

## Resistencia residual de arenas limosas con ensayos DSS

Heriberto Echezuría<sup>1</sup>, Andres Torres<sup>2</sup>, Victor De Las Casas<sup>3</sup>, Yonathan Gonzalez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>hechezuria51@gmail.com, <sup>2</sup>andres.torres.50@hotmail.com, <sup>3</sup>vdlds410@gmail.com, <sup>4</sup>yonathan\_ucv@hotmail.com

Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela

**Resumen:** Se estudió el comportamiento de arenas limosas y arenas limpias altamente confinadas mediante ensayos de corte simple directo (DSS). Para tal fin, se ensayaron varias muestras de arena limosa y arena limpia bajo altura constante a diferentes relaciones de vacíos y presiones de confinamiento. Se demostró experimentalmente que el ángulo de fricción residual de la arena limpia resulta menor que el de la arena limosa. Por otra parte, se encontró que la posición de la línea de estados residuales (LER) de una arena limosa, con una misma granulometría y angularidad, depende de su estructura, es decir, si se tiene una misma granulometría, angularidad y estructura se tendrá una sola LER, mientras que con una misma granulometría y angularidad pero con estructuras diferentes se obtendrán LER paralelas entre sí. Asimismo, se encontró que la LER de la arena limpia posee mucha más pendiente que la LER de la arena limosa. Finalmente, se evaluó si el proceso de carga de una plataforma petrolera tipo "Jacket" generaba esfuerzos cortantes capaces de inducir licuación en el suelo próximo a los pilotes donde se encuentra hincado. Estos aspectos resultan cruciales para la interpretación del comportamiento de la arena durante su deposición-confinamiento y posterior proceso de corte.

Palabras clave:

Resistencia residual arenas, ensayos DSS en arenas, ángulo de envolvente de estados residuales de arenas, ángulo de envolvente pico de arenas.

## Residual resistance of silty sands with DSS tests

**Abstract:** The behavior of highly confined silty and clean sands around the face of offshore piles was studied using Direct Simple Shear (DSS) tests. For this purpose, several samples of silty sand and clean sand were tested under constant height at different void ratios and confining pressures. It was experimentally demonstrated that the residual friction angle of clean sand is lower than that of silty sand. Therefore, it was found that sand with fine non-plastic content must have greater strength than sand with a lower content of these fines. Additionally, the results indicate that the loamy sand consolidation curves are generated from very different initial void relationships, such as loose sand and very dense sand. On the other hand, it was found that the position of the line of residual states (LER) of a silty sand, with the same granulometry and angularity, depends on its structure, that is, if it has the same grain size, angularity and structure it will be a single LER, while with the same granulometry and angularity but with different structures, parallel LERs will be obtained. It was also found that the LER of the clean sand has much more slope than the LER of the silty sand. Finally, it was evaluated whether the loading process of a "Jacket" oil platform generated shear forces capable of inducing liquefaction in the soil next to the piles where it is driven. These aspects are crucial for the interpretation of the behavior of the sand during its deposition-confinement and subsequent cutting process.

Keywords:

Residual strength of sands, DSS tests in sands, residual strength envelop angle for sands, peak strength envelop for sands.

## I. INTRODUCCIÓN

La práctica común para determinar la resistencia residual de arenas ha sido mediante la ejecución de ensayos triaxiales (TXT) no drenados CIU con medición de las presiones de poros. Este procedimiento es bastante riguroso y consume mucho tiempo en la preparación y saturación de las muestras. El ensayo de corte directo simple (DSS) se utiliza mucho para estudiar el proceso de generación de presiones de poros en muestras de arenas con ensayos cíclicos, pero poco se ha explorado para su aplicación con ensayos monotónicos (aquellos con carga incremental desde cero hasta la rotura) no drenados con fines de definir la resistencia residual en sustitución de los ensayos CIU.

Por otra parte, la predicción del comportamiento de las arenas sometidas a corte no drenado no es un tema fácil y, en general, se deben realizar muchos ensayos para definir el comportamiento de dichas arenas a posteriori. No obstante, Echezuría [1] ha desarrollado un modelo semiempírico tridimensional integrado de los parámetros de suelos que permite verificar y anticipar el comportamiento de ensayos TXT CIU en arenas limpias o limosas. Por eso, es deseable verificar la capacidad de dicho modelo para interpretar también ensayos DSS monotónicos no drenados. En consecuencia, en este trabajo de investigación se plantearon los siguientes objetivos, de acuerdo con lo investigado en [2]:

- Utilizar los ensayos DSS para determinar la resistencia residual de arenas limpias y limosas
- Verificar la aplicabilidad del modelo semiempírico integrado de suelos para interpretar ensayos DSS monotónicos no drenados.

A tal efecto, se determinaron las curvas de estados residuales de dos arenas con diferentes contenidos de limo. Como parte del mismo análisis, se evaluaron las respuestas al corte contractivo, parcialmente contractivo y dilatante de muestras de esas arenas con distintos niveles de confinamiento y relaciones de vacíos, las cuales se colocan en posiciones diferentes con respecto a la Línea de estados residuales (LER), tal como se ilustra en la Figura 1 [3]. De la misma manera, se utilizó el modelo semiempírico tridimensional integrado antes mencionado para modelar la respuesta al corte de las arenas ensayadas.

### **Descripción del modelo semiempírico integrado**

El modelo correlaciona la resistencia al corte ( $\tau$ ), la relación de vacíos ( $e$ ), la presión de confinamiento ( $\sigma'_v$ ) y el peso unitario ( $\gamma_t$ ). El modelo permite predecir correctamente la resistencia al corte de la arena, conociendo el ángulo de fricción el esfuerzo confinante y la relación de vacíos

En la parte superior de la Figura 2 se observa cómo el modelo integra los parámetros asociados con la resistencia residual en los planos comúnmente utilizados en la geotecnia a saber: i) el plano  $\tau$ - $\sigma'$  que describe el plano Mohr-Coulomb en el cual se desarrolla el ángulo de fricción y ii) el plano  $e$ - $\sigma'$  en el cual se observan los cambios de volumen con el esfuerzo confinante. Este último describe los procesos durante la consolidación de las muestras.

Nótese que al colocar esos dos planos juntos por el esfuerzo confinante, aparece el plano  $e$ - $\tau$ , que tiene muy poca aplicación en la geotecnia y que resulta de fundamental importancia en el modelo para integrar los demás parámetros de resistencia al corte. En la parte inferior del modelo se observa que el eje de resistencia al corte ha sido sustituido por el peso unitario (esto porque el suelo no es capaz de tomar esfuerzos de tracción) lo cual permite hacer el seguimiento en el cambio de peso unitario con los cambios en la relación de vacíos (contenido de humedad) del suelo a medida que es confinado.

Este modelo fue utilizado por González [4] para describir el comportamiento de ensayos TXT – CIU en arenas limosas de Lagunillas y Tia Juana. Adicionalmente, el mismo fue aplicado exitosamente por De Las Casas y Torres [1] utilizando ensayos TXT-CIU existentes en la literatura de Ishihara [5] y Govinda [6].

En la Figura 3 se describen los tres tipos de comportamiento de las arenas, antes indicados, los cuales dependen tanto de la relación de vacíos y el confinamiento antes del ensayo. El comportamiento contractivo produce un aumento en la presión de poros y la trayectoria de esfuerzos alcanza la resistencia pico ( $S_{up}$ ) para luego descender hasta la envolvente de resistencia residual ( $S_{uss}$ ) sobre la LER. Este comportamiento es usual en muestras con alta relación de vacíos inicial y alto confinamiento tal como en el caso de las muestras con  $e=0,917$  y  $p'=0,1$  MPa y  $e=0,833$  y  $p'=3,0$  MPa. Nótese que en ambos casos las

muestras son capaces de alcanzar la resistencia máxima antes de encontrar la recta de transformación de fase o envolvente pico, mostrada en azul, y que dicha resistencia máxima es mayor que la resistencia residual.

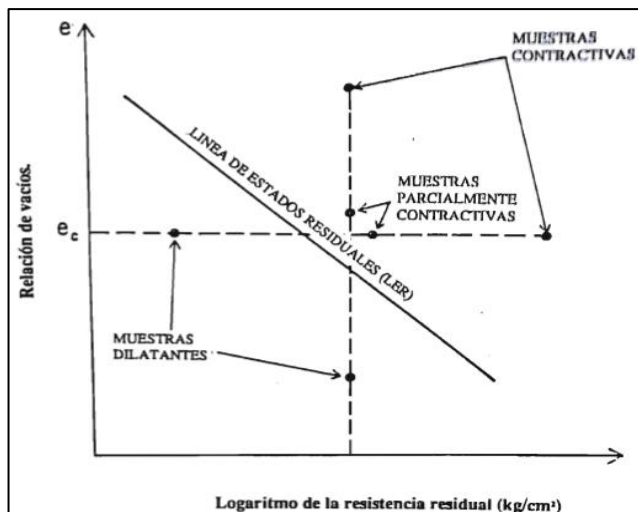


Figura 1: Comportamiento de arenas de acuerdo a su posición en la LER [1]

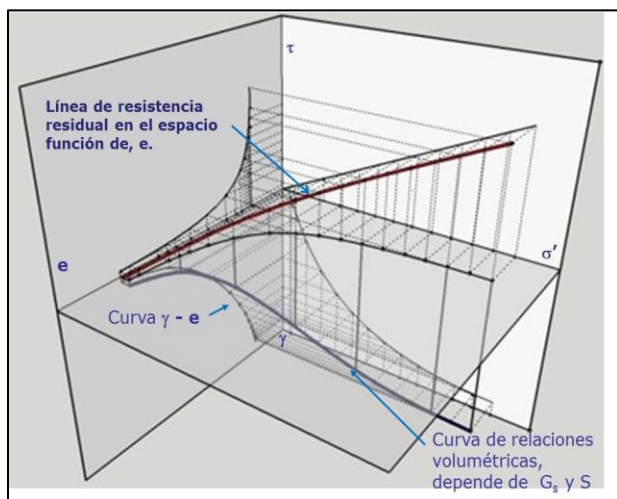


Figura 2: Modelo Tridimensional de Echezuría [2]

Cuando la resistencia máxima de las muestras es menor que la resistencia residual la muestra debe ascender por la envolvente residual hasta alcanzar dicha resistencia residual. Estas muestras tienen comportamiento parcialmente contractivo tal como el exhibido por las muestras con  $e=0,915$  con  $p'=0,06$  MPa y la muestra  $e=0,833$  y  $p'=2,0$  MPa. Es oportuno destacar que estas muestras exhiben un pico en la curva esfuerzo-deformación, tal como las muestras contractivas, pero con la limitante de que ese pico no queda por encima de la resistencia residual. Véase la Figura 3.

Las muestras dilatantes son aquellas en las que no es posible desarrollar un pico ya que la trayectoria de esfuerzos alcanza demasiado pronto la envolvente, por lo que las muestras deben ascender hasta alcanzar la resistencia residual. Esto es el caso de las muestras con  $e=0,916$  y  $p'=0,05$  MPa,  $e=0,833$  y  $p'=1,0$  MPa y las cuatro muestras con  $e=0,735$  para todos los confinamientos incluidos.

Ahora bien, existe una diferencia importante entre el comportamiento de las arenas limpias y las limosas cuando son sometidas acorde no drenado, la cual es que la LER no es única como en el caso de arenas limpias. Es decir, las LER de las arenas limpias no dependen de la técnica utilizada para obtener distintas relaciones de vacíos en las muestras [5]. Contrariamente, las arenas limosas presentan distintas LER para cada método de preparación de las muestras. Esto fue demostrado por Ishihara [5] y también lo verificaron De las Casas y Torres [2] con los datos de Govinda [6] y Gonzalez [4], además de los ensayos de las arenas del Golfo de México utilizadas en este trabajo. Esto se debe a que cuando el método de preparación de las muestras es diferente las muestras limosas son capaces de desarrollar estructuras distintas mientras que las arenas limpias no. Adicionalmente, si la arena limosa utilizada en los distintos ensayos tiene la misma granulometría y angularidad, el ángulo de fricción pico resulta igual para las diferentes estructuras.

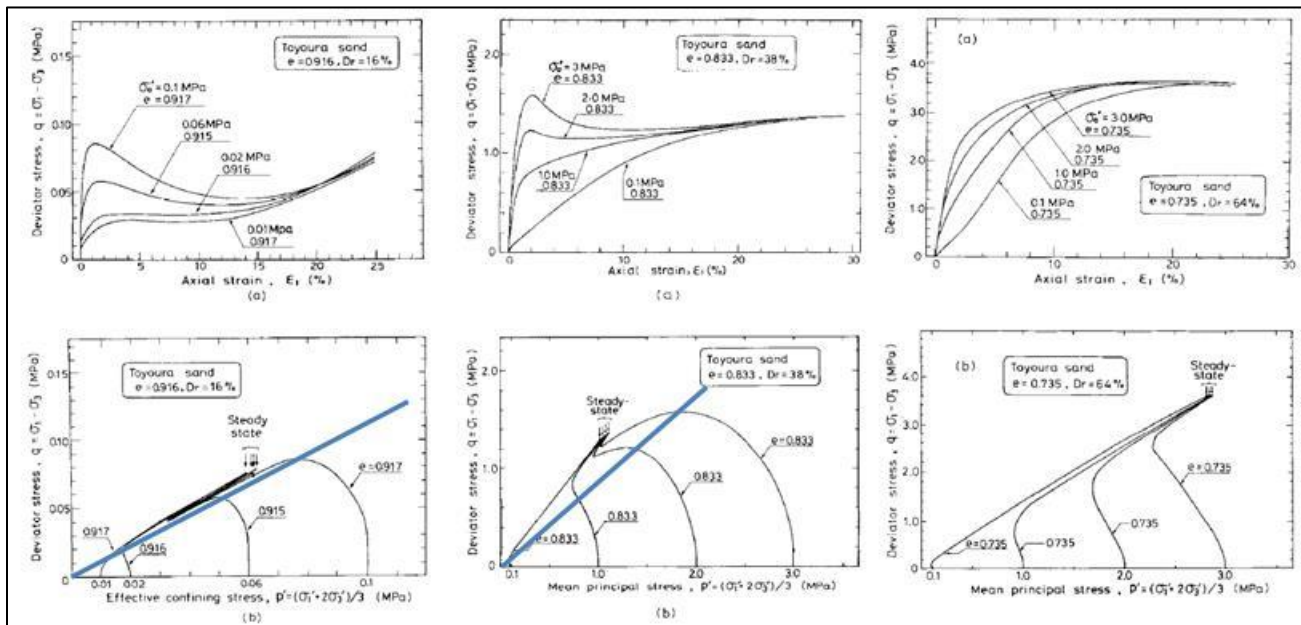


Figura 3: Comportamientos contractivo, parcialmente contractivo y dilatante de arenas [3]

## II. METODOLOGÍA

### A. Características de la muestra

La muestra de arena limosa fue recuperada en el Golfo de México por la empresa GeoHidra Consultores C.A. La misma fue recuperada con tubo Shelby a 107,7m de profundidad bajo el subsuelo marino. Luego, la muestra fue almacenada y trasladada desde México hasta el laboratorio de la empresa en Caracas, Venezuela.

La arena presenta las siguientes características: grano fino, limosa, medianamente densa a muy densa, de color gris verdoso oscuro, con fragmentos escasos de bivalvos (conchas marinas), micácea, con fuerte reacción al HCL (SM). La granulometría de la arena se muestra en la Figura 4. De acuerdo con el resultado del análisis granulométrico por tamizado, la muestra posee 16% de finos no plásticos.

### B. Preparación de las muestras

La mayoría de las muestras de arena limosa fueron preparadas con  $w=1\%$  con poca densificación de la

misma manera que en el denominado método de subcompactación. Este método genera relaciones de

vacíos iniciales elevadas, los cuales para la arena limosa estaban alrededor de  $e=1,3$ .

Para fines de comparación, una de las muestras se preparó con  $w=0\%$  y  $e=0,88$ ; la cual fue confinada a  $15\text{kg/cm}^2$ . Esta última muestra se preparó por capas a fin de tratar de simular la forma en que sedimentaría una arena in situ.

Por otra parte, las muestras de arena limpia también se prepararon con  $w=1\%$  y el método de la subcompactación, tratando que las relaciones de vacíos iniciales fuesen parecidas a las de las muestras de arena limosa, es decir, alrededor de  $e=1,3$ .

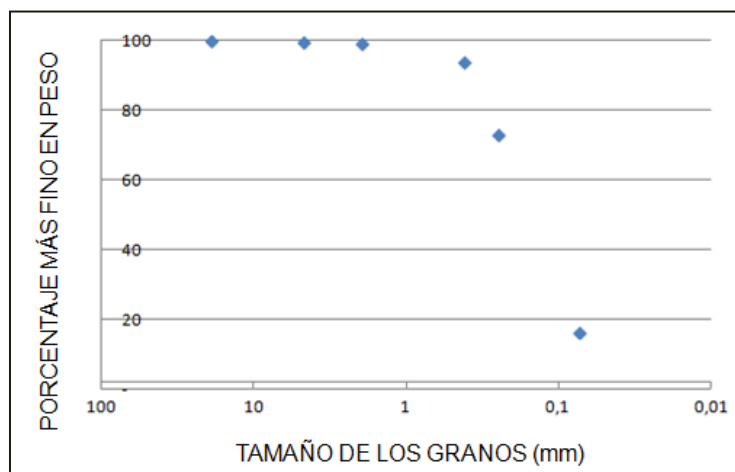
En total, para la muestra de arena limosa (16% de finos) se efectuaron siete (7) ensayos de corte directo simple (DSS), los cuales se clasifican de la siguiente forma:

- Cinco (5) ensayos en modalidad de altura constante (no drenado con medición de presión de poros), con esfuerzos efectivos de

- confinamiento de: 2,5 kg/cm<sup>2</sup>, 10 kg/cm<sup>2</sup>, 15 kg/cm<sup>2</sup>, 18 kg/cm<sup>2</sup>, y 20 kg/cm<sup>2</sup>.
- Dos (2) ensayos en la modalidad de esfuerzo constante (drenado con medición de cambio de volumen), con esfuerzos confinantes de: 2,5 kg/cm<sup>2</sup> y 18 kg/cm<sup>2</sup>.

Por otra parte, para la muestra de arena limpia (0% de finos) se realizaron (3) tres ensayos de corte directo simple (DSS) bajo la modalidad de altura constante (no drenado), con esfuerzos efectivos de confinamiento de: 2,5 kg/cm<sup>2</sup>, 10 kg/cm<sup>2</sup>, y 18 kg/cm<sup>2</sup>.

	Tamaño de los granos (mm)	Porcentaje más fino (peso)
3/4"	19,1	100
#4	4,75	99,7
#10	2	99,5
#40	0,42	94,2
#60	0,25	73,3
#200	0,074	16,5



**Figura 4:** Análisis Granulométrico por tamizado de arena limosa (identificada como Muestra 21B)

**C. Montaje Ensayo de Corte Simple Directo (DSS)**

Se realizaron pruebas DSS monotónicas usando un aparato marca GEOJAC. Para la ejecución del ensayo, se siguieron los parámetros de la Norma DSS ASTM D6528-07 “Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils” [8]. Las muestras se prepararon dentro de un recipiente contentivo de una membrana la cual se montó en la cámara del equipo DSS. Una vez montadas las muestras dentro la cámara del equipo DSS, se saturaron por aproximadamente 15

minutos con alrededor de 100 ml de agua destilada. Se permitió que el agua fluyera dentro de la muestra por gravedad hasta el punto donde no salieron más burbujas de aire en la línea de drenaje. Se cerraron las líneas de alimentación de agua después de saturada la muestra, y luego se procedió a consolidarla. La consolidación se realizó mediante “Incremental Load Consolidation (ICL)”, iniciando lo incrementos de carga con una tensión de consolidación de 25 kPa y la tensión aumentó con una “Relación de Incremento de Carga (LIR)” hasta el esfuerzo efectivo de consolidación deseado para

cada ensayo. Cada incremento de carga se aplicó durante 15 minutos, con la excepción del último incremento de carga que se aplicó durante 30 minutos. Finalmente, luego de haber culminado el proceso de consolidación, se prosigue a activar el proceso de corte de la muestra. Esto se lleva a cabo a través del software del aparato GEOJAC. Luego de 12-24 horas, se obtienen los resultados del corte de la muestra.

#### D. Cálculo LER inalterada de la muestra de arena limosa

De las Casas y Torres, también demostraron con los datos de González (1994) [4] que cuando el método de preparación de la muestra en el laboratorio genera una estructura de la arena similar a la que tiene la arena limosa en sitio, existe un solo ángulo de fricción y una curva LER única tanto para muestras remoldeadas como inalteradas. Dicha demostración aplica para arenas limosas de Tía Juana y Lagunillas, las cuales también ensayadas por Ishihara [5] para demostrar que cuando cambia el método de preparación también cambia la LER.

Ahora bien, cuando el método de preparación no logra la estructura similar a la del campo, es necesario obtener la LER inalterada. Este procedimiento consiste en trazar una línea paralela a la LER de la muestra reconstituida por el punto que describe la ubicación de la resistencia residual y relación de vacíos en campo [3][5]. Sin embargo, generalmente se desconoce el valor de la resistencia residual en campo de la arena, lo cual limita la aplicación de este procedimiento [7]. No obstante, considerando que el Parámetro "R", descrito abajo, correlaciona los valores residuales, es posible inferir un buen estimado de la resistencia residual de la arena en sitio. Este método ha sido utilizado por Ishihara [5], González [4] y Kramer [7].

$$R = \frac{\sigma'_{us}}{\sigma'_{vo}} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma'_{us}$ =esfuerzo efectivo axial para el cual se alcanza la resistencia residual.

$\sigma'_{vo}$ =esfuerzo de confinamiento previo al corte

En este trabajo se utiliza el valor de  $R=0,12$  obtenido por De Las Casas y Torres utilizando datos existentes en la literatura de ensayos realizados con arena limosas por Ishihara [5], González [4] y Govinda [6]. Una vez determinado el promedio de las "R" y conociendo el esfuerzo de confinamiento,  $\sigma'_{vo}$ , se despeja ( $\sigma'_{us}$ ):

$$\sigma'_{us} = R_{promedio} * \sigma'_{vo} \quad (2)$$

Conocido este valor es posible trazar la LER inalterada utilizando el modelo semiempírico integrado [1].

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Ensayo de Corte Directo Simple (DSS) bajo altura constante en arena limosa preparadas con $w=1\%$

La Tabla I muestra los parámetros iniciales correspondientes a las muestras de la arena limosa antes de iniciar el proceso de corte bajo la modalidad de altura constante (no drenado).

**Tabla I:** Parámetros iniciales de ensayos realizados con arena limosa a altura constante

El comportamiento de las curvas representativas de los ensayos de corte simple para las muestras de arena limosa se incluyen en las gráficas de la izquierda de la Figura 5. Las muestras ensayadas a 245,27 kPa (2,5 kg/cm<sup>2</sup>) y 981,07 kPa (10 kg/cm<sup>2</sup>) alcanzan la resistencia residual ( $S_{uss}$ ) a diferencia de las muestras ensayadas a 1765,02 kPa (18 kg/cm<sup>2</sup>) y 1962,14 kPa (20kg/cm<sup>2</sup>) donde, para una deformación de 60%, el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) continúa disminuyendo sin alcanzar su resistencia mínima.

La LER correspondiente se incluye en el gráfico de la derecha en la Figura 5 en azul junto con las curvas correspondientes a los procesos de consolidación de las muestras. Nótese que las muestras tienen una relación de vacíos muy cercana entre ellas y, como se utilizó el mismo método de preparación, se espera que las mismas tengan la misma estructura.

La gráfica de *Curvas de Esfuerzo de Corte Normalizado vs. Esfuerzo Vertical Normalizado*, ubicadas a la izquierda en la Figura 5, muestra un comportamiento contractivo para los confinamientos de 1765,92 Kpa (18 kg/cm<sup>2</sup>) y 1962,14 kPa (20 kg/cm<sup>2</sup>), ya que la arena llega a su resistencia máxima y luego desciende a su resistencia residual. Por otro lado, en los ensayos con confinamiento de 245,27 y 981,07 kPa (10kg/cm<sup>2</sup>), las trayectorias de esfuerzos normalizadas ascienden algo antes de bajar a la resistencia residual. Eso sugiere un cambio de comportamiento de contractivo a dilatante, lo cual es propio del comportamiento parcialmente contractivo. Lo anterior demuestra que se posible utilizar los ensayos de DSS para establecer las LER de arenas en sustitución de los TXT tradicionalmente utilizados para tal fin.

#### B. Ensayo de Corte Directo Simple (DSS) bajo altura constante en arena limosa preparada con $w=0\%$

La forma de preparación por capas de arena seca al aire será tomada como cercana a la estructura de la arena en el sitio ya que la misma ha sido arrastrada por corrientes que la van acumulando y ese proceso no es igual ni al pluviado en agua ni al colocado con humedad y sub-compactación. La Tabla II contiene los parámetros iniciales de la muestra de arena limosa confinada a 15 kg/cm<sup>2</sup> y cortada bajo altura constante. En la gráfica de la izquierda de la Figura 6

Parámetros iniciales	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Humedad natural inicial $w_o$ (%)	1,00	1,00	1,00	1,00
Porcentaje pasante No. 200, (%)	16	16	16	16
Límite Líquido, (%LL)	NL	NL	NL	NL
Límite Plástico, (%LP)	NP	NP	NP	NP
Índice de Plasticidad, (%IP)	NP	NP	NP	NP
Descripción (SUCS)	SM	SM	SM	SM
Gravedad Específica (Gs)	2,66	2,66	2,66	2,66
Peso Unitario Húmedo $\gamma_h$ (kN/m3)	11,07	11,127	11,047	11,12
Peso Unitario Seco $\gamma_d$ (kN/m3)	10,96	10,958	10,938	11,01
Peso Unitario Sumergido $\gamma_{sum}$ (kN/m3)	1,26	1,317	1,237	1,306
Relación de vacíos inicial, $e_o$	1,381	1,369	1,386	1,371
Porcentaje de Saturación, $S_r$ (%)	1,93	1,94	1,92	1,94
Relación de vacíos inicial al momento de ensayar, $e_o$	1,155	1,075	1,009	0,999
Deformación al momento de ensayar, $\epsilon_a$ (%)	9,50	12,40	15,80	15,71
Esfuerzo efectivo axial al momento de ensayar $\sigma_a$ (%)	245,27	981,07	1765,92	1962,14
Duración del esfuerzo vertical durante el ensayo (s)	43362,00	101854,00	42826,00	101854,00

se observa claramente un comportamiento parcialmente contractivo para esta muestra de arena limosa. Asimismo, en la gráfica de la derecha de la Figura 6 se evidencia que debido a que cambió la forma de preparación también cambiaron las relaciones de vacíos al inicio y al final de la consolidación y, por ello se espera que esta muestra tenga una estructura diferente a las otras preparadas con  $w=1\%$ . Por esta razón, la LER de esta muestra no puede ajustarse a la de las muestras preparadas con  $w=1\%$  y el punto al cual se alcanza su  $S_{uss}$  está ubicado en la gráfica de la derecha de la Figura 6 por debajo de la otra y en color rojo. Sin embargo, las pendientes de ambas curvas deben ser paralelas [3][4][5].

En la Figura 7 se aplica el modelo integrado a los ensayos de arenas limosas de este estudio preparadas con  $w=1\%$  y  $w=0\%$ . A tal efecto De Las Casas y Torres [2] estimaron el ángulo de fricción residual uniendo el origen con los puntos correspondientes a la ubicación de los valores de la resistencia residual,  $S_{uss}$ , designado como  $\phi$  en la Figura 7.

En la Figura 7 se observa que aunque las LER son distintas tanto en el plano  $\phi - \phi'_v$  como  $\phi - e$ , el valor correspondiente a la resistencia residual para  $w=0\%$  cae sobre el mismo ángulo de fricción residual,  $\phi$  o  $\phi_{Suss}$  lo cual comprueba que el mismo es único aunque la estructura de la arena cambie por la forma de preparación!! Nótese también que las dos LER en los dos planos  $\phi - \phi'_v$  y  $\phi - e$ , deben ser paralelas para mantener los valores de las relaciones de vacíos acordes. Con esto se demuestra que con el ensayo DSS también se evidencia el cambio en localización de la LER cuando se varía el método de preparación de la muestra, debido al cambio en su estructura interna y que, sin embargo, el ángulo fricción residual  $\phi$ , continua siendo único para la arena independientemente de la estructura de la misma.

### C. Determinación de la LER inalterada representativa para el sitio en el Golfo de México

La muestra de arena limosa en campo tiene los siguientes parámetros iniciales:  $G_s=2,66$ ;  $w=23,7\%$ ,  $s=100\%$ .

Usando dichos datos, se calculó la relación de vacíos, confinamiento y el peso unitario del suelo en sitio.

- Cálculo de la relación de vacíos ( $e$ ):

$$G_s \cdot w = s \cdot e$$

$$e = \frac{2,66 \cdot 23,7}{100}$$

$$e = 0,63$$

- Cálculo del peso específico seco ( $\gamma_d$ ):

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1 + e} \cdot \gamma_w$$

$$\gamma_w = 1,026 \text{ Ton/m}^3 \text{ (agua de mar)}$$

$$\gamma_d = \frac{2,66}{1 + 0,79} \cdot 1,026$$

$$\gamma_d = 1,674 \text{ Ton/m}^3$$

- Cálculo del peso unitario sumergido ( $\gamma'$ ):

$$\gamma' = \gamma_d - \gamma_w$$

$$\gamma' = 1,674 - 1,026 = 0,648 \text{ Ton/m}^3$$

- Cálculo del confinamiento que tiene el suelo a la profundidad estudiada ( $z=107,10\text{m}$ ):

Los estratos de suelos por encima de los 107,70m de profundidad, se consideran con peso específico ( $\gamma_d$ ), igual a  $1,674 \text{ Ton/m}^3$ . Se utiliza un solo valor como simplificación, debido a que los valores de cada estrato se encuentran muy cercanos al ( $\gamma_d$ ) utilizado.

$$\sigma_1 = \sigma'_{vo} = \gamma' \cdot z$$

$$\sigma'_{vo} = 0,648 \text{ Ton/m}^3 \cdot 107,10\text{m}$$

$$\sigma'_{vo} = 69.822 \text{ kg/m}^2 = 684,718 \text{ kPa}$$

Este valor obtenido  $\sigma'_{vo} = 684,718 \text{ kPa}$  corresponde al confinamiento inicial al que fue sometido la muestra en campo.



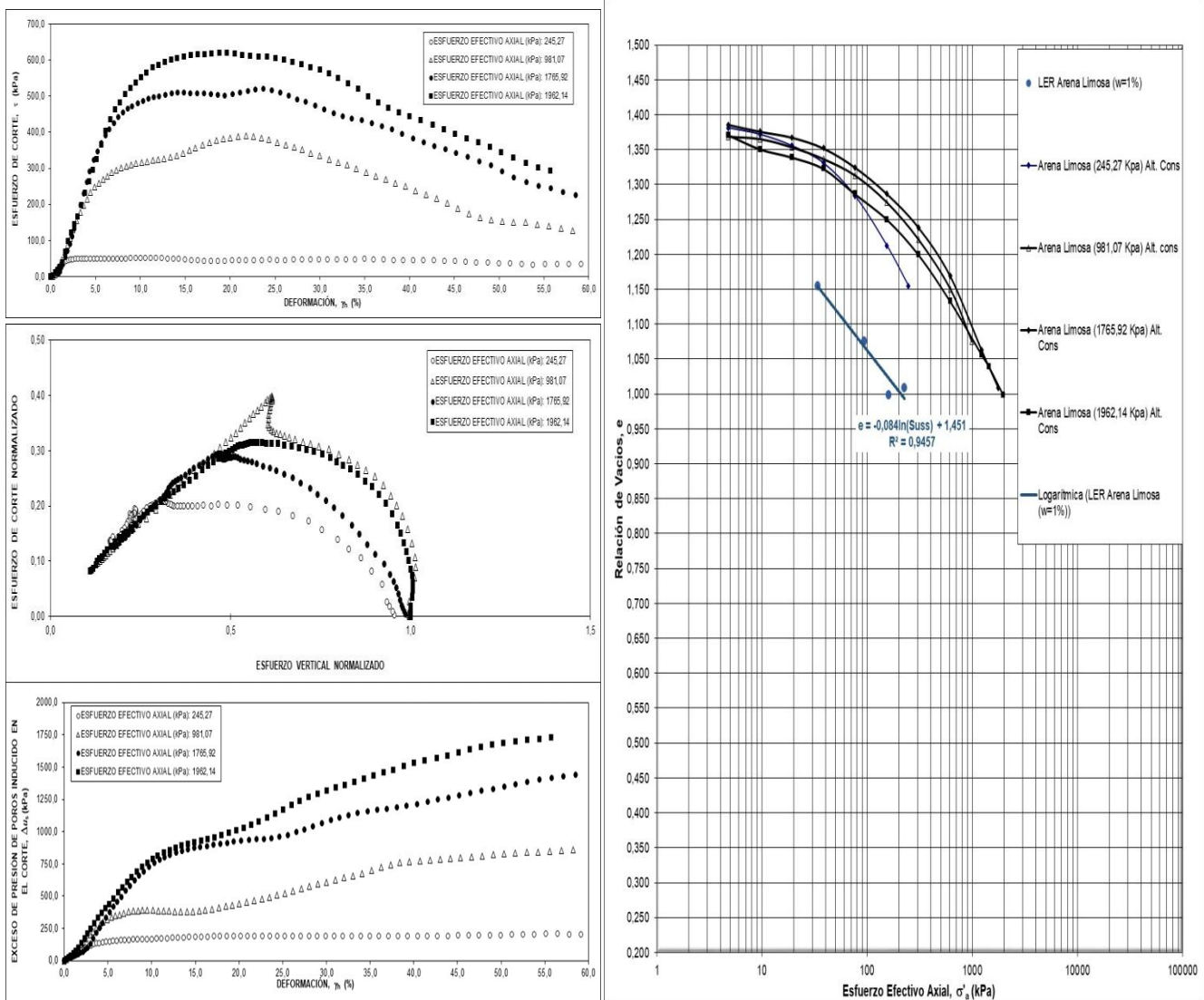


Figura 5: Resultados ensayos DSS bajo altura constante en muestra de arena limosa (con w=1%)

Para hallar la LER inalterada, se utilizó el Modelo Echezuría, por lo cual hizo falta hallar esfuerzo efectivo axial en el estado residual ( $\sigma'_{us}$ ) para utilizar la relación del Parámetro “R”.

• Cálculo del parámetro “R”

-  $R_{2.5 \text{ kg/cm}^2} = \frac{33,75}{245,27} = 0,137$   
 -  $R_{10 \text{ kg/cm}^2} = \frac{93,13}{981,07} = 0,095$

-  $R_{15 \text{ kg/cm}^2} = \frac{276}{1471,12} = 0,187$   
 -  $R_{18 \text{ kg/cm}^2} = \frac{225,9}{1765,92} = 0,128$   
 -  $R_{20 \text{ kg/cm}^2} = \frac{159,93}{1962,14} = 0,081$

Se promedian los valores de “R” anteriores y se obtiene:

-  $R_{\text{promedio}} = \frac{0,137+0,095+0,187+0,128+0,081}{5}$

$$R_{\text{promedio}} = 0,125$$

Por ende:

$$\sigma'_{us} = 0,125 * \sigma'_{vo}$$

$$\sigma'_{us} = 0,125 * 684,01$$

$$\sigma'_{us} = 85,50 \text{ kPa}$$

Para estimar el valor del confinamiento al alcanzar la resistencia residual, en la Figura 10 se trazó una paralela a la LER (línea verde) por el punto obtenido  $\sigma'_{us} = 85,50 \text{ kPa}$  (punto verde). Esta línea verde correspondería a la LER representativa del sitio, puesto que hemos definido el método de preparación empleado en ella como representativo del estado in situ. La incertidumbre relacionada con la relación de vacíos se representó como un rango alrededor de línea verde en el sentido vertical al punto. Véase la Figura 10. No obstante, todavía no se conoce el valor de la resistencia residual in situ.

Para estimar dicha resistencia residual, es posible aplicar el modelo semiempírico integrado, pues el ángulo de fricción residual es conocido,  $\phi = 36,07^\circ$ . Eso se muestra en la Figura 11 y se obtuvo con el siguiente procedimiento: En el plano  $(\sigma'-e)$ , se traza una línea horizontal desde este punto inicial ( $e = 0,63$  y  $\sigma'_{vo} = 684,718 \text{ kPa}$ ) hasta el punto residual ( $\sigma'_{us} = 85,50 \text{ kPa}$ ;  $e = 0,63$ ), ubicado sobre la LER. Se traza ahora una recta vertical desde este punto residual hasta el punto ubicado sobre la envolvente de falla residual. Este último punto corresponde a la resistencia residual ( $S_{uss}$ ) de la arena limosa in situ. Véase la Figura 11.

Asimismo, es posible estimar la línea de resistencia máxima de la muestra in situ. De Las Casas y Torres estiman dicho ángulo como  $32^\circ$  con base en el resultado para la muestra de arena limosa confinada a  $15 \text{ kg/cm}^2$  la cual posee una relación de vacíos relativamente parecida ( $e = 0,65$ ) a la estimada para el sitio ( $e = 0,63$ ).

**Tabla II:** Parámetros iniciales muestra arena limosa ( $w=0\%$ ) confinada a  $15 \text{ kg/cm}^2$  bajo altura constante

Parámetros iniciales	Punto 5
Humedad natural inicial $\omega_0$ (%)	0
Porcentaje pasante No. 200, (%)	16
Límite Líquido, (%LL)	NL
Límite Plástico, (%LP)	NP
Índice de Plasticidad, (%IP)	NP
Descripción (SUCS)	SM
Gravedad Específica (Gs)	2,66
Peso Unitario Húmedo $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,94
Peso Unitario Seco $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,94
Peso Unitario Sumergido $\gamma_{sum}$ (kN/m <sup>3</sup> )	4,126
Relación de vacíos inicial, $e_0$	0,865
Porcentaje de Saturación, $S_r$ (%)	0,00
Relación de vacíos inicial al momento de ensayar, $e_0$	0,653
Deformación al momento de ensayar, $\epsilon_a$ (%)	11,72
Esfuerzo efectivo axial al momento de ensayar $\sigma_a$ (%)	1471,60
Duración del esfuerzo vertical durante el ensayo (s)	16405,50

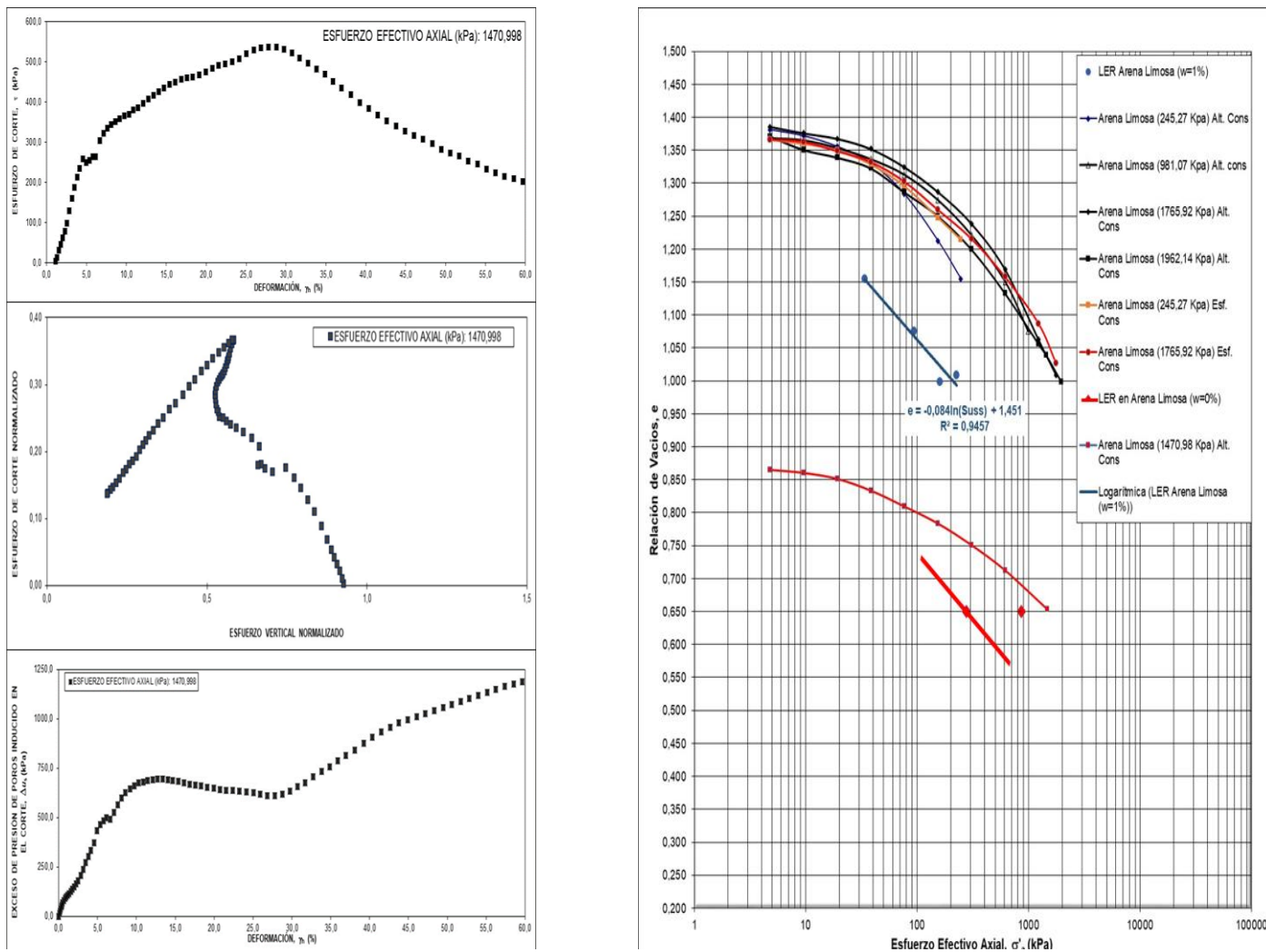


Figura 6: Resultados ensayos DSS bajo altura constante en muestra de arena limosa (con w=0%)

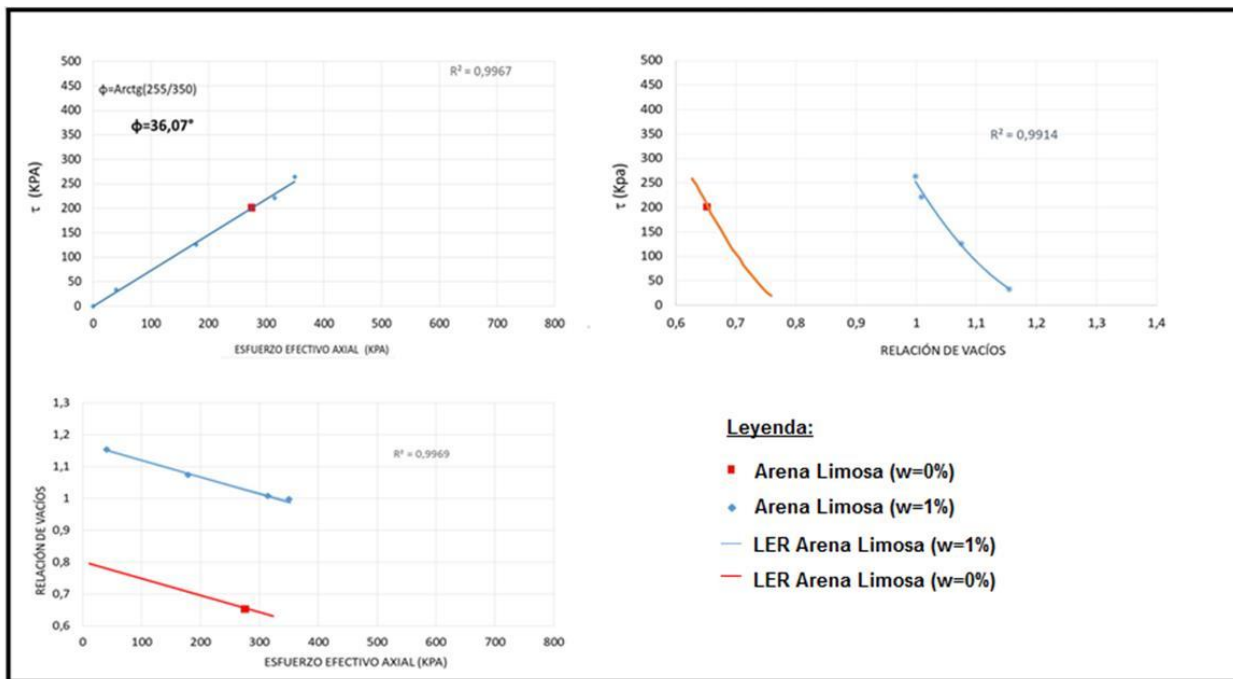


Figura 7: Aplicación del modelo semiempírico integrado a los ensayos de arenas limosas preparadas con w=1% y w=0% de humedad

Tabla III: Parámetros iniciales de ensayos realizados con arena limpia a altura constante

Parámetros iniciales	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Humedad natural inicial $\omega_0$ (%)	1,00	1,00	1,00
Porcentaje pasante No. 200, (%)	0	0	0
Límite Líquido, (%LL)	NL	NL	NL
Límite Plástico, (%LP)	NP	NP	NP
Índice de Plasticidad, (%IP)	NP	NP	NP
Descripción (SUCS)	S	S	S
Gravedad Específica (Gs)	2,66	2,66	2,66
Peso Unitario Húmedo $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	11,1	11,107	11,11
Peso Unitario Seco $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	10,99	10,992	11
Peso Unitario Sumergido $\gamma_{sum}$ (kN/m <sup>3</sup> )	1,29	1,297	1,3
Relación de vacíos inicial, $e_0$	1,374	1,373	1,372
Porcentaje de Saturación, $S_r$ (%)	1,94	1,94	1,94
Relación de vacíos inicial al momento de ensayar, $e_0$	1,322	1,251	1,156
Deformación al momento de ensayar, $\epsilon_a$ (%)	2,18	5,12	9,10
Esfuerzo efectivo axial al momento de ensayar $\sigma_a$ (%)	245,17	981,07	1765,92
Duración del esfuerzo vertical durante el ensayo (s)	41269,00	0,00	41440,00

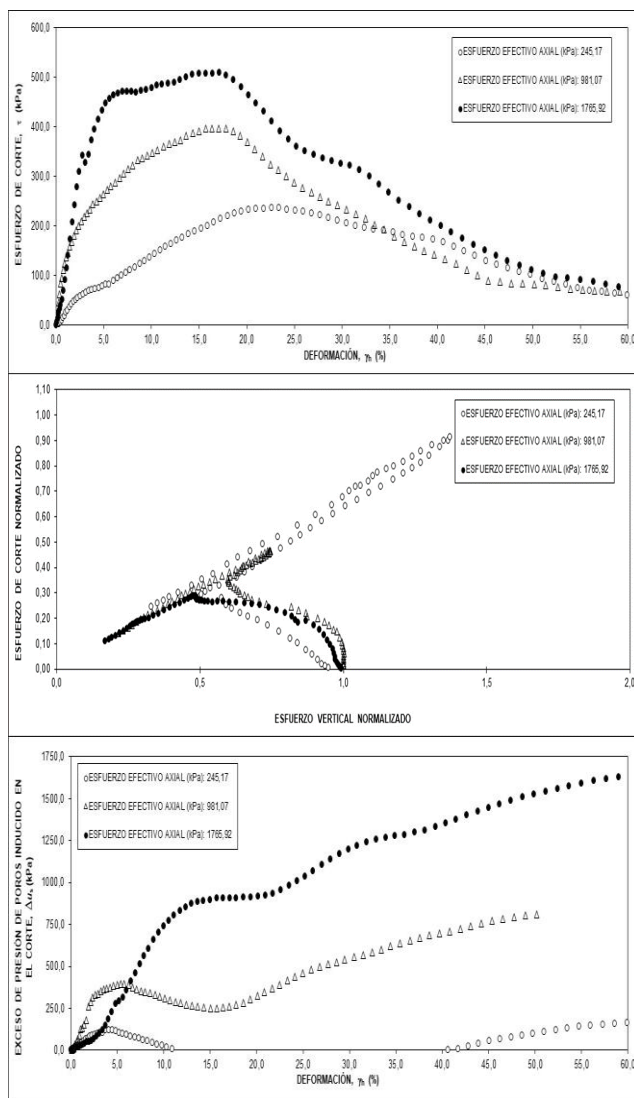


Figura 8: Resultados ensayo DSS bajo altura constante en arena limpia (con  $w=1\%$ )

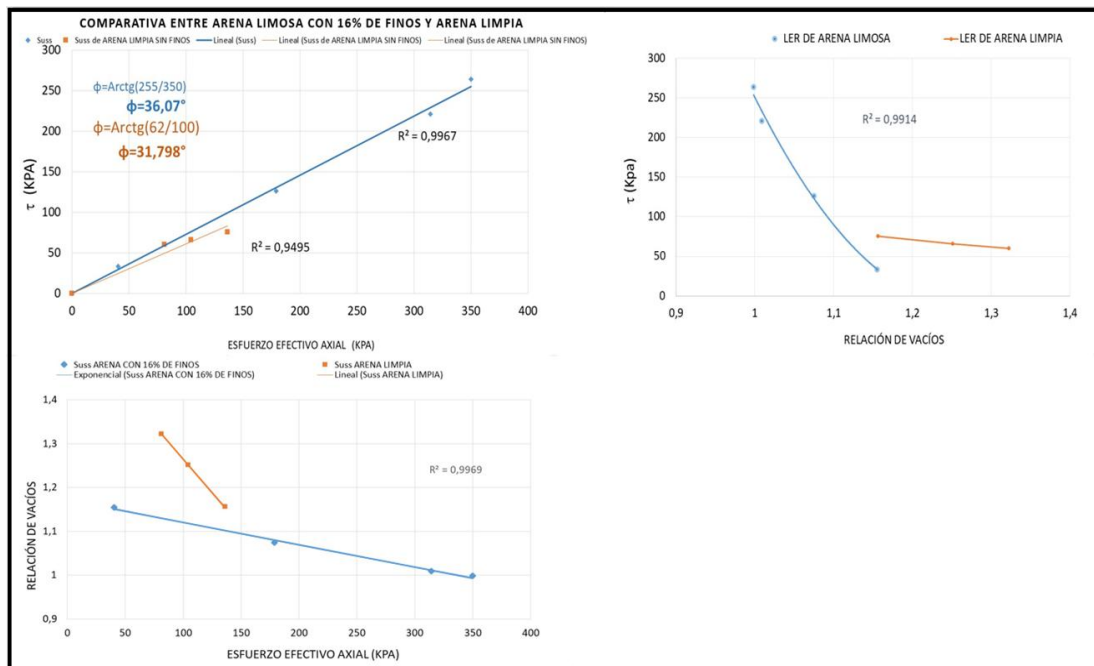


Figura 9: Resultados ensayo DSS bajo altura constante en arenas limosa y limpia (con w=1%)

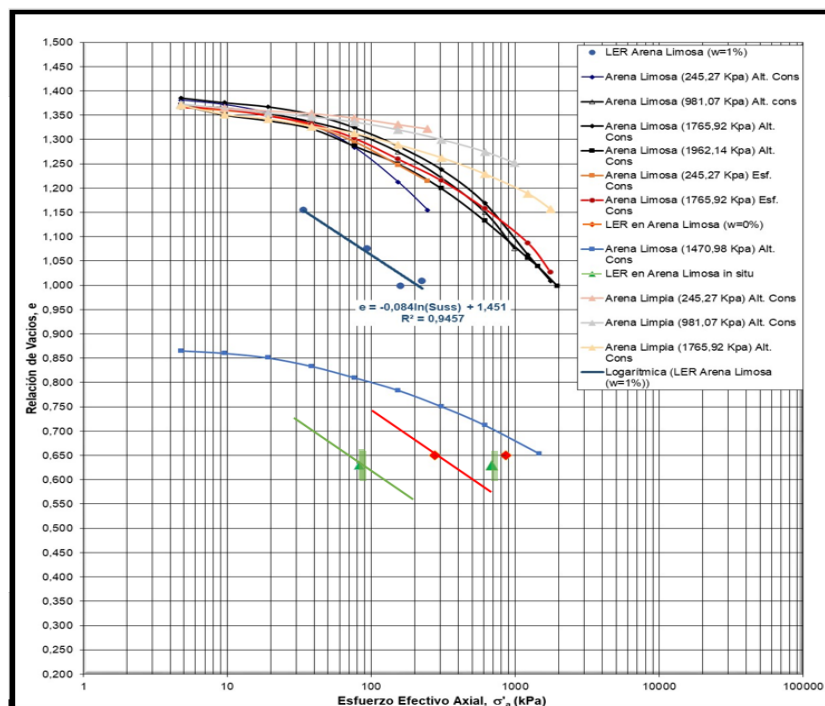


Figura 10: Curvas de consolidación y LER para la muestra de arena limosa

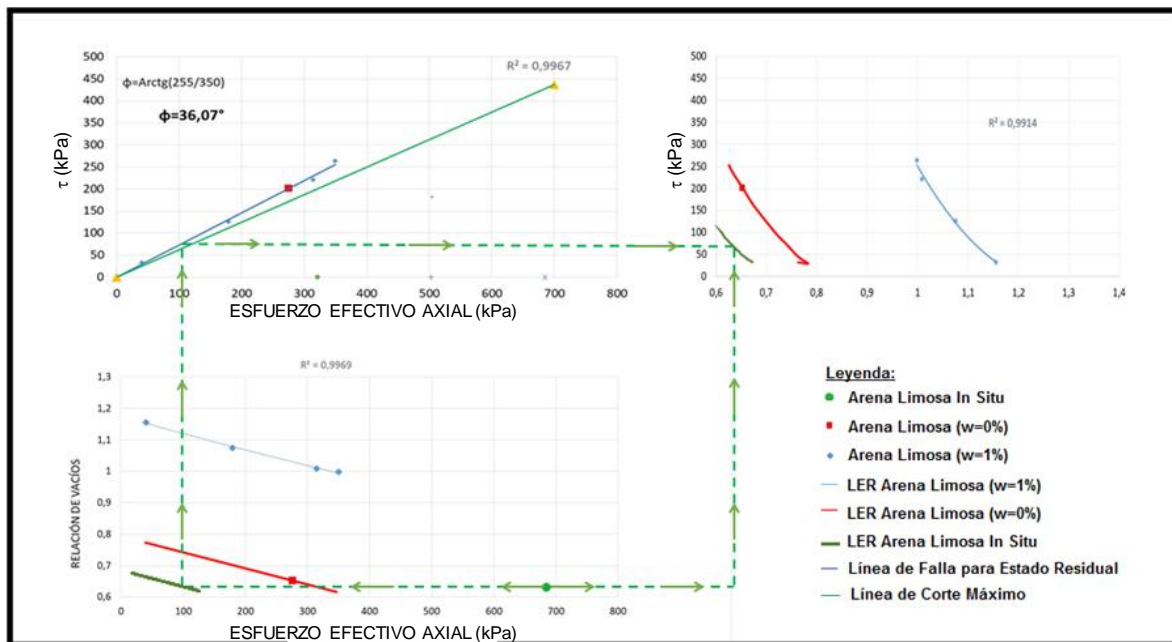


Figura 11: Aplicación del "Modelo Echezuría" para hallar LER de la muestra de arena limosa in situ

#### IV. CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento de arenas limosas y arena limpias con distintos confinamientos mediante ensayos de corte simple directo (DSS). Estas pruebas, demostraron que es posible utilizar estos ensayos para obtener la LER en lugar de los ensayos TXT.

Se demostró además, que la LER de las arenas limosas depende de la estructura de la muestra. Arenas limosas con estructuras diferentes, tendrán LER paralelas que pasan por diferentes relaciones de vacíos. También se comprobó que el ángulo de fricción en estado residual de la arena limpia resulta menor que el de la arena limosa. Este ángulo varía según la granulometría y angularidad de los granos del suelo. Por consiguiente, una arena con contenido de finos no plásticos debe tener mayor ángulo de fricción que una arena con menor contenido de estos finos.

El método empleado para la preparación de las muestras de arenas limosas modifica su estructura, por lo que si la muestra de suelo es preparada con

diferentes contenidos de humedad y diferente patrón de compactación o vibrado al ser colocada en los moldes, cambiará entonces la posición de la LER. Esto se evidencia en el caso de la muestra de arena limosa con menor porcentaje de humedad que resultó con menor relación de vacíos que las muestras con mayor contenido de humedad.

Finalmente, se verificó que el modelo semiempírico integrado permite una adecuada interpretación y predicción de la resistencia residual de las arenas limpias y limosas tanto en el laboratorio como en el campo.

#### REFERENCIAS

- [1] Echezuría, H. (2018). *Integración 3D de la Propiedades Ingenieriles del Suelo y la Importancia del Plano q-e*. Centro de Investigaciones y Desarrollo de Ingeniería (CIDI) UCAB.
- [2] De las Casas, Víctor M. y Torres, Andrés, *Respuesta al Corte de arenas limosas con alto confinamiento alrededor de la cara de pilotes costa afuera*, TRABAJO DE GRADO, UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO, OCTUBRE 2018.

- [3] Kramer, J. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Nueva Jersey. Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Mechanics.
- [4] González Mireles, M. A. (1994). *Trabajo de Grado: Comportamiento de arenas y limos no plástico sometidos a cargas en condiciones no drenadas*. Caracas. Universidad Simón Bolívar
- [5] Ishihara, K. (1993). *Liquefaction and flow failure during earthquakes*. *Geotechnique* 43, No. 3. pp.351-415.
- [6] Govinda Raju, L.; Sitharam, T.G.; Srinivasa Murthy, B.R. (2004) *Cyclic and Monotonic Undrained Shear Response of Silty Sand from Bhuj Region in India*. Bangalore. ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 450, Vol. 41, No. 2-4, pp. 249-260