**XII SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA**

**Tiempo de consolidación vs permeabilidad en cimentaciones superficiales sobre suelos parcialmente saturados**

***Consolidation time vs permeability in surface foundations on unsaturated soils***

Ing. Meily de la Cruz Díaz1, Msc.Ing. Claudia María Rodríguez Rodríguez 2,

Dr. Cs. Gilberto Julio Quevedo Sotolongo 3.

1. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, mdelacruz@uclv.cu
2. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, claudiamrr@uclv.cu
3. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, quevedo@uclv.edu.cu

**Resumen:**

En la Mecánica de Suelos tradicional se presentan varias limitaciones en cuanto al análisis del comportamiento tenso-deformacional de los suelos en estado parcial de saturación, es por ello que en este trabajo se presenta la obtención de la variación del tiempo de consolidación cuando cambia la permeabilidad del suelo producto de variaciones en el grado de saturación, para lo cual se emplea el modelo de Van Genuchten para obtener la curva de conductividad hidráulica a partir de la curva característica en el suelo parcialmente saturado y el modelo de Rojas y Alanís para determinar la variación del índice de poros.

**Palabras Claves**: Conductividad hidráulica; Suelos parcialmente saturados; Curva característica; Tiempo de consolidación.

***Abstract:***

*In traditional Soil Mechanics, there are several limitations regarding the analysis of the tenso-deformational behavior in unsatured soils, which is why in this work we present the variation of the consolidation time when the permeability changes of the soil product of variations in the degree of saturation, for which the Van Genuchten model is used to obtain the hydraulic conductivity curve from the characteristic curve in unsaturated soils and the Rojas and Alanís model to determine the variation of pore index.*

***Keywords:*** *Hydraulic conductivity; Unsaturated soils; Characteristic curve; Consolidation time*

**1. Introducción**

En la Mecánica de Suelos tradicional se presentan varias limitaciones en cuanto al análisis del comportamiento tenso-deformacional de los suelos en estado parcial de saturación, cuando sobre él se ubican distintas estructuras y, el mismo se encuentra sujeto a diversas cargas o estados tensionales, se comienzan a producir deformaciones que son provocadas en gran medida por la forma de aplicación de los esfuerzos y las tensiones que se puedan producir, además de la composición y la relación de vacíos que presente el terreno.

En el diseño de las cimentaciones superficiales al igual que cualquier otra estructura donde el suelo desempeñe un rol importante, es fundamental; el análisis de las tensiones y deformaciones que se producen en los suelos sobre los que se apoya, teniendo en cuenta la curva de compresibilidad del suelo mediante el ensayo de consolidación, donde para suelos arcillosos que tienen una baja permeabilidad la deformación va a depender del tiempo.

Las características físicas y mecánicas del suelo perteneciente al Canal Magistral Zaza- Ciego que se pretende analizar en este trabajo, correspondiente a una arcilla, el cual presenta complejidades para el análisis tenso-deformacional en los suelos parcialmente saturados en cuanto a las cimentaciones superficiales donde existe una considerable relación entre la velocidad de consolidación y la permeabilidad del suelo, además de ser necesario la simulación de la curva característica del suelo.

**2. Metodología**

El análisis de los suelos parcialmente saturados se dificulta un poco si no se cuenta con las presiones de poros, pues para este tipo de suelos es muy útil en el momento de medir los coeficientes de permeabilidad del suelo.

Para la obtención de la función de permeabilidad existen *métodos directos*, en los cuales se mide la cantidad de agua que entra y sale del suelo producto a las variaciones en la succión, además de los *métodos indirectos* que obtienen la función a partir del tamaño y distribución de los poros o mediante la curva característica.

El coeficiente de permeabilidad no es constante para el suelo, sino que presenta variaciones debido a los cambios en el grado de saturación (Sr) o en la succión (Su) del suelo, provocado por el contenido de humedad. Existen estudios donde se vincula al grado de saturación (Sr) con la permeabilidad para suelos parcialmente saturados (), la cual representa un porcentaje de la permeabilidad del mismo suelo, pero en estado saturado ().

La curva característica es la relación que existe entre el contenido de agua del suelo (grado de saturación (Sr), contenido de agua volumétrico o gravimétrico) y la succión (tensión del agua) del suelo. **(**[**Pérez 2006**](#_ENREF_58)**)** .Es una representación de la capacidad de un suelo para retener agua, bajo cierto valor de succión aplicada. La naturaleza de la misma está directamente asociada a la composición granulométrica y estructura del suelo; por tanto, la relación puede variar para diferentes tipos de suelos. Existen resultados coherentes que permiten asociar la curva característica con las propiedades de los suelos en estado parcial de saturación por lo que constituye una vía de acceso para predecir empíricamente la función de permeabilidad de un suelo con estas características a partir de la obtención del coeficiente de permeabilidad del suelo saturado.

Para estimar la permeabilidad de los suelos parcialmente saturados se encuentran varios métodos a continuación se enuncia; él que se empleará en la investigación.

**Método de Van Genuchten**

Es importante para determinar la permeabilidad de un suelo parcialmente saturado, contar con la curva característica para luego proceder al ajuste de la misma. (Ecuación **(1)**) **(Chae et al. 2010), (Krishnapillai and Ravichandran 2011), (Tejo et al. 2015)**.

**(1)**

Dónde:  es el grado de saturación,  es la succión total de la muestra, yson los parámetros de ajuste del modelo, .

Según la succión del suelo y una vez obtenida la curva característica se puede determinar la permeabilidad del suelo parcialmente saturado (). (Ecuaciones **(2)**, **(3)** y **(4)**).

**(2)**

**(3)**

**(4)**

Dónde:  es la permeabilidad del suelo parcialmente saturado, es la permeabilidad residual planteada por Van Genuchten, es la succión del intervalo analizado, es la permeabilidad saturada experimental, parámetros de ajuste del modelo.

En los suelos parcialmente saturados los efectos del cambio de tensión total y las variaciones de presiones de agua deben ser tratados de forma independiente. Por lo tanto, () se define como la tensión neta total, donde () es la presión de aire,es la tensión total, y () se define como la succión matricial del suelo, siendo  la presión de agua. El estado de tensión que se produce por la presión de agua se utiliza como la delimitación entre la mecánica de suelos saturados y no saturados (**Tristá, J. G., et al. 2016)**. A continuación, se presenta un modelo que permite predecir el comportamiento de los suelos parcialmente saturados en cuanto a las tensiones y deformaciones.

**Modelo de Rojas y Alanís**

**(**[**Alanís Araiza 2012**](#_ENREF_3)**)** y **(**[**Rojas 2013**](#_ENREF_63)**)** plantean un nuevo modelo para predecir el comportamiento tenso-deformacional de los suelos parcialmente saturados, que parte de las siguientes consideraciones:

1. El modelo de proporcionalidad natural se utilizará, no en términos de volumen específico si no en términos de la relación de vacíos , ya que la relación de vacíos está en función del volumen de vacíos y el volumen de sólidos no cambiará ya que ese espacio no puede desaparecer o variar, por lo que será siempre el mismo.
2. Para tomar en cuenta el comportamiento elástico y plástico del material parcialmente saturado, se tomarán en cuenta los factores κ y λ, los cuales serán tomados de la curva de compresibilidad del material saturado en su tramo virgen de carga y de descarga respectivamente.

Para el cálculo de los coeficientes κ y λ correspondiente a su comportamiento elástico y plástico se emplea las siguientes expresiones derivadas de la curva de compresibilidad del suelo saturado. (Ecuaciones **(5)** y **(6)**)

Elástico **(5)** Plástico **(6)**

Cuando la muestra es compactada se tomará un esfuerzo de prefabricación σfab´ quien se añadirá para calcular los esfuerzos efectivos, el cual se obtiene de la curva de compresibilidad saturada trazando dos líneas rectas en los cambios de pendiente en la zona virgen. (Figura 1)

El esfuerzo de fabricación sería el esfuerzo de pre-consolidación para el caso de muestras inalteradas, cuando las muestras son remoldeadas o compactadas no se considera el esfuerzo de pre-consolidación, pero hay que considerar el esfuerzo que se le introduce a las muestras en el proceso de remoldeo de las misma, ambos esfuerzos se obtienen de la misma forma, pero uno de la curva de compresibilidad de la muestra remoldeada y el otro en la curva de compresibilidad para las muestras inalteradas.



**Figura1.** Curva de compresibilidad del suelo saturado, donde se obtienen los coeficientes κ y λ.

Ecuaciones para determinar la relación de vacíos **(**[**Alanís Araiza 2012**](#_ENREF_3)**)** y **(**[**Rojas 2013**](#_ENREF_63)**)**(Ecuaciones **(7)**, **(8)** y **(9)**)

Comportamiento elástico:  **(7)**

Comportamiento elasto-plástico  **(8)**

 **(9)**

Dónde:son las tensiones efectivas, las tensiones normales totales, además de considerar la tensión de fabricación, es la presión del aire,la presión del agua y el grado de saturación del suelo.

Las deformaciones en los suelos se producen con el transcurso del tiempo, lo cual manifiesta como disminuye su volumen de acuerdo con el paso del tiempo y a su vez aumentan las cargas por sedimentación sucesiva. El índice de consolidación para suelos saturados se puede obtener con el empleo de las ecuaciones **(10)** y **(11)** porque depende de la permeabilidad que tenga el suelo. **(Tristá, J. G., et al. 2016)**

**(10)**

Se emplean los valores de índice de poros, que se obtiene a partir del modelo de Rojas y Alanís.

**(11)**

Dónde: es el índice de consolidación,  es la permeabilidad saturada, es el coeficiente de compresibilidad, es el peso específico de agua, , es la variación de relación de vacíos para variación de tensión,  **(Crespo 2006),(Tristá, J. G., et al. 2016)**

Para la obtención del tiempo hay que tener en cuenta la influencia del índice de consolidación, ecuación **(12)** o el grado de consolidación del suelo saturado. En los suelos parcialmente saturados el tiempo de consolidación se obtiene por la ecuación **(13)**, que es resultado de sustituir la ecuación **(11)** en la **(12)**, tomando en consideración la permeabilidad parcialmente saturada y la curva de compresibilidad cuando varía la succión en el suelo.

**(12)**

**(13)**

Dónde: es el índice de consolidación, trayectoria de drenaje promedio más larga durante la consolidación: si drena en 2 sentidos y si drena en un solo sentido( es el espesor del estrato), es el factor tiempo y depende del grado de consolidación U (%), es la permeabilidad del suelo parcialmente saturado y está en función de la succión, es el peso específico de agua, , es la variación de relación de vacíos para una variación de tensión  en la curva de compresibilidad del suelo parcialmente saturado y **(Crespo 2006),(Tristá, J. G., et al. 2016).**

**RESULTADO DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO**

**Granulometría, peso específico, límites de consistencia y ensayo de compactación**

Las muestras de suelo empleadas en el estudio pertenecen a un tramo del Canal Magistral (CM) Zaza - Ciego de Ávila, que se ubica aproximadamente a 2,7 km del asentamiento rural La Ofelia correspondiente al poblado Venezuela, situado entre las coordenadas geográficas: E: 721000; N: 213000 y E: 724000; N: 215000, según el sistema de proyección Cuba Norte; hoja cartográfica 4481-III-d (Venezuela) escala 1:25000 de la provincia de Ciego de Ávila. Los ensayos se realizaron siguiendo las especificaciones de las normativas vigentes, referidas a: determinación de la granulometría, límites de consistencia, peso específico, Proctor Estándar, consolidación y succión del suelo. Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 1.

Con los resultados de la granulometría y los límites de consistencia fue posible clasificar el suelo teniendo como resultado CH (Arcilla de alta compresibilidad) según el método de clasificación (SUCS).

Para el remoldeo de las muestras fue necesario la realización del ensayo Proctor Estándar, con lo que se obtuvo los valores de peso específico máximo y la humedad óptima, valores que sirvieron de referencia pues no se contaba con muestras inalteradas para el análisis.

**Tabla 1.** Propiedades del suelo

|  |
| --- |
| Parámetros |
| LL (%) | LP (%) | IP (%) | Gs | γd (kN/m3) | ω óptima (%) | Método de Clasificación |
| (SUCS) | (AASHTO) |
| 51,8 | 25,3 | 26,4 | 2,82 | 15,64 | 24,7 | CH(Arcilla de alta compresibilidad) | A-7-6(22) |

**Ensayo de consolidación**

La determinación de la curva de consolidación del suelo saturado (e vs σ **ʹ**), se realizó siguiendo las especificaciones de la normativa vigente para este tipo de ensayo. A continuación, se muestra la curva de compresibilidad del suelo para un 100% del grado de saturación. (Figura 2)

**Figura 2.** Curva de consolidación e vs σ **ʹ** para un 100% del grado de saturación.

Con la curva de compresibilidad en carga y descarga para un 100% del grado de saturación, se obtienen los parámetros k y λ en su tramo virgen, que son empleados en el modelo de Rojas y Alanís para la simulación de la curva de compresibilidad para distintos grados de saturación del suelo.

**Ensayo de succión**

Para determinar la succión del suelo y posteriormente la curva característica se empleó la técnica indirecta del papel de filtro, siguiendo las especificaciones de la normativa vigente para este tipo de ensayo. Las curvas experimentales para el suelo analizado se muestran a continuación con su rama en humedecimiento y en secado. (Figura 3)

**Figura 3.** Curvas de retención de agua del suelo para la succión matricial.

**SIMULACIÓN DE LAS CURVAS DE COMPRESIBILIDAD**

**Curva de compresibilidad del suelo**

En la determinación del tiempo de consolidación del suelo parcialmente saturado, es necesario la obtención de la curva de compresibilidad cuando varía la succión del suelo para distintos grados de saturación, por lo que a partir del modelo de Rojas y Alanís se obtienen los valores de κ zona elástica=-0,046 y λ zona plástica =-0,08 de la curva de compresibilidad para un 100% del grado de saturación. (Figura 4)

**Figura 4.** Simulación de la curva de compresibilidad con e=0,7642.

**Curva de conductividad hidráulica**

A partir de contar con la curva característica del suelo y luego de ser ajustada la misma por el modelo de Van Genuchten, se obtiene la curva de conductividad hidráulica para el suelo estudiado, figura 5, empleando las ecuaciones **(1)** - **(4)**, trabajando con la rama en secado de la curva característica del suelo.

**Figura 5.** Curvas de conductividad hidráulica empleando el modelo de Van Genuchten.

**3. Resultados y discusión**

**CASO DE ESTUDIO**

Para el caso de estudio se analiza la variación del tiempo de consolidación, cuando se producen cambios en la succión del suelo en el que se apoya una cimentación superficial como se observa en la figura 6, con una profundidad de cimentación de 1,5m. En el análisis se toma en consideración los datos de la tabla 2 y se considera un factor tiempo para un 90% del grado de consolidación, (Tv=0,848), así como los resultados obtenidos en la simulación de las curvas de compresibilidad (Figura 4) y de las curvas de conductividad hidráulica (Figura 5). Los resultados obtenidos para el suelo de Ciego de Ávila se muestran en la Figura 7.



**Figura 6.** Características geométricas de la cimentación empleada en el caso de estudio.

En la determinación de los tiempos se trabaja con los puntos superior, central e inferior del estrato que se analiza con (Ha=6m). Para la obtención de la variación de la tensión de la cimentación se empleó la ecuación (14). Siendo el peso específico seco máximo y  la humedad óptima del suelo obtenidos mediante el ensayo Proctor estándar (Tabla 1).

 **(14)**

**Tabla 2.** Datos del modelo de Rojas y Alanís para la obtención del tiempo de consolidación.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Sr (%) | Su (kPa) | ei | ef | Δe | eprom | γd (kN/m3) | γw (kN/m3) | ω (%) | H(m) | Δσ (kPa) |
| 100 | 0 | 0,7443 | 0,6654 | 0,0789 | 0,70485 | 15,64 | 9,81 | 24,7 | Superior | 1,5 | 29,25 |
| Central | 4,5 | 87,76 |
| Inferior | 7,5 | 146,27 |
| 98 | 3,76 | 0,7523 | 0,6966 | 0,0557 | 0,72445 | Superior | 1,5 | 29,25 |
| Central | 4,5 | 87,76 |
| Inferior | 7,5 | 146,27 |
| 92 | 17 | 0,7533 | 0,6975 | 0,0558 | 0,7254 | Superior | 1,5 | 29,25 |
| Central | 4,5 | 87,76 |
| Inferior | 7,5 | 146,27 |
| 85 | 75 | 0,7532 | 0,6976 | 0,0556 | 0,7254 | Superior | 1,5 | 29,25 |
| Central | 4,5 | 87,76 |
| Inferior | 7,5 | 146,27 |

**Figura 7.** Curva que relaciona el tiempo de consolidación vs la permeabilidad parcialmente saturada por el método de Van Genuchten – suelo Ciego de Ávila.

Como se puede apreciar en la Figura 7, a medida que disminuye la permeabilidad del suelo; en estado parcial de saturación se produce un aumento en la succión y en el tiempo de consolidación para cada uno de los puntos analizados en la cimentación superficial estudiada.

**4. Conclusiones**

* La permeabilidad del suelo se puede estimar de forma analítica cuando no se cuenta con el equipamiento necesario en los laboratorios para analizar los suelos en estado parcial de saturación, para ello es importante conocer la curva característica y el valor de permeabilidad saturada para el suelo que se estudia.
* El método de Van Genucthen, es válido para determinar la permeabilidad, en la figura 5 se puede observar como a medida que disminuye la permeabilidad del suelo se produce un aumento en la succión, lo cual constituye un aspecto fundamental para el estudio de los suelos parcialmente saturados.
* Con el aumento de la succión del suelo en estado parcial de saturación se produce un aumento del tiempo de consolidación del suelo además de provocar una disminución de la permeabilidad del suelo en estado parcial de saturación, siendo más notable a medida que disminuye el grado de consolidación del suelo.

**5. Referencias bibliográficas**

Alanís Araiza, A. O. (2012). "Deformación volumétrica de suelos no saturados."

Chae J., Kim B., Park S. and Kato S. (2010). “Effect of suction on unconfined compressive strength in partly saturated soils”. KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 14, no. 3, pp 281290. ISSN: 1976-3808. Publisher: Korea Society of Civil Engineering, Korea.

Crespo C. (2006). “Mecánica de suelos y cimentaciones”. Limusa Noriega. 5ta edición. ISBN: 968-18-0069-9.México.

Krishnapillai S. H. and Ravichandran N. (2011). “Improved soil-water characteristic curves and permeability functions for unsatured soils”.14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Toronto. Canadá.(Octubre 2011).

Pérez, N. (2006). Development of a protocol for the assessment of unsaturated soil properties.

Rojas, E. (2013). "La última pieza del rompecabezas: el comportamiento volumétrico de los suelos no saturados." Ciencia@ UAQ(2): 1-16.

Tristá J. G., Cobelo W., Quevedo G. y García C. (2015). “Comportamiento volumétrico de un suelo de la formación Capdevila en condiciones de saturación parcial”. Revista Cubana de Ingeniería, vol. VI, no. 2, pp. 5-15. ISSN: 2223-1781, La Habana, Cuba.

 Tristá, J. G., et al. (2016). " Relación entre tiempo de consolidación y permeabilidad no saturada en presas de tierra".Revista:Ingeniería Hidráulica y ambiental.Vol XXXVII 94–107.