

## Técnica constructiva de terraplenes húmedos y su aplicación en la geotecnia moderna

G. Gonzalo Carnero Guzmán<sup>1</sup>, Erasmo G. Carnero Carnero<sup>2</sup>

PhD Candidate, Monash University, Australia ([gonzalo.carnero.guzman@monash.edu](mailto:gonzalo.carnero.guzman@monash.edu))<sup>1</sup>  
Dr. Profesor Principal, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica ([ecarnero53@yahoo.es](mailto:ecarnero53@yahoo.es))<sup>2</sup>

### INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Art. Recibido 20/setiembre/2015  
Art. Aceptado 15/diciembre/2015  
online: 30/diciembre/2015

### PALABRAS CLAVE:

- \* Suelos quasi-saturado
- \* resistencia al cizallamiento
- \* succión
- \* tensiómetro de alta capacidad
- \* ensayos de laboratorio no saturados

### ARTICLE INFO

Article Received 20/september/2015  
Article Accepted 15/december/2015  
online:30/december/2015

### KEY WORDS:

- \* Quasi-saturated soils
- \* shear strength
- \* suction
- \* high capacity tensiometer
- \* unsaturated
- \* unsaturated laboratory tests

### RESUMEN

La compactación de suelos en lugares con elevada precipitación pluvial presenta dificultades que afectan los cronogramas físicos y financieros de las obras. Comúnmente, el suelo requiere ser secado cerca a la humedad óptima (+/- 3%), sin embargo, existe la posibilidad de emplear la técnica constructiva de «terraplenes húmedos» que consiste en compactar el suelo con humedades altas, en las cuales, el suelo se encuentra en el «estado quasi-saturado». Para poder emplear esta técnica, es importante conocer la succión que el suelo tendrá durante la construcción que puede ser obtenida en laboratorio mediante el tensiómetro de alta capacidad (HCT), equipo moderno que monitorea la succión en tiempo real. El presente trabajo realiza una revisión de las investigaciones ejecutadas por Marinho y Massad (2011) y Carnero (2014) ambas realizadas con un suelo residual de la Universidade de Sao Paulo, Brasil que fue estudiado ampliamente para conocer su comportamiento en condición no saturada. Los investigadores realizaron ensayos de confinamiento constante (PH), ensayos triaxiales en condición saturada (CU) y no saturada (CW). Los valores de succión de los ensayos PH y CW fueron obtenidos con el HCT y demostraron la eficiencia del equipo. La investigación concluye definiendo el valor de presión de positividad, los parámetros de resistencia efectivos, las ecuaciones de resistencia no saturada según Bishop (1959) y Fredlund et al. (1978) y la representación tridimensional de resistencia en condición no saturada.

### CONSTRUCTIVE TECHNIQUE OF WET FILLS AND ITS APPLICATION IN MODERN GEOTECHNICS

### ABSTRACT

The compaction of soils in places with high rainfall has problems that affects the physical and financial schedule of works. Commonly, the soils requires to be dry in the vicinity of the optimum water content (+/-3 %), however, there is the possibility to use the constructive technique of «wet fills» consisting in compact the soils with high moisture values, in which, the soils is the «quasi-saturated state». To employ this technique, it is important to know the soil suction during the construction, which it may be obtained in laboratory using the high capacity tensiometer (HCT), modern equipment that monitors the suction in real time. The present work makes a revision of the investigations conducted by Marinho y Massad (2011) and Carnero (2014), both performed with a residual soil from the Universidade de Sao Paulo, Brasil which was broadly studied in order to know its behaviour in unsaturated condition. The researchers conducted constant confined test (PH), saturated (CU) and unsaturated (CW) triaxial tests. The values of suction of the PH and CW tests were obtained by the HCT and validated the equipment efficiency. The research concluded defining the positivation pressure value, the effective strength parameters, the equations of unsaturated resistance according to Bishop (1959) and Fredlund et al. (1978) and the resistance three-dimensional representation in unsaturated condition.

## INTRODUCCIÓN

Cuando se construyen los terraplenes bajo un control tradicional y en regiones con periodos prolongados de precipitación pluviométrica, el suelo a ser compactado exige un trabajo de reducción de la humedad natural. Diferentes normativas a nivel mundial limitan el uso del suelo considerando que el suelo debe ser compactado con no más de 3% de la humedad óptima, en algunos casos incluso se limita a 2%, sin embargo, estas normas fueron establecidas basadas en experiencias constructivas en lugares no tropicales. En zonas tropicales como la selva peruana es necesario incluir una nueva óptica para economizar en las obras y reducir el tiempo de ejecución. Debido a esto, es importante realizar las siguientes interrogantes sobre el comportamiento del suelo cuando este es compactado con contenidos de humedad superiores a los valores conservadores:

1. ¿Cuál es la implicancia en el comportamiento mecánico de compactar el suelo con contenido de humedad elevado?
2. ¿Cuáles son los procedimientos de laboratorio necesarios para evaluar el comportamiento del suelo compactado con humedades elevadas?

El presente artículo presenta una revisión del método de «terraplenes húmedos» que fue aplicado con éxitos en diferentes partes del mundo. Aplicando las informaciones de la literatura mundial, se presenta el análisis de dos estudios ejecutados por Marinho y Massad (2011) y Carnero (2014) sobre el diseño de terraplenes húmedos con un suelo residual de la ciudad de Sao Paulo – Brasil, sus resultados son complementarios y sirven como referencia de estudios necesarios en el diseño de terraplenes húmedos.

### Mecánica de suelos no saturados

La mecánica de suelos tradicional, tal como la concibió Karl Terzaghi en los años 30, se desarrolló sobre la hipótesis de que el suelo se encuentra en uno de los siguientes casos límite: completamente seco o completamente saturado (los poros del suelo se encuentran rellenos de un único fluido: aire, agua u otro). A través de esta hipótesis, una enorme simplificación fue conseguida para el estudio teórico y experimental del comportamiento del suelo. Sin embargo, un suelo totalmente seco o saturado rara vez se encuentra en la realidad, empero, dos fluidos suelen dividir los vacíos existentes en la estructura del suelo. Esta condición, genera que ciertos fenómenos ocurran en el suelo

relacionados a la tensión superficial (succión, ascenso capilar, etc.) y los cambios de estado de fluidos (Fredlund y Rahardjo, 1993). El estudio en detalle de estos fenómenos es el campo de la Mecánica de Suelos No Saturados, y si bien para muchas aplicaciones de la geotecnia, este estudio detallado puede obviarse, existen escenarios donde su aplicación es relevante. Como ejemplos pueden citarse estudios con suelos expansivos, el colapso por humedecimiento, los suelos compactados, diseño de barreras de ingeniería, transporte de contaminantes, comportamiento térmico de suelos y el estudio de otros materiales porosos como rocas arcillosas o los geosintéticos.

### Succión

Marinho (2005) definió que la succión es la energía con que un elemento poroso absorbe el agua cuando esta se encuentra libre para moverse. El autor asoció esta característica a la mineralogía, densidad y contenido de humedad del suelo. La succión, también llamada de succión total ( $\psi$ ), está compuesta de dos partes: succión matricial y succión osmótica. La primera está relacionada al tipo de partícula y el ordenamiento estructural del suelo; cuantitativamente, está definida por la diferencia entre la presión atmosférica y la presión de agua (presión neutra) que existe en los poros del suelo. La succión osmótica se da debido a la presencia de sales y otras sustancias disueltas en el agua del suelo. En los estudios relacionados al comportamiento mecánico del suelo se analiza principalmente la succión matricial, y termina siendo llamada únicamente de succión. Debido a esta implicación, la succión viene a ser la presión neutra negativa que existe en el suelo, pensando en valor absoluto, cuanto más seco se encuentra el suelo, mayor es el valor de succión presente y actúa a favor de la resistencia del suelo cuando este es sometido a presiones externas.

### Comportamiento quasi-saturado

Los suelos no saturados pueden contener la fase de aire en dos estados diferentes: abierto y ocluido. Diversos autores (e.g. Mello, 1958; Casagrande y Hirschfeld, 1960; Olson, 1963; Langfelder et al. 1968; Cruz y Ferreira, 1993) estudiaron como ambos estados afectan las propiedades mecánicas de los suelos. Cruz (1996) definió como suelo quasi-saturado aquel que presenta suficiente cantidad de agua en su interior que aísla el aire de los vacíos en formas de bolas discontinuas. Shahu et al (1999) definen que estos suelos presentan un comportamiento mecánico similar a un suelo saturado. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los suelos no saturados pueden presentar dos comportamientos en términos

mecánicos dependiendo del nivel de succión, un comportamiento «no saturado» o «quasi-saturado», de acuerdo al tipo de fase de aire, abierta y ocluida respectivamente. La transición entre ellos se define de acuerdo a los trabajos presentados por White et al. (1970) y Vanapalli et al. (1996). Utilizando la curva de retención del suelo (WRC) (Figura 1), los autores definieron cuatro zonas asociadas con el grado de desaturación: zona de efecto frontera, zona de transición primaria, zona de transición secundaria, y zona residual. La zona de efecto frontera presenta grados de saturación próximos al 100%, con la fase de agua en estado continuo y la fase de aire en estado ocluido. Basados en esta clasificación, el estado quasi-saturado representa la zona de efecto frontera. El uso de la WRC propuesta por Vanapalli et al (1996) se presenta como un método más práctico y preciso para definir la transición entre los estados «no saturado» y «quasi-saturado» que se encuentra definida por la «entrada de aire generalizada», como se presenta en la Figura 1. El método constructivo de los terraplenes húmedos consiste en compactar el suelo con humedades elevadas (estado quasi-saturado) que poseen succiones inferiores al valor de entrada de aire. Por este motivo, ensayos de laboratorio son importantes para definir la succión inicial del terraplén.

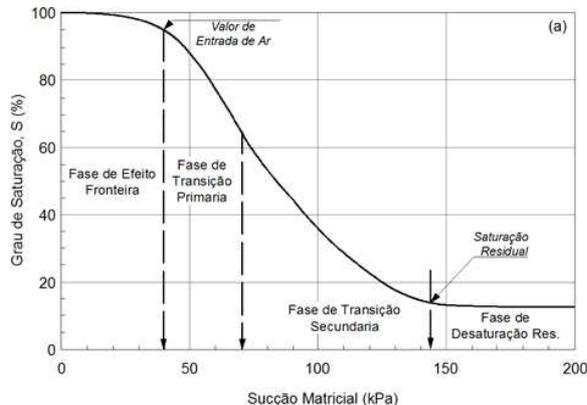


Figura 1 - Curva de retención de agua hipotética de un suelo dividida en las diferentes fases de desaturación (modificado de Vanapalli et al. 1996).

## MATERIALES Y MÉTODOS

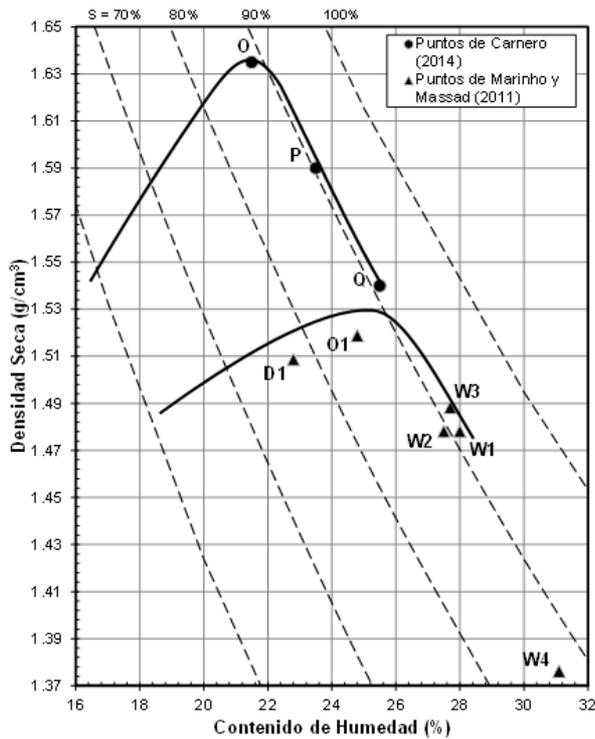
### Caracterización del suelo empleado en las investigaciones

El suelo empleado en los estudios conducidos por Marinho y Massad (2011) y Carnero (2014) fue obtenido del campus experimental de la Universidade de Sao Paulo, Brasil. El lugar para retirar el suelo fue un talud de suelo residual de gneis con una composición principalmente de arena limosa micácea con núcleos de

caolín derivados de feldespato y pequeñas venas de cuarzo. Fueron ejecutados los ensayos de caracterización del suelo, como son: masa específica de los granos, límite de liquidez, límite de plasticidad y análisis granulométrico. Juntamente con estos, se realizó los ensayos de compactación con Proctor Estándar en ambas investigaciones, la Tabla 1 presenta las características del suelo y la Figura 2 presenta las curvas de compactación. A pesar de la similitud de los resultados de ensayos de caracterización, las curvas de compactación y sus parámetros (humedad óptima y densidad seca máxima) difieren una de otra, sin embargo, ABEF (1989) obtuvo diversas curvas de compactación para el mismo suelo estudiado y obtuvo densidades secas máximas entre 1.53 y 1.68 g/cm<sup>3</sup> con humedades óptimas entre 19 y 24%. Las curvas de compactación de Marinho y Massad (2011) y Carnero (2014) yacen dentro de estos valores, y estas variaciones son comúnmente encontradas en suelos residuales. Los puntos de estudio de la investigación de Marinho y Massad (2011) yacen tanto en el ramo húmedo como en el ramo seco y la humedad óptima, por otro lado, el punto W4 fue definido extrapolando la curva de compactación para estudiar el efecto de la humedad «+6.1% de la óptima». La investigación de Carnero (2014) definió tres puntos de estudio: la humedad óptima (21.5%), +2% y +4% arriba de la óptima respectivamente. La Tabla 2 presenta las características físicas de los puntos de estudio. La succión fue obtenida usando el tensiómetro de alta capacidad (HCT) el cual consiste en un transductor es tipo Entram EPX, mayores detalles pueden ser encontrados en Ridley y Burland (1993), Marinho (1998) y Carnero (2014).

Tabla 1 - Caracterización del suelo empleados en las investigaciones de Marinho y Massad (2011) y Carnero (2014) y parámetros de compactación obtenidos.

Investigaciones	SUCS	Dens. Granos (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	IP (%)	W <sub>opt</sub> (%)	γ <sub>seca max</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
Marinho y Massad (2011)	ML	2.71	47	13	25	1.530
Carnero (2014)	ML	2.71	48	19	21.5	1.635



**Figura 2 - Curva de compactación del suelo estudiado por los investigadores con los puntos de estudio que determinan las condiciones iniciales de las muestras utilizadas.**

**Tabla 2 - Características físicas de los puntos de estudio.**

Puntos	w (%)	$\gamma$ seca (g/cm <sup>3</sup> )	S (%)	Succión inicial (kPa)
<b>Puntos de Marinho y Massad (2011)</b>				
D1	22.8	1.49	76	206
O1	24.8	1.51	84	108
W1	28.0	1.52	90	42
W2	27.5	1.53	88	40
W3	27.7	1.52	89	38
W4	31.1	1.48	87	14
<b>Puntos de Carnero (2014)</b>				
O	21.5	1.64	88.6	132
P	23.5	1.59	90.4	98
Q	25.5	1.54	90.3	63

### Ensayos de laboratorio especiales

En cada punto de estudio fueron ejecutados ensayos especiales de resistencia. A continuación se detalla el método de los ensayos.

#### a) Ensayos de confinamiento constante (PH)

Marinho y Massad (2011) ejecutaron un ensayo PH en cada punto de estudio: D1, O1, W1, W2, W3 y W4 de la Figura 2. A lo largo del ensayo, la succión fue medida

usando el HCT. El ensayo se ejecuta en una cámara triaxial y consiste en realizar incrementos de tensión confinante impidiendo el drenaje de agua, de modo que se genera exceso de presión de agua como respuesta a la carga. Cuando las presiones de agua en el suelo se convierten en positivas (eliminación de la succión), la tensión alcanzada se llama «presión de positividad» el cual sirve como parámetro en el diseño de terraplenes.

#### b) Ensayos triaxiales saturados (CU)

Fueron realizados ensayos en condición saturada (CU) para obtener los parámetros efectivos del suelo ( $c'$  y  $\phi'$ ) en el estudio de Carnero (2014). Tres ensayos con diferentes confinantes (50, 100 y 200 kPa) fueron ejecutados en cada punto de estudio (O, P y Q de la Figura 2). Las muestras fueron saturadas mediante percolación de agua con una carga de 20 kPa durante la fase de consolidación para luego iniciar la fase de cizallamiento sin drenaje y con succión igual a cero.

#### c) Ensayos triaxiales no saturados (CW)

Los ensayos no saturados fueron ejecutados para obtener la influencia de la succión sobre la resistencia en el estudio de Carnero (2014). Tres ensayos con diferentes confinantes (50, 100 y 200 kPa) fueron realizados en cada punto de estudio (O, P y Q de la Figura 2). La succión fue medida a lo largo de todo el ensayo mediante el HCT ubicado en la base de la cámara triaxial.

## RESULTADOS

#### Ensayos de confinamiento constante (PH)

La Figura 3 presenta los resultados donde se observa la respuesta de la presión de agua debido al incremento de la presión isotrópica. Una carga equivalente, asumiendo un peso unitario de 20 kN/m<sup>3</sup>, se encuentra como referencia en el eje superior de la figura. Los resultados de los seis ensayos muestran el efecto de la succión inicial (o grado de saturación) sobre la respuesta de presión de agua, cuanto más seca la muestra, mayor el valor de la succión inicial y mayor la presión necesaria para alcanzar valores positivos. La figura presenta la succión en la zona negativa de la presión de poros, para apreciar el efecto de positividad que tienen las cargas.

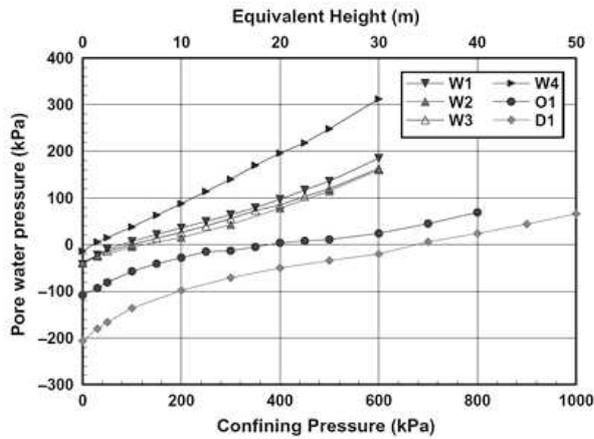
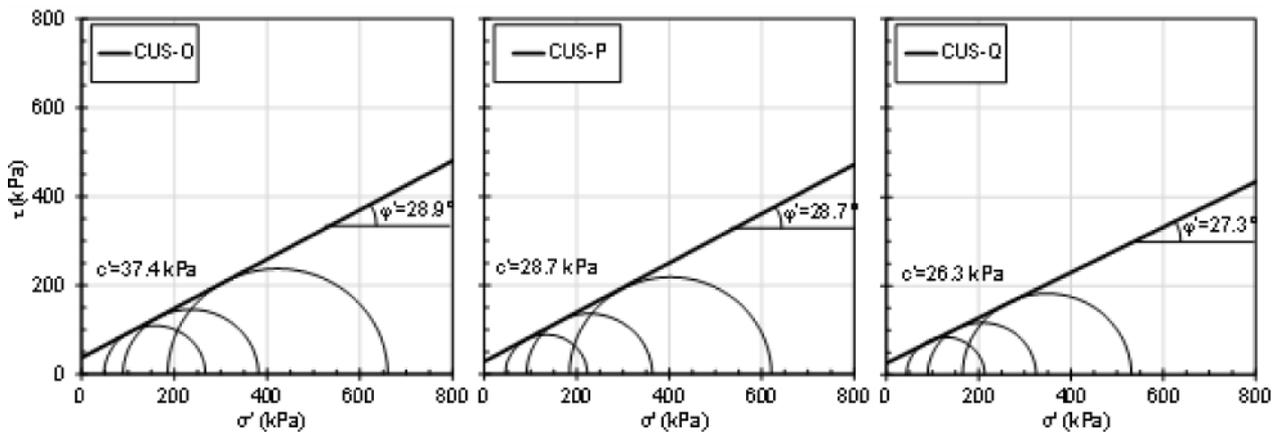


Figura 3 - Respuesta de la presión de agua debido a la aplicación de tensión confinante (Marinho y Massad, 2011).

### Ensayos triaxiales saturados (CU)

La Figura 4 muestra las envoltorias de resistencia obtenidas para los tres puntos de estudio acompañadas de sus respectivos parámetros de resistencia efectivos ( $c'$  y  $\phi'$ ). Es notorio que cuanto más seco es el suelo, mayor es la cohesión efectiva, en cuanto que el ángulo de fricción no varía considerablemente, lo que muestra que la cohesión es sensible a los cambios de humedad y la densidad seca, en cuanto que el ángulo de fricción es una propiedad ligada a la estructura del suelo (floculado o disperso).

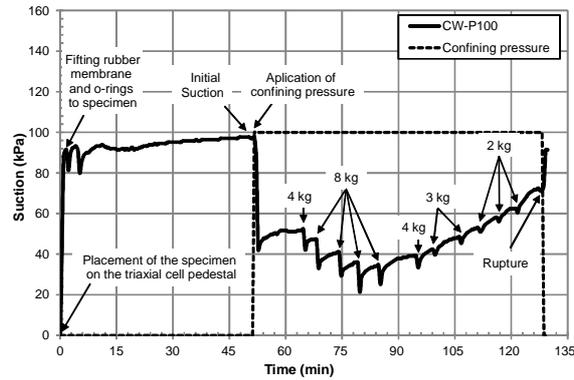
Figura 4 - Envoltorias de resistencia obtenidas en base a los círculos de Mohr para los tres puntos de estudio (O, P y Q) (modificado de Carnero, 2014).



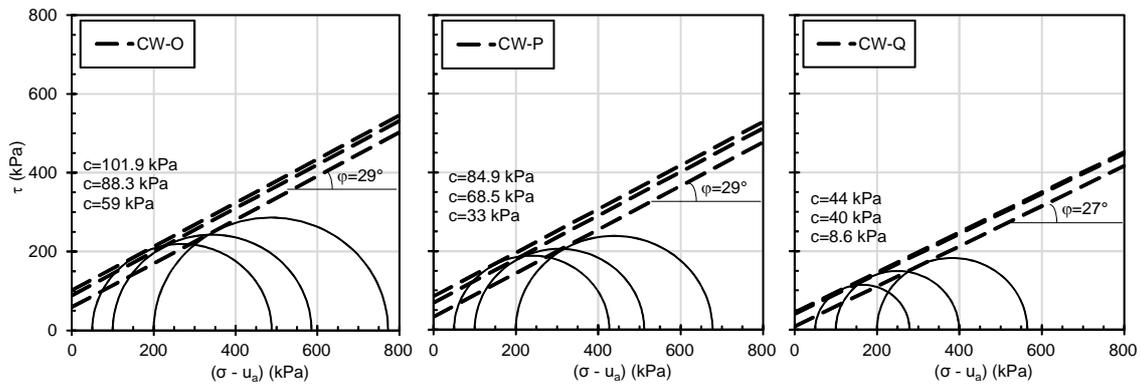
### Ensayos triaxiales no saturados (CW)

Los ensayos no saturados pueden ser ejecutados usando la técnica de translación de ejes (ATT) o mediante el uso del HCT. La mayor ventaja del HCT es el monitoreo de la succión a lo largo de todo el ensayo. La Figura 5.8 presenta las variaciones de la succión a lo largo del ensayo CW en la muestra CW-P100. Puede observarse que la succión se reduce cada vez que se aplican cargas. Después de la aplicación de las mismas, la succión se incrementa hasta tender a estabilizarse, finalmente, cuando la muestra alcanza la ruptura la succión se incrementa violentamente como respuesta a tratar de mantener el estado de tensiones en el suelo. Informaciones como las presentadas en la figura no pueden ser obtenidas mediante el ATT, por lo cual, el HCT es una herramienta de gran utilidad para la

investigación geotécnica. Por otro lado, cuando el suelo posee succión, los círculos de Mohr no pueden ser tangenciados por un único plano como se realizó en la Figura 4 pues cada círculo de Mohr se encuentra en una posición espacial diferente definido por los tres planos (tensión normal, succión y tensión cizallante). Debido a esto, cuando el suelo posee succión, los ensayos triaxiales proveen la «cohesión aparente del material». Para obtener la cohesión aparente, la cual se relaciona al incremento de cohesión debido a la succión del suelo, a cada círculo de Mohr de los ensayos CW se debe tangenciar líneas con un ángulo igual a  $\phi'$  obtenido a través de los ensayos saturados (CU). La Figura 5 muestra este análisis y los valores de cohesión aparente para cada ensayo en cada punto de estudio. Se observa que cuanto menor es la confinante aplicada, la succión inicial es mayor, lo cual incrementa la cohesión aparente.



**Figura 5-** Monitoreo de la succión a lo largo del ensayo CW, desde la colocación de la muestra en la cámara triaxial hasta la ruptura de la misma (Carnero y Marinho, 2015).



**Figura 6 -** Obtención de la cohesión aparente del suelo para los tres puntos de estudio mediante los ensayos no saturados (CW).

## DISCUSIÓN

### Presión de positación y ensayos PH

De acuerdo a la información de la Figura 3, se concluye que las muestras compactadas en el ramo seco de la curva de compactación comenzaron los ensayos con succiones de aproximadamente de 200 kPa y la muestra W4 (+6% de la humedad óptima) presentaba succión de 14 kPa. La tensión confinante, en la cual la presión de agua se vuelve cero (presión de positación) es directamente proporcional a la succión inicial de la muestra. Si el suelo es compactado con +3% de la humedad óptima, el terraplén puede soportar una presión de 130 kPa lo que representa 6.5m de terraplén compactado. La muestra compactada con +6% de la humedad óptima requirió 30 kPa para anular la succión equivalente a 1.5m de terraplén construido. Estas alturas

de terraplén son comúnmente alcanzadas en carreteras y obras viales, por lo cual, la investigación de Marinho y Massad (2011) muestra que la ejecución de terraplenes húmedos es posible para este orden de alturas de terraplén.

### Análisis integrado de los ensayos saturados (CU) y no saturados (CW)

Los resultados en términos de resistencia de los ensayos triaxiales pueden brindar relevante información sobre el comportamiento no saturado del material. Existen dos análisis posibles a ser ejecutados basados en las ecuaciones de resistencia no saturada propuestas por Bishop (1959) y Fredlund et al. (1978) respectivamente (mayor información puede ser encontrada en Carnero, 2014). Para utilizar la ecuación de Bishop (1959), debe ser definido el valor de  $\chi$  en la ecuación. Debido a que el

suelo se encuentra en el estado quasi-saturado (mencionado en el ítem 1.3), se asume que  $\chi=1$ , para validar este principio, se comprobó que los círculos de Mohr presentados en la Figura 6 deben tangenciar la envoltoria saturada definida mediante los ensayos CU. Carnero (2014) realizó un estudio analítico para evaluar la precisión de asumir  $\chi = 1$ , como resultado de este análisis, se validó la hipótesis asumida con éxito. La Tabla 3 presenta las ecuaciones de resistencia del suelo en condición no saturada para los tres puntos de estudios de Carnero (2014) (O, P y Q). Puede observarse que la presión total y la succión se encuentran como variables internas de  $\varphi^a$  cuando  $\chi=1$  como el caso de los tres puntos de estudio presentados por Carnero (2014).

**Tabla 3 - Ecuaciones de resistencia definidas mediante la interacción de los Procedimientos 1 y 2 empleando la ecuación de Bishop (1959) (Carnero, 2014).**

Punto de Estudio	Umidade de moldagem	Ecuación Bishop (1959)
O	$W_{opt} = 21.5\%$	$\tau = 37.4kPa + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)]\tan 29^\circ$
P	$W = 23.5\%$	$\tau = 28.8kPa + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)]\tan 29^\circ$
Q	$W = 25.5\%$	$\tau = 26.3kPa + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)]\tan 27^\circ$

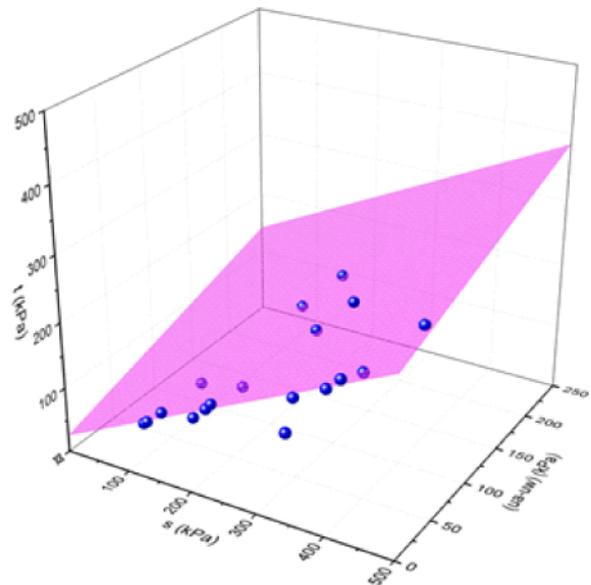
Opuesto al principio aplicado por Bishop (1959), la ecuación de Fredlund et al. (1978) permite que la tensión total y la succión dependan de ángulos diferentes ( $\varphi^a$  y  $\varphi^b$  respectivamente) mediante lo cual la resistencia no

saturada se define en tres planos espaciales. El ángulo  $\varphi^b$  es constante únicamente hasta alcanzar el valor de la «entrada de aire generalizada», por lo cual, Carnero (2014) definió mediante la obtención de las curvas de retención de agua (WRC) que este valor es 150 kPa. El autor obtuvo superficies de resistencia tridimensionales hasta este valor de succión de la «entrada de aire generalizada» mediante un análisis estadístico en el software Origin 2015. La Tabla 4 presenta los resultados de dicho análisis en base a diferentes combinaciones entre los resultados de los ensayos saturados y no saturados. Para los casos 3, 4 y 5, que corresponden a las superficies de resistencia de cada punto de estudio, se fijaron los parámetros efectivos en función a los ensayos CU en el análisis estadístico. Carnero (2014) observó que la diferencia entre los parámetros de resistencia del punto óptimo con el ramo húmedo (+2 y +4% arriba de la óptima) podían ser interpretados conjuntamente para crear el modelo 3D del suelo, representado en los casos 1 y 2. En el caso 1 únicamente se usó los ensayos no saturados (CW) para crear la superficie, la cohesión efectiva se reduce a

3.6 kPa y el valor de  $\varphi^b$  supera al de  $\varphi^a$ , lo cual no es congruente con el modelo teórico de Fredlund et al. (1978). El caso 2 (presentado en la Figura 7) utiliza todos los ensayos CU y CW y como resultado se obtuvo un único grupo de parámetros de resistencia no saturada del suelo:  $c' = 23.9kPa$ ,  $\varphi^a = 29.8^\circ$  y  $\varphi^b = 28.3^\circ$ . Comparando estos dos últimos casos, el autor recomienda realizar ensayos saturados y no saturados a fin de obtener valores más precisos para definir la resistencia no saturada del suelo estudiado. Cabe resaltar que los 5 casos de estudio tienen elevados valores de coeficiente de correlación ( $r^2$ ) que refuerza el postulado de la linealidad del efecto de la succión sobre la resistencia en suelos quasi-saturados.

**Tabla 4 - Resultados de los análisis estadísticos para las superficies de resistencia de los puntos de estudio de Carnero (2014) (Carnero y Marinho, 2015).**

Case	Type of test	Testing points	$\varphi^a$ (°)	$\varphi^b$ (°)	$c'$ (kPa)	$r^2$
1	CW	O, P, Q	32.0	33.3	3.6	0.992
2	CW and CIU	O, P, Q	29.8	28.3	23.9	0.989
3	CW and CIU	O	28.9	26.2	37.4	0.997
4	CW and CIU	P	28.7	27.0	28.6	0.999
5	CW and CIU	Q	27.3	23.9	26.1	0.991



**Figura 7 - Superficie de resistencia generada a partir de los ensayos saturados y no saturados efectuados en los tres puntos de estudio (modificado de Carnero, 2014).**

En base a la obtención de los parámetros no saturados del suelo, puede postularse diversos escenarios de

construcción de terraplenes húmedos. Por ejemplo, si el terraplén es construido con suelo +4% de humedad sobre la óptima (punto de estudio Q), puede esperarse que el suelo posea una succión inicial en torno a 60 kPa, si sobre el mismo se construyen 5m de terraplén (100 kPa de confinamiento), se puede reemplazar los valores en la ecuación de Fredlund et al (1978) definida para el punto Q en la ecuación 1 a seguir:

$$\tau_{\text{punto Q}} = 26.4 \text{ kPa} + (100 \text{ kPa})\tan 27.3^\circ + (60 \text{ kPa})\tan 23.9^\circ \quad (1)$$

Como resultado, se obtiene que la resistencia al cizallamiento no saturada para esas condiciones es  $\tau_{\text{punto Q}} = 105 \text{ kPa}$ , lo que significa que el suelo puede soportar una tensión cizallante de la misma magnitud que el nivel de confinamiento al cual es sometido. El caso presentado en este cálculo puede ser considerado como el peor escenario de los puntos de estudio de los investigadores, por lo tanto, puede concluirse que la construcción de terraplenes húmedos con el suelo residual estudiado ofrece seguridad para el diseño debido a que el nivel de presiones de agua es muy inferior comparado con aproximaciones empíricas tradicionales. Estos resultados se traducen en ahorro de costos y tiempo pues el suelo no requiere ser secado para garantizar la seguridad de la obra.

## CONCLUSIONES

El suelo residual de la Universidade de Sao Paulo, Brasil fue estudiado para analizar el efecto en el comportamiento mecánico cuando es compactado en el ramo húmedo, en el estado conocido como «quasi-saturado». Mediante la revisión de los estudios realizados por Marinho y Massad (2011) y Carnero (2014) se obtuvo las siguientes conclusiones:

Los ensayos PH ejecutados por Marinho y Massad (2011) mostraron que el suelo compactado en el ramo húmedo con humedades entre +3 y +6% posee succión inicial considerable, la que permite que el terraplén soporte entre 130 y 30 kPa de carga antes de llegar a la «positivización», lo que representa un terraplén entre 6.5 y 1.5m de altura.

Mediante los ensayos triaxiales saturados (CU) fueron obtenidos los parámetros de resistencia efectiva para las tres humedades de estudio (humedad óptima, +2% y +4% de la humedad óptima respectivamente). El ángulo de fricción ( $\varphi'$ ) mantuvo un valor casi constante, en cuanto que la cohesión efectiva se incrementó con la reducción de la humedad inicial.

En el estudio de Carnero (2014), se obtuvo las ecuaciones de resistencia al cizallamiento no saturada basada en Bishop (1959) y Fredlund et al. (1978) gracias al empleo conjunto de los ensayos triaxiales saturados (CU) y no saturados (CW). Usando el principio de que el suelo se encontraba en estado quasi-saturado, se definió  $\chi = 1$  en las ecuaciones basadas en Bishop (1959). Los datos experimentales tuvieron concordancia con la hipótesis asumida.

Mediante un análisis estadístico en Origin 2015, fue definido el plano en 3 dimensiones para la obtención de los parámetros de la ecuación basada en Fredlund et al. (1978). Se obtuvo elevados coeficientes de correlación ( $r^2$ ), lo que refuerza el postulado de la linealidad del efecto de la succión sobre la resistencia en suelos quasi-saturados representado por un único valor del parámetro  $\varphi^b$ .

Se definieron parámetros de resistencia generalizados usando los ensayos de los tres puntos de estudio debido a que presentan diferencias pequeñas entre sus parámetros independientes, por lo cual, el grupo de parámetros de resistencia para los tres puntos de estudios es:  $c' = 23.9 \text{ kPa}$ ,  $\varphi' = 29.8^\circ$  y  $\varphi^b = 28.3^\circ$ .

Mediante los resultados presentados se define que si el proceso de saturación del terraplén es controlado debidamente y no se permite que el suelo se sature completamente, el método constructivo de los terraplenes húmedos brinda seguridad y economía en el diseño de proyectos en condiciones de humedad elevadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE) (1989) **Research on Foundation Engineering**. Publicado no XII ICMF.
- BISHOP, A. W. (1959) **The principle of effective stress**. In: Teknisk Ukeblad, v.106, n.39, p. 859-863,
- CARNERO, G. G. (2014) **Contribution to the study of the behavior of a quasi-saturated unsaturated compacted soil**. MSc dissertation, University of São Paulo, São Paulo, Brazil, (In Portuguese). 229p.

- CARNERO, G. G.; MARINHO F.A.M. (2015) **Behavior of a Compacted Residual Soil at a Quasi-Saturated State**. XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Buenos Aires, Argentina. (Under printing process).
- CASAGRANDE, A.; HIRSCHFELD, R. C. (1960) **Stress-Deformation and Strength Characteristics of a Clay Compacted to a Constant Dry Unit Weight**. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, Colorado, p. 359-417.
- CRUZ, P. T.; FERREIRA, R. C. (1993) **Aterros compactados. Solos do Interior de São Paulo**. ABMS, USP/SC, p. 277-313.
- FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. WIDGER, R. A. (1978) **The shear strength of unsaturated soils**. Canadian Geotechnical Journal, v.15, n.3, p. 313-321.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. (1993) **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley & Sons, New York, 517p.
- LANGFELDER, L. J., CHEN, C. F.; JUSTICE, J. A. (1968) **Air permeability of compacted cohesive soils**. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.94, n.4, p. 981-1001.
- MARINHO, F.A. M. (1998) **Introdução ao comportamento de solos não saturados**. Minicurso ministrado durante o XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Brasília.
- MARINHO, F. A. M. (2005) **Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados**. Concurso de Livre-Docência (Geomecânica). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 201p.
- MARINHO, F. A. M.; MASSAD, F. (2011) **Behaviour of wet fill using residual soil**. In: ALONSO e GENS (eds). Unsaturated Soils. London, Taylor & Francis Group, p. 1419-1424.
- MELLO, V. F. B. (1958) **Propriedades geotécnicas dos solos argilosos compactados**. II Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Campina Grande, v.2, p. 201-226.
- OLSON, R. E. (1963) **Effective stress theory of soil compaction**. Journal of Soil Geomechanics and Foundations Division, ASCE, n.89, v.2, p. 27-45.
- RIDLEY, A. M.; BURLAND, J. B. (1993) **A new instrument of the measurement of soil moisture suction**. Géotechnique, v.43, n.2, p. 321-324.
- SHAHU, J. T.; YUDHBIR; KAMESWARARAO, N. S. V. (1999) **Effective stress behavior of quasi-saturated compacted cohesive soils**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.125, p. 322-329.
- VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUF AHL, D. E.; CLIFTON, A. W. (1996) **Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction**. Canadian Geotechnical Journal, v. 33, p. 379-392.
- WHITE, N. F.; DUKE, H. R.; DUNADA, D. K.; COREY, A. T. (1970) **Physics of desaturation in porous materials**. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, v.96, p. 165-191.

**NOTA: La bibliografía fue realizada usando el método APA, la cual es la más usada en el área de ingeniería.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO**  
**ESCUELA DE POST GRADO - MAESTRIAS Y PROGRAMAS**

<b>MAESTRIA</b>	<b>MENCION</b>
MAESTRÍA EN DERECHO	Derecho Administrativo y Gerencia Pública.
	Derecho Constitucional y Derechos Humanos.
	Derecho Civil.
	Derecho Penal.
MAESTRÍA EN ECONOMÍA	Proyectos de Inversión.
	Gerencia de Proyectos.
	Planificación y Gestión Pública.
MAESTRÍA EN CONTABILIDAD Y ADMINISTRACIÓN	Auditoría y Tributación
	Gestión Pública.
	Auditoría Integral.
	Gestión Tributaria.
MAESTRÍA EN LINGÜÍSTICA ANDINA Y	Administración y Finanzas.
	Lingüística Andina y Educación.
MAESTRÍA EN CIENCIA ANIMAL	Producción Animal
	Reproducción Animal
	Salud Animal
MAESTRIA EN DESARROLLO RURAL	Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente.
	Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente..
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS	Agricultura Sostenible y Manejo de Pastizales.
	Agroindustrias y Bioprocesos.
	Sistemas de Información Geográfica y Protección
MAESTRÍA EN CIENCIAS: INGENIERÍA QUÍMICA	Ingeniería Química.
	Seguridad Industrial y Ambiental.
	Ingeniería Química Ambiental.
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA NUTRICIÓN	Gerencia de Programas y Seguridad Alimentaria.
	Nutrición Clínica.
	Nutrición Pública.
MAESTRIA EN GEOTECNIA Y GEOMECANICA	Geotecnia y Geomecanica Minera
MAESTRÍA EN TRABAJO SOCIAL	Trabajo Social
MAESTRIA EN TECNOLOGÍAS DE PROTECCIÓN	Tecnologías de Protección Ambiental
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA	Ingeniería De Recursos Hídricos
	Ingeniería Ambiental
	Gestión y Auditoría Ambiental
MAESTRÍA EN EDUCACIÓN	Didáctica de la Educación Superior
	Administración de la Educación
	Didáctica de la Matemática
	Didáctica de las Ciencias Sociales
	Matemática y Comunicación en Educación Primaria
	Ciencias del Deporte
	Educación Inicial y Primera Infancia
	Educación Especial
	Educación Intercultural Bilingüe
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA	Ecología Y Gestión Ambiental
	Acuicultura
	Evaluación del Impacto Ambiental.
MAESTRÍA EN SALUD PÚBLICA	Epidemiología,
	Salud y Desarrollo,
	Dirección y Gestión de Servicios de Salud
	Investigación Cuantitativa y Cualitativa en Salud
MAESTRÍA EN INFORMÁTICA	Ingeniería de Software.
	Gerencias de tecnologías de la Información y las Informática Educativa.
	Matemática Computacional.
MAESTRIA EN CIENCIAS SOCIALES	Relaciones Comunitarias y Resolución de Conflictos
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA	Gestión Pública y Desarrollo Local
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA	Arquitectura
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS	Ingeniería de Sistemas
fuentes	<a href="http://www.unap.edu.pe/postgrado/escuelas/maestria">http://www.unap.edu.pe/postgrado/escuelas/maestria</a>