

Mtra. Cristina Vintimilla Avila
Ing. Edison Avila Redrovan

**Análisis de modelos constitutivos para
representar el comportamiento de los
suelos del Sector las Orquideas de
la Ciudad de Cuenca, ECUADOR**

Análisis de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los suelos del sector las orquideas de la Ciudad de Cuenca

Mtra. Cristina Vintimilla Avila

mcrixsv@hotmail.com

Ing. Edisson Avila Redrovan

edisonavil45@hotmail.es

Resumen

En este documento se presenta un programa de investigación desarrollado para el análisis del comportamiento real de un suelo de características areno arcillosas. Para ello, el estudio incluye la realización de ensayos de clasificación, corte directo y compresión triaxial no drenada en muestras de suelos provenientes del sector las Orquideas de la Ciudad de Cuenca, con el objeto de evaluar y determinar los parámetros para los modelos constitutivos de Mohr – Coulomb, Drucker – Prager, hiperbólico de Duncan – Chang y Hardening Soil, que fueron utilizados para la respectiva simulación del comportamiento esfuerzo-deformacional en el programa de elementos finitos MIDAS GTS NX, a fin de realizar un análisis comparativo de los modelos con el comportamiento experimental del suelo. A través del análisis de los resultados se obtuvo que de las simulaciones realizadas con el modelo de Hardening Soil, las predicciones no se ajustan a la curva experimental, cuyos resultados evidencian que para arenas con matriz fina arcillosa no sería conveniente trabajar con dicho modelo, a menos que se cuente con ensayos edométricos para afinar el cálculo. Por otra parte, la relación hiperbólica de Duncan Chang no ajusta con precisión la zona plástica experimental; en cambio para los modelos elastoplásticos de Mohr – Coulomb y Drucker Prager el ajuste sería más aceptable, y de manera especial se ha obtenido que el modelo de Mohr Coulomb predice una curva de ajuste de las zonas elástica y plástica con ciclos de carga y descarga similar a la establecida en laboratorio.

Palabras clave

Modelos constitutivos, elementos finitos, MIDAS GTS NX

Abstract

This paper presents a research program developed for describing the real soil behavior with physical properties of clayey sands. For this reason, the study includes the execution of soil classification tests, a shear strength test and undrained compression triaxial test in samples of soil from the place Las Orquideas of Cuenca's city to evaluate and determine parameters for the constitutive models of Mohr - Coulomb, Drucker - Prager, Duncan – Chang hyperbolic model and Hardening Soil, which were used for the respective simulation of the stress – strain behavior in the element finite software MIDAS GTS NX to compare each model with the experimental soil behavior. For the sets of established parameters, the analysis shows that the Hardening Soil model predictions doesn't adjust to the experimental curve, whose results prove that for the soil of study wouldn't be recommendable to work with this model, unless there are oedometer tests to improve the estimation of the parameters. On the another hand, the hyperbolic relation of Duncan Chang model doesn't have an adequate accuracy in the experimental plastic zone; but the elastoplastic models of Mohr-Coulomb and Drucker Prager establish a better approximation, where the first one of them predicts a better grade of adjustment of the simulated curve with the experimental curve of the elastic and plastic zones with loading and unloading cycles.

Keywords

constitutive models, finite elements, MIDAS GTS NX

Introducción

Conforme el paso de los años, el estudio de la Mecánica de Suelos clásica ha sido usada como parte substancial para la construcción de obras de ingeniería tales como: edificaciones, puentes, vías, represas, entre otros. Debiéndose entender como mecánica clásica a la ejecución de sondajes en campo para muestreo, para la posterior realización de ensayos de laboratorio y caracterización de los materiales, con lo que se pueda proponer diseños, conclusiones y recomendaciones que aseguren la correcta interacción del sistema suelo - soporte. Sin embargo, analizar el verdadero comportamiento de los suelos frente a la actuación de cargas estructurales ha sido un tópico de interés ya que los métodos clásicos se limitan a estimar características geomecánicas que podría tener el suelo en un momento dado, considerando para ello únicamente criterios de elasticidad lineales. La respuesta del suelo es sumamente compleja y depende, no solo de la acción de cargas, sino también del tiempo y del estado tensional que ha adquirido el mismo previo al análisis [1].

Por lo expuesto anteriormente, con el advenimiento tecnológico y el incremento de las capacidades computacionales se ha dado apertura a la modelación numérica con el método de los elementos finitos (MEF) para simular con diversos niveles de sofisticación el comportamiento del suelo frente a la acción de cargas hidrostáticas y estructurales; en donde se han desarrollado una gama amplia de modelos constitutivos empíricos para la representación mecánica del suelo a través de las relaciones esfuerzo – deformación.

La diversidad de los modelos constitutivos se sustenta en el hecho de analizar un comportamiento realista de los geomateriales, tomando en cuenta las condiciones para las que fueron desarrollados o validados, ya que por ejemplo modelos elásticos clásicos se aplican únicamente para materiales homogéneos, isotrópicos y elástico lineales. En la actualidad, existen modelos que representan las deformaciones plásticas y elásticas de los suelos de mejor forma, relacionando los cambios de volumen y el esfuerzo cortante. Entre algunos de los modelos que se pueden mencionar se encuentran: modelos hiperbólico de Duncan - Chang y Hardening Soil (modelos que describen el comportamiento de un suelo, considerando condiciones no – lineales e inelásticas, con curvas de tendencia hiperbólica), modelos elastoplásticos de Mohr-Coulomb y Drucker-Prager, de donde estos dos últimos sustentan su aplicabilidad en el simple hecho de que el suelo frente a la actuación de una carga tiende a deformarse considerablemente, requiriéndose por ello, modelos plásticos que resuelvan dicho problema.

Los modelos constitutivos proveen un marco cualitativo para afinar el conocimiento del comportamiento del suelo; además sirven para ser utilizados en los cálculos de elementos finitos, que los implementan diferentes programas computacionales especializados tales como PLAXIS [2], FLAC o MIDAS GTS NX [3]. Dichos modelos, necesitan parámetros que pueden ser obtenidos de ensayos de laboratorio tales como: ensayos de clasificación, pruebas de corte directo, y ensayos de compresión triaxial (ensayos con los que se cuenta para propósitos del presente documento); procediendo de tal modo, a la respectiva simulación mediante elementos finitos para comparar los resultados que se obtengan con los de laboratorio, y de esta manera validar el modelo que mejor se ajuste al estado tenso – deformacional del suelo, que para el caso de la correspondiente investigación se ha considerado un geomaterial proveniente del sector de las Orquídeas de la Ciudad de Cuenca. El fin es proporcionar información que sirva como base o complemento de futuras investigaciones que amplíen y viabilicen el estudio de la mecánica de suelos moderna en nuestro país.

Materiales y Métodos

Mediante muestreos y ensayos de laboratorio (análisis granulométrico, límites, corte directo y compresión triaxial no drenada) realizados en el Sector Las Orquideas, en la calle Av. X Juegos Bolivarianos por parte del Municipio de Cuenca, y adicional a esto, con información complementaria a través de fuentes bibliográficas, se analizan diferentes modelos constitutivos; a fin de validar el que mejor se ajuste al suelo en estudio, utilizando para ello herramientas computacionales tales como MIDAS GTS NX, que permitan simular cada modelo mediante el método de elementos finitos.

Propiedades físicas y parámetros geotécnicos del suelo

A través del equipo de perforación de propiedad del Municipio de Cuenca se realizaron 3 sondeos de campo (perforaciones), de donde se obtuvieron muestras de suelo para ser analizadas en laboratorio, determinándose la presencia de materiales de características arena arcillosas y limosas. Por lo tanto, para los correspondientes análisis se optó por trabajar con las muestras obtenidas del sondeo # 4 a una profundidad de 7 m, en las que se realizaron ensayos de clasificación, corte directo y compresión triaxial no consolidada no drenada. Del análisis granulométrico se obtuvo que el suelo se compone de un 52 % de arenas y 48 % de filler, con un contenido de humedad $w = 22.07 \%$, límite líquido $LL = 44.27 \%$ y un índice plástico $IP = 22.02 \%$, clasificándose según la SUCS como arenas arcillosas (SC) y por la AASHTO como suelos arcillosos (A-7-6).

Para la validación experimental de los modelos constitutivos se utilizaron ensayos de compresión triaxial, no drenados, sin consolidar; con presiones de confinamiento (σ_3, σ_3) de 50, 100 y 200 kPa, en los que se obtuvo la curva esfuerzo - deformación experimental. Para cada presión de confinamiento se obtuvieron la humedad (w) y densidad de volumen de la muestra (ρ_d, ρ_d). El tamaño de las probetas fue de 36.2 mm de diámetro y 67 mm de longitud. Los valores del ángulo de fricción y cohesión obtenidos por compresión triaxial para el suelo fueron de 40° y 58.8 kPa, respectivamente.

Simulación del ensayo triaxial mediante el MEF

Para la simulación del ensayo triaxial se utilizó el software de elementos finitos MIDAS GTS NX (licencia de evaluación), el mismo que implementa los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, el modelo hiperbólico de Duncan – Chang y el de Hardening-Soil.

El problema a simular tiene condiciones no drenadas, sin consolidar, con presión de cámara de 100 kPa. El modelo geométrico representa una probeta que se corresponde con los especímenes experimentales tanto en su forma como en sus dimensiones, optándose por un modelo axisimétrico. De donde, una vez definido el modelo geométrico se definen la discretización del dominio, las condiciones iniciales como la presión de poros y las restricciones de contorno, en las que para el lado inferior se impide el movimiento en las dos direcciones (vertical y horizontal) y para la parte izquierda se impide el movimiento en la dirección horizontal. Las condiciones se completan con la adición de tensiones perpendiculares al contorno en los lados superior – A y derecho - B (ver Figura 1).

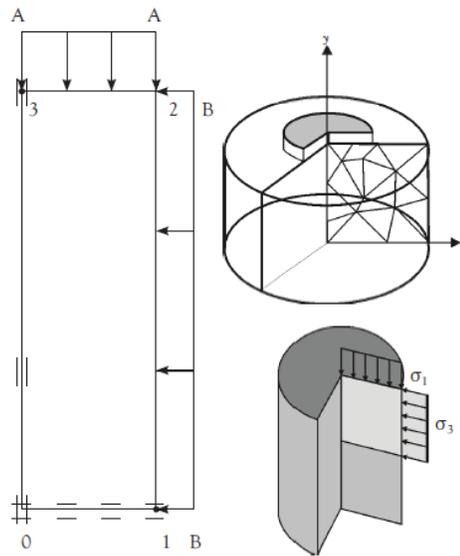


Figura 1. Modelización de una probeta de suelo para un ensayo triaxial [4]

Modelo de Mohr - Coulomb

Se trata de un modelo elastoplástico, el cual es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo, que relaciona la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla Mohr – Coulomb, en la que se puede simular el comportamiento de suelos granulares sueltos o finos normalmente consolidados en dos etapas (un modelo elástico y luego plástico). Este modelo ignora los efectos del esfuerzo principal intermedio, lo cual es inconsistente con resultados experimentales [5]. Además, muestra predicciones conservadoras de la resistencia cortante del suelo y no es conveniente su uso en aplicaciones tridimensionales debido a la presencia de esquinas en la superficie de fluencia lo cual afecta la convergencia de los modelos [6]. El modelo no representa el comportamiento elastoplástico progresivo (Figura 2a), únicamente involucra dos elementos generales: la elasticidad perfecta y la plasticidad asociada al desarrollo de deformaciones plásticas o irreversibles, tal como se puede ver en la Figura 2b [4].

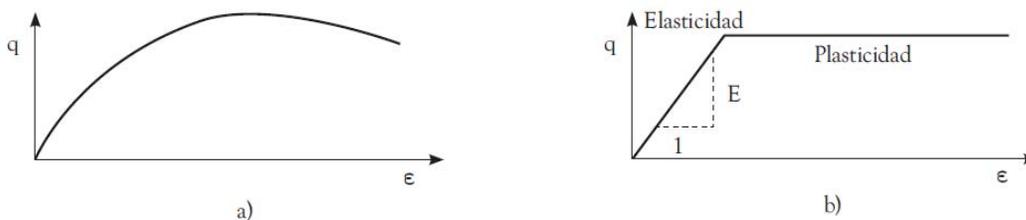


Figura 2. Representación de curva idealizada del modelo de Mohr – Coulomb: a) Respuesta experimental del suelo en ensayos de compresión triaxial, b) Formulación básica del modelo elastoplástico perfecto (Mohr – Coulomb)

El modelo exige cinco parámetros básicos de entrada: el módulo de Young E, la relación de Poisson μ , la cohesión del suelo c, el ángulo de fricción interna ϕ , y el ángulo de dilatación ψ . Por lo tanto, el módulo de elasticidad se determina como el valor de la pendiente de la tangente a la curva esfuerzo - deformación del suelo sometido a ensayo triaxial, con presión de confinamiento de 100 kPa.

La determinación del coeficiente de Poisson (μ) se la hace utilizando la relación entre el módulo de elasticidad y el módulo cortante (G) que viene expresada por la siguiente ecuación $G=E/2(1+\mu)$ [6]. El módulo cortante se obtiene mediante el ensayo de corte directo, cuyo aparato trabaja con deformación controlada, en una caja de sección circular de 61.6 mm de diámetro y 20 mm de altura, con presiones de confinamiento similares a los del ensayo de compresión triaxial, siendo el valor de la pendiente de la curva esfuerzo – deformación cortante del suelo con presión de confinamiento de 100 kPa.

El ángulo de dilatación (ψ) en las arcillas o limos no consolidados es cero, pero para el caso de suelos consolidados o arenosos toma importancia, por lo que a través de la siguiente expresión matemática se estima dicho valor $\psi = \phi - 30^\circ$ [2].

Para un análisis determinado, la evaluación de la posible ocurrencia de la plasticidad involucra un conjunto de funciones de fluencia f (yield functions) que definen el límite entre el comportamiento elástico y plástico del material. La representación gráfica corresponde a una superficie del tipo cono hexagonal irregular, en donde para diversos estados de esfuerzos que se ubiquen dentro de la superficie, el comportamiento es puramente elástico. En caso contrario si los esfuerzos son mayores o iguales a la frontera definida por la superficie existirán deformaciones tanto elásticas como plásticas [4].

En la Tabla 1 se exponen los parámetros de ingreso del modelo constitutivo de Mohr – Coulomb, para el suelo areno arcilloso (SC).

Parámetro	Descripción	Origen	Valor
E (kPa)	Módulo de Young	Ensayo triaxial	20323.36
μ	Coeficiente de Poisson	Relación del módulo cortante (G) y módulo de elasticidad (E)	0.35
c (kPa)	Cohesión	Ensayo triaxial	58.86
$(^\circ)\phi$	Ángulo de Fricción	Ensayo triaxial	40
Ψ ($^\circ$)	Ángulo de Dilatación	$\psi = \phi - 30$	10

Tabla 1. Valores obtenidos para los parámetros constitutivos de Mohr – Coulomb y Drucker Prager

Modelo de Drucker - Prager

Es un criterio fundamentado en la teoría de la plasticidad para describir la falla del suelo, definiendo una superficie de fluencia plástica en términos de los tres esfuerzos principales. El modelo fue introducido para resolver los problemas numéricos encontrados en las esquinas de la superficie de fluencia de Mohr – Coulomb, en donde la forma hexagonal del cono de falla se reemplaza por un cono simple, de tal manera que desde el centro de la superficie de fluencia exista equidistancia [7].

Una de las limitaciones del modelo se da en la asunción de una regla de flujo asociada que implica una excesiva dilatación durante la falla del material, sin embargo como ventaja se tiene que el modelo presenta simplicidad en tanto a la obtención de los parámetros constitutivos que son hallados por ensayos de compresión triaxial y a partir del mismo modelo de Mohr Coulomb. Por lo tanto, para la respectiva simulación con dicho modelo se toma en consideración los mismos parámetros del modelo de Mohr – Coulomb (ver Tabla 1).

Modelo hiperbólico Duncan - Chang

El modelo hiperbólico fue propuesto inicialmente por Konder y Zelasko (1963), posteriormente fue presentado en forma ajustada por Duncan y Chang (1970), el que parte del supuesto de que las curvas esfuerzo-deformación del suelo pueden aproximarse a una curva hiperbólica que relaciona el esfuerzo desviador ($\sigma_3 - \sigma_1$) con la deformación axial [8]. Los parámetros constitutivos que se requieren para trabajar con el modelo se encuentran en función del esfuerzo de confinamiento y del esfuerzo cortante, los cuales pueden ser obtenidos por ensayos de compresión triaxial.

Los parámetros básicos de ingreso para el desarrollo del modelo son: el módulo de elasticidad inicial (E_i), módulo tangencial de elasticidad (E_t), el módulo de carga y descarga de elasticidad (E_{ul}), coeficiente de Poisson (μ), cohesión (c), ángulo de fricción interna (ϕ), módulo de carga inicial (K), exponente de rigidez inicial (n), coeficiente de falla (R_f), esfuerzo de confinamiento (σ_3) y presión atmosférica (P_a), módulo de descarga y recarga (K_{ur}), módulo volumétrico (K_b), exponente de módulo volumétrico (m) y módulo tangencial (E_t) [5].

El modelo de Duncan – Chang es muy usado en la ingeniería geotécnica ya que los parámetros del suelo pueden ser obtenidos directamente de un ensayo triaxial. Sin embargo, la desventaja del modelo a comparación de modelos elastoplásticos es que el modelo hiperbólico no puede consistentemente distinguir entre los ciclos de carga y descarga [9].

En la Tabla 2, se exponen los parámetros constitutivos del modelo de Duncan Chang para el suelo areno arcilloso.

Parámetro	Descripción	Origen		Valor
c (kPa)	Cohesión	Ensayo triaxial		58.86
	Ángulo de Fricción	Ensayo triaxial		40
K	Módulo de carga inicial	$E_i = K \cdot Pa \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^n$	Curva E_i vs. σ_3 (50, 100 y 200 kPa) del ensayo triaxial	421.56
n	Exponente de rigidez inicial			0.34
R_f	Relación de falla	Valor por defecto		0.9
K_b	Módulo de carga inicial	$B_m = K_b \cdot Pa \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^m$	Curva B_m vs. σ_3 (50, 100 y 200 kPa) del ensayo triaxial $B_m = 16.67E_t$ [5]	270.12
m	Exponente de rigidez inicial			0.40
K_{ur}	Módulo de descarga y recarga	$E_{ur} = K_{ur} \cdot Pa \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^n$	Curva E_{ur} vs. σ_3 (50, 100 y 200 kPa) del ensayo triaxial	83.43

Tabla 2. Valores obtenidos para los parámetros del modelo hiperbólico de Duncan – Chang

Modelo Hardening Soil

Modelo avanzado que permite simular el comportamiento de diversos tipos de suelos tanto cohesivos como granulares, el cual es considerado como una aproximación de segundo grado, siendo una variante elastoplástica del modelo hiperbólico de Duncan Chang [4]. La idea básica para la formulación del modelo Hardening – Soil es la relación hiperbólica entre la deformación axial (ϵ) y el esfuerzo desviador ($\sigma_3 - \sigma_1$).

De entre los parámetros básicos del modelo constitutivo de Hardening-Soil están la rigidez secante de ensayos triaxiales (E_{50}^{ref}), rigidez tangente de carga edométrica (E_{oed}^{ref}), rigidez de descarga – recarga (E_{ur}^{ref}), potencia para la dependencia a nivel de estrés de la rigidez (m).

El modelo de suelo con endurecimiento supera en alto grado al modelo de Duncan – Chang por hacer uso de la teoría de plasticidad en vez de la de elasticidad, por incluir en su formulación el fenómeno de dilatancia en el suelo y por la introducción de una superficie de fluencia variable en el espacio. De esta manera, en la Tabla 3 se presentan los respectivos

parámetros constitutivos del modelo, en el que para la obtención de algunos valores se optó por correlaciones ya que no se dispuso de ensayos adicionales como los de consolidación; razón por la que la capacidad y desempeño particular del modelo podrían afectarse.

Parámetro	Descripción	Origen	Valor
c (kPa)	Cohesión	Ensayo triaxial	58.86
$(^\circ)\varphi$	Ángulo de Fricción	Ensayo triaxial	40
Ψ ($^\circ$)	Ángulo de Dilatancia	$\psi = \varphi - 30$	10
μ	Coeficiente de Poisson	Modelo de Mohr - Coulomb	0.35
E_{50}^{ref}	Rigidez secante (kPa)		21347.47
m	Dependencia de la rigidez al estado de esfuerzos	Ensayo triaxial $E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c * \cotan(\varphi)}{\sigma_{ref} + c * \cotan(\varphi)} \right)$	0.90
E_{oed}^{ref}	Rigidez tangente para carga primaria edométrica	$E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref} [2]$	21347.47
E_{ur}^{ref}	Rigidez en descarga - recarga	$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} [2]$	64042.42
σ_{ref}	Esfuerzo de referencia (kPa)		100
K_o^{nc}	Coeficiente de presión lateral de tierras	$K_o = 1 - \text{sen}\varphi$ Para suelos de grano grueso	0.36
R _f	Relación de falla	Valor por defecto	0.90

Tabla 3. Valores obtenidos para los parámetros del modelo Hardening Soil

Resultados y Discusiones

Los resultados de las propiedades físicas del suelo de estudio muestran que tiene un porcentaje pasante el tamiz 200 equivalente a 48.3 %, con un IP = 22.02 %, por lo que se lo ha clasificado como un suelo areno arcilloso con características plásticas, en la que la humedad natural es de 22 %, con una densidad húmeda de 1.7 gr/cm³.

A través del software Midas GTS NX se han realizado las respectivas simulaciones numéricas del suelo areno arcilloso con una presión de confinamiento de 100 kPa, de donde para el caso de los modelos constitutivos de Mohr Coulomb (MC), Drucker Prager (DP) y el hiperbólico de Duncan Chang (DC) se ha obtenido un desplazamiento vertical máximo equivalente a 3 mm (ver Figura 3). Por otro lado, en el modelo de Hardening Soil (HS) la simulación presenta un

desplazamiento máximo de 1.42 mm (ver Figura), con lo que converge hasta un 50 % de su solución, esto debido a los parámetros hallados y estimados para el suelo.

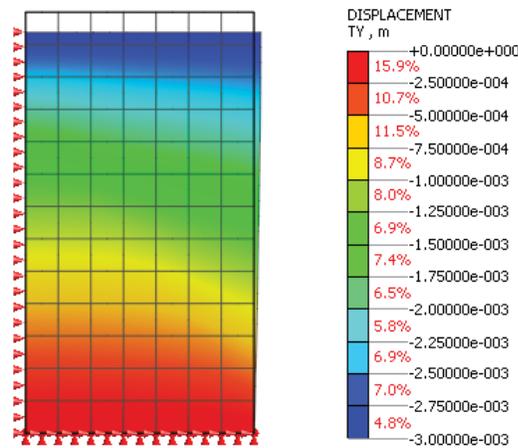


Figura 3. Desplazamientos verticales y malla deformada de los modelos MC, DP y DC

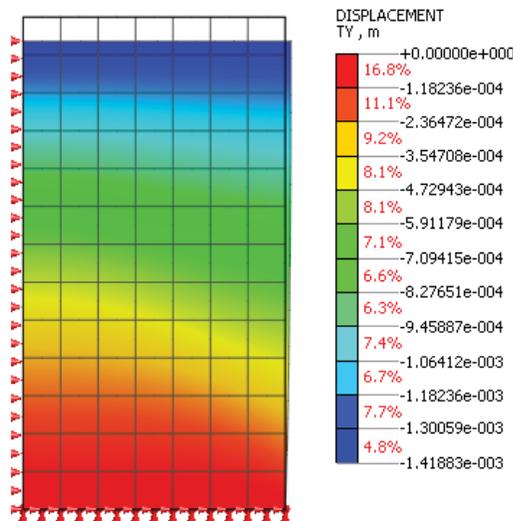


Figura 4. Desplazamientos verticales y malla deformada del modelo HS

En la Figura 5 se presentan los resultados de las curvas esfuerzo-deformación experimental junto con las obtenidas por simulación numérica, para una presión de confinamiento isotrópico de 100 kPa.

Tal como se puede observar en la Figura 5, el modelo constitutivo de Hardening Soil es el que presenta menor precisión en el ajuste de las curvas simulada y experimental, por lo que se establece que los parámetros adoptados para el análisis no satisfacen la validación del modelo con respecto al suelo de estudio ya que la convergencia a la solución es de solo el 50%; resaltando con ello el término de la curva frente a la acción de un esfuerzo desviador

igual a 4.38 kg/cm^2 para una deformación axial no mayor a 2.11 kg/cm^2 . Por tal motivo, no se define la zona plástica referida a los cambios de rigidez del material con el aumento de las deformaciones, y con ello se establece que no sería optable trabajar con dicha metodología.

Por otro lado, para el caso del modelo de Duncan Chang se puede ver que la curva hiperbólica de esfuerzo – deformación generada por la simulación se ajusta de mejor forma a la curva experimental comparada con el modelo de Hardening Soil. Sin embargo, en la zona plástica que se presenta desde una deformación mayor a 2.60 % según mediciones de laboratorio, existe una menor exactitud en las predicciones; siendo esta la desventaja de la metodología, en donde, conforme aumenta la deformación, el esfuerzo desviador también lo hace en una relación hiperbólica, dificultando la distinción entre los ciclos de carga y descarga.

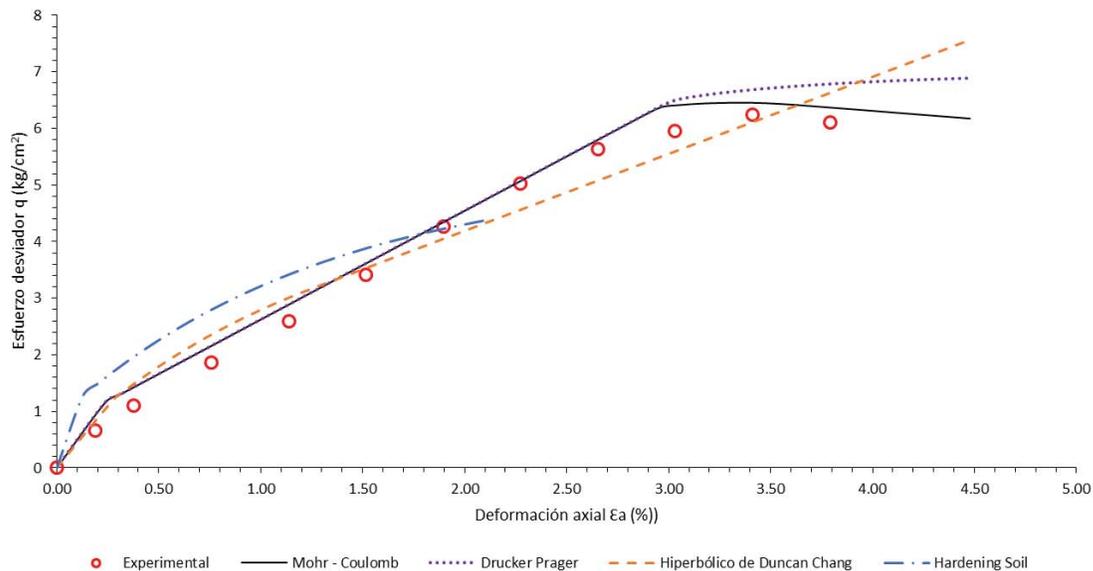


Figura 5. Curvas Esfuerzo – Deformación para ajuste de simulaciones con resultados experimentales

Finalmente, de las mediciones realizadas en laboratorio, se observa una transición gradual de la curva experimental entre las zonas elástica y plástica, definiéndose una tendencia lineal de la primera etapa que se presenta hasta la deformación de 2.60 % con un esfuerzo desviador de 5.72 kg/cm^2 ; con lo que se observa una correspondencia aceptable de los modelos de Mohr Coulomb y Drucker Prager, en los que se evidencia la presencia de un módulo elástico inicial igual a $47\,690 \text{ kPa}$ y un módulo elástico tangencial de la zona elástica igual a 18846 kPa , hasta la deformación axial de 3 %, valor hasta el cual las deformaciones son reversibles. Para la zona plástica, se puede notar que el modelo simplista de Mohr Coulomb se ajusta de manera más aproximada a la curva experimental, en donde el esfuerzo desviador de falla del modelo es 3.47 % mayor al de la curva experimental cuyo valor es de 6.238 kg/cm^2 , notándose la similitud en el ciclo de carga y descarga. Por lo contrario, durante la falla del material, el modelo de Drucker Prager no define claramente un esfuerzo desviador de falla sino un progresivo incremento del esfuerzo hasta una línea asintótica equivalente a 7 kg/cm^2 , sin presencia de un punto alto intermedio en la curva tenso – deformacional.

Conclusiones

En Ecuador, la realización de estudios y diseños geotécnicos ha tomado como base a modelos netamente elásticos para estudiar el comportamiento de los suelos, generando soluciones diversas, que en variados y múltiples casos se han alejado de la realidad tenso – deformacional a la que están expuestos los geomateriales o podrían estarlo frente a la acción de cargas externas como las climatológicas, sísmicas, estructurales (por construcción de obras de ingeniería), etc. Por ello, basados en los resultados obtenidos en cuanto a la determinación de parámetros constitutivos y modelación numérica de ensayos de compresión triaxial, se concluye que el modelo elastoplástico de Mohr Coulomb presenta un adecuado ajuste entre los resultados experimentales y las predicciones realizadas por simulación numérica, para los suelos areno arcillosos, muestreados en el sector de las Orquídeas de la ciudad de Cuenca; lo que hace que la determinación de los parámetros sea razonablemente sencilla.

Trabajos Futuros

En la actualidad, el campo de la Mecánica de Suelos requiere de cálculos más precisos en los que, para un suelo determinado se estudie el comportamiento real del mismo con aplicación de diferentes modelos constitutivos, a fin de validar el que mejor se ajuste a las mediciones experimentales. Por ello a través del presente documento se han presentado cuatro modelos constitutivos con sus respectivas formulaciones, parámetros y limitaciones, que sirvan de apoyo para futuras investigaciones, en las que se puedan elaborar estudios geotécnicos a detalle para diferentes propósitos como estabilidad de taludes, cimentaciones superficiales y profundas, análisis de filtraciones, etc. utilizando geotecnologías innovadoras tales como softwares especializados para la Geotecnia (MIDAS GTS NX o PLAXIS) que implementan las técnicas numéricas para simulación de geomateriales frente a la acción de agentes naturales o antrópicos.

Referencias

- [1] O. González Cueto, M. Herrera Suárez, C. E. Iglesias Coronel y E. López Bravo, «Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos,» Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 22, n° 3, pp. 75-80, 2013.
- [2] PLAXIS, «Plaxis. Versión 8. Tutorial Manual,» Delft University of Technology and PLAXIS b.v, Delft, Netherlands, 2004.
- [3] MIDAS, «Benchmarks and Verifications - Manual Midas GTS NX,» 1 July 2014. [En línea]. Available: http://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/150/GTX.htm. [Último acceso: 20 February 2016].
- [4] A. Nieto Leal, J. F. Camacho Tauta y E. F. Ruiz Blanco, «Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr - Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos,» Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 8, n° 15, pp. 75-91, 2009.
- [5] M. Soilworks, Geotechnical Solution for Practical Design, 2016.
- [6] D. Wulfsohn y B. Adams, «Advances in Soil Dynamics Volume 2, Elastoplastic soil mechanics,» St. Joseph, Mich: ASAE, pp. 1-116, 2002.

[7] S. Rani R., N. cubanos Prasad. K y S. Krishna T., «Applicability of Mohr-Coulomb & Drucker - Prager models for assesment of undrained shear behavior of clayey soils,» International Journal of Civil Engineerin and Technology (IJCIET), vol. 5, nº 10, pp. 104-123, 2014.

[8] M. Herrera Suárez, O. González Cueto, C. Iglesias Coronel, A. d. L. Rosa Andino y R. Madruga Hernández, «Estudio de la exactitud del modelo hiperbólico de Duncan y Chan en la predicción de la relación esfuerzo deformación de tres suelos arcillosos,» Ciencias Técnicas Agropecuarias, vol. 19, nº 4, pp. 24-29, 2010.

[9] B. B. Huat, J. Noorzaei, M. S. Jaafar, K. Sien Ti y G. See Sew, «A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application,» EJGE, vol. 14, pp. 1-18, 2015.

[10] F. A. Bernal López y J. F. Camacho Leguízamo, «Coefiente de presión de tierras en reposo (Ko),» Universidad Nacional de Colombia

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por el personal de la Empresa MIDAS para adquirir una licencia de evaluación del software especializado en Ingeniería Geotécnica “MIDAS GTS NX”, como también a la provisión de información para la correcta simulación mediante técnicas numéricas de elementos finitos que implementa el programa ya mencionado.

Acerca de los Autores

La Ingeniera Cristina Vintimilla obtuvo su título de Ingeniera Civil y de Master en Geología Aplicada y Geotecnia en la Universidad de Cuenca en la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Ha realizado diversos estudios Geotécnicos y de Pavimentos para el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, así como para las Municipalidades: de Cuenca, de Paute, de Sucua, de Zaruma, de Macará, de Guaranda, de Nabón, Los Encuentros. Participó como supervisora geotécnica en la Estabilización del Cerro Tamuga, Proyecto PUMA y Monitoreo del Cerro Mishqiyacu para SENAGUA. Contribuyo como auxiliar de Fiscalización para el Proyecto Saymirin V. Diversas fiscalizaciones mediante el control de calidad de materiales, hormigones y densidades.

El Ingeniero Edisson Oswaldo Avila Redrovan estudio en la Universidad de Cuenca en la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.

Autorización y Renuncia

El (o los) autores del presente artículo autorizan al Área de Administración y Tecnología para el Diseño, para publicar el escrito en el Anuario de Administración y Tecnología para el Diseño (2016). El Área de Administración y Tecnología o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que está expresado en el escrito.