

## RELACIÓN TEORÍA-PRÁCTICA COMO MODELO DIDÁCTICO EN EL PROCESO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LA GEOTECNIA

## THEORY-PRACTICE RELATIONSHIP AS A DIDACTIC MODEL IN THE TEACHING-LEARNING PROCESS OF GEOTECHNICS

Vicente León Toledo<sup>1</sup> ([vipaleta2004@yahoo.com](mailto:vipaleta2004@yahoo.com))

Aníbal Wilfrido Trujillo Naranjo<sup>2</sup> ([anibal.trujillon@ug.edu.ec](mailto:anibal.trujillon@ug.edu.ec))

Gustavo García Mendoza<sup>3</sup> ([gustavo.garciam@ug.edu.ec](mailto:gustavo.garciam@ug.edu.ec))

### RESUMEN

El presente artículo muestra el desarrollo de un estudio de caso de la vida real aplicado a la asignatura Geotecnia, con el objetivo de combinar de forma efectiva la relación existente entre la teoría y la práctica en la enseñanza y el desarrollo profesional de los docentes y los estudiantes de la carrera Ingeniería Civil, Universidad de Guayaquil. Para ello se ha elaborado una metodología en la que el profesor promueve la relación del conocimiento académico y su acción docente cotidiana a través del estudio de un caso real, como es evaluar los efectos de las propiedades índices en los suelos en el probable desarrollo del efecto tixotrópico. Además, se destaca el incremento de la capacidad de carga en los suelos cohesivos luego de ser remoldeados en el laboratorio. La realización de este caso de estudio real contribuye a la materialización de una metodología básica que permite evaluar la posibilidad de que se desarrolle tixotropía en el contacto suelo-pilote, lo cual nos acerca a los principales resultados y conclusiones de este artículo.

**PALABRAS CLAVES:** Teoría, práctica, desarrollo profesional docente, relación teoría práctica, caso de estudio real, estudio de la Geotecnia.

### ABSTRACT

This article shows the development of a real-life case study applied to the subject Geotechnics, with the objective of effectively combining the relationship between theory and practice in teaching and professional development of teachers and students of the Civil Engineering career, University of Guayaquil. To this end, a methodology has been developed in which the professor promotes the relationship between academic knowledge and his daily teaching activity through the study of a real case, such as evaluating the effects of index properties on soils in the probable development of the effect thixotropic. In addition, the increase of

---

<sup>1</sup> Profesor de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Carrera Ingeniería Civil, Universidad de Guayaquil, Ecuador.

<sup>2</sup> Profesor de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Carrera Ingeniería Civil, Universidad de Guayaquil, Ecuador.

<sup>3</sup> Profesor de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Carrera Ingeniería Civil, Universidad de Guayaquil, Ecuador.

the load capacity in the cohesive soils after being remodeled in the laboratory is highlighted. The realization of this case of real study contributes to the materialization of a basic methodology that allows to evaluate the possibility of developing thixotropy in soil-pile contact, which brings us closer to the main results and conclusions of this article.

**KEY WORDS:** Theory, practice, professional teacher development, relationship practical theory, real case study, geotechnical study.

El presente artículo se enfoca en dar solución a un problema académico a través de un modelo basado en la integración entre la teoría y la práctica, además, se hace referencia a la forma equilibrada en que este debe usarse. Sin dudas, la temática que aborda el estudio constituye un pilar fundamental para la educación universitaria, especialmente porque se centra en los procesos didácticos de enseñanza-aprendizaje, como consideran G. R. Ferreiro y C. M. Espino (2009); S. G. Ramírez, V. León y A. W. Trujillo (2017).

La relación teoría-práctica educativa es un aspecto al que se le debe prestar especial atención, debido a la falta de experiencia de los docentes en el área de Geotecnia, asignatura que se imparte en la carrera Ingeniería Civil, de la Universidad de Guayaquil, para combinar correctamente la teoría con la práctica, criterio que se comparte con R. Porlán, R. Martín, J. Martín y A. Rivero (2001).

Por esta razón, en el desarrollo del artículo tratamos de demostrar a partir de un problema práctico de la vida real, la importancia que tiene la teoría, como fundamento imprescindible de lo aprendido en los libros, y su aplicación práctica, que es el resultado de todo lo abordado en el aula, según A. Caamaño, J. Carrascosa y A. Oñorbe (1992).

El resultado de la aplicación de un problema práctico de la vida real nos lleva a plantear la necesidad de contar con un nuevo paradigma superador, que demuestre a los docentes de la asignatura Geotecnia, una forma más adecuada para poder combinar la teoría con la práctica en el proceso de enseñanza-aprendizaje. En base a estas ideas podemos entender la fortaleza, que tanto el profesor como el estudiante obtendrán en su desarrollo académico y profesional, en correspondencia con lo expuesto por J. S. Renzulli (2010).

Un principio fundamental en la enseñanza de la Geotecnia es proporcionar a los educandos las habilidades necesarias para adquirir un conjunto de conceptos, que serán el soporte en la interpretación de los factores geológicos y físicos del terreno a edificar y en la solución de problemas. Estos elementos se relacionan directamente con las definiciones, representaciones, valores, símbolos y habilidades que, estructurados apropiadamente, constituyen el núcleo concreto del proceso de enseñanza-aprendizaje de la Geotecnia, en la opinión de C. Batanero y C. Díaz (2004); R. S. Salas y P. Ardanza (1995).

Debido a lo descrito anteriormente, para realizar el análisis del principio básico que expresa la importancia de combinar la teoría con la práctica, hemos considerado realizar un estudio real para la investigación y la descripción del comportamiento físico mecánico de suelos sumergidos. Además, los relacionamos, entre otros

aspectos, con la composición mineralógica de las arcillas sobre las cuales han sido construidas cimentaciones profundas.

### **Materiales y métodos**

En consonancia con lo expuesto anteriormente, con la finalidad de combinar la teoría y la práctica dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje de la Geotecnia, se consideró la realización de un estudio de la vida real. Por ello se tomó en cuenta el desarrollo de diversas metodologías para la evaluación de la capacidad de carga de los pilotes. En este sentido, es usual no considerar el efecto de la tixotropía que desarrollan algunos suelos.

Al tener presente que los suelos están conformados por capas naturales producto de la depositación en diferentes eventos enmarcados en una región específica, resulta de sumo interés analizar la interacción suelo-suelo, suelo-componentes del suelo y suelo-estructura, para poder elaborar un adecuado diseño geotécnico, el que debe ser analizado en los escenarios más críticos, tales como la sismicidad de la zona en cuestión.

Autores como R. E. Abarzúa, J. H. González, L. L. Quijada y J. P. González (2000), exponen las características y propiedades mecánicas del suelo y del terreno donde se realizará el proyecto de construcción. Es por ello que se deben tener en cuenta algunos de los procedimientos que son usados en el estudio de la Geotecnia:

- Reconocimiento del marco geológico regional: reconoce el origen y formación de los suelos, en esta parte se determinan las características y propiedades de los suelos.
- Etapa de exploración de campo y muestreo: se realizan recorridos por el predio y sus alrededores para identificar las condiciones del suelo y el comportamiento de estructuras existentes, asimismo, para buscar indicios de problemas geotécnicos en el sitio y zonas circundantes.
- Sondeos superficiales y pruebas en sitio: pozos a cielo abierto, pruebas de placa de carga, pruebas de compactación.
- Estudios de laboratorio: precisa los parámetros significativos para clasificar adecuadamente el tipo de suelo y definir la estratigrafía con la que se obtienen las formas, composiciones litológicas, propiedades físicas, mecánicas y geoquímicas, sucesiones originarias y relaciones de edad.
- Ingeniería de gabinete: conjunta e interpreta el resultado de los trabajos de campo y laboratorio, lo que genera recomendaciones para los diferentes tipos de cimentaciones de acuerdo con la capacidad de carga y tipo de asentamiento a realizar.

Para la realización de este trabajo nos concentramos en un punto específico que, en nuestra consideración, el alumno debe dominar, y se trata del estudio en el laboratorio de mecánica de suelos. Para ello se desarrolló la investigación de un problema de la vida real, que debe ser aplicada por el estudiante como parte de lo aprendido en el aula, a partir de la práctica dentro del modelo de enseñanza-aprendizaje.

### **Fundamentación teórica**

El presente estudio comprende el análisis de los suelos que presentan o son susceptibles al desarrollo de tixotropía en condiciones especiales. Por esta razón, es necesario el dominio de ciertos conceptos que permitirán una mejor comprensión de este ejercicio práctico.

**Plasticidad:** Es una característica fundamental de toda arcilla, se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares, lo que produce un efecto de “lubricante” y facilita su desplazamiento cuando se ejerce esfuerzo sobre ellas. Esta característica fundamental en las arcillas, es decir, la capacidad de absorber agua, es función de la capacidad de cambio catiónico y de la superficie específica. El fenómeno se presenta cuando las partículas de agua se ligan a la superficie de las partículas por enlaces dipolares las cuales se aglutinan.

**Actividad:** Se ha definido como actividad la relación entre el índice de plasticidad y la fracción de arcilla ( $< 2\mu s$ ) en términos porcentuales que compone una masa de suelo. Es decir:  $\text{Actividad} = \text{Índice de Plasticidad} / \text{Fracción de la arcilla}$ .

Las arcillas según su actividad se clasifican en:

- Activas: Actividad igual o mayor a 1,25.
- Normales: Actividad entre 1,25 a 0,75.
- Inactivas: Actividad menor a 0,75.

**Susceptibilidad:** K. Terzaghi (1943) definió el término susceptibilidad ( $St$ ), como el cociente entre la resistencia al corte sin drenaje de dicha arcilla en su estado natural, y después de ser enérgicamente amasada a contenido de humedad constante.

| Relación de Esfuerzos<br>$qu$ -inalterado / $qu$ -remoldeado | Susceptibilidad        |
|--|------------------------|
| $St \approx 1$   | No susceptible         |
| $1 < St < 2$   | Baja                   |
| $2 < St < 4$   | Media                  |
| $4 < St < 8$   | Susceptibles           |
| $8 < St < 16$  | Alta                   |
| $St > 16$  | Muy alta (quick clays) |

**Tabla 1:** Relación esfuerzo del ( $qu$ ) inalterado y remoldeado.

**Tixotropía:** Esta palabra deriva del griego *thixis*, “el toque, el contacto”, y *trepo*, “cambiar, mudar”. El término es empleado para designar el fenómeno de pérdida de resistencia de un coloide al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Observen que el fenómeno es intenso en las proximidades del límite líquido y prácticamente nulo en el límite plástico.

**El índice de fluidez o liquidez** se ha definido como la consistencia o facilidad relativa con que un suelo puede deformarse espontáneamente, dada por la relación numérica entre la diferencia del contenido natural de humedad y su límite plástico, entre su índice de plasticidad.

$$If = (Wn - Wp) / Ip$$

**If** = Índice de fluidez

**Wn** = Contenido natural de humedad

**Wp** = Límite plástico

**Ip** = Índice plástico

Nota: **Si If = 0** o cercano, se considera un suelo preconsolidado. Si **If = 1** o cercano se considera un suelo normalmente consolidado.

**Expansividad:** La capacidad de adsorción de agua que presentan los suelos es función de su contenido mineralógico, de ahí que la acumulación de agua en los bordes laminares y zonas interlaminares da lugar a los cambios de volumen en las arcillas.

**Compresibilidad:** En general, las arcillas se caracterizan por su gran compresibilidad y capacidad de retención de agua en relación con los limos o las arenas. Esta propiedad está relacionada con la susceptibilidad de disminuir su volumen cuando son sometidas a cargas. Es una característica de los materiales cuyo volumen disminuye al ser sometidos a un esfuerzo de compresión confinada. En el laboratorio puede ser cuantificada mediante ensayo de compresión confinada o de consolidación, a partir del cual puede obtenerse el coeficiente de compresibilidad ( $av$ ), el módulo edométrico ( $mv$ ), y el índice de compresión.

### **Composición de una partícula de suelo**

Los suelos en su estado natural usualmente se presentan en forma de mezclas, conformadas por diferentes tamaños y diferencias en su composición mineralógica, por lo que se puede apreciar la complejidad en su comportamiento. La influencia de la mineralogía sobre las características del suelo es tal que, incluso pequeños porcentajes de ciertos minerales, como las esmectitas (a partir del 10%), pueden influir significativamente en sus propiedades. De hecho, la constitución química de un suelo influye en su comportamiento.

### **Principales análisis realizados en el laboratorio de mecánica de suelos**

Para obtener un resultado de lo aprendido en las aulas de clase con respecto a la asignatura Geotecnia y con la finalidad de aplicar en la práctica todo lo adquirido en la teoría, se ha considerado el siguiente problema de la vida real, cuyos datos recolectados en el campo de trabajo, se han llevado al laboratorio de mecánica de suelos. Con el propósito de clasificar los suelos y obtener los parámetros de diseño de la cimentación referidos a la resistencia y deformabilidad, se debe establecer un programa de estudios de laboratorio.

### **Pruebas índice**

- Contenido natural de humedad AASHTO-T 265
- Límite Líquido AASHTO-T 89
- Plástico AASHTO-T90
- Contracción AASHTO-T92-97
- Granulometría-Tamiz 200 AASHTO-T88

- Hidrometría AASHTO-T88
- Densidad de los sólidos AASHTO-T100
- Peso volumétrico AASHTO-T100-70

Con este grupo de ensayos caracterizamos los suelos, lo que permite, mediante el uso de tablas, establecer su posible constitución mineralógica. A través del ensayo hidrométrico logramos de manera precisa determinar, por ejemplo, la cantidad de limos o arcillas en términos porcentuales que pueden estar presentes en una mezcla de suelos, parámetro fundamental para evaluar la actividad de las arcillas.



**Figura 1:** Análisis y ensayos de laboratorio.

De este modo, el carácter orgánico de las arcillas no estaría confirmado si no se tiene la acuciosidad de prever ensayos de límites con muestras desecadas al horno a temperaturas de 110 °C durante 24 horas, con el objetivo de poder contrastarlas con los ensayos que han sido realizados con muestras íntegras, conforme llegan al laboratorio.

Establecer el contenido de humedad natural en que se encuentran los suelos resulta indispensable. En tal sentido, para que se presente el fenómeno de la tixotropía deben presentarse dos condiciones fundamentales: la humedad natural cercana al límite líquido y no presencia de partículas orgánicas. Estos, en conjunto con los límites de consistencia, sirven para evaluar el índice de fluidez, la consistencia relativa y el índice de compresibilidad, parámetros con los cuales se caracterizan los suelos.

### **Pruebas mecánicas de resistencia al esfuerzo cortante**

- Compresión triaxial AASHTO-T234
- Compresión no confinada AASHTO-T208-70
- Corte directo AASHTO-T236
- Tacómetro-veleta AASHTO-T223



**Figura 2:** Aparato triaxial-Programa DS-6.

## Pruebas mecánicas de deformabilidad

- Compresibilidad-Consolidación AASHTO-T216-66
- Expansión-Libre y Controlada AASHTO-T258



**Figura 4:** Marco de carga “qu” y muestras de suelos remoldeadas.

Es imprescindible elegir las condiciones de pruebas, al tratar de reproducir los estados de esfuerzos y patrones de drenaje que vayan a generar la estructura en análisis. Además, con la selección adecuada de la muestra se logra la obtención de parámetros de diseño que representen el comportamiento físico-mecánico del suelo.

## Usos de los límites de consistencia

Los límites de Atterberg tienen mucha practicidad en la Mecánica de Suelos, ya que mediante estos podemos evaluar el estado de consistencia de los suelos, clasificarlos en los diferentes sistemas, así como predecir la probable expansión que pudiera presentarse. De igual modo, a través de la correlación establecemos su composición mineralógica; al comparar los límites líquidos evaluados en muestras de suelos íntegras y las contrastamos con muestras previamente desecadas al horno, se puede observar si estos contienen material orgánico o no. Al combinar dichos límites con la humedad natural y el índice de plasticidad podemos evaluar los siguientes parámetros:

**Consistencia relativa (Cr):** La consistencia relativa es definida por la expresión:  
$$Cr = (Wl - W) / Ip$$

Donde:

**Cr** = Consistencia relativa

**Wl** = Límite Líquido

**Wn** = Humedad natural

**Ip** = Índice de plasticidad

**Wp** = Límite plástico

| Valor obtenido-Cr  | Consistencia Relativa |
|--------------------|-----------------------|
| $0 < 0$ (negativo) | Muy blanda            |
| 0 a 0,5            | Blanda                |
| 0,5 a 0,8          | Media                 |
| $>0,8$             | Dura a muy dura       |

**Tabla 2:** Grado de consistencia de Cr.

Se debe tomar en cuenta que:

Cr es negativo cuando  $W > WI$

Cr es cero cuando  $W = WI$

Cr es igual a 1 cuando  $W = Wp$

Cr es mayor a 1 cuando  $W < Wp$

**Índice de liquidez (IL):** Denota el esfuerzo a que ha estado sometido el suelo en su historia geológica, se define con la expresión:  $IL = (Wn - Wp) / IP$

Si el valor de  $IL = 0$ , o cercano, se considera pre-consolidado.

Si el valor de  $IL = 1$ , o cercano, se considera normalmente consolidado.

**Índice de compresibilidad (Cc):** Con este índice podemos preveer problemas de asentamientos, ya que está relacionado con el límite líquido, se define con la siguiente expresión:  $Cc = 0,009 (WI - 10)$

Donde:

**Cc** = Índice de compresibilidad

**WI** = Límite Líquido

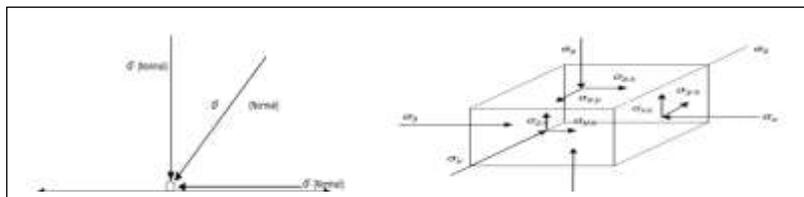
| Valor de Cc         | Compresibilidad |
|---------------------|-----------------|
| De 0,00 a 0,19      | Baja            |
| De 0,20 a 0,39      | Media           |
| De 0,40 en adelante | Elevada         |

**Tabla 3:** Valores dados en (Cc), para el cálculo del índice de compresibilidad.

### Esfuerzos cortantes. Análisis

En la mecánica de suelos hay muchos problemas, entre ellos el análisis de esfuerzos en tres dimensiones. Los análisis de compresión o tensión a los que usualmente son sometidos los materiales hormigón o acero, tienen poca practicidad en el estudio de una masa de suelo, ya que este recibe el peso propio de la masa (de niveles superiores) y las cargas estructurales inducidas por las cimentaciones, las cuales son en diferentes direcciones y diversos niveles.

Debe estar claro que el término esfuerzo, lo usamos como la fuerza aplicada por unidad de área. Cualquier esfuerzo aplicado sobre una superficie plana, se descompone básicamente en dos direcciones, una perpendicular (normal) al plano en que actúa, que lo llamamos  $\sigma$  (sigma), y otra que actúa en la superficie de contacto llamado esfuerzo cortante, y se representa como  $\tau$  (tau).



**Figura 5:** Gráfico de fuerza aplicada por unidad de área.

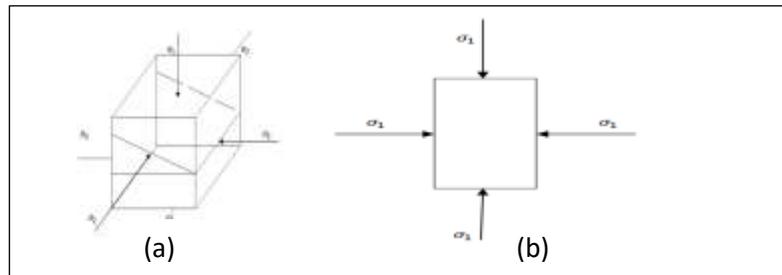
En cualquier punto, para su análisis existen tres planos ortogonales en los que los esfuerzos tangenciales son nulos. A estos planos los llamamos planos principales, si actúan esfuerzos normales a cada uno de estos planos, los llamamos esfuerzos principales, llamados en su orden de magnitud:  $\sigma_1$  esfuerzo principal mayor,  $\sigma_3$  esfuerzo principal menor,  $\sigma_2$  esfuerzo principal intermedio.

Si los esfuerzos en el terreno son geostáticos, el plano horizontal que pasa por un determinado punto es un plano principal, al igual que todas sus caras ortogonales, entonces  $\sigma_v = \sigma_n = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , este estado de esfuerzos se denomina isótropo.

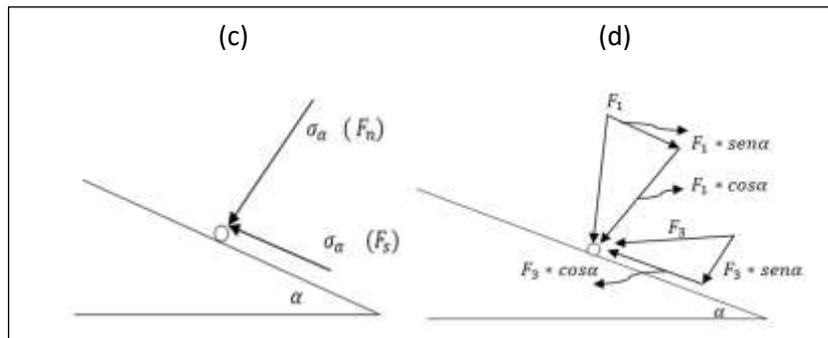
Si el  $\sigma_v$  es mayor que el  $\sigma_n$ , entonces  $\sigma_v = \sigma_1$ ,  $\sigma_n = \sigma_3$ , y  $\sigma_2 = \sigma_3$ .

Si tuviéramos que  $\sigma_n$  es mayor que el vertical  $\sigma_v$ , entonces  $\sigma_n = \sigma_1$ ,  $\sigma_v = \sigma_3$ , y  $\sigma_2 = \sigma_1 = \sigma_n$ .

Al utilizar las leyes de la estática, podríamos analizar la influencia de los esfuerzos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . Cualquier plano del cubo planteado así:



**Figura 6:** Gráfico de la influencia de los esfuerzos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ .



**Figura 7:** Gráfico del estado de esfuerzos denominado isótropo.

Para facilitar el análisis suponemos una arista de valor 1. Las fuerzas que actúan sobre el plano analizado  $F_1$  y  $F_2$  ( $F = \sigma * A$ ), proyectada sobre la cara ortogonal.

Lo que produce:  $F_1 = \sigma_1 * \text{Área}$

$$F_1 = \sigma_1 * 1 * 1; \quad F_1 = \sigma_1 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$F_2 = \sigma_1 * 1 * \text{tg} \alpha \quad F_2 = \sigma_1 * \text{tg} \alpha \quad \text{Ecuación 2}$$

La sumatoria de las componentes de estas fuerzas, normales al plano inclinado es:

De 1 y 2 ( $F_n = F_1 \cos \alpha + F_3 \operatorname{sen} \alpha$ )

$$F_n = \sigma_1 \cos \alpha + \sigma_3 * \operatorname{tg} \alpha \operatorname{sen} \alpha \quad \text{Ecuación 3}$$

Sumatoria de fuerzas paralelas al plano fuerzas cortantes:

$$F_s = F_1 \operatorname{sen} \alpha - F_3 \cos \alpha$$

$$F_s = \sigma_1 \operatorname{sen} \alpha - \sigma_3 * \operatorname{tg} \alpha \cos \alpha \quad \text{Ecuación 4}$$

\* Como el área del plano analizado es  $\frac{1}{\cos \alpha}$ , el esfuerzo normal en el plano  $\sigma_\alpha$  es:

$$\sigma_\alpha = \frac{F_N}{A} = \frac{\sigma_1 * \cos \alpha + \sigma_3 * \operatorname{tg} \alpha * \operatorname{sen} \alpha}{1 * \frac{1}{\cos \alpha}}$$

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 * \operatorname{tg} \alpha * \cos \alpha * \operatorname{sen} \alpha$$

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 * \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} * \cos \alpha * \operatorname{sen} \alpha$$

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 * \operatorname{sen}^2 \alpha \quad \text{Ecuación 5}$$

**Por trigonometría**

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) \quad \operatorname{sen}^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha)$$

$$\operatorname{sen} \alpha \cos \alpha = \frac{1}{2} \operatorname{sen} 2\alpha$$

Remplazando en la Ecuación 5

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) + \sigma_3 \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad \text{Ecuación 5' Esfuerzo Normal}$$

De la misma manera hallamos el esfuerzo cortante en el plano inclinado:

$$\tau_\alpha = \frac{F_s}{A} = \frac{\sigma_1 * \operatorname{sen} \alpha + \sigma_3 * \operatorname{tg} \alpha * \cos \alpha}{1 * \frac{1}{\cos \alpha}}$$

$$\tau_s = \sigma_1 \operatorname{sen} \alpha * \cos \alpha - \sigma_3 * \operatorname{tg} \alpha * \cos \alpha * \cos \alpha$$

$$\tau_\alpha = \sigma_1 \operatorname{sen} \alpha * \cos \alpha - \sigma_3 * \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} * \cos \alpha * \cos \alpha$$

$$\tau_s = \sigma_1 \operatorname{sen} \alpha * \cos \alpha - \sigma_3 * \operatorname{sen} \alpha * \cos \alpha \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \operatorname{sen} 2\alpha \quad \text{Ecuación 6' Esfuerzo Cortante}$$

Por medio de estas fórmulas podemos calcular los esfuerzos en cualquier plano, lo importante es conocer su inclinación ( $\alpha$ ). Con respecto al plano principal mayor  $\sigma_1$ . O si se conocen los esfuerzos en dos planos cualesquiera se puede calcular los esfuerzos principales.

Del análisis matemático de las formulas 5' y 6' se puede establecer los valores máximos y mínimos para los esfuerzos normal y cortante, de la siguiente forma:

El esfuerzo normal máximo se produce cuando el  $\cos 2\alpha = 1$  y eso ocurrirá cuando  $\alpha = 0^\circ$

$$\sigma_{\alpha_{max.}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

El esfuerzo normal mínimo se produce cuando el  $\cos 2\alpha = -1$  y eso ocurrirá cuando  $\alpha = 90^\circ$

$$\sigma_{\alpha_{min.}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

El esfuerzo cortante máximo se produce cuando el  $\sin 2\alpha = 1$  y eso ocurrirá cuando  $\alpha = 45^\circ$

$$\tau_{\alpha_{min.}} = -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

El esfuerzo cortante mínimo se produce cuando  $\sin 2\alpha = -1$  y eso ocurrirá cuando  $\alpha = 135^\circ$

$$\tau_{\alpha_{max.}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

En este sentido, en dos planos perpendiculares entre sí, los esfuerzos cortantes son iguales en magnitud, pero de sentido contrario.

### El Círculo de Mohr

Para los fines de este estudio es imprescindible hacer alusión al físico alemán O. Mohr, quien inventó un procedimiento gráfico con el objetivo de hallar los esfuerzos normal y cortante.

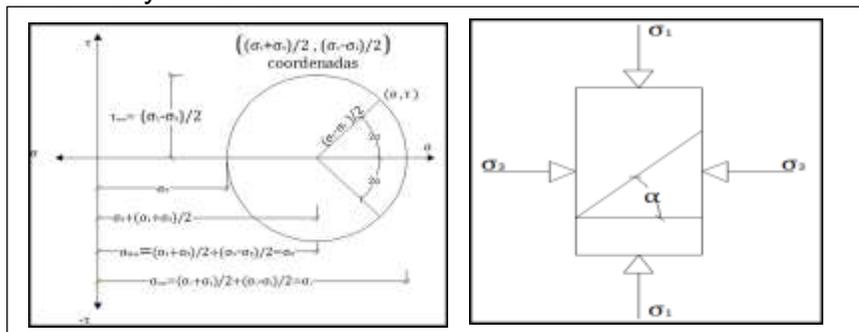
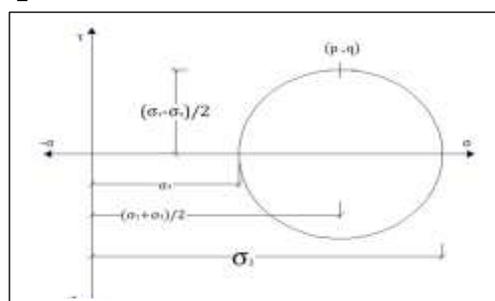


Figura 8: Diagrama P-Q.

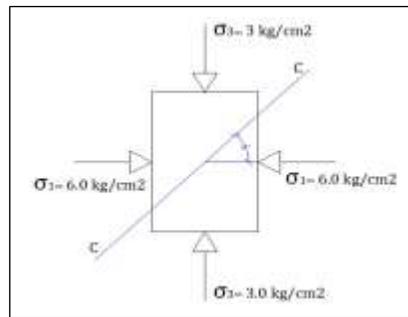
Al observar detenidamente la gráfica de Mohr, nos damos cuenta que el punto de máximo esfuerzo cortante ( $\tau$ ), se produce justo en la parte superior vertical al centro de la circunferencia, por lo que convencionalmente se le ha llamado coordenada p., q., donde p representa el esfuerzo normal situado en el centro de la circunferencia  $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ , y q representa el esfuerzo cortante máximo  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ .



**Figura 9:** Gráfica de O. Mohr.

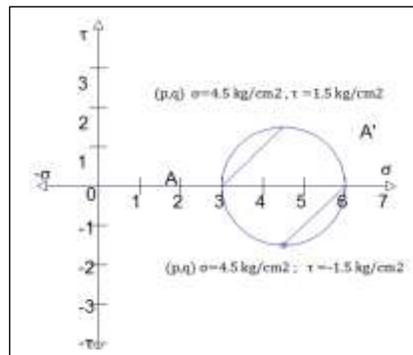
Para representar en un diagrama único múltiples estados de esfuerzos de una determinada muestra de suelo, resulta conveniente realizarlo de esta manera. Luego se los enlaza y la curva significa el incremento de los esfuerzos cortantes en función del esfuerzo normal.

**Ejemplo:** Supongamos una muestra de suelo de forma cúbica a la que induciremos esfuerzos, como indica el gráfico que a continuación se presenta. El problema plantea calcular los esfuerzos en un plano (c-c) que forme 45° con la horizontal.



**Figura 10:** Diagrama único con múltiples estados.

**Solución gráfica de Mohr**



**Figura 11:** Gráfica de Mohr.

**Solución analítica:**

$$\sigma_1 = 6.0 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_3 = 3.0 \text{ kg/cm}^2 \quad \alpha = 45^\circ$$

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

$$\sigma = \frac{6.0 + 3.0}{2} + \frac{6.0 - 3.0}{2} * \cos 2(45) = 4.5 \text{ kg/cm}^2$$

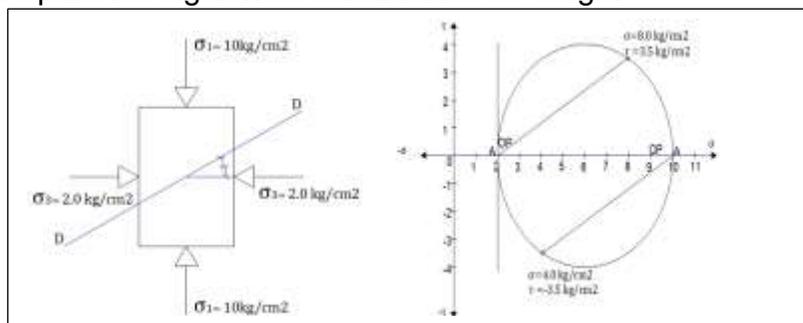
$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \text{sen} 2\alpha$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{6.0 - 3.0}{2} \text{sen } 90 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$$

Procedimiento para encontrar en forma gráfica los esfuerzos inducidos en un plano determinado, al usar el círculo de Mohr. El procedimiento para graficar en Mohr, es el siguiente:

1. Se dibuja  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  sobre el eje x.
2. Se encuentra el centro del círculo  $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ .
3. Se traza el círculo con compás.
4. Se traza una línea A-A' al partir de  $\sigma_1$ , que será paralela al esfuerzo principal mayor  $\sigma_1$ , hasta que se intercepte un punto de la circunferencia. Se define entonces el polo OP.
5. Se hace centro en OP y se traza una línea paralela al plano en el cual se quieren encontrar los esfuerzos, la línea se prolonga hasta que intercepta un punto en la circunferencia, este es el punto buscado. Después se observan sus coordenadas ( $\sigma$ ,  $\tau$ ).

**Ejemplo:** En la muestra de suelo indicada, colocar los esfuerzos normales y cortantes para las siguientes condiciones de carga:



**Figura 12:** Gráfico de condiciones de carga.

**Solución analítica:**  $\sigma_1 = 10 \text{ kg/cm}^2$        $\sigma_3 = 2.0 \text{ kg/cm}^2$        $\alpha = 300$

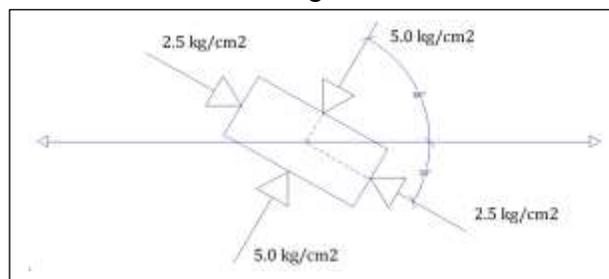
$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

$$\sigma = \frac{10 + 2}{2} + \frac{10 - 2}{2} * 0.5 = 8 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \text{sen } 2\alpha$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{10 - 2}{2} \text{sen } 60 = 3.46 \approx 3.5 \text{ kg/cm}^2$$

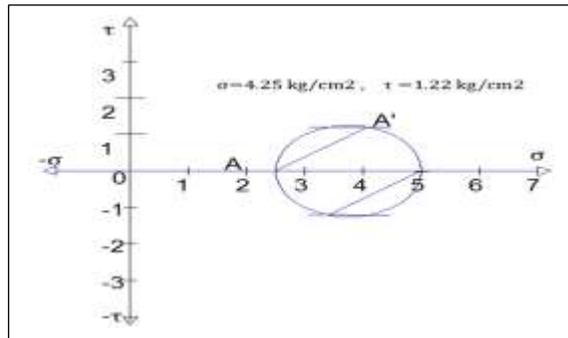
**Ejemplo práctico:** Calcule los esfuerzos  $\sigma$  y  $\tau$  sobre el plano horizontal de una muestra de suelo en condiciones de carga, como se indica en el siguiente gráfico:



**Figura 12:** Gráfico de esfuerzos  $\sigma$  y  $\tau$  sobre el plano horizontal.

Para la solución gráfica usamos el círculo de Mohr:

$$\sigma_1 = 5.0 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_3 = 2.5 \text{ kg/cm}^2$$



**Figura 13:** Gráfico del círculo de Mohr.

**Solución analítica:**

$$\sigma_1 = 5.0 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_3 = 2.5 \text{ kg/cm}^2 \quad \alpha = 30^\circ$$

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

$$\sigma = \frac{5.0 + 2.5}{2} + \frac{5.0 - 2.5}{2} * 0.5 = 4.37 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

$$\tau_\alpha = \frac{5.0 - 2.5}{2} \sin 60 = 1.08 \text{ kg/cm}^2$$

Con el objetivo de evaluar la resistencia del esfuerzo cortante de los suelos cohesivos, se debe tomar en cuenta el criterio de diseño a utilizar, así como si se trabajará con esfuerzos totales o efectivos.

### Criterio de esfuerzos totales

La adherencia suelo-pilote ( $C_a$ ), se estima como una fracción de la resistencia al corte, no drenada del suelo ( $C_u$ ). Esta prueba se realiza en un espécimen labrado a partir de una muestra inalterada. Para evaluar ( $C_u$ ) debe realizarse una prueba triaxial no consolidada, no drenada (UU), la cual presenta ventajas en relación con las demás pruebas:

- Reduce la influencia de fisuras presentes en el espécimen, ya que, si se utiliza la prueba de compresión no confinada, se podría subestimar la resistencia.

- El espécimen estará sujeto a un estado de esfuerzos más homogéneo que en la prueba de corte directo, lo que facilita su interpretación.
- La prueba con torcómetro (veleta), no es aconsejable en suelos que contienen estratos de arena. En las pruebas triaxiales se disminuye la influencia de la presencia de pequeños estratos de arena fina en el espécimen.

### **Criterio de esfuerzos efectivos**

El objetivo es evaluar el esfuerzo desarrollado por el suelo, sin considerar la presión desarrollada inicialmente por los poros. Para el diseño se debe evaluar la cohesión ( $C'$ ) y el ángulo de fricción ( $\Phi'$ ) del suelo, en función de esfuerzos efectivos. Para ello se utilizan muestras labradas que provienen de tubos de pared delgada (Shelby). No obstante, hay que tener mucho cuidado en no modificar el contenido de agua.

La determinación de  $C'$  y  $\Phi'$ , se realiza a partir de los resultados de las pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD) y consolidadas no drenadas, en las que se determina la presión de poros (CU).

De manera general, con las actividades propuestas a través de la combinación de la teoría con la práctica, se busca cambiar el rol tradicional del docente y del estudiante, para ofrecerle más espacio a este último y posibilitar el desarrollo de competencias, las cuales le permitirán un mejor desempeño dentro del aula de clases y como futuro profesional. A la vez, se busca crear en ellos un hábito responsable en el aprendizaje, sobre todo en lo concerniente a la asignatura Geotecnia.

Durante el desarrollo de este proyecto basado en la vida real, los estudiantes se manifestaron de un modo más optimista y participativo, cuestionan las propuestas planteadas por sus compañeros, realizan trabajo colaborativo y además, relacionan los contenidos teóricos de la Geotecnia, con la práctica profesional y la realidad, dentro del laboratorio de mecánica de suelos de la carrera Ingeniería Civil. Asimismo, manifiestan la necesidad de conceder mayor tiempo al estudio para lograr la madurez de los conocimientos.

El docente a cargo del proyecto se encuentra satisfecho con los resultados alcanzados. Por su parte, los estudiantes muestran un aprendizaje significativo, no memorístico, y demuestran el “saber hacer” ante las situaciones planteadas. Es importante recalcar que, durante la práctica, específicamente en el ensayo hidrométrico, los educandos apreciaron la presencia de arcillas-colides con un tamaño menor a 2 micrones, las cuales son partículas susceptibles de experimentar movimiento browniano. Dicho movimiento está determinado por los impactos moleculares entre las partículas en su medio más que por la atracción gravitacional.

### **REFERENCIAS**

Abarzúa, R. E., González, J. H., Quijada, L. L. y González, J. P. (2000). *Un proyecto de docencia interactiva para la enseñanza de la Mecánica de*

*Suelos en Chile*. Trabajo presentado en el 1er Congreso Latinoamericano sobre la enseñanza-aprendizaje de la Ingeniería Geotécnica, Oaxaca, México.

- Batanero, C. y Díaz, C. (2004). El papel de los proyectos en la enseñanza y aprendizaje de la Estadística. *Aspectos didácticos de las matemáticas*, pp. 125-164.
- Caamaño, A., Carrascosa, J. y Oñorbe, A. (1992). Los trabajos prácticos en ciencias experimentales. *Aula de innovación educativa*, 9, pp. 61-68.
- Ferreiro, G. R. y Espino, C. M. (2009). *El ABC del aprendizaje cooperativo: Trabajo en equipo para aprender y enseñar*. México: Trilla.
- Porlán, R., Martín, R., Martín, J. y Rivero, A. (2001). *La relación teoría-práctica en la formación permanente del profesorado*. Sevilla: Díada.
- Ramírez, S. G., León, V. y Trujillo, A. W. (2017). Sistematización y generación de conocimientos a partir de la teoría y la práctica como experiencia en el diseño de proyectos académicos en el aula. *Opuntia Brava* 9(3), p. 2. Recuperado de [opuntiabrava.ult.edu.cu](http://opuntiabrava.ult.edu.cu)
- Renzulli, J. S. (2010). El rol del profesor en el desarrollo del talento. *Revista electrónica interuniversitaria de formación del profesorado*, 13(1).
- Salas, R. S. y Ardanza, P. (1995). La simulación como método de enseñanza y aprendizaje. *Educación Médica Superior*, 9(1), pp. 3-4.
- Terzaghi K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Recuperado de [geotecnia-sor.blogspot.com/2012/02/historia-de-la-geotecnia-terzaghi-y-la.html](http://geotecnia-sor.blogspot.com/2012/02/historia-de-la-geotecnia-terzaghi-y-la.html)