

## INTEGRACIÓN 3-D DE LAS PROPIEDADES INGENIERILES DEL SUELO Y LA IMPORTANCIA DEL PLANO, $\tau$ - $e$

Heriberto Echezurúa

*Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (CIDI), Universidad Católica Andrés Bello*  
hchezur@ucab.edu.ve

### RESUMEN

Se demuestra la existencia de un modelo integrado tridimensional de las propiedades ingenieriles y básicas de los suelos que controla su respuesta al corte. El modelo confirma el principio de que cualquier cambio en alguna de las propiedades básicas o ingenieriles tiene un efecto en las demás propiedades del suelo. Así, es posible combinar los planos que definen el comportamiento convencional del suelo, a saber:  $\sigma' - \tau$  y  $e - \sigma'$  en un espacio común que conduce a la aparición del plano,  $\tau$ - $e$ . También se demuestra que este nuevo plano,  $\tau$ - $e$ , controla la resistencia al corte tanto para condiciones normalmente consolidadas como sobre consolidadas. La verificación del modelo utilizando valores experimentales existentes en la literatura permite establecer su robustez para aplicación en procesos de caracterización geotécnica..

*Palabras Clave: modelo 3-D, suelos, propiedades índices, parámetros de ingeniería, resistencia al corte, no drenado, caracterización geotécnica*

### ABSTRACT

The existence of a three dimensional model which integrates the soil volumetric and engineering properties is demonstrated. The model confirms that any change in a given soil parameter affects the other parameters. Consequently, it is possible to integrate the planes which define the conventional soil behavior which are treated separately, i.e.  $\sigma' - \tau$  and  $e - \sigma'$  into a common space which defines the appearance of the,  $\tau$ - $e$ , plane. It is also demonstrated that this new,  $\tau$ - $e$ , plane controls the shear strength of the soil for normally consolidated and over consolidated conditions. The validation of the predicting capacity of the model using data from the literature provides an excellent demonstration of its robustness to be applied in geotechnical characterization processes.

*Keywords: 3-D model, soil, index properties, engineering parameters, undrained shear strength, geotechnical characterization*

### INTRODUCCIÓN

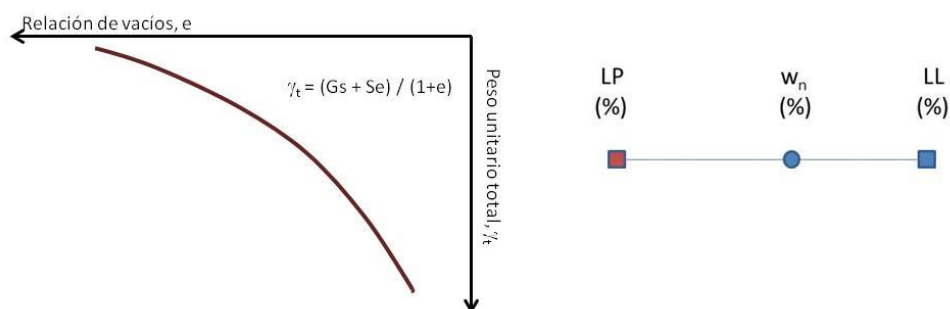
#### *Los cambios de volumen y resistencia en los suelos*

Muchas de las propiedades ingenieriles de los suelos, y en particular, la resistencia al corte sin drenaje, se estudian con énfasis en la historia de esfuerzos. De hecho, modelos como el SHANSEP [1] se basan en la normalización de parámetros del suelo propuesta en MIT [2] y considera además de la presión de confinamiento actual, la historia de esfuerzos. De la misma manera, los cambios de volumen del suelo se manejan con base en los ensayos de consolidación,

con los cuales se definen tanto el índice de compresión,  $C_c$ , como el índice elástico de descarga-recompresión,  $C_{sr}$ . El nivel de sobre consolidación se establece con un método empírico desarrollado por Casagrande, el cual es citado por Das [3]. Sin embargo, poco o muy poco trabajo se ha adelantado para tratar de poner juntas estas dos formas de respuesta del suelo pues debe haber conexión entre ambos por tener en común el confinamiento.

Por otra parte, sabemos que no es posible alterar uno de los parámetros del suelo sin alterar los demás. Esto es particularmente evidente al considerar las propiedades volumétricas ya que la relación de vacíos,  $e$ , la humedad,  $\omega$ , el peso unitario total,  $\gamma_t$ , la saturación,  $S$ , y la gravedad específica,  $G_s$ , están íntimamente correlacionadas, tal como se ilustra en la gráfica de la izquierda de la Fig. 1 [4]. Para un suelo saturado, existe una curva como la mostrada en la Fig. 1, correspondiente a un valor de,  $G_s$ . Es bueno destacar que las correlaciones de las propiedades volumétricas aplican tanto a las condiciones remoldeadas como a las inalteradas. En otras palabras, no dependen de la estructura del suelo, sino de la capacidad de las partículas del mismo para almacenar agua.

Considerando entonces que cualquier cambio en el peso unitario está, por un lado, estrechamente unido a las propiedades volumétricas y, por otro lado, con el cambio de volumen del suelo, es lógico pensar entonces que los cambios en los esfuerzos y los de resistencia al corte, están también relacionados con dichas propiedades volumétricas. A tal efecto, algunos ingenieros experimentados grafican la humedad natural junto con los límites de Atterberg para tener en un golpe de vista cuán lejos o cerca está dicha humedad de ambos límites, tal como se ilustra en la gráfica de la derecha en la Fig. 1 [4]. Así, un suelo cuya humedad esté cercana al LL tendrá una resistencia al corte menor que el mismo suelo con humedad cercana al LP.

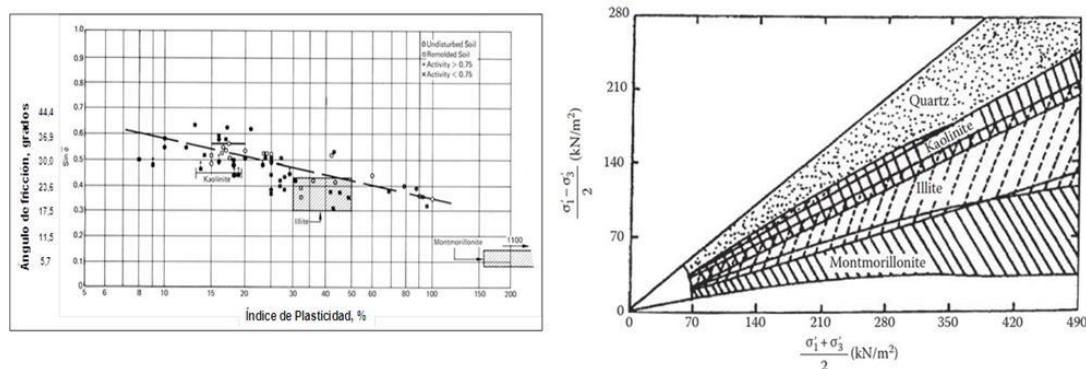


**Figura. 1** Gráfico de compatibilidad entre las propiedades volumétricas de los suelos (izquierda) y rango definido por los límites de consistencia con la ubicación relativa de la humedad natural de una arcilla (derecha) [4].

### *La resistencia al corte y el IP de arcillas*

Ahora bien, considerando que la capacidad de retener agua de una arcilla está controlada por la capacidad de sus partículas para retener agua en su doble capa, podemos establecer que esa capacidad de retener agua está fuertemente ligada a la plasticidad. Adicionalmente, la capacidad de retener agua también está íntimamente relacionada con el ángulo de fricción y, en particular,

con el seno de dicho ángulo, ya que el mismo varía con la pendiente de la recta de Mohr-Coulomb, M-C, tal como se ilustra en el gráfico de la izquierda en la Fig. 2 (propuesta por Kenney (1959) y Olson (1974)) según se cita en [5]. La variación del ángulo es atribuible a la diferencia en los iones intercambiables de la arcilla y a las condiciones de saturación en los ensayos que generan deformaciones en las placas de la misma al cortarlas. En consecuencia, si suponemos que las arcillas están saturadas, podemos decir que el plano que define la resistencia al corte, es decir, el círculo de M-C está íntimamente relacionado con la plasticidad del suelo. Esto se ilustra en la gráfica de la derecha de la Fig. 2 donde se evidencia la variación de los ángulos de fricción de distintas arcillas con muy bajo a ningún contenido de materiales no plásticos.

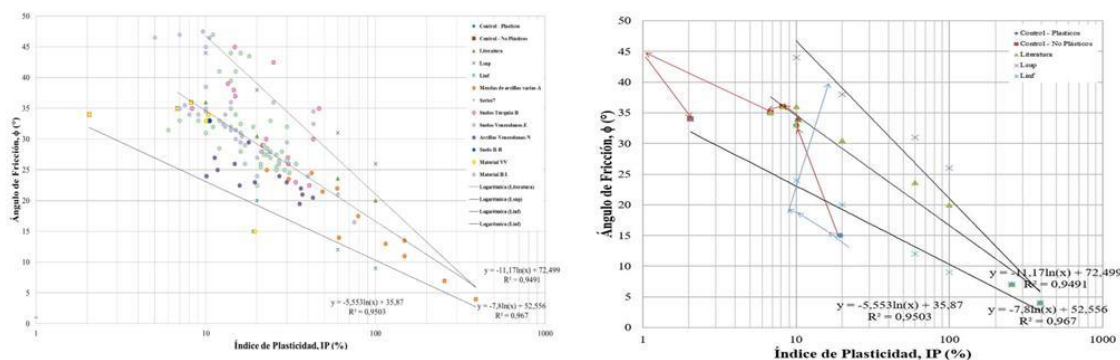


**Figura. 2** Correlación entre el ángulo de fricción,  $\phi$ , con el Índice de Plasticidad (modificado de Kenney (1959) y Olson (1974) citados en [5] y Variación del ángulo de fricción,  $\phi$ , para distintos materiales relativamente puros. Propuesta por Olson, 1974 y citada en [5].

Por otra parte, Echezurúa [6] y Privitera [7] encontraron que la variación del ángulo de fricción depende también del contenido de finos no plásticos del suelo, tal como se muestra en la gráfica de la izquierda de la Fig. 3. En la misma se observa que para un mismo valor del IP hay un amplio rango de valores del ángulo de fricción, el cual está asociado con el contenido de finos no plásticos. Por otra parte, en el gráfico de la derecha de la Fig. 3 se incluyen dos secuencias de ensayos en arcillas con contenidos iniciales de finos no plásticos cercanos al 49%, a las cuales se les fue agregando arena y limo. Nótese que los cambios en el contenido de cualquiera de dichos materiales no plásticos condujeron a una reducción del IP y un aumento del ángulo de fricción. Se observa también en la Fig. 3 que agregar limo no plástico cambia de manera diferente las propiedades del suelo (flechas rojas) que cuando se agrega arena (flechas azules).

Como ya se mencionó, los ángulos de fricción de los materiales arcillosos puros tienden a variar muy poco para cada mineral cuando tienen los mismos iones intercambiables y para el rango de presiones típico utilizado en ingeniería. Véase la Fig. 2. Nótese también que la variación de los ángulos de fricción para los minerales incluidos en las Fig. 2 es mucho menor que la mostrada en la Fig. 3 cuando se introducen los materiales no plásticos.

De tal manera que los ángulos de los materiales arcillosos puros están alrededor de la recta que define el límite inferior de la Fig.3 y varían poco al comenzar a añadirles material no plástico para luego comenzar a aumentar significativamente. Adicionalmente, y como ya hemos mencionado, a medida que aumenta el valor del ángulo de fricción con el contenido de finos no plásticos el índice de plasticidad baja.



**Figura. 3** Correlación entre el ángulo de fricción y el índice de plasticidad de los suelos, IP [7], (izquierda, tomado de Privitera [7] y su dependencia con la fracción de material no plástico contenida en la matriz de material plástico [10] (derecha, modificada de Echezuria [6]).

Por otra parte, es práctica común en la geotecnia considerar que cuando el material está sobre consolidado, es necesario tomar en cuenta un incremento en la resistencia al corte debido a que el suelo tendría una especie de “memoria” que mantendría los esfuerzos desarrollados en el plano horizontal como un “legado” por haber estado expuesto a esfuerzos verticales mayores que los actuales, lo cual lo haría más resistente. Esto es una interpretación incorrecta y será aclarada más adelante en este artículo cuando se demuestre que la resistencia al corte realmente depende de la relación de vacíos del suelo la cual tiene una correlación única con el confinamiento. Por lo tanto, la resistencia al corte realmente es controlada por la relación de vacíos que alcanzó el suelo al ser descargado para llegar al nivel de sobre consolidación correspondiente.

De la misma manera, también hay evidencias en la literatura de la dependencia tanto del índice de compresibilidad,  $C_c$  como del índice de descarga-recompresión,  $C_{sr}$ , con el IP, [3]. Para el caso del modelo planteado en este artículo se utilizaron las siguientes correlaciones  $C_c = IP/74$  y  $C_{sr} = IP/370$ , respectivamente.

Con base en todo lo anterior, podemos indicar que existe dependencia entre la plasticidad con los valores de resistencia al corte y los parámetros de cambio de volumen. Eso quiere decir que hemos utilizado separadamente los planos  $p'$ - $q$  y  $e$ - $p'$  para caracterizar el comportamiento de las arcillas sin intentar conectarlos utilizando la plasticidad y el confinamiento, lo cual se incluye en la próxima sección de este artículo.

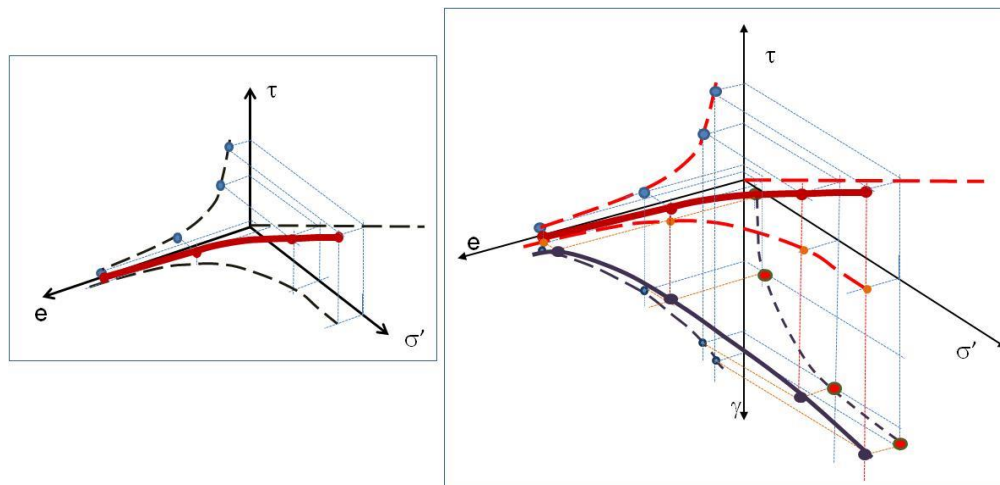
## METODOLOGÍA

### SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.  
 Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053  
 Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

## La integración de los planos de cambio de volumen y de resistencia al corte

Tomando en consideración que cualquier cambio en una propiedad del suelo afecta las demás, es posible pensar, en primera instancia que al estar ambos planos convencionales, es decir  $\tau-\sigma'$  y  $e-\sigma'$ , relacionados por el eje del confinamiento,  $\sigma'$ , entonces cualquier cambio en esa variable afectará, al mismo tiempo, tanto a la resistencia al corte como a la relación de vacíos. Por otra parte, como la humedad está relacionada con la relación de vacíos (por la gravedad específica y la saturación), entonces si el esfuerzo confinante cambia, la humedad también debe cambiar al igual que el peso unitario. Esto último genera una correlación única entre la relación de vacíos y la resistencia al corte,  $\tau-e$ , la cual aparece como resultado de unir los planos  $\tau-\sigma'$  y  $e-\sigma'$  y permite hacer un sistema tridimensional del suelo, tal como se ilustra en la gráfica de la izquierda de la Fig. 4. En el dicho sistema el suelo queda representado por la línea roja en el espacio, la cual de proyecta en los distintos planos para darnos las curvas que conocemos convencionalmente. Cada suelo corresponde a un IP determinado.



**Figura. 4** Integración de los planos de resistencia al corte y de cambio de volumen para definir el plano  $\tau-e$  de un suelo con IP conocido, lo cual genera la línea roja en el espacio, (izquierda) y modelo tridimensional integrado de las propiedades ingenieriles y las propiedades volumétricas de un suelo saturado con IP y  $G_s$ , conocidos (derecha).

De la misma manera, y como se mencionó en el párrafo anterior, el peso unitario también está relacionado con el cambio de confinamiento, por lo tanto, podemos plantear el mismo tipo de integración antes mencionado pero ahora cambiando el eje de resistencia al corte por el de peso unitario y colocándolo en sentido contrario al esfuerzo cortante, tal como se muestra en la gráfica de la derecha de la Fig. 4. De esta manera se genera la curva morada mostrada en el espacio hacia abajo, la cual depende de la gravedad específica,  $G_s$ , y la saturación,  $S$ , del suelo. Nótese que ambas curvas, la roja y la morada se conectan por el plano horizontal,  $e-\sigma'$ . Si asumimos que el suelo está saturado la curva morada en el espacio se proyecta sobre el plano  $e-\gamma_t$  y define la correlación indicada antes en la Fig. 1.



En el modelo integral del suelo antes descrito todas sus propiedades están relacionadas de manera que el plano horizontal representa, como se ha dicho, el plano  $e-\sigma'$  que es el estudiado en los procesos de consolidación. Unido a este último está el plano  $\tau-\sigma$ , que se utiliza para la resistencia M-C, el nuevo plano  $\tau-e$ , muy importante para describir procesos de corte no drenado y por la parte inferior están el  $e-\gamma_t$  que se utiliza para seguimiento de los cambios de peso unitario con la humedad, según se indicó en la Fig. 1 y el  $\gamma_t-\sigma'$  para seguir los cambios de peso unitario con el confinamiento. Todos ellos conforman el espacio que interrelaciona todas las propiedades de los suelos.

Es oportuno destacar que el modelo presentado en la Fig. 4 aplica tanto para suelos plásticos como no plásticos. Como hemos indicado, la curva superior (roja) depende de la plasticidad para arcillas y de la densidad relativa o relación de vacíos para las arenas. Contrariamente, la curva inferior (morada) depende de la gravedad específica y la saturación del suelo y aplica para ambos, arcillas y arenas. El modelo tal como se ha presentado en este artículo aplica sólo para suelos saturados.

La verificación de este modelo se realizó mediante la predicción de los valores de parámetros de ingeniería de suelos encontrados en la literatura. Esto se hizo así para darle más robustez al mismo al no utilizar solamente data incluida en el desarrollo del mismo, por razones obvias.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

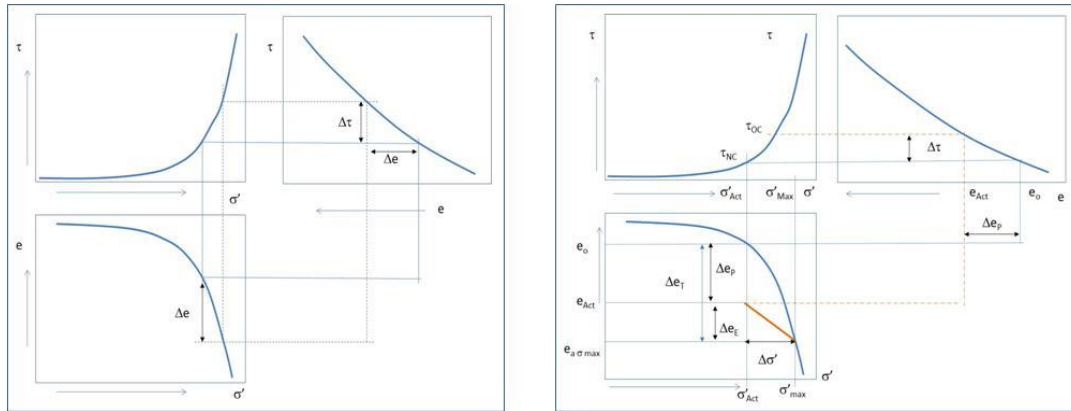
### El plano $e-\tau$ en el comportamiento no drenado de las arcillas

Echezurúa [4] e Izarra y D'Onofrio [8] han demostrado que la resistencia al corte de una arcilla sometida a corte no drenado realmente está controlada por la relación de vacíos de la misma. Así, cuando la arcilla está normalmente consolidada, el valor de la relación de vacíos puede ser calculado directamente de la curva de consolidación virgen de la arcilla. Esto se ilustra en la Fig. 5 donde se colocan los tres planos de la parte superior del modelo en forma separada pero ajustando los procesos que ocurren en cada uno en forma simultánea.

Por otra parte, cuando la arcilla está sobre consolidada, es necesario hacer el seguimiento de la relación de vacíos final luego de haberla consolidado hasta el esfuerzo correspondiente a la carga máxima pasada y la descarga hasta el valor del confinamiento actual. Por lo tanto, el cambio neto en la relación de vacíos es la diferencia de la reducción impuesta por la consolidación menos la expansión producto de la descarga. Esto se evidencia en la gráfica de la derecha en la Fig. 5.

Nótese que la resistencia al corte está controlada por la relación de vacíos correspondiente al valor del confinamiento actual, es decir, luego de completar el ciclo de sobre consolidación. Eso fue corroborado utilizando un programa que integra las propiedades tanto volumétricas como de ingeniería de la misma manera que el modelo y permite hacer el seguimiento a los cambios de relación de vacíos con los niveles de carga para situaciones normalmente consolidadas y sobre consolidadas. Dicha corroboración fue realizada para varias arcillas con distintos valores de plasticidad ( $10\% < IP < 200\%$ ) encontrando que los valores de las resistencias al corte correspondientes a las relaciones de vacíos al final de las consolidaciones coinciden

perfectamente con los valores calculados con los esfuerzos confinantes mediante las ecuaciones de SHANSEP [1]. Lo anterior se ilustra en la Tabla 1.



**Figura. 5** Parámetros de resistencia al corte y cambio de volumen para arcillas NC (izquierda) y cambio en la relación de vacíos y la resistencia al corte al cambiar el esfuerzo confinante por sobre consolidación (derecha).

**Tabla 1.** Valores de resistencia al corte y ángulos de fricción obtenidos con SHANSEP o ensayos de laboratorio comparadas con los obtenidos con el Modelo aquí planteado. Adaptada de Izarra y D'Onofrio, [8].

SUELOS DE LA LITERATURA	OCR	$\omega$ (%)	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	Prof. (m)	IP (%)	Estimado de finos no plásticos del modelo (%)	$\sigma'_{v_0}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción estimado del modelo (°)	Ángulo de fricción de datos de literatura (°)	Su De ensayos o SHANSEP (kN/m <sup>2</sup> )	Su Del modelo (kN/m <sup>2</sup> )
1	1	60	6,5	10	60	15	65	12,85	12-13	14,95	14,45
2	2	40	8,3	10	60	15	83	12,85	12-13	32,23	32,13
3	1	60	6,5	6	30	80	39	30,53	-	19,81	19,81
4	1,2	53	7,1	2	42	70	14,2	25,58	-	6,13	7,09
5	1	57	6,7	22	15	90	147,4	39,70	-	94,17	94,18
6	1	40	8,2	27	25	65	221,4	29,00	-	107,59	107,59
7	2	36	8,7	15	25	65	130,5	29,00	-	110,42	110,42
8	1	80	5,4	5	60	25	27	14,76	15	-	6,882
9	1	80	5,4	5	25	50	27	25,90	25	-	11,783
10	1	60	6,5	5	70	60	32,5	22,45	23	-	12,404
11	1	60	6,5	5	15	50	32,5	29,55	29	-	16,031

Es bueno destacar que en la Tabla 1 se incluyen valores de ensayos realizados en arcillas encontrados en la literatura. El modelo de suelos aquí planteado permite predecir acertadamente cuando la arcilla tiene contenidos de finos no plásticos además del OCR de dicha arcilla.

Por otra parte, también es necesario resaltar que la trayectoria de estado que define el desarrollo de la resistencia al corte durante el proceso de carga desviadora no drenada es independiente de la generación de la presión de poros y que esta última solo afecta el plano  $\tau$ - $\sigma'$ . En otras palabras, la trayectoria de estado para condiciones no drenadas en el plano,  $\tau$ - $e$ , es vertical y no curva como sucede la trayectoria de esfuerzos efectivos del plano,  $\tau$ - $\sigma'$ .

## CONCLUSIONES

Se demuestra en este artículo que las propiedades del suelo están íntimamente relacionadas entre sí y no es posible cambiar una de ellas sin afectar a las demás. Las relaciones entre las propiedades del suelo permiten integrarlas en un modelo tridimensional capaz de predecir el comportamiento tanto de suelos plásticos como no plásticos para condiciones normalmente consolidadas como sobre consolidadas. El mismo también aplica para arenas y arcillas no sensitivas.

Tanto el ángulo de fricción como los índices de compresibilidad y descarga re-compresión del suelo dependen del IP, lo cual hace posible el modelo indicado. Similarmente, el peso unitario y la relación de vacíos dependen de la Gravedad específica del suelo y de la relación de vacíos. Eso a su vez, permite relacionarlos junto con los esfuerzos confinantes a las otras propiedades ingenieriles para conformar un modelo único tridimensional del suelo.

El plano,  $e$ - $\tau$ , producto de dicha integración explica que la resistencia al corte de los suelos plásticos depende directamente de la relación de vacíos al final del proceso de confinamiento y no de los esfuerzos de confinamiento. De manera que la curva que relaciona la relación de vacíos con la resistencia al corte,  $e$ - $\tau$ , es única y no debe ser afectada por ningún factor de ajuste para la condición sobre consolidada.

## REFERENCIAS

La cita se hace empleando números arábigos entre corchetes al final de la idea [1]

- [1] Llorens, J., Pera-Titus, M. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering aspects, 350 (2009) 63
- [2] Rivas, L. (2006) Trabajo Especial de Grado: Oxidación catalítica de hidrocarburos saturados e insaturados mediante óxidos de hierro nanoestructurados. Universidad Central de Venezuela
- [3] Petróleos de Venezuela, S.A. (Noviembre 2011) <http://www.pdvsa.com>
- [4] Schulz, H., Schon, M., Rahman, N. M. (1986) In: Studies in Surface Science and Catalysis, Vol. 27 "Catalytic Hydrogenation, a Modern Approach", Cervený L (ed) Elsevier, Amsterdam, p 204
- [5] Condon, J.B. (2006) Surface Area and Porosity Determinations by Physisorption Measurements and Theory. Elsevier. The Netherlands.