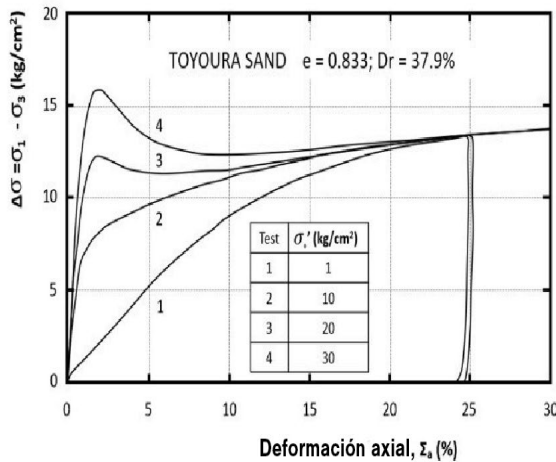


Figura 25. Resultados de pruebas triaxiales CIU a diferentes presiones de confinamiento y la misma relación de vacíos después de la consolidación. Reproducido con permiso de ICE Publishing, de Ishihara (1993), concedido a través del Copyright Clearance Center, Inc.

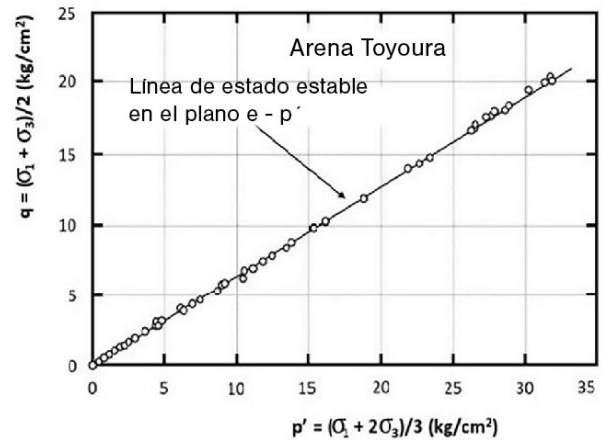
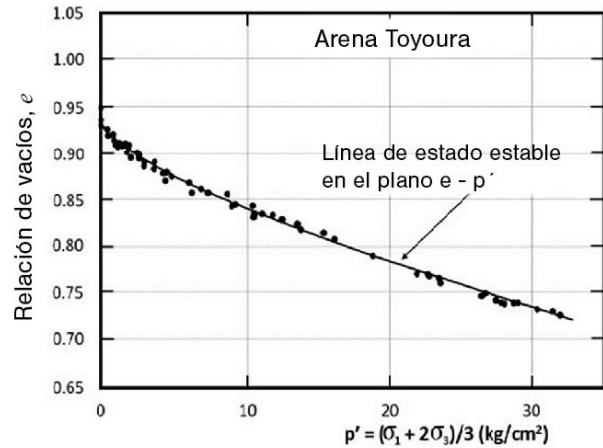


Figura 26. Proyecciones de estado estable de la arena de Toyoura (siguiendo a Verdugo 1992).

4.3.3.3. La proyección q-p' de la CSL

La selección de una ecuación para modelar la proyección q-p' de la CSL es sencilla porque los datos definen, de manera inequívoca, una tendencia proporcional:

$$q = Mp' \tag{13}$$

donde la pendiente M se denomina relación de fricción en el estado crítico. Dado que M depende de la forma de las partículas (Cho *et al.* 2006, Sadrekarimi y Olson 2011), es concebible que la CSL pueda desviarse de la tendencia lineal simple propuesta por la ecuación 13 cuando los esfuerzos sean lo suficientemente altos como para inducir la fractura de las partículas. Sin embargo, no tenemos conocimiento de ningún caso práctico en el que se haya observado esto. M depende de la magnitud del esfuerzo intermedio en relación con los otros dos esfuerzos principales. Normalmente, se toma como referencia la condición triaxial ($\sigma_2 = \sigma_3$) y la pendiente resultante se denomina M_{tc} . Esta condición de referencia se puede escalar a otras condiciones de esfuerzo (Jefferies y Been 2015).

4.3.3.4. Selección de muestras

Las CSL dependen de características intrínsecas de las partículas, como la mineralogía, la forma de las partículas y su distribución granulométrica. La proyección $e-p'$ es especialmente sensible a variaciones en cualquiera de estas características, mientras que la proyección $q-p'$ solo es sensible a variaciones en la mineralogía y en la forma de las partículas (Sadrekarimi y Olson 2011, Li *et al.* 2015, Torres-Cruz 2019). Generalmente las investigaciones sobre la variabilidad de las CSL dentro de un mismo depósito de jales muestran que las diferentes gradaciones exhiben proyecciones $e-p'$ diversas, pero esencialmente la misma proyección $q-p'$ (Fourie y Papa-georgiou 2001, Carrera *et al.* 2011, Li y Coop 2019, Torres-Cruz y Santamarina 2020). La implicación práctica positiva de esto es que cualquier variación potencial en la mineralogía y en la forma de las partículas dentro del depósito está suficientemente limitada como para evitar un efecto significativo en la proyección $q-p'$ de la CSL. Esto parece razonable en los depósitos que reciben jales de una sola planta o al menos de un solo cuerpo mineral. Por otro lado, existe la implicación de que caracterizar a fondo las proyecciones $e-p'$ de las CSL de un depósito de jales determinado requiere probar múltiples gradaciones. Esto de inmediato hace surgir la pregunta: ¿cuál es un enfoque confiable para seleccionar las muestras cuyas CSL se determinarán experimentalmente? La respuesta requiere una consideración cuidadosa porque la determinación de la CSL es una tarea que implica un nivel alto de recursos, ya que cada punto de la CSL requiere una prueba triaxial con medidas precisas de la relación de vacíos (Been *et al.* 1991, Verdugo e Ishihara 1996, Reid *et al.* 2021). Las investigaciones sobre las recientes fallas de depósitos de jales sugieren que, para fines prácticos, las CSL se definen con entre 4 y 8 puntos (Morgenstern *et al.* 2016, Jefferies *et al.* 2019, Robertson *et al.* 2019). En ocasiones, incluso pueden ser necesarias más pruebas para obtener una CSL bien definida. Claramente, las muestras deben ser elegidas cuidadosamente antes de comprometerse con pruebas tan exhaustivas.

Idealmente, las gradaciones seleccionadas para las pruebas de la CSL deberían permitir evaluar la variabilidad de las CSL dentro del depósito de relaves. Dado que nos centramos en la variabilidad de la proyección $e-p'$ y, suponiendo que la ecuación 11 es válida, las gradaciones seleccionadas deben revelar la variabilidad de Γ_{p^*} y λ_{10} dentro del depósito de jales. Un enfoque común es seleccionar muestras que abarquen el rango predominante de gradaciones en el depósito, desde el material más fino hasta el más grueso (Jefferies y Been 2016, Jefferies *et al.* 2019, Robertson *et al.* 2019). En jales plásticos, este enfoque parece razonable porque el material más fino suele ser más susceptible a la licuefacción bajo esfuerzos cíclicos (Schofield y Wroth 1968). Sin embargo, el contenido de limo de los suelos no plásticos no tiene una relación sistemática con Γ_{p^*} (Thevanayagam *et al.* 2002). En consecuencia, probar solo la gradación más gruesa y la más fina

de un depósito de jales puede llevar a una subestimación sistemática de la variabilidad de la CSL. Es cierto que esta subestimación podría ser poco significativa si también se prueba una o más gradaciones intermedias. A diferencia de adoptar la distribución de la granulometría como guía del proceso de selección de muestras, el análisis de una base de datos de más de 150 suelos sugiere que, independientemente del contenido de limo, la relación de vacíos mínima (e_{min}) es una propiedad índice adecuada para evaluar la variabilidad de las CSL en depósitos de suelos no plásticos, incluidos los jales (Torres-Cruz 2019, Torres-Cruz y Santamarina 2020). Es decir, e_{min} se correlaciona linealmente con Γ_{p^*} y con el límite superior de λ_{10} . La determinación de e_{min} en jales puede parecer una propuesta inusual, ya que los protocolos estandarizados de e_{min} generalmente están diseñados para arenas, en contraste con las gradaciones de jales, que suelen estar dominadas por limo. Sin embargo, hay numerosos precedentes en la literatura técnica que respaldan la confiabilidad de las determinaciones de e_{min} en limos (por ejemplo, Zlatovic e Ishihara 1995, Cubrinovski e Ishihara 2002, Thevanayagam *et al.* 2002, Papadopoulou y Tika 2008, Yang *et al.* 2006, Carrera *et al.* 2011, Torres-Cruz y Santamarina 2020).

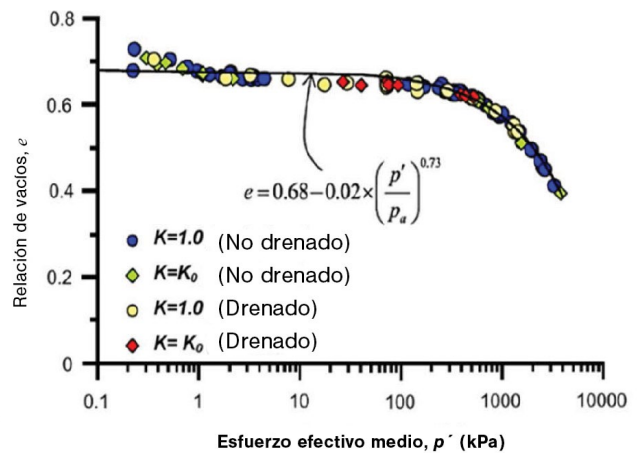


Figura 27. CSL curva derivada de simulaciones de triaxiales (utilizando DEM) de una colección de partículas elipsoidales (siguiendo a Nguyen *et al.* 2018).

4.3.4. Resistencia residual de los jales o relaves

Como se mencionó anteriormente, existe una creciente necesidad de evaluar la estabilidad de TSF existentes en función de las resistencias residuales (grandes deformaciones), cuando hay jales potencialmente licuables en la zona del depósito que podrían estar involucrados en una posible falla. Si los jales licuables solo existen en el centro de un depósito, lejos del perímetro de contención, no significan un problema. Lo que puede representar un riesgo es la presencia de jales potencialmente licuables cerca del perímetro. El enfoque emergente es; si los jales pueden licuar, asumamos que lo harán. Por ejemplo, hace algún tiempo, Silvis y de Groot (1995) sugirieron que debe asumirse siempre la activación si

los suelos (jales) son susceptibles a la pérdida de resistencia y, de forma similar, Morgenstern (2018) aconsejó firmemente que se asuma que los depósitos de jales que pueden licuar lo harán y que, así, la contención se generará mediante un contrafuerte de jales no saturados no licuables y/o material dilatante compactado.

El enfoque ha cambiado de intentar eliminar todos los mecanismos plausibles que puedan desencadenar la licuefacción, a asumir que en algún momento ocurrirá algún desencadenante desconocido (incluso potencialmente incognoscible). En muchos de los casos, esto podría ser simplemente un sismo de diseño máximo (MDE, por sus siglas en inglés) o, incluso, de menor magnitud. Sin embargo, las implicaciones en costos de esta postura pueden ser importantes. Los autores tienen conocimiento del altísimo costo de contrafuertes recientemente terminados o aún en construcción. Además, como lo demuestran muy bien Sarantonis *et al.* (2020), la importancia de la relación de resistencia post-licuación (s_r/σ_v') asumida en el costo resultante del contrafuerte es muy significativa. Ellos proporcionan un resumen de sus análisis de un depósito de jales hipotético, reforzado con enrocamiento, y trazan el costo (en millones de dólares) por cada 100 metros de longitud de contrafuerte en función de la relación de resistencia licuada (residual) asumida (figura 33). Como señalaron Sarantonis *et al.* (2020), al variar la relación de resistencia residual (s_r/σ_v') entre 0.05 y 0.2 (un rango plausible), hay un aumento de tres veces el costo. Visto así, claramente, la determinación precisa y confiable de la resistencia residual de los jales es un desafío clave para la industria.

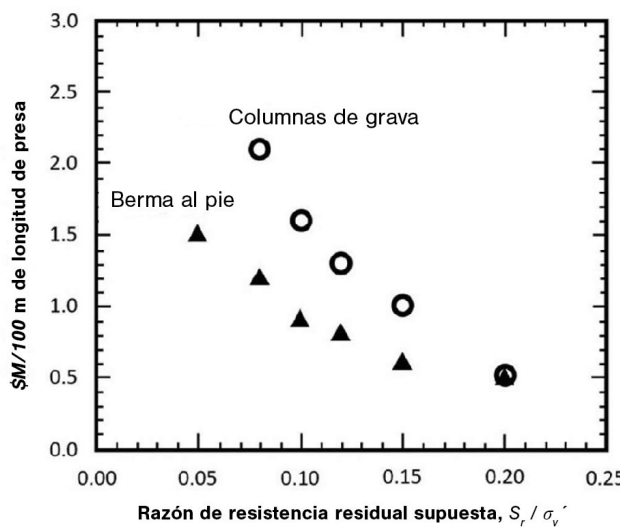


Figura 33. Ilustración del efecto de la relación de resistencia residual asumida en el costo resultante de un contrafuerte de estabilización (según Sarantonis *et al.* 2020).

Hay dos enfoques comunes para determinar la resistencia residual al corte de un material. Uno es el uso de correlaciones empíricas basadas en análisis retrospectivos de fallas documentadas y, el otro, es la realización de mediciones directas utilizando pruebas in situ o pruebas de laboratorio (a veces ambas). Para ambos enfoques hay fuertes defensores. Quienes apoyan el primero insisten en que la estimación de la relación de vacíos en la mayoría de las pruebas de laboratorio puede llevar a interpretaciones potencialmente engañosas de los resultados (Weber 2015). Los defensores de las pruebas de laboratorio señalan las enormes incertidumbres en la resistencia al corte movilizada en una masa en falla, por ejemplo, debido a diferentes tasas de deformación al cortante o distorsional. Esto junto con el hecho de que muchos de estos análisis no tienen en cuenta los efectos del momento al evaluar la resistencia al corte requerida para producir la geometría de la falla observada. Además, Robertson (2010) ha señalado que muchas historias de casos de falla involucraban deslizamientos regresivos, como el caso de la falla del depósito de jales de Merriespruit en Sudáfrica, en 1994 (Fourie *et al.* 2001), lo cual rara vez se tiene en cuenta en los análisis retrospectivos. La evaluación de la resistencia al corte post-licuación basada en tales ejemplos es cuestionable. Según los resultados presentados por Been y Jefferies (2006), estimar las relaciones de resistencia residual basadas en análisis retrospectivos de fallas proporciona una estimación conservadora (a veces significativamente conservadora) en comparación con las predicciones generadas con pruebas de laboratorio y un modelo constitutivo de estado crítico. Desde el trabajo de Been y Jefferies (2006), ha habido intentos adicionales de conciliar las resistencias retrospectivas con los datos de pruebas de laboratorio, pero un enfoque unificado parece seguir siendo difícil de lograr. Quizás la complejidad del comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos y jales muy frágiles o sueltos, y las implicaciones de analizar de manera realista los datos del CPTu –como se discutirá más adelante– hagan que tal reconciliación sea imposible, al menos a corto y mediano plazo.

Los datos de laboratorio, principalmente de pruebas de compresión triaxial y pruebas de corte simple directo (DSS, por sus siglas en inglés), son los más utilizados actualmente en la práctica para evaluaciones de resistencia residual. A continuación se presentan algunos ejemplos extraídos de la experiencia con jales de cobre en Chile para ilustrar la gama de factores a considerar al realizar pruebas. La figura 34 muestra valores de la resistencia residual no drenada en función de la relación de vacíos para jales de cobre, considerando diferentes contenidos de finos (es decir, partículas más finas que 75 micras). Estos resultados destacan el efecto de la distribución granulométrica del jal en la respuesta mecánica.

Estos resultados son especialmente relevantes en aplicaciones que utilizan ciclones para reducir el contenido de finos en los jales o relaves arenosos, como sucede en la construc-

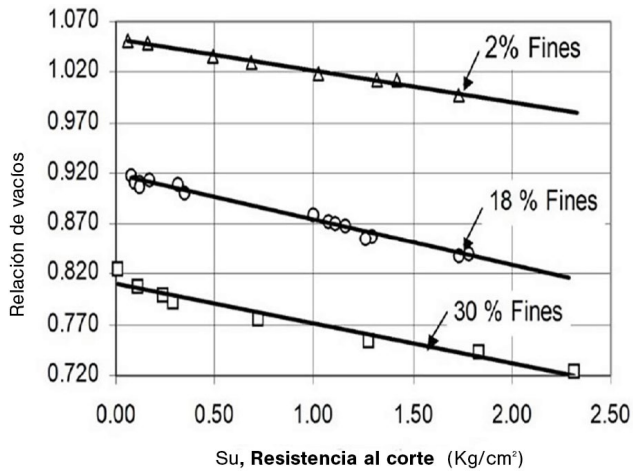


Figura 34. Resistencia residual no drenada de los jales o relaves de cobre chilenos.

ción de depósitos de arena de jales o relaves (tranques de relaves), práctica ampliamente utilizada en Chile y Perú.

Aunque sean ampliamente utilizados en la práctica, las limitaciones de deformación de los dispositivos típicos para pruebas triaxiales y de corte directo simple son tales que no siempre es posible alcanzar condiciones de estado estable (o incluso estado crítico) en estos ensayos. Existe evidencia de que las condiciones de contorno, especialmente en el corte directo simple, pueden ser tales que el comportamiento post-pico medido en estos dispositivos resulta no representativo. Aunque un dispositivo de corte anular –particularmente semejante al descrito por Suits et al. (2009)– promete determinar las resistencias residuales a grandes deformaciones, los autores no tenían conocimiento de ninguna resistencia residual no drenada (o a grandes deformaciones) medida de los jales o relaves utilizando dicho equipo. Consideramos que esta es una necesidad de investigación importante.

4.3.5. Ensayos de corte simple

Considerando que una parte significativa (a menudo la mayoría) de las superficies de falla potencial pueden sufrir esfuerzos cortantes bajo condiciones mucho más cercanas al corte simple, existe una dependencia excesiva de los ensayos de compresión triaxial. Ladd (1991) mostró cómo el suelo ensayado bajo diferentes condiciones de carga (por ejemplo, compresión triaxial, extensión triaxial y corte simple) arrojó diferentes valores de la relación de resistencia no drenada; presentó también resultados en función del índice de plasticidad (PI, por sus siglas en inglés) y mostró que la divergencia aumentaba a medida que el PI disminuía. Esto demuestra que la diferencia será mayor para los jales o relaves no plásticos, típicamente jales o relaves limosos y arenosos; precisamente el tipo de material más propenso a un comportamiento frágil si está más suelto que el correspondiente al estado crítico.

Como alternativa a los ensayos de compresión triaxial, especialmente para caracterizar las resistencias no drenadas a lo largo de secciones horizontales o casi horizontales de una superficie de falla potencial, se sugiere el ensayo de corte simple (SS). En un dispositivo de corte simple verdadero, la muestra se falla bajo condiciones de corte puro, sin esfuerzos cortantes complementarios en ninguna de las fronteras. El dispositivo de corte simple de Cambridge, descrito por Roscoe (1953), se acerca a imponer condiciones de carga de corte simple verdaderas. Sin embargo, la practicidad ha dado lugar al desarrollo de otros dispositivos de corte simple, con trabajos pioneros realizados tanto en el Instituto Noruego de Geotecnia (NGI) como en el Instituto Sueco de Geotecnia (SGI). Estos dispositivos confinan una muestra cilíndrica en la dirección horizontal mediante una membrana de látex reforzada o una pila de anillos delgados de teflón. Ello con el fin de mantener la restricción durante el montaje de la muestra y minimizar el confinamiento durante la aplicación del corte. Estos dispositivos, y varias de sus versiones modificadas, se conocen comúnmente como dispositivos de corte simple directo (DSS, por sus siglas en inglés).

En un ensayo de DSS los esfuerzos conocidos son el esfuerzo vertical (impuesto) y el esfuerzo cortante desarrollado en un plano horizontal durante la etapa de falla. Por lo tanto, permite conocer la resistencia al corte a lo largo de un plano horizontal a través de la muestra (es decir, la resistencia al corte no drenada) y el esfuerzo total vertical. Una suposición importante –que ha sido verificada por varios investigadores, pero particularmente por Dyvik et al. (1987)– es que los cambios en el esfuerzo vertical requeridos para garantizar condiciones de volumen constante (es decir, sin cambios en la altura) son iguales a la presión de agua intersticial medida en ensayos de corte simple verdadero no drenados. Esto significa que los ensayos en el DSS se pueden llevar a cabo incluso en especímenes secos y, si se mantienen las condiciones de volumen constante (ajustando el esfuerzo vertical total a medida que avanza el corte), se pueden determinar las presiones intersticiales que se desarrollarían durante los ensayos no drenados.

Sin embargo, el dispositivo de corte simple (DSS) también tiene algunas desventajas; particularmente que los parámetros de resistencia en términos de esfuerzo efectivo no se pueden determinar correctamente ya que los esfuerzos principales son desconocidos (e incluso imposibles de conocer de manera explícita). De hecho, los esfuerzos principales rotan durante el corte y la magnitud de la rotación es función del ángulo de fricción (Budhu 1984). Atkinson et al. (1991) demostraron que el ángulo de fricción obtenido en un ensayo de corte simple es menor que el obtenido en un ensayo triaxial, resultados que fueron confirmados por Dounias y Potts (1993).

A pesar de estas limitaciones, el ensayo de corte simple ha sido ampliamente utilizado durante muchos años en Escandinavia en el diseño de depósitos de jales, pues se considera que

proporciona una estimación conservadora de la resistencia al corte (Knutson 2018). Sin embargo, este grado adicional de seguridad no puede ser cuantificado. Por otro lado, el uso del ensayo triaxial para determinar los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos en el diseño de depósitos de jales está cada vez más extendido en Suecia, especialmente después del trabajo exhaustivo de Bhanbro et al. (2017) sobre jales arenosos, el cual demostró la magnitud de estas diferencias.

Aun con sus limitaciones, el ensayo de corte simple sigue siendo una herramienta digna de consideración, especialmente para determinar las relaciones de resistencia al corte no drenado en secciones horizontales y casi horizontales de los planos de falla potencial en el análisis de estabilidad de taludes. Cabe destacar que los ensayos de corte simple se han utilizado ampliamente en muchas de las evaluaciones forenses de fallas recientes en depósitos de jales (Morgenstern et al. 2016; Jefferies et al. 2019).

4.3.5 Condiciones de carga diferentes a la compresión triaxial y el corte simple

Aunque no es lo más común en la ingeniería de jales o relaves, también se han utilizado otras condiciones de carga, como la extensión triaxial, la deformación plana y los ensayos de corte torsional en cilindros huecos. Los ensayos de extensión triaxial proporcionan datos de resistencia que se consideran relevantes para una longitud relativamente pequeña en una superficie de falla típica, en el análisis de estabilidad de taludes de un depósito de jales, generalmente el tramo final aguas abajo de la superficie de falla potencial (ver Sadrekarimi 2016). Como mostró Ladd (1991), la relación de resistencia al corte no drenado (s_r/s_v') en extensión triaxial es menor que en compresión triaxial y en corte simple, pero las condiciones para llevar a cabo ensayos de extensión triaxial (la concentración de esfuerzos que causan la estricción de la muestra, lo que dificulta los cálculos de área y algunas complicaciones para asegurar el contacto de la muestra con el cabezal de carga superior, por ejemplo) han provocado que generalmente se utilicen datos de resistencia obtenidos de ensayos de compresión triaxial o corte simple para esta sección de la superficie de falla.

A primeras vistas, un dispositivo de carga de deformación plana es altamente adecuado para determinar las resistencias al corte relevantes para el análisis de estabilidad de taludes de un depósito de jales, ya que estos se representan generalmente de manera bidimensional. Sin embargo, estos dispositivos no suelen estar disponibles fuera de instituciones de investigación. Wanatowski y sus colaboradores (por ejemplo, Wanatowski y Chu, 2007, 2011), entre otros, han realizado un trabajo valioso sobre pruebas de deformación plana de licuefacción estática de arenas sueltas (no específicamente jales).

Aunque su uso para probar jales ha sido limitado, el aparato de corte torsional en cilindros huecos (TSHC, por sus siglas en inglés) es el más versátil en términos de carga. El TSHC

puede reproducir una variedad de trayectorias de esfuerzos, incluyendo compresión triaxial, corte simple verdadero y deformación plana. Una de sus desventajas es el costo del dispositivo y la complejidad de su operación (especialmente en comparación con los dispositivos de corte simple y triaxiales); sin embargo, algunos proveedores ya están desarrollando dispositivos compactos y completamente automatizados. Dada la importancia de evaluar una variedad amplia de posibles trayectorias de esfuerzos para la estabilidad de las pendientes de los depósitos de jales, prevemos que, en la próxima década, o incluso antes, el uso del TSHC estará más generalizado.

La sección 4.3 se ha centrado en explicar los diversos enfoques para determinar la resistencia al corte de los jales mineros bajo condiciones de carga estática. En la sección 6 (*ver la liga al artículo completo en las notas al final de este*) se presenta una discusión más detallada sobre la importancia de las distintas trayectorias de esfuerzos seguidas durante las pruebas, y se analizan brevemente algunos de los resultados de investigaciones forenses bien documentadas.

Notas

1. Este artículo es una traducción del inciso 4.3 de "Geotechnics of mine tailings: a 2022 State of the Art" elaborado por Andy Fourie, Ramón Verdugo, Annika Bjelkevik, Luis Alberto Torres Cruz, Dobroslav Znidarcic y publicado en "Proceedings of the 20th ICSMGE-State of the Art and Invited Lectures - Rahman and Jaksá (Eds) © 2022 Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, ISBN 978-0-9946261-6-5e1"

2. Por razones de espacio algunos subincisos, así como las referencias, no fueron incluidos. Los interesados pueden consultar el artículo original en:

<https://www.issmge.org/publications/publication/geotechnics-of-mine-tailings-a-2022-state-of-the-art>

La máquina adecuada para cada situación.

LIEBHERR

Obras civiles especiales



Thomas Riccio

Escuela de Ciencias e Ingeniería
Universidad de Dundee
Escocia

Tomás Romero-Olán

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
México

Marco Previtali

Escuela de Ciencias e Ingeniería
Universidad de Dundee
Escocia

Matteo O. Ciantia

Escuela de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Dundee
Escocia
Departamento de Ciencias de la Tierra y Ambientales
Universidad Milano-Bicocca
Italia

Miguel A. Mánica

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
México

Equipo multiaxial para modelos a escala con tomografía computarizada

La modelación física ha sido esencial para el desarrollo de la ingeniería geotécnica. Los modelos físicos a escala nos permiten obtener información sobre los patrones de respuesta de un problema de contorno de interés, de manera más rápida y con mayor control que una prueba a escala real (Muir Wood, 2004). Asimismo, a partir de su validación mediante análisis numéricos, permiten explorar diferentes configuraciones e identificar las variables principales que determinan la respuesta de un sistema (ver, e.g., Boulanger *et al.*, 1999). Además, son particularmente útiles para estudiar problemas de interacción suelo-estructura bajo configuraciones de carga complejas.

Los ensayos de centrifuga han ganado gran importancia, ya que permiten representar de manera más realista el estado de esfuerzos en un modelo escalado, al incrementar localmente el campo gravitatorio (Schofield, 1980). Sin embargo, debido a las particularidades de su operación, el monitoreo de la respuesta presenta ciertas complicaciones y limitaciones. Por otro lado, la aplicación de técnicas de imagen no invasivas en la ingeniería geotécnica, como la tomografía computarizada (Desrues *et al.*, 1996), han permitido identificar los complejos procesos de deformación que ocurren en los geomateriales bajo diversas condiciones de carga. No obstante, estas técnicas requieren de instalaciones y equipos especializados, generalmente desarrollados para otras aplicaciones, por lo que su uso en modelos físicos en geotecnia conlleva importantes limitaciones, en particular en cuanto al espacio disponible. El escaneo de una muestra suele realizarse en momentos específicos durante el proceso de carga, lo que obliga a detener secuencialmente la prueba; esto también dificulta mantener el estado de esfuerzos durante el proceso, lo cual es fundamental en problemas donde la dependencia con el confinamiento es relevante.

En este contexto, resultado de una colaboración entre la Escuela de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Dundee, Escocia, y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, se planteó el desarrollo de un equipo para estudiar modelos a escala reducida de interacción suelo-estructura capaz de aplicar cargas multidireccionales. El principal desafío en su diseño fue lograr que el equipo pudiese operar dentro de un escáner CT de rayos X para observar, en tiempo real, la configuración de deformación interna del geomaterial durante el proceso de carga.

La presente nota técnica describe brevemente el equipo desarrollado. Para más detalles sobre su diseño y operación, consultar Riccio *et al.* (2024) y Romero *et al.* (2024).

Características generales del equipo

El equipo fue diseñado para operar dentro del escáner CT Nikon XT H225 ST de la Universidad de Dundee (figura 1). El interior del dispositivo tiene un ancho de 1500 mm y una altura de 1210 mm y la muestra se coloca en un plato rotatorio de 300 mm de diámetro. El escaneo de la muestra se realiza mediante una fuente de rayos X de 225 kV y un detector de fibra de carbono con lados de 400 mm. La rotación del plato permite la captura de múltiples secciones para su posterior reconstrucción tridimensional (3D).

El equipo multiaxial fue diseñado para cumplir con las restricciones geométricas, de peso y operacionales del escáner CT y está compuesto por tres elementos principales: (1) el marco externo, (2) el marco interno y (3) el elemento de reacción (ver figura 2). El marco externo está conformado por elementos estructurales de aluminio anodizado que soportan el sistema de desplazamiento vertical. El marco interno está compuesto por elementos que soportan los sistemas de desplazamiento horizontal principal y secundario, así como un cubo de reacción que contiene un arreglo de celdas de carga miniatura conectadas a un elemento que representa la cimentación a estudiar. Los sistemas de desplazamiento se componen de actuadores lineales de husillo trapezoidal accionados por motores de corriente directa; cuatro para el sistema vertical, dos para el sistema horizontal primario y uno para el sistema horizontal secundario. La sincronización de los motores del sistema vertical y el horizontal primario se logró mediante un sistema de correas de polímero reforzado con acero. Por último, el elemento de reacción está conformado por una cámara cilíndrica de acrílico, confinada entre dos placas de aluminio, que contiene la muestra de suelo. Esto permite minimizar las distorsiones y anomalías en las mediciones durante el escaneo CT. También se diseñó una cámara para especímenes más pequeños, soportada por una serie de columnas de aluminio huecas (ver más detalles en Riccio *et al.*, 2024).

La configuración final del equipo se muestra en la figura 3. El sistema permite aplicar simultáneamente carga vertical y carga en ambas direcciones horizontales (una con rotación libre y otra con rotación restringida), tanto de forma monótona como cíclica. Por lo tanto, el equipo es particularmente útil para estudiar el comportamiento de pilas y pilotes ante cargas laterales accidentales, como las producidas por viento o sismo.

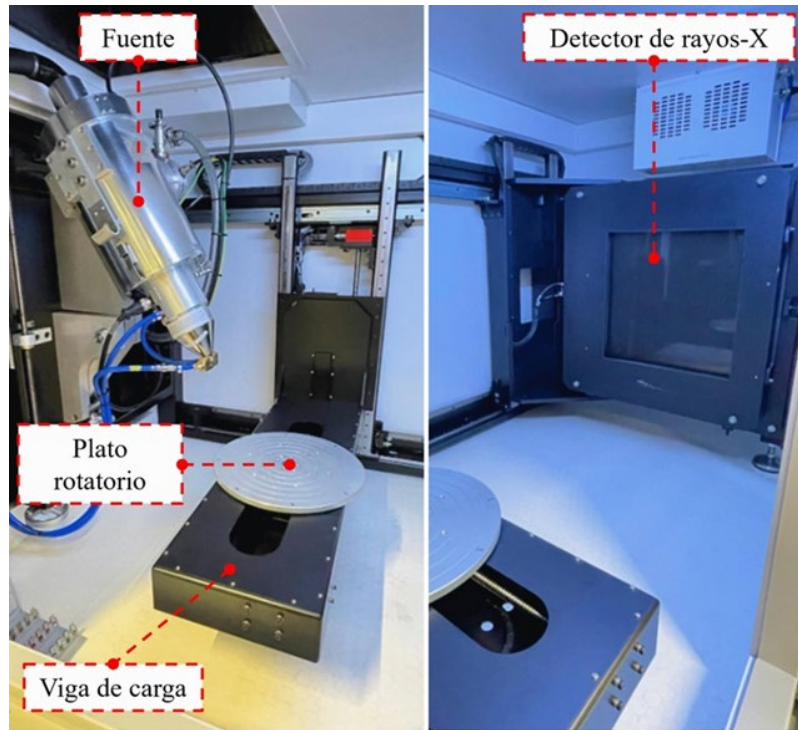


Figura 1. Interior del escáner CT Nikon XT H225 ST de la Escuela de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Dundee, Escocia.

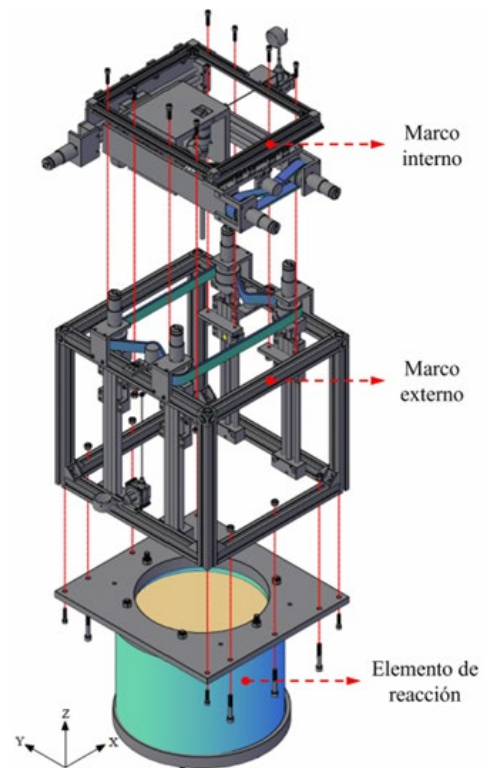


Figura 2. Elementos principales del equipo multiaxial.

Ejemplo de aplicación

A manera de ejemplo, la figura 4 muestra las imágenes adquiridas con el escáner CT de una de las secciones transversales (ver figura 4b) y de la reconstrucción 3D (ver figura 4a), durante la instalación y carga lateral cíclica de un pilote tubular metálico a escala en una roca blanda. La escala de grises representa la atenuación de los rayos X y, por lo tanto, es una medida de la distribución espacial de la densidad de la roca que evoluciona como resultado del proceso de deformación. Durante la instalación, se observa que la deformación axial del material que se introduce en el pilote causa la formación de una serie de fracturas por tensión, orientadas en dirección perpendicular al eje del pilote. Posteriormente, como consecuencia de la carga lateral cíclica, se observa una zona de intenso daño aledaña al pilote, así como la propagación de algunas fracturas hasta los límites del modelo. Este tipo de observaciones permiten relacionar el comportamiento de las medidas globales de carga y desplazamiento con la compleja distribución de deformación y fracturamiento de la roca.

Conclusiones

La presente nota describe el desarrollo de un equipo para estudiar modelos a escala reducida de interacción suelo-estructura bajo cargas multidireccionales. Su principal característica es la capacidad para operar dentro de un escáner CT, lo que permite observar, en tiempo real, la evolución de la configuración de deformaciones internas del material debido a carga mecánica. El equipo permite identificar mecanismos de deformación/falla complejos y, por lo tanto, proporciona elementos para entender las respuestas observadas en términos de mediciones globales de carga y desplazamiento.

Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto ICE-PICK, financiado por el EPSRC NIA, con número de subvención EP/W00013X/1.

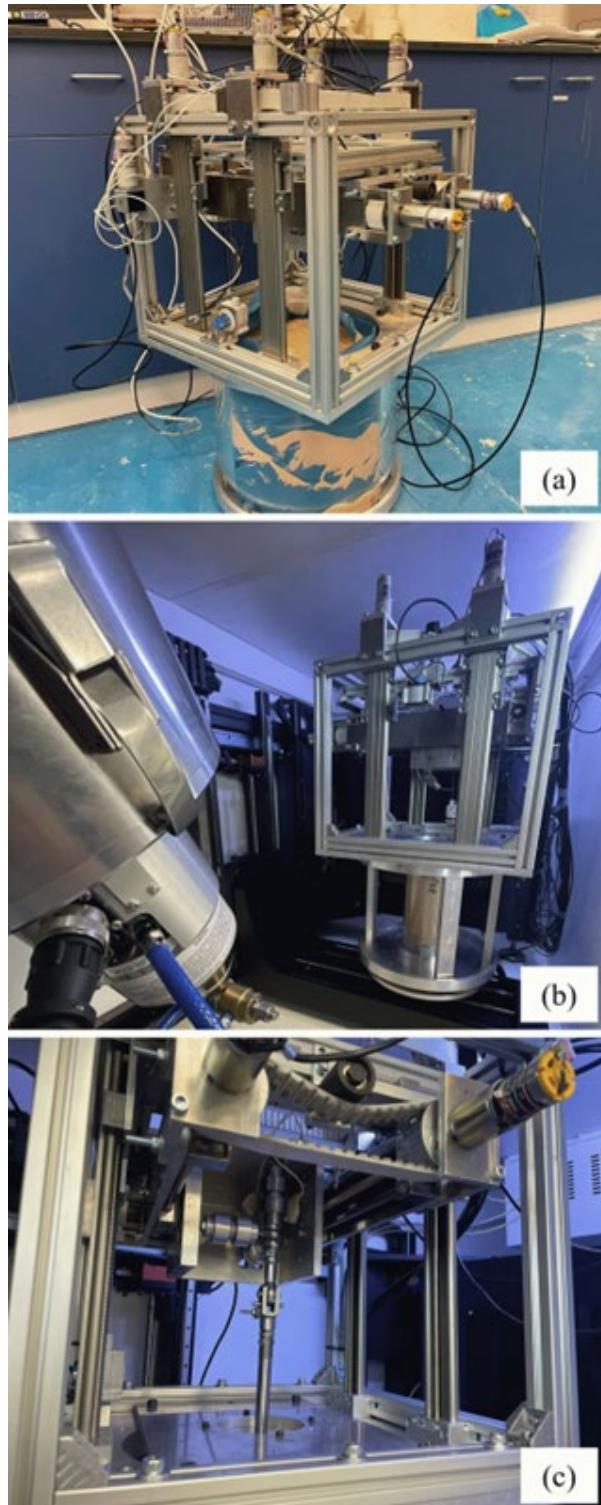


Figura 3. Equipo desarrollado con la cámara (a) principal y (b) reducida (dentro del escáner CT) y (c) penetración de un pilote a escala.

Referencias

Boulanger R W, Curras C J, Kutter B L, Wilson D W, Abghari, A (1999). Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(9): 750-759.

Desrues J, Chambon R, Mokni M, Mazerolle F (1996). Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique*, 46(3): 529-546.

Muir Wood, D (2004). *Geotechnical Modelling* (1st ed.). CRC Press, London.

Riccio T, Romero T, Previtali M, Manica M A, Ciantia M O (2024). A 4D soil-structure interaction model testing apparatus. *Geotechnical Testing Journal* (in press).

Romero T, Riccio T, Ciantia M O, Mánica M A, Ovando E (2024). Diseño conceptual y estructural de un marco de carga multiaxial para modelos geotécnicos a escala. En López-Acosta N P y Espinosa-Santiago A L (eds.), XXXII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, Ciudad de México, 325-332.

Schofield, A N (1980). *Cambridge geotechnical centrifuge operations*. *Géotechnique*, 30(3): 227-268.

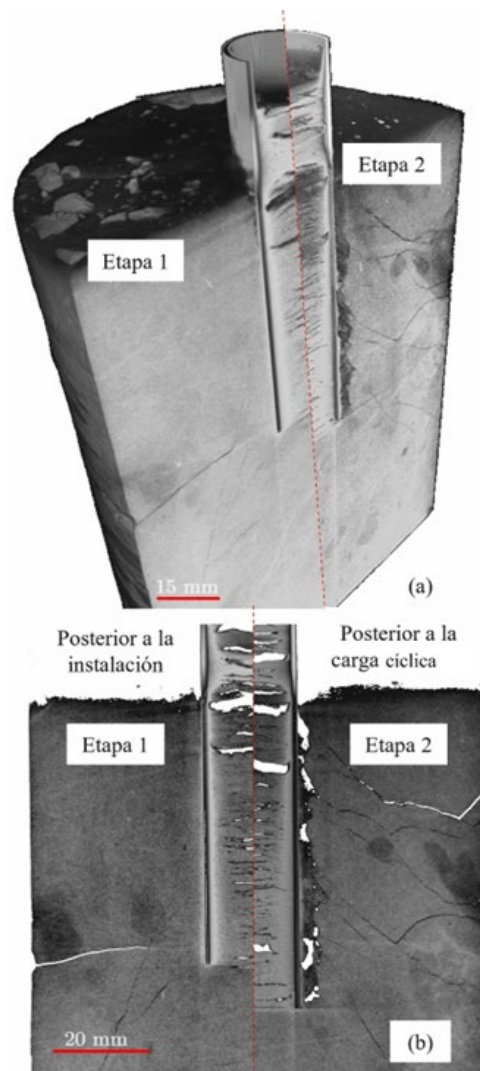


Figura 4. Imágenes obtenidas después de la penetración (etapa 1) y carga lateral cíclica (etapa 2) de un pilote tubular a escalara en una roca blanda a) reconstrucción 3D y b) sección transversal (Riccio et al., 2024).

PILOTES DE ACERO W o H PARA CIMENTACIONES

Presentes en el día a día de las personas y dándole vida a las ciudades, proponemos soluciones versátiles, flexibles, innovadoras y sostenibles que apoyan la visión de nuestros clientes. Satisfacemos las demandas existentes para la optimización de tus proyectos y juntos moldeamos el futuro.

CERTIFICACIONES



CALIDAD



MEDIO AMBIENTE



SEGURIDAD Y SALUD

VENTAJAS DE LA CIMENTACIÓN CON PILOTES DE ACERO



Rapidez en la construcción



Productos certificados



Rentabilidad del proyecto

TRANSFORMAMOS LA CIMENTACIÓN DE TU PROYECTO CON PILOTES DE ACERO.

Contáctanos

☎ 55.5262.7300

✉ pilotes@gerdau.com

🌐 gerdaucorsa.com.mx

GERDAU
CORSA
El futuro se moldea

2025

Enero
10

Primer encuentro de tutores de capítulos estudiantiles ante la SMIG
On line

Enero
13 al 17

Curso Taller Laboratorio de Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería de la UNAM
México

Septiembre
4 y 5

7° Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas y Mejoramiento de Suelos
México

2026

Marzo

2^{do} Simposio Internacional sobre Depósitos de Jales
México

Noviembre
4 al 6

International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering
Chile
info@pbd-v-chile.com
www.pbd-v-chile.com

NUEVOS SOCIOS ¡BIENVENIDOS!

Paola Hueytletl Gavilán

José Luis Santiago Guerrero

Luis Misaél Palacios Tepepa

José Fernando Mateos Ruiz

David Armando Beltrán Vargas

Tania Cruz González

Joel Serna García

Rodrigo Salas Jarquín

Bardomiano Soria Castañeda

Michael James

Ariadna Berenice Trejo Raya

Marycruz Ramírez Casanova

Julio César Terán Méndez

Marco Antonio Gómez Catalán

Carlos Alberto Olvera Vázquez

Juan Santiago Juárez

Moisés Flores Luna

Pedro Ancheyta Bringas

Carolina Hernández Valerio

Jonathan David Guzmán Piña

Eduardo Alonso López Flores

Berenice Andrea Neri Moreno

Ángel Rodrigo Terrones Porcayo

Néstor Manuel Rezza Díaz

Ximena Penélope Amezcua Pastrana

Brenda Lizbeth Cervantes García

Fredy Alonso Díaz Durán

Mayra Pamela Contreras González

Pedro Sánchez López



IR A TEXTO CORRIDO

RESEÑAS

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS EN SUELOS COSTEROS A PARTIR DE UN ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA (TRT)

Universidad Nacional Autónoma de México

Programa: Maestría y Doctorado en Ingeniería

Grado obtenido: Maestría

Autor

Octavio Alan Herrera Zúñiga

Tutora principal

Dra. Norma Patricia López Acosta

Resumen

Una de las propuestas para aprovechar la energía geotérmica son las estructuras termoactivas, como lo son las pilas de energía, consideradas un tipo especial de Bombas de Calor Geotérmico (BCG). El correcto diseño de estas estructuras requiere una estimación precisa de las propiedades térmicas del suelo y del intercambiador de calor. Estos datos pueden obtenerse mediante ensayos de respuesta térmica (TRT), los cuales consisten en inyectar calor de manera constante a un fluido caloportador que circula en un circuito cerrado dentro del intercambiador de calor, mientras se registra el cambio de temperatura del fluido con el tiempo.

Relacionado a ello, el objetivo principal de esta tesis de maestría es determinar las propiedades térmicas de los suelos en la zona costera de Jalisco a partir de un TRT aplicado directamente a un caso real de una pila de energía. En el documento se exponen los modelos analíticos más utilizados en la práctica, señalando sus ventajas y limitaciones. Como

núcleo del trabajo, se presentan los métodos para determinar las propiedades térmicas del suelo, haciendo énfasis en los TRT, para, después, exponer algunos modelos analíticos propuestos en la literatura para calcular la variación de temperatura del fluido caloportador.

El caso analizado corresponde al proyecto de una pila de energía ubicada en la zona costera de Jalisco. Sobre dicha pila se ejecutó un TRT y con los datos obtenidos se efectuaron los análisis térmicos aplicando las ecuaciones de flujo de calor y el principio de superposición. Para realizar estos análisis, se desarrolló un código en el software MATLAB® fundamentado en los modelos analíticos para determinación de las propiedades térmicas del suelo y de la pila de energía. Adicionalmente, se compararon los valores de los parámetros térmicos obtenidos con cada modelo analítico y su fiabilidad mediante la homocedasticidad. Así mismo, se compararon los resultados obtenidos a partir del TRT y los datos determinados con la aguja térmica y, adicionalmente, se comprobó la existencia de flujo subterráneo mediante la estimación secuencial de la conductividad térmica.

En el apartado final, se presentan las conclusiones de los análisis realizados y se dan algunas recomendaciones resaltando aspectos relevantes a investigar para mejorar el análisis de los datos obtenidos a partir de TRTs implementados en pilas de energía.

ANÁLISIS Y DISEÑO GEOTÉCNICO PARA VÍAS FÉRREAS

 IR A TEXTO CORRIDO
Universidad Nacional Autónoma de México

Programa: Maestría y Doctorado en Ingeniería

Grado obtenido: Maestría

Autor

Manuel Josimar Barroso Morales

Tutora

Dra. Alexandra Ossa López

Con el aumento en la expansión de líneas y la construcción de nuevos proyectos ferroviarios en nuestro país, resulta fundamental estudiar y comprender los aspectos en los que la ingeniería geotécnica debe desempeñar un rol estratégico para el desarrollo y la implementación de estos sistemas.

Esta tesis hace una descripción del contexto actual y presenta los desafíos del crecimiento en infraestructura ferroviaria en el país, considerando tanto el transporte de pasajeros como el de carga. El trabajo comienza con una revisión general de la red ferroviaria existente, señalando cuáles son los componentes principales de una vía férrea convencional, los materiales esenciales para garantizar su seguridad y las especificaciones de calidad exigidas según las normativas nacionales e internacionales. Además, se detallan las metodologías

analíticas empleadas para determinar el espesor adecuado de la capa granular (balasto y subbalasto) y los criterios de diseño correspondientes, presentando y comparando las principales diferencias y similitudes entre sus enfoques.

La tesis también desarrolla un modelo numérico aplicado a un caso práctico en dos escenarios, incluyendo una descripción de los modelos constitutivos comúnmente empleados para simular el comportamiento de la capa granular, junto con las propiedades específicas de los materiales del estudio. Los resultados del modelado numérico permiten observar los efectos de las cargas generadas en cada durmiente, así como la distribución de esfuerzos y asentamientos en las capas granulares que forman parte de la subestructura estudiada.

Mediante el análisis de elementos finitos, se valida la metodología de Li & Selig (1998) al comparar el esfuerzo desviador máximo obtenido en el modelado numérico con el resultado de la metodología analítica en el nivel de la subrasante. Esto permite concluir si el espesor de la capa granular está subestimado o sobrestimado. Finalmente, se hace una comparación de los asentamientos obtenidos en el modelado numérico y los valores de asentamiento permitidos por la normativa nacional para la nivelación de vías férreas, proponiéndolos como valores de referencia admisibles.

DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS DINÁMICOS DE DEFORMACIÓN UNITARIA MEDIANTE LA CÁMARA TRIAXIAL CÍCLICA
 IR A TEXTO CORRIDO
Universidad Nacional Autónoma de México

Programa: Maestría y Doctorado en Ingeniería

Grado obtenido: Maestría

Autor

Miriam Adriana Arias Rojas

Tutores

Dr. Rigoberto Rivera Constantino

Ml. Carmelino Zea Constantino

El Dr. Leonardo Zeevaert desarrolló la teoría de la Sismo-geodinámica con el objeto de estudiar el comportamiento dinámico del suelo. Una de sus aportaciones principales son los módulos dinámicos de deformación unitaria, cuyos parámetros se obtenían con la Cámara Holandesa (Fig. 1).

El principio de este equipo se basa en aplicar el esfuerzo efectivo de campo (σ_v) y el esfuerzo horizontal (σ_h) de acuerdo con la anisotropía del material, para posteriormente aplicar un incremento de compresión horizontal cíclica $\pm \Delta p_x$ correspondiente a $1/4$ del periodo equivalente al que se espera ocurra en un evento sísmico (2 a 4 s).

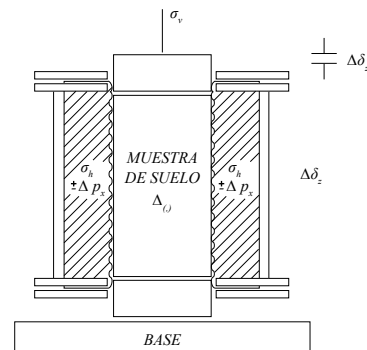
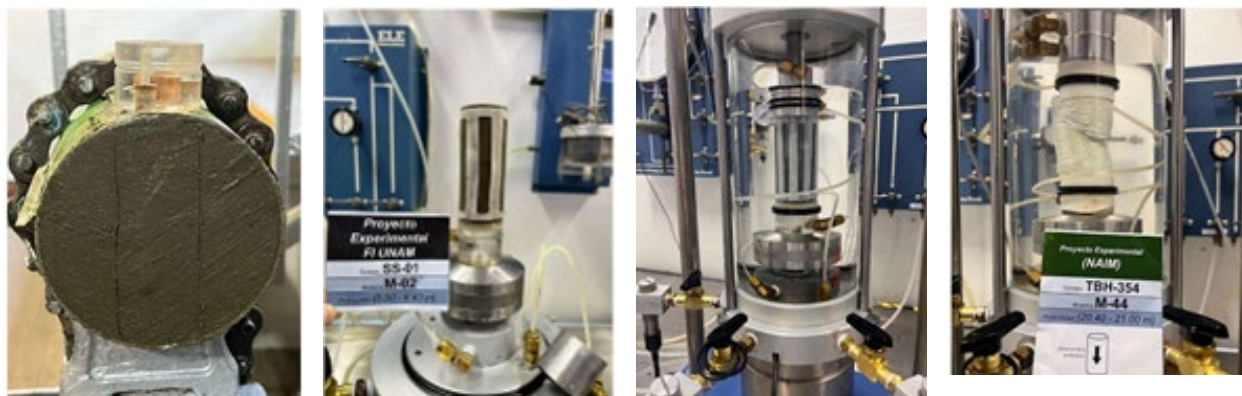


Figura. 1 Arreglo general de la Cámara Holandesa (Zeevaert, 1988).

Una alternativa para determinar los parámetros dinámicos establecidos por el Dr. Zeevaert, es el uso de la cámara triaxial cíclica, empleando probetas de suelo labradas en sentido normal y paralelo a la estratificación. Para esta investigación, con apoyo de diferentes disciplinas que integran el Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería, se rehabilitó un



Proceso de montaje para el ensaye triaxial cíclico.

equipo triaxial cíclico aprovechando la automatización realizada en el pasado.

Una de las variables que es necesario conocer durante el desarrollo del ensaye triaxiales cíclicos, en condiciones no drenadas, es la presión de poro que se genera por la aplicación del esfuerzo desviador, ya que de ella dependen los parámetros dinámicos del suelo ensayado. Normalmente, dicha presión se mide mediante un transductor colocado en la base de la cámara, asumiendo que el valor medido es uniforme a lo largo de la probeta de suelo.

Sin embargo, mientras que en suelos muy permeables, dicha suposición puede ser cierta; en suelos de baja a muy baja permeabilidad, como las arcillas blandas de la ciudad de México, la hipótesis de uniformidad de la presión de poro es poco aceptable. Una forma de conocer la distribución de esta última a lo largo de la probeta de suelo es colocando transductores de presión en la cabeza, base y centro de la probeta, o bien, haciendo una estimación de la misma mediante métodos analíticos, como se decidió en este caso al utilizar el modelo analítico de Zeevaert (1988).

El modelo de Zeevaert permite estimar de manera analítica el incremento de la presión de poro que se genera durante la aplicación de un esfuerzo desviador cíclico $\pm \Delta p_z$. Para ello es necesario conocer las deformaciones unitarias verticales tanto en compresión

como en tracción, la relación de Poisson, el grado de saturación y el factor de respuesta β , tanto en compresión como en tracción, y asumir que, durante el corto tiempo de la aplicación de la carga cíclica, no hay disipación de la presión de poro.

Para determinar los parámetros del modelo analítico de Zeevaert, las muestras recuperadas se consolidaron isotrópicamente con el esfuerzo normal efectivo equivalente de campo. Para esto, la aplicación de la carga en las probetas se realiza incrementando paulatinamente la amplitud del esfuerzo desviador cíclico, en la modalidad de carga controlada, conservando la frecuencia y el mismo número de ciclos hasta la falla.

Para programar la secuencia de incrementos de carga cíclica verificamos los resultados obtenidos en los ensayos de compresión triaxial realizados (UU), ya que, en suelos finos muy blandos, las muestras pueden fallar con amplitudes de carga muy pequeñas.

Para todas las pruebas realizadas se utilizó una frecuencia de 0.50 Hz, equivalente a un periodo de 2 s, aplicando 20 ciclos a cada incremento de amplitud.

Conclusiones:

1. Estos resultados ponen en evidencia la importancia de conocer la distribución real de las presiones de poro a lo largo de la muestra de suelo durante la aplicación del esfuerzo desviador cíclico, mediante un incremento en la instrumentación.
2. Debido a lo anterior y, al observar este comportamiento en los suelos impermeables, el Dr. Zeevaert definió el grado de saturación como el parámetro con mayor impacto en la obtención de los módulos dinámicos en su teoría.
3. Se establece compatibilidad entre el modelo del Dr. Zeevaert, con las teorías modernas propuestas por otros investigadores para la arcilla de la CDMX (Mendoza, M.J. *et al.* 1991 y Ovando *et al.* 2021)
4. Los módulos de deformación dinámica obtenidos con la teoría de Zeevaert pueden ser empleados para calcular los hundimientos residuales sísmicos en la superficie del suelo, la capacidad de carga por pérdida de confinamiento lateral, la respuesta sísmica de edificios y, a futuro, seguramente brindará información importante en suelos licuables o materiales de jal.

LIBROS TÉCNICOS



IR A TEXTO CORRIDO

Mecánica de suelos no saturados

Eduardo Rojas G., Omar Chávez A. y Felipe Romero Z.

Este libro es el primero publicado por la editorial de la Universidad Autónoma de Querétaro en formato electrónico (epub). Esto, además de abatir costos, permite realizar publicaciones sin el uso de valiosos recursos naturales –como son los árboles– y generar una difusión más amplia.

Por otro lado, el conocimiento del comportamiento y modelación de los suelos no saturados se ha transformado profundamente en los últimos 30 años. Ante la complejidad del comportamiento de estos materiales, su estudio formal inició con el empleo de las llamadas variables de esfuerzos independientes: el esfuerzo neto y la succión. Esto permitió analizar el comportamiento de los materiales frente a la variación de cada uno de estos parámetros de forma independiente y así surgió el Modelo Básico de Barcelona que generalizó el Modelo del Estado Crítico para el caso de suelos con cualquier grado de saturación.

No obstante, pronto se identificaron ciertos fenómenos difíciles de incluir en dichos modelos, uno de ellos el acoplamiento hidro-mecánico. Este fenómeno implica que, ante un incremento de carga, los tamaños de poro se reducen, la distribución de agua del suelo, al igual que su grado de saturación, cambia y esto modifica el comportamiento mecánico del material. Por ello surgió la necesidad de generar modelos a partir del concepto de esfuerzos efectivos. Y, aunque la ecuación de esfuerzos efectivos para suelos no

saturados sigue siendo un tema de discusión dentro de esta rama de la Geotecnia, el empleo de ecuaciones aproximadas –como la ecuación de Bishop– ha permitido comprender bastante bien el comportamiento de estos materiales. De la misma forma, ha permitido avanzar en la comprensión del comportamiento de otros suelos problemáticos, tales como los expansivos y colapsables.

Este libro inicia presentando los conceptos básicos de los suelos trifásicos. Continúa con las curvas de retención agua-suelo y las causas de la histéresis y su modelación. Más adelante explica el flujo de agua en estos materiales y los procedimientos experimentales para determinar la influencia de la succión en la conductividad hidráulica y su modelación. Incluye el comportamiento experimental de los suelos no saturados ante diversas trayectorias de carga y los efectos del humedecimiento y secado, así como su modelación considerando modelos con acoplamiento hidro-mecánico. Continúa describiendo el comportamiento de suelos expansivos y colapsables y las técnicas constructivas sobre estos materiales, para terminar con el análisis de la estabilidad de laderas ante cambios de humedad.

El libro se podrá obtener en línea en el enlace: <https://tinyurl.com/yt3fzmmmd> y su costo será de \$200.00.

Reseña realizada por Natalia del Pilar



Fundamentos de mecánica del medio continuo

Dr. Rigoberto Rivera Constantino

En su tercera edición escrita y primera versión digital, este libro contribuye a la mejor difusión y consulta de la Mecánica del medio continuo entre profesionales y alumnos de geotecnia.

Con ocho capítulos y dos apéndices, el volumen presenta de manera clara una introducción a la Mecánica del medio continuo. Profundizando en diversas temáticas, en el capítulo 1 se trata el concepto de estado de esfuerzo; en el capítulo 2 se presenta el concepto de estado de deformación y, en capítulo 3, las leyes generales de la mecánica. Adelante, en el capítulo 4, se aborda la teoría de los materiales elásticos lineales homogéneos e isotrópicos, para luego, en el capítulo 5, tratar algunos aspectos de la mecánica de fluidos. Es importante resaltar que en el capítulo 6, se exponen los modelos constitutivos del suelo y los conceptos de Creep y Relajación,

aspectos fundamentales en los análisis geotécnicos. Hacia el final del libro, en el capítulo 7, se estudian las teorías de falla y ruptura de los materiales y, en el capítulo 8, se aborda la teoría de la elastoplasticidad y los teoremas de colapso plástico.

A lo largo del texto se incluyen ejemplos (resueltos y propuestos) que ayudan a reforzar los conocimientos adquiridos. Además, se presentan las expresiones matemáticas de los modelos constitutivos de manera sencilla, ordenada y usando literales unificadas en todo el documento.

Este libro es una consulta obligada para estudiantes tanto de posgrado como de licenciatura y se recomienda ampliamente para la materia y el laboratorio de mecánica de suelos.

Reseña realizada por Ricardo E. Ortiz Hermosillo





Revisión de coincidencias y similitudes para obtención de grado en la UNAM

En el mes de octubre de 2024, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, se publicó el instructivo para trámite de Revisión de estudios y Autorización para presentar Examen de Grado, en el cual hay varios requisitos nuevos. Entre ellos, los que se presentan a continuación.

Se requerirá el análisis de coincidencias y similitudes del trabajo de tesina y/o examen general de conocimientos, para lo cual el tutor deberá realizar una solicitud de revisión, por parte del Área de Cómputo y Servicios de Información de la Biblioteca de Posgrado, con los datos del estudiante (nombre, número de cuenta y título del trabajo), así como el archivo del documento en formato Word (no mayor a 100 MB). Este trámite se realizará con una herramienta tecnológica, con el fin de prevenir faltas de integridad académica.

La revisión con la herramienta tecnológica podrá realizarse hasta dos veces sobre el mismo documento y los revisores

presentarán un dictamen, el cual se deberá compartir con el grupo de sinodales, para su revisión y emisión de votos.

Además, el tutor deberá llenar y firmar una carta aval, en la cual se declare conocer el trabajo escrito, así como el reporte que contiene el resultado del análisis con la herramienta tecnológica de identificación de coincidencias y similitudes.

De esta manera, con fundamento en lo previsto por los artículos 96, fracción III del Estatuto General de la UNAM; 21, primero y segundo párrafos, 32, 33 y 34 del Reglamento General de Exámenes y 22, 49, primer párrafo y 52, fracción II del Reglamento General de Estudios de Posgrado, el tutor avalará el trabajo realizado para obtener el grado de académico, por considerar que cumple con las exigencias de rigurosidad académica previstas en la legislación universitaria.

Esta nueva disposición dará a todos los involucrados en el proceso de obtención de grado la certeza de que se trata de trabajos originales. Será muy deseable que otras instituciones educativas incorporen la práctica, ya que le dará mayor prestigio a estas y a los graduados.

Reseña realizada por Walter I. Paniagua, profesor de posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM



CHUM

Monitor ultrasónico Cross Hole

Usa el método de "cross-hole ultrasónico" o "Cross-hole Sonic Logging" (CLS) para realizar un control de calidad de cimentaciones profundas de alta resolución, según norma ASTM D6760-16. El sistema utiliza ondas ultrasónicas enviadas desde un emisor a un receptor. Software para Tomografía 3D.



PET

Ensayos de pilotes por eco Bluetooth o USB

Es una solución muy fácil de usar y flexible para ensayar un gran número de pilotes con rapidez y precisión. El sistema PET utiliza el método de impulso-eco (ASTM D5882-16 & AFNOR P160-2,4 standards). PET es un sistema modular, independiente del ordenador.



GPC

Pruebas dinámicas en pilotes (PDA)

El GPC cumple con ASTM D4945 - Método de prueba estándar para pruebas dinámicas de alta tensión de cimentaciones profundas y el Eurocódigo EN ISO-22477-4. Transmisión inalámbrica sin pérdidas: N-GAPA - N-GAPA Programa de análisis automático de la prueba dinámica de un pilote.



PSI

Método sísmico paralelo

Establece la profundidad de los cimientos existentes (para un pilote o cimientos profundos) donde la superestructura impide el acceso a las cabezas del pilote. PSI2 cumple con los siguientes estándares AFNOR NF P94-160-3 y ASTM D8381-21.

CONCRETMOL

• MÉXICO •

Empresa mexicana representante exclusivo de PILETEST en México. Piletest es líder del mercado y pionero en el campo de las pruebas de integridad de pilotes.



Todos los productos vienen con 10 años de actualizaciones de software gratuitas. Nuestros productos cuentan con una garantía estándar de 3 años.

CONTÁCTANOS



+52(449)5751684



WWW.CONCRETMOL.COM



VENTAS@CONCRETMOL.COM



CONCRETMOL

• MÉXICO •

CULTURA

LIBROS



IR A TEXTO CORRIDO

El acontecimiento

De Annie Ernaux, Ed. Tusquets

Aún en pleno Siglo XXI, el aborto está muy lejos de ser un tema respecto al cual exista consenso. Por el contrario, independientemente de lugares de origen, edades, género, posturas políticas y religiones, este genera grandes polémicas entre los individuos. Lo que es innegable es que, en la elaboración de las leyes alrededor de ello, participan personas que muchas veces, debido a sus circunstancias, ideas o género se encuentran lejos de entender o empatizar con lo que puede implicar ese asunto para quien lo vive.

A través de esta novela corta, intensa y profunda, Annie Ernaux –escritora francesa ganadora del Premio Nobel de Literatura del año 2022– permite a cualquiera que la lea ponerse emocionalmente en el lugar de una mujer ante el aborto.

Sin teorizaciones, sin juicios morales, la literatura coloca a los lectores en la situación, contexto y emociones de sus protagonistas y, en este caso, les permite sentir y entender la vivencia, pensamientos y problemáticas que esto implica para una mujer.



La Roca de Tanios

De Amin Maalouf

Novela basada en un hecho real que tiene lugar en un pueblo libanés que se encuentra en una zona montañosa, durante la época del enfrentamiento entre Egipto y el Imperio Otomano. El narrador es un habitante de Kfaryabda que, apoyado por crónicas locales y los recuerdos de un anciano del lugar, presenta la historia de Tanios, quien es un joven que se ve

envuelto en el asesinato de un patriarca y en una venganza. En el contexto de la vida cotidiana del pueblo, la novela plantea aspectos históricos, míticos y éticos. Esta obra es muy interesante y su belleza sugiere tintes poéticos.



Reseñas realizadas por la maestra Margarita Puebla

PELÍCULAS



IR A TEXTO CORRIDO

Te doy mis ojos

Icíar Bollaín
2003



Una noche, Pilar huye de su casa llevándose a su hijo. Escapa de su marido, Antonio, quien la maltrata y, pronto, vuelve a buscarla para recuperarla. Pilar es su sol –dice– y “le ha dado sus ojos”.

Te doy mis ojos es una película española de drama social de 2003, dirigida por Icíar Bollaín y protagonizada por Laia Marull y Luis Tosar. El largometraje, acreedor a siete premios Goya, incluido el de Mejor Película, se acerca al tema de la violencia de género y el contexto machista que la soporta.

Romper el círculo (It ends with us)

Justin Baldoni
2024



Esta adaptación de la novela de Colleen Hoover cuenta la historia de Lily Bloom, una mujer que, luego de superar una infancia traumática, termina repitiendo, en sus propias relaciones, los vínculos familiares que la causaron.

Película de drama romántico estadounidense de 2024 dirigida por Justin Baldoni, a partir de un guion de Christy Hall. La película está protagonizada por Blake Lively junto al mismo Baldoni, Brandon Sklenar, Jenny Slate y Hasan Minhaj.



Toma de protesta del Capítulo Estudiantil de Licenciatura del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente

El pasado 25 de noviembre de 2024, se llevó a cabo el evento de nombramiento de la nueva mesa directiva del capítulo estudiantil de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG) en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO). La ceremonia, caracterizada por su formalidad y profesionalismo, destacó la importancia del liderazgo estudiantil en el fortalecimiento de la disciplina de la geotecnia.

El acto dio inicio con la presentación titulada "Geotecnia Aplicada a la Ingeniería de Presas: Innovación, Retos y Oportunidades", impartida por el M.I. Pedro Hernández. Durante su exposición, el ingeniero compartió su vasta experiencia en proyectos de gran envergadura, subrayando los avances tecnológicos y los desafíos inherentes a la ingeniería de presas en el contexto actual. La ponencia captó la atención de los asistentes, quienes se llevaron una visión clara del impacto de la geotecnia en la infraestructura hidráulica y las oportunidades que esta área ofrece a las nuevas generaciones.

Posteriormente, se llevó a cabo la ceremonia de toma de protesta de la nueva mesa directiva, la cual fue presidida por un distinguido presidium de honor. En representación de la SMIG, estuvo presente la M.I. Yoleida Suarez Arrellano, vocal de la mesa directiva y coordinadora de los capítulos estudiantiles, vía remota y el Ing. Juan Fajardo, vicepresidente de la delegación Occidente, quien dirigió el acto protocolario y formalizó la toma de protesta de manera presencial. Durante su intervención, el Ing. Fajardo destacó el papel del capítulo estudiantil como un espacio vital para el crecimiento profesional y la vinculación entre estudiantes y expertos de la industria.

El evento contó también con la participación del alumno Ramón Aldana, expresidente del capítulo estudiantil, quien compartió palabras de aliento y agradecimiento por las experiencias vividas durante su gestión. En su mensaje, destacó los logros alcanzados y motivó a los nuevos integrantes a continuar trabajando con compromiso y visión. Por su parte, el nuevo presidente, el estudiante Ismael Rodríguez, asumió con entusiasmo su papel como líder del capítulo, comprometiéndose a impulsar actividades que

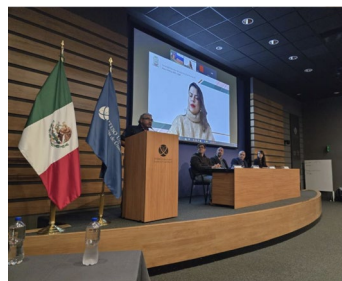
fortalezcan el aprendizaje, la colaboración y el impacto de la geotecnia en el ámbito local y nacional.

El M.I. Alejandro Nicolás Jiménez López, quien asumió el cargo de tutor del capítulo estudiantil, ofreció un emotivo discurso para cerrar el evento. En sus palabras, resaltó la relevancia del acompañamiento académico y profesional para la formación integral de los futuros ingenieros geotécnicos. Además, animó a los miembros del capítulo a aprovechar al máximo los recursos y redes que la SMIG pone a su disposición.

La ceremonia fue dirigida con gran profesionalismo por el M.C. Pablo Zamudio, quien actuó como maestro de ceremonias, asegurando que el evento se desarrollara de manera impecable.

Este acto marca el inicio de una nueva etapa para el capítulo estudiantil del ITESO, que busca consolidarse como un referente en la formación de ingenieros geotécnicos comprometidos con la innovación y la excelencia profesional.

Con esta emotiva ceremonia, quedó patente el compromiso de la comunidad académica y profesional con el desarrollo de la ingeniería geotécnica en México, reafirmando el papel de los capítulos estudiantiles como semilleros de talento y liderazgo en la disciplina.



Presidium de honor del evento.



Alan Ismael Rodríguez Aguilar, nuevo presidente del capítulo estudiantil.



Noticias de la Vicepresidencia por Norteamérica de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica

La mesa directiva de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE) se reunió el 11 de noviembre de 2024, en la Universidad de La Serena, Chile. Durante el encuentro se trataron temas vigentes, como el de la integración de la Sociedad, los presupuestos de 2024 y 2025, así como la Fundación ISSMGE, el proyecto “Herencia en la Cápsula del Tiempo”, entre otros.

El presidente, Marc Ballouz, informó acerca de la entrega de medallas al mérito, recibidas por Norbert R. Morgenstern

(Canadá) y Suzanne Lacasse (Noruega); además, quedó aceptada la propuesta de que Jean Louis Briaud dicte la Conferencia Terzaghi en Viena 2026. También se consideró la posibilidad de que el congreso internacional de 2030 se realice en conjunto con las Sociedades Internacionales de Mecánica de Rocas, Geosintéticos e Ingeniería Geológica, encabezadas por la ISSMGE. Estas cuatro asociaciones conforman la Federación Internacional de Sociedades de Geoingeniería (FedIGS, www.geoengineeringfederation.org).



Miembros de la mesa directiva de la ISSMGE, en la Universidad de La Serena, Chile.



Posteriormente, del 12 al 16 de noviembre, en esa misma ciudad, se llevó a cabo el XVII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (PCSMGE), así como la 2a Conferencia Regional Latinoamericana de la Asociación Internacional de Ingeniería Geología y Medio Ambiente (IAG).

El 12 de noviembre se llevó a cabo 1er Encuentro LATAM/PANAM de profesores y profesoras de Ingeniería Geotécnica, en el que participaron los siguientes profesores mexicanos:

Gabriel Auvinet

Tema: “Caracterización geotécnica de regiones de América”

Raúl Aguilar

Tema: “Dinámica de suelos: Influencia del tiempo en propiedades físicas del terreno”

En el marco del primer día del encuentro se dictaron, de forma paralela, siete cursos precongreso. Por la tarde, se llevó a cabo la ceremonia de inauguración, donde los presidentes de la ISSMGE y de la AIG, Marc Ballouz y Vassilis Marinos, respectivamente, dirigieron sendos mensajes al auditorio. Posteriormente, tuvo lugar la mesa redonda “Perspectivas internacionales sobre el papel crucial de los geoingenieros en la respuesta a las catástrofes sobrenaturales”, moderada por Dimitrios Zekkos. Para cerrar el día, se ofreció a los asistentes un coctel de bienvenida.



1^{er} Encuentro LATAM/PANAM de profesores y profesoras de Ingeniería Geotécnica.



Integrantes del Consejo Panamericano, con miembros de la mesa directiva de la ISSMGE.

El 13 de noviembre, se dictó la Conferencia Casagrande, a cargo del profesor Carlos Santamarina, con el título “Soil properties: Casagrande’s prologue to the future”. Ese mismo día se llevó a cabo el Consejo Panamericano, integrado por los presidentes y representantes de las Sociedades miembros de la ISSMGE en el Continente Americano. En esa reunión, cada sociedad presentó un resumen de sus actividades destacadas más recientes. También se anunció que el siguiente PCSMGE tendrá lugar en la ciudad de Chicago, EUA, del 26 al 29 de marzo de 2028.

Las conferencias magistrales presentadas fueron:

1^a Conferencia Honoraria Harry Poulos

Alessandro Mandolini

TC-212 (Cimentaciones Profundas) “Rethinking piles in light of current knowledge”

2nd Panamerican Distinguished

Fernando Marinho

Lecture on Unsaturated Soils “Exploring the interplay between water, grains, suction and infrastructure”

Katerina Ziotopoulou

“Assessment of liquefaction effects on infrastructure”

Ramón Verdugo

“Geotechnical lessons left by XXI century (2000-2004) large earthquakes”

David Williams

“Geotechnical, geochemical and erosional stability of waste rock dumps”

Doug Stead

“Progress toward understanding complex rock slope failure mechanism”

Andy Small

“What could tailings facility engineering look like in 2030?”

Marcio Almeida

“Offshore geotechnical solutions: from advanced physical modelling to applications”



NOTICIAS

En cuanto a las mesas redondas, “HTC ISSMGE: Academia and industry collaboration to face the challenges of the next 10 years”, fue moderada por Lucky Nagarajan; “Articular la red de jóvenes profesionales y visibilizar la participación de mujeres en ingeniería geológica”, por Alejandra Serey; “Challenges in space geotechnical engineering”, por Pooneh Maghoul, e, “Improve diversity in geotechnical engineering”, moderada por Norma Patricia López Acosta.

Así mismo, se organizó el Encuentro de Jóvenes y Profesores, que contó con la participación de más de 200 personas, generando un gran ambiente entre los asistentes.

El congreso contó con 761 asistentes, 344 artículos recibidos y la revisión de 159 especialistas. El comité organizador estuvo conformado por:

- Daniela Pollak** | Copresidente
- Gonzalo Montalva** | Copresidente
- Luis Valenzuela** | Presidente del Comité Científico
- Segio Sepúlveda** | Presidente del 2º Congreso Latinoamericano IAEG
- Jaime Rodríguez** | Director Académico, Universidad de La Serena
- Carolina Jadue** | Tesorera
- Omar Núñez** | Cosecretario
- Francisca Lezana** | Cosecretaria



Fotografía oficial del XXVII PCSMGE.



Algunos miembros de la delegación mexicana en el XXVII PCSMGE.

Las conferencias Bright Spark, establecidas por la ISSMGE en 2019, para promover a los jóvenes ingenieros geotécnicos menores de 36 años, se presentan en cada Congreso Regional. En esta ocasión, los ganadores fueron:

Kshama Roy (Canadá): “A simplified soil constitutive model for sand: Advancing soil-structure interaction analysis for sustainable and resilient buried infrastructures”

Emilia Castillo (Chile): “Foundation systems for floating wind turbines”

Mauro Sottile (Argentina): “A comparison of advanced constitutive models to evaluate flow liquefaction of upstream raised tailing dams”

Además, se organizaron visitas técnicas al metro de Santiago (11 de noviembre) y al proyecto Agua Negra (16 noviembre).

Se presentó una exposición de productos y servicios relacionados con la ingeniería geotécnica, que contó con la

participación de 46 empresas, en la que hubo un gran intercambio de opiniones y experiencias entre los participantes.

La delegación mexicana estuvo conformada por alrededor de 50 personas. Mismas que participaron en cursos precongreso, presentaciones de conferencistas magistrales, mesas redondas y trabajos orales y en versión poster.



Las fotografías del evento se pueden consultar y descargar en https://drive.google.com/drive/folders/17QJZTlozWgmh8y48I-p4usSQ1wGkX_MIn?usp=sharing.

Elecciones para la conformación de la Mesa Directiva 2025-2026



[IR A TEXTO CORRIDO](#)

Del 15 al 29 de noviembre de 2024 se llevaron a cabo las elecciones para determinar a los miembros de la próxima Mesa Directiva de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. (SMIG). Tradicionalmente, este proceso electoral concluye al finalizar la Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica. Sin embargo, debido a que dicho evento se realizó en el mes de septiembre, y en cumplimiento con los Estatutos de la SMIG, las elecciones se programaron para noviembre de este año.

Desde el año 2014, por iniciativa de la Mesa Directiva encabezada por el doctor David Yáñez Santillán, las elecciones se realizan de forma electrónica a través del Sistema Digital de la SMIG (SIDISMIG). El sistema solo habilita a los usuarios con derecho a voto. Una vez emitido el voto, el asociado visualiza una pantalla en la que se puede verificar la Mesa Directiva para la que emitió su voto, así como un folio de votación único y aleatorio. En caso de alguna controversia, la lista de folios obtenidos por cada candidato puede hacerse pública, permitiendo a los asociados corroborar su elección. Los votos emitidos se almacenan en una base de datos encriptada, en un servidor con certificado de seguridad y con múltiples medidas de protección contra infiltraciones. La apertura de la urna electrónica se realiza mediante datos de acceso que solo son enviados, minutos previos, a la persona elegida por el comité escrutador. En cumplimiento de los estatutos, este proceso garantiza un voto individual, intransferible y secreto.

El periodo de votación concluyó el viernes 29 de noviembre a las 23:59 horas. Sin embargo, la urna electrónica permaneció cerrada hasta el lunes 2 de diciembre, cuando se llevó a cabo una Asamblea General en el Colegio de Ingenieros Civiles de México para realizar el proceso de escrutinio. En dicha asamblea se conformó el comité escrutador integrado por Ricardo Ortíz Hermosillo, presidente de la SMIG, Giovanni Quintos quien asumió el papel de secretario del comité, Roberto Avelar y José Alejandro Núñez como representantes de los candidatos a la presidencia y Raúl López Roldan en representación del consejo consultivo y de los asociados. El comité escrutador en sesión privada procedió a abrir la urna electrónica y a validar la correspondencia entre el número de votantes y los votos emitidos. Minutos después se anunciaron los resultados ante la asamblea general.

De este modo, la Mesa Directiva quedó conformada de la siguiente forma:

Mesa Directiva SMIG 2025 - 2026



PRESIDENTE

Miguel Ángel Mánica Malcom



VICEPRESIDENTE

Francisco Alonso Flores López



SECRETARIA

Yoleida del Valle Suárez Arellano



TESORERO

Daniel Martínez Oviedo



VOCAL

Alonso Gabriel Lira Álvarez



VOCAL

Miguel Gallardo Contreras

Para finalizar la asamblea, los asistentes escucharon el mensaje del presidente electo.

La actual Mesa Directiva expresa su agradecimiento y felicitaciones a todos los candidatos y asociados que participaron activamente en este proceso electoral, demostrando su compromiso con nuestra Sociedad. Asimismo, extendemos nuestros mejores deseos de éxito a la Mesa Directiva electa en su próxima gestión, confiando en que contribuirá significativamente al avance de nuestra sociedad y al cumplimiento de los objetivos que compartimos.



IR A TEXTO CORRIDO

Reseña de la XXIII Reunión Nacional de Profesores de Ingeniería Geotécnica

El 3 de septiembre de 2024, se llevó a cabo la XXIII Reunión Nacional de Profesores de Ingeniería Geotécnica en el auditorio Javier Barros Sierra, ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este evento, que reunió a académicos y profesionales del área, se inauguró con la participación del M. I. Ricardo Ortiz Herмосillo, presidente de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG) y del M. I. Octavio García Domínguez, jefe de la División de Ingenierías Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Uno de los momentos más destacados de la RNPIG fue la presentación de la Quinta Conferencia Magistral “Eulalio Juárez Badillo”, dictada, de manera excepcional, por la M. E. Margarita Puebla Cadena. En su ponencia, titulada “El currículum oculto en ingenierías”, la M. E. Puebla Cadena abordó de manera profunda y reflexiva los actos y procedimientos que pueden incidir negativamente sobre los principios explícitos de las instituciones educativas. Su exposición reveló cómo el currículum oculto tiende a valorar lo cuantitativo por encima de lo cualitativo, un tema que generó un gran interés y reflexión entre los profesores y alumnos presentes.

El evento continuó con una serie de sesiones temáticas que incluyeron “Aprendizaje en el siglo XXI”, “Vinculación Profesional” y “Proceso de enseñanza-aprendizaje”.

En estas sesiones se analizaron diversas propuestas presentadas por los profesores expositores y, alrededor de ellas, se fomentó el intercambio de opiniones de los asistentes. La moderación estuvo a cargo de los profesores tutores de los capítulos estudiantiles de la SMIG, así como de académicos invitados de diferentes partes de la República, quienes enriquecieron el diálogo y la discusión.

Para engalanar el evento, se contó con la participación del Cuarteto de Minería de la UNAM, que deleitó a los asistentes con su música, creando un ambiente agradable para todos.

Al concluir la reunión, el presidente de la SMIG, el M. I. Ricardo Ortiz Herмосillo, expresó su agradecimiento a los profesores M. I. Juan Luis Umaña Romero y al M. I. Miguel Ángel Figueras Corte por la organización del evento.



De izquierda a derecha: Ricardo Ortiz Herмосillo, Margarita Puebla Cadena, Octavio García Domínguez y Rodrigo Takashi Sepúlveda



Foto grupal de la XXIII Reunión Nacional de Profesores de Ingeniería Geotécnica.

 IR A TEXTO CORRIDO

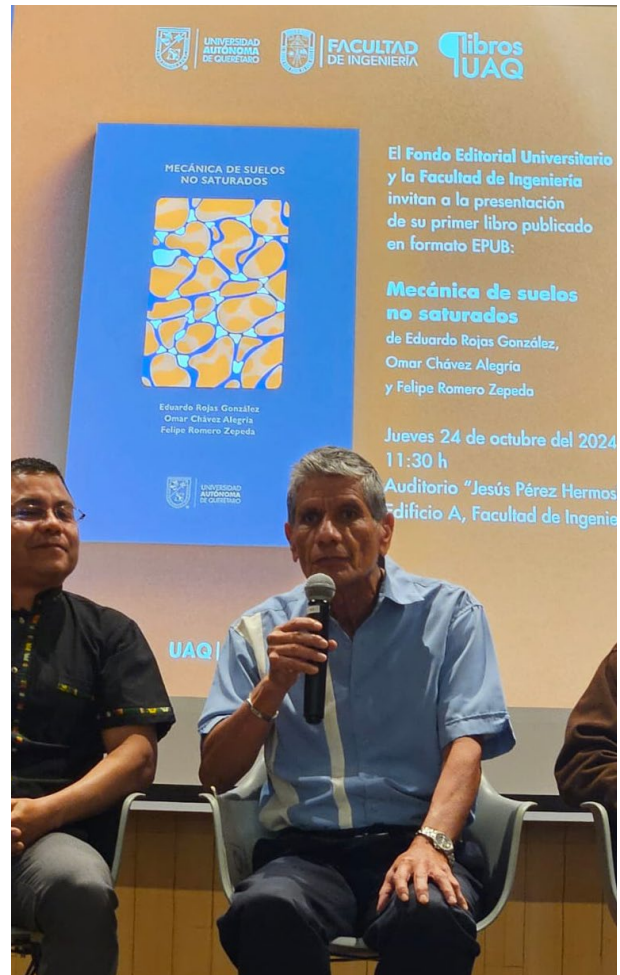
Presentación de libro "Mecánica de suelos no saturados"

El 24 de octubre del presente año, la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) celebró la presentación del libro *Mecánica de suelos no saturados*, de los autores Eduardo Rojas González, Omar Chávez Alegría y Felipe Romero Zepeda. Este libro, publicado como el primer EPUB de la universidad, representa un avance significativo hacia la digitalización de materiales educativos especializados.

Durante el evento, los autores abordaron conceptos fundamentales del estudio de suelos no saturados en la ingeniería geotécnica, resaltando temas como el modelo sólido poroso, el modelo acoplado para el comportamiento de suelos y las curvas de retención agua-suelo. Explicaron que el modelo sólido poroso permite analizar la estructura del suelo considerando el espacio de poros y su interacción con líquidos y gases, mientras que el modelo acoplado es esencial para describir la respuesta mecánica del suelo frente a variaciones de humedad y carga. Las curvas de retención agua-suelo, por su parte, fueron presentadas como herramientas cruciales para evaluar la capacidad de los suelos de retener agua bajo diferentes condiciones de succión y humedad.

El libro consolidándose como una referencia integral para estudiantes, investigadores y profesionales que buscan comprender la complejidad y el impacto del comportamiento de suelos no saturados en la estabilidad de estructuras y proyectos de ingeniería.

El libro se puede adquirir en formato digital en el enlace:
<https://tinyurl.com/yt3fzmmmd>



Durante la presentación, el doctor Eduardo Rojas hizo una breve reseña del libro.



Los autores del libro (al centro) con los correctores y editores del Fondo Editorial de la Universidad Autónoma de Querétaro.



El doctor Eduardo Rojas y algunos de sus alumnos del Posgrado en Geotecnia de la Universidad Autónoma de Querétaro.



IR A TEXTO CORRIDO

Elección de la Mesa Directiva 2025-2026

Delegación Regional Michoacán

El 11 de octubre de 2024 se llevó a cabo la asamblea regional de la Delegación Michoacán en modalidad virtual. En esta se dieron a conocer los resultados de la votación realizada de manera electrónica, a través del SiDiSMIG, del 7 al 11 de octubre de 2024.

La Mesa Directiva 2025-2026 de la Delegación Regional Michoacán quedó conformada de la siguiente manera:

VICEPRESIDENTE José Luis Castillo Soto	TESORERO Eleazar Arreygue Rocha
SECRETARIO Carlos Chávez Negrete	VOCAL José Manuel Córdova Alanís

El vicepresidente electo, el M.I. José Luis Castillo Soto, expuso su plan de trabajo, el cual está conformado por tres ejes principales:

- sinergia entre la teoría y la práctica
- currículum oculto en ingeniería y práctica profesional
- docencia y formación profesional en la práctica de la ingeniería civil

Estos buscan consolidar a la delegación como un espacio de formación, divulgación y crecimiento profesional para sus miembros. Durante su gestión se realizarán conferencias de difusión de la ingeniería geotécnica y de otras áreas, cursos especializados de acuerdo a la necesidad de los agremiados y se impulsará la colaboración con el sector productivo para resolver problemas prácticos. Además, se fomentará la participación de los estudiantes, la transmisión de conocimientos y se gestionarán apoyos privados para la elaboración de tesis de licenciatura. Se trabajará también en la vinculación de nuevos asociados en la delegación, para tener mayor presencia y participación en los eventos de la SMIG a nivel nacional y en eventos de otros gremios.

Finalmente, se exhortó a la nueva mesa directiva a divulgar las buenas prácticas de ingeniería que competen a nuestra especialidad.



IR A TEXTO CORRIDO

Glosa de la XXXII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica organizada por la Delegación Querétaro y el capítulo estudiantil de la UAQ

Con el propósito de promover el intercambio de conocimientos y experiencias entre profesionales consolidados y estudiantes en formación, la Delegación Querétaro de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG), en colaboración con el capítulo estudiantil de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), organizó una glosa de la XXXII Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, celebrada el 16 de octubre de 2024.

Durante el evento destacaron los trabajos presentados por miembros de la delegación, quienes abordaron temas de gran relevancia para la comunidad geotécnica, como suelos no saturados y técnicas de mejoramiento de suelos. En las presentaciones, además, se subrayó la creciente importancia de la ingeniería forense en la evaluación y resolución de fallas estructurales, así como los desafíos asociados a la recimentación de monumentos y edificios históricos, áreas de particular interés dado el valor del patrimonio cultural del país.

Uno de los mensajes dirigidos a los estudiantes fue la relevancia de asistir a estos eventos y repasar las memorias de los trabajos presentados, ya que constituyen una valiosa fuente de información y aprendizaje. Se les instó a aprovechar estos recursos para fortalecer su formación y aplicarlos en los proyectos profesionales en los que, sin duda, estarán involucrados en el futuro.



 IR A TEXTO CORRIDO

Toma de protesta ante la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica Delegación Regional Puebla

El pasado 19 de abril de 2024, a las 17:00 horas, se llevó a cabo la toma de protesta de la nueva mesa directiva de la Delegación Regional Puebla ante la SMIG. La ceremonia, que se realizó de manera presencial en las instalaciones del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Puebla, A. C. (CICEPAC), contó con la participación de los miembros afiliados a la SMIG que se encuentran en la ciudad de Puebla.

Dentro del marco del evento, se presentó la conferencia magistral “Aspectos que se deben considerar en el diseño geotécnico y que se indican en las NTC-Cimentaciones 2017 y 2023”, a cargo del Dr. Ricardo E. Ortiz Hermsillo, actual presidente de la SMIG. Durante su exposición, se abordaron temas relevantes sobre la consideración geotécnica en el diseño de cimentaciones en la Ciudad de México. El Dr. Ortiz Hermsillo también realizó una comparativa entre las principales modificaciones realizadas en la normativa de 2023 respecto a la de 2017.

Tras la conferencia magistral, el presidente de la SMIG dirigió la toma de protesta, formalizando así la creación de la Delegación Regional Puebla. La nueva mesa directiva

quedó conformada por el Ing. José Alejandro Núñez Torres, vicepresidente; el M. I. Félix Sosa Contreras, tesorero; el M. I. Alfredo López Hernández, secretario, y la M. I. Ana Elena Posada Sánchez, vocal.

La toma de protesta culminó con un brindis de agradecimiento, durante el cual los nuevos integrantes de la mesa directiva compartieron algunos de sus planes de trabajo para esta gestión.



Asistentes a la toma de protesta.

 IR A TEXTO CORRIDO

Sobre el reglamento de cimentaciones de la ciudad de México y su pertinencia de utilización en otras ciudades

Conferencia especializada organizada por la Delegación Querétaro e impartida por el M.I. Iván Lugo Olmos.

Durante la conferencia se expuso la relevancia del Reglamento de Cimentaciones de la Ciudad de México, marco normativo que sirve de referencia para el diseño de estructuras seguras y sostenibles en una de las zonas geotécnicamente más complejas del mundo. Se explicó que este reglamento ha sido desarrollado para enfrentar los retos específicos que plantea el subsuelo de la Ciudad de México, caracterizado por su alta compresibilidad, heterogeneidad y vulnerabilidad a hundimientos diferenciales, lo que exige soluciones innovadoras y rigurosas en el campo de la ingeniería civil.

La presentación se centró en desglosar los principios fundamentales que guían este reglamento, destacando su enfoque en garantizar la estabilidad y seguridad de las cimentaciones bajo condiciones geológicas adversas. Se abordaron aspectos técnicos clave, como el diseño en función de los parámetros de resistencia del suelo, el control de asentamientos y otras

recomendaciones para el uso de tecnologías modernas en la construcción de cimentaciones profundas y superficiales.

Además, la conferencia subrayó la importancia de este reglamento, no solo en el contexto de la Ciudad de México, sino también como un punto de referencia para otras ciudades que enfrentan desafíos geotécnicos similares. Se destacó la necesidad de realizar ajustes específicos para su aplicación según el contexto local, adaptando el reglamento a diferentes condiciones geotécnicas, como suelos expansivos, zonas sísmicas y terrenos inestables en otras partes del mundo.

Finalmente, se invitó a reflexionar sobre el papel que juegan las normativas geotécnicas en la mitigación de riesgos estructurales y la importancia de que los ingenieros civiles no solo las apliquen, sino que participen activamente en su actualización, con el fin de incorporar nuevos avances científicos y tecnológicos.



IR A TEXTO CORRIDO

Primer Encuentro de Delegaciones y Representaciones Regionales

El 7 de noviembre de 2024 se llevó a cabo el Primer Encuentro de Delegaciones Regionales ante la SMIG, con la participación de las delegaciones de Occidente, Michoacán, Puebla, Querétaro, Tabasco, Veracruz, Baja California, Sureste y la representación de Ciudad Juárez, Chihuahua.

Las delegaciones regionales fueron creadas en 1993, durante el periodo de la Mesa Directiva presidida por el Ing. Luis Bernardo Rodríguez. La Delegación regional de Michoacán fue la primera en consolidar el objetivo de facilitar el cumplimiento de las metas de nuestra asociación mediante una presencia directa y constante en cada región o estado del país.

El evento, coordinado por el M.I. David Febrés y la Dra. Natalia Parra, vicepresidenta de la Mesa Directiva, comenzó con un emotivo mensaje en el que destacó la importancia de la cooperación entre delegaciones para promover la divulgación de las buenas prácticas de ingeniería geotécnica en todo el país.

Durante el encuentro, las diferentes delegaciones tuvieron la oportunidad de presentar sus principales logros y actividades. Posteriormente, en la sección titulada “Marco geotécnico regional: características geotécnicas de cada región, problemáticas asociadas y lecciones aprendidas”, los más de 50 asistentes en línea compartieron sus valiosas perspectivas sobre la diversidad de particularidades geológicas y geotécnicas de las ciudades y regiones participantes, así como las áreas de oportunidad en cuanto a la actualización de la zonificación geotécnica en algunos sitios.

Ver el evento: https://www.youtube.com/watch?v=i_xSAC-ooQ

Finalmente, en la mesa redonda “Diagnóstico, Retos y Oportunidades del Ejercicio de la Ingeniería Geotécnica en México”, se llegó a los siguientes puntos:

- Es necesario fomentar una mayor coordinación entre las delegaciones regionales para sumar esfuerzos en la vinculación con entidades gubernamentales y gremios locales. Además, se debe promover una mayor divulgación de cursos y conferencias sobre temas específicos e involucrar a más especialistas en geotecnia.

- A nivel estatal, aún no existe un marco normativo sólido relacionado con los estudios previos para proyectos de infraestructura. Por lo tanto, a través de las delegaciones, se podrían sumar esfuerzos para proponer la revisión de las normas vigentes, participando activamente en foros técnicos y grupos de discusión.

- Sería valioso realizar más encuentros de delegaciones regionales en cada ciclo de la mesa directiva, preferentemente de forma presencial, y en el marco de la reunión nacional de ingeniería geotécnica.

Este Primer Encuentro marcó un paso significativo en la consolidación de la colaboración entre las Delegaciones regionales de la SMIG. La reunión permitió, no solo compartir experiencias y logros, sino también identificar los desafíos comunes y las oportunidades de mejora en la ingeniería geotécnica en México. Las conclusiones del evento proporcionan una base sólida para continuar con la labor de fortalecimiento de la ingeniería geotécnica a nivel nacional, promoviendo la cooperación y el intercambio de conocimientos entre las diversas zonas del país.

Agradecimiento a Walter I. Paniagua Zavala, Miguel Mánica Malcom, Natalia del Pilar Parra Piedrahita, Juan Luis Umaña Romero, Eduardo Rojas González, Alejandro Núñez, Paul Garnica, y Yoleida Suárez por su colaboración en la sesión de noticias.

Su socio de confianza en México para la ejecución de cimentaciones especiales y técnicas de mejora del terreno

www.keller.com.mx





Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.

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

CUOTAS MÁS IVA



Softwares de Vanguardia para Optimizar tu Flujo de Trabajo en tus Proyectos Geotécnicos



RocFall3



RS3



RocTunnel3



RocSlope2



RocSlope3

