



**UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO**

**TRABAJO DE ASCENSO A PROFESOR TITULAR  
PRESENTADO POR:  
HUGO IGNACIO PEREZ AYALA**

**CARACAS, 30 DE NOVIEMBRE DE 2016**

**“ENSAYO DE CORTE DIRECTO Y EL EFECTO DE LA  
VARIACIÓN DEL ÁREA”**

## **CONTENIDO**

### **Resumen**

- I. Introducción**
- II. Marco Referencial, Ensayo de Corte Directo**
- III. Determinación de la Ecuación Para la Corrección del Área en un Ensayo de Corte Directo en Muestra Circular**
- IV. Determinación del Esfuerzo Cortante en un Ensayo de Corte Directo**
- V. Proposición de Correcciones para un Ensayo de Corte Directo**
- VI. Preparación de Muestras**
- VII. Comparación de Resultados de Ensayos de Corte Directo en Muestras Granulares para Diferentes Relaciones de Vacíos Iniciales**
- VIII. Discusión**
- IX. Conclusiones**

## **REFERENCIAS**

### **LISTA DE REFERENCIAS SEÑALADAS EN EL TEXTO**

## **IMÁGENES**

- 1. GEOMETRÍA**
- 2. DEFINICIÓN DE ÁREAS**
- 3. DEFINICIÓN DE SECTOR, TRIÁNGULO DEL SECTOR Y SEGMENTO DEL CÍRCULO**
- 4. PROCESO DE REDUCCIÓN DEL ÁREA**
- 5. DEFINICIÓN DE ÁREAS: METAL-SUELO, SUELO-SUELO Y SUELO-METAL E INICIAL**
- 6. TABLA RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS.**

## **NOMENCLATURA**

### **DEFINICIÓN Y LISTA DE SÍMBOLOS**

## **ANEXOS**

- 1. ENSAYO DE CORTE DIRECTO EJEMPLO DE CÁLCULO**
- 2. MEMORIA DE CÁLCULO EN BASE A “N” (SPT)**

# **“Ensayo de Corte Directo y el Efecto de la Variación del Área”**

## **RESUMEN**

**El Ensayo de Corte Directo es muy utilizado por profesionales dedicados a la Geotecnia, la gran mayoría de las referencias hablan de la variación del área de corte como una limitación que produce imprecisión en la obtención de parámetros de resistencia. Esta investigación presenta una modalidad que ajusta los resultados en muestras circulares y cuadradas y una serie de ensayos para comparar e interpretar los criterios de corrección en uso y el deducido por el autor.**

## **I. Introducción**

En la primera parte presentamos un marco referencial general de los ensayos de corte en varias modalidades, algunas ventajas, limitaciones, variantes en los esfuerzos y obtención de la resistencia máxima, última y residual al corte, así como su interpretación referida a la envolvente Morh-Coulomb. Posteriormente deducimos la ecuación que permite calcular el área reducida que se genera durante el ensayo en una muestra circular, ésta deducción no aparece en las investigaciones referenciadas aunque podemos encontrar la ecuación en diferentes modalidades, en ocasiones mal interpretadas que producen resultados incorrectos. La revisión de los criterios usados en la práctica profesional relacionados con las correcciones al área de la muestra es parte del texto.

Adicionalmente presentamos una alternativa de cálculo que ajusta y mejora las correcciones. En punto aparte presentamos un análisis comparativo de los criterios de corrección a los resultados del ensayo relacionados con la variación del área de corte incluyendo la modalidad deducida en este trabajo. El tema requiere una revisión de procedimientos referentes a la preparación de muestras y en todo lo relacionado con la interpretación de resultados.

Para finalizar análisis y comparaciones de resultados para ensayos en muestras circulares, en un material natural no cohesivo y una comparación de los resultados, calculados según los distintos criterios de corrección. Concluimos el trabajo con afirmaciones y recomendaciones basadas en esta experiencia incluyendo un resumen de las expresiones matemáticas para

aplicar, según el método propuesto y efectuar las correcciones a los resultados del ensayo, afectados por la variación del área durante su ejecución.

## **II. Marco Referencial, Ensayo de Corte Directo**

El ensayo de Corte Directo, en todas sus modalidades, tiene como objetivo fundamental la obtención de parámetros de resistencia mediante la obtención de la envolvente de falla.

Al hablar de modalidades debemos hacer referencia a la forma y tamaño de la muestra y equipo empleado. Los equipos mas usados son: Corte Simple, Corte Directo o Confinado y Corte en Anillo Circular, en todos los casos podemos efectuar el ensayo en las modalidades de deformación o esfuerzo controlado **K. H. Head (1982)**.

En este trabajo siempre hablaremos del Ensayo de Corte Directo Confinado y desplazamiento controlado. El Corte Directo simple se efectúa en muestras no confinadas, donde medimos deformaciones en su sección vertical durante la aplicación de la fuerza horizontal. El objetivo principal es la obtención del Módulo Elástico de Corte “G” para pequeñas deformaciones laterales y angulares de la muestra en su sección vertical, este valor es muy usado en problemas de ingeniería sísmica.

La descripción del equipo y ensayo de Corte Simple escapa al objetivo de este trabajo y podemos referir la información a la referencia señalada.

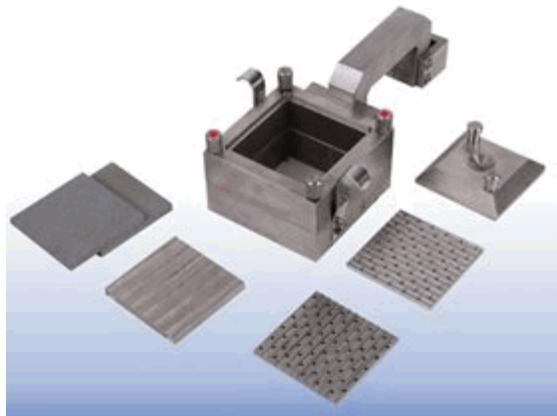
Es oportuno mencionar el equipo de Corte de Anillo Circular porque en éste equipo se mantiene la dimensión de la muestra y no requiere de corrección del área. Este es el punto fundamental tratado en este trabajo, Lamentablemente el equipo de Corte Simple presenta muchas deficiencias, las más importantes son la dificultad para preparar una muestra homogénea en todo el anillo, limitación a muestras alteradas, la variación de los esfuerzos en la superficie de falla entre el radio interior y exterior de la muestra y que no es un equipo de uso generalizado en los laboratorios.

Referente al tamaño de la muestra, en estos equipos podemos afirmar que es muy variable y que depende del diámetro máximo de las partículas del suelo, es un problema de escala. En general usamos muestras cuadradas o circulares de

área comprendida entre 30 y 60 mm<sup>2</sup>, se utilizan equipos para muestras mayores en ensayos de roca y material granular grueso como piedra picada.

En los equipos convencionales de Corte Directo Confinado la forma de las muestras pueden ser cuadradas o circulares, en este texto hablaremos de estas variantes.

A continuación fotos de catálogo de equipos de Corte Directo Circular y Cuadrado.



La resistencia al corte se obtiene mediante el ensayo de varias probetas de igual relación de vacíos sometidas a diferentes esfuerzos normales.

El equipo convencional consiste en dos marcos concéntricos que hacemos desplazar uno sobre el otro y que contienen la muestra sometida a un esfuerzo normal y hacemos fallar en un plano horizontal.

Durante el proceso determinamos:

- Valores de la fuerza horizontal.

- La deformación lateral que indica la traslación de un marco sobre otro.
- La deformación vertical de la muestra sometida a una carga constante vertical que nos indicara la dilatación del material durante el proceso de corte.
- Estas mediciones permiten obtener la resistencia al corte máxima y última o residual, entendiéndose como última o residual la resistencia del material posterior a la falla que bajo carga constante continua deformándose.

El ensayo se repite para muestras iguales pero con diferentes cargas normales que serán constantes durante el corte.

Como resultado, tendremos varios puntos en un gráfico, esfuerzo normal vs resistencia al corte. Estos puntos definen la envolvente de falla del material, aproximación dada por el criterio de falla de Mohr-Coulomb, de una recta.

Con la ecuación de la recta obtenemos los parámetros de resistencia al corte fricción y cohesión, entendiéndose por fricción el ángulo correspondiente a la pendiente de la recta y cohesión como la resistencia al corte de un material que no está sometido a esfuerzo normal.

En el caso de Cohesión debemos distinguir la cohesión aparente que presentan los materiales finos granulares, generada por la tensión capilar entre las partículas para condiciones húmedas, ésta se pierde al saturarse.

Cohesión real es la que ocurre con materiales arcillosos y se mantiene en condición saturada.

En este trabajo, presentamos una alternativa para materiales normalmente consolidados y granulares para obtener parámetros que se ajusten mas a la envolvente real de Mohr que es una parábola que pasa por el origen.

Podemos calcular el esfuerzo normal que coincide con la ecuación de la recta que pasa por el origen y de la recta cuya aproximación no pasamos por el origen que representa una aproximación a la extensión de la parábola.

Podemos afirmar que la fricción del material está mejor representada por la recta que es extensión de la parábola que por la aproximada que pasa por el origen.

Para el caso de la envolvente de Mohr-Coulom la resistencia última o residual es la recta que pasa por el origen y la envolvente curva de Mohr da valores similares.

Para las arcillas saturadas normalmente consolidadas, la envolvente para esfuerzos totales no pasa por el origen y representan un ensayo sin consolidar y sin drenar, la envolvente será aproximadamente una recta horizontal con ligero crecimiento al aumentar el esfuerzo normal.

Sólo los casos de arcillas muy blandas en situación de preconsolidación, no drenadas y no consolidadas el valor es igual al valor residual y la envolvente recta, pasa por el origen.

La velocidad para efectuar el desplazamiento de un marco sobre otro depende del criterio del ingeniero y el tipo de muestra; en general una velocidad de 0,5 mm/minuto es apropiada para todos los casos donde las mediciones están hechas en esfuerzos totales.

En el caso de granulares limpios o pocos finos los esfuerzos totales son iguales a los efectivos por su alta permeabilidad; en caso de suelos de baja permeabilidad debemos recordar que el ensayo lo realizamos y medimos en términos de esfuerzos totales y que para esfuerzos efectivos es preferible un ensayo que permita la medición y control de las presiones de poros.

Una limitación del ensayo, está referida a la superficie predefinida de corte que puede o no ser la más débil, esto es muy común en suelos residuales y rocas, arcillas con lentes y muchas variantes en la heterogeneidad de los suelos; en éstos casos es común encontrar variaciones con ensayos que no tienen esta limitación como son los ensayos triaxiales o caso análogo de compresión axial no confinada en una muestra tallada en suelos cohesivos.

En muestras alteradas, también encontramos diferencias con ensayos triaxiales sometidos a carga lateral ya que las muestras en equipo de corte no están sometidas a esta condición sólo a un confinamiento lateral.

En general los factores que afectan los resultados son muchos. **Thermann et al (2006)** presenta un estudio estadístico comparativo donde analiza algunos de ellos como:

- Operador
- Velocidad de Ensayo

- Diámetro de la Muestra.
- En este trabajo se afirma que la velocidad de ensayo es un factor importante en la variación de los resultados

A estos comentarios podemos añadir la preparación de las muestras a:

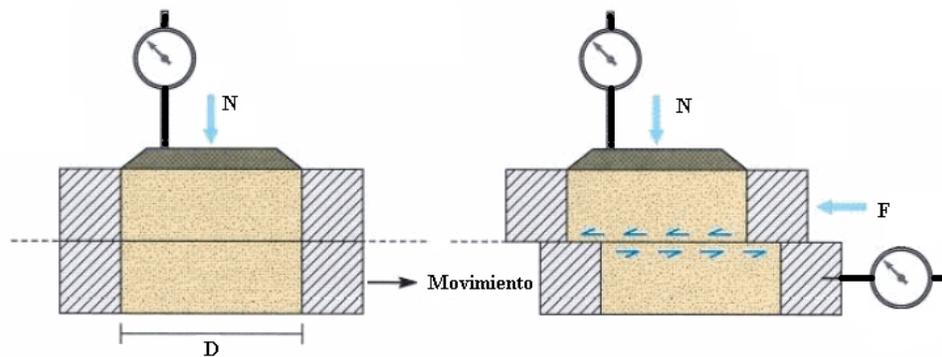
- Igual relación de vacíos
- Aproximación a una recta como criterio de falla de Mohr Coulomb
- La variación del área de corte durante el ensayo

### III. Determinación de la Ecuación Para la Corrección del Área en un Ensayo de Corte Directo en Muestra Circular

#### Ensayo

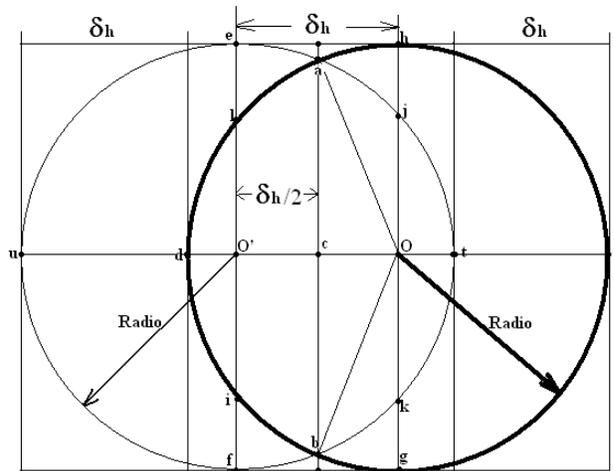
Como tratamos en el punto anterior, el ensayo se realiza manteniendo fijo el marco superior y produciendo el movimiento del marco inferior, el esfuerzo normal lo aplicamos inicialmente a la muestra en su parte superior y dentro del marco fijo, sobre un cabezal de carga medimos la deformación vertical durante el proceso de corte. El movimiento del marco inferior dentro de la caja permite la lectura de la deformación horizontal durante el proceso de corte en un plano horizontal y la fuerza aplicada a la caja que contiene ambos marcos se refleja en el marco superior acoplado a un instrumento de lectura de carga.

El esquema siguiente muestra las partes esenciales del proceso de corte.



#### Geometría.

Una visual en planta (Imagen 1) de una muestra circular entre dos marcos y la traslación del diámetro del círculo cuando aplicamos una fuerza horizontal al marco superior o inferior móvil con relación al otro marco que permanece fijo.

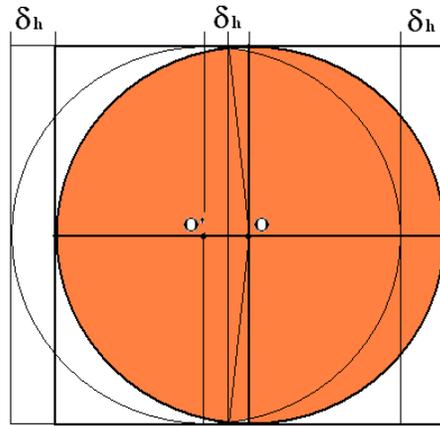


**IMAGEN 1**

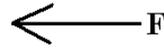
Al trasladarse el círculo o un marco sobre otro se reduce el área de la muestra en la zona de contacto suelo-suelo. El área resultante es el doble del área definida por la sección de círculo comprendido entre la secante originada por la traslación del diámetro en el círculo original.

**Deducción.**

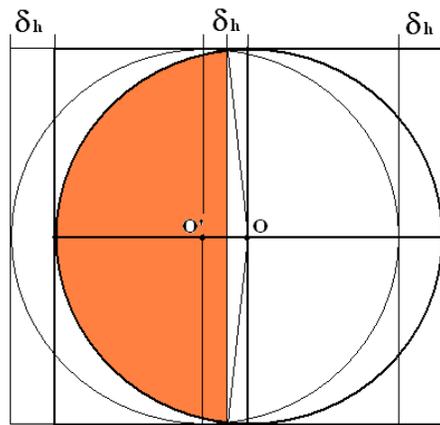
La variación del área la podemos obtener con soluciones a la geometría de un círculo (Hudson, 1917,1939). Calculamos el área del sector del círculo, restamos la parte triangular del sector y en su zona central obtenemos el segmento de círculo (Imágenes 2 y 3), éste se encuentra entre la secante y el arco resultante, el sector representa la mitad del área reducida de la zona de contacto suelo-suelo.



$\delta_h$  = deformación horizontal  
 $F$  = fuerza horizontal  
 $O$  = centro del círculo inicial  
 $O'$  = centro del círculo desplazado



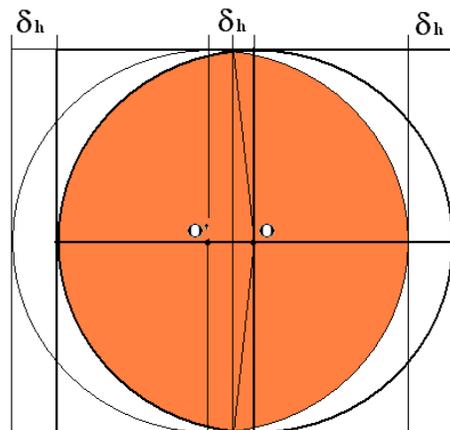
 **Área Inicial**



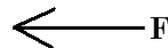
$\delta_h$  = deformación horizontal  
 $F$  = fuerza horizontal  
 $O$  = centro del círculo inicial  
 $O'$  = centro del círculo desplazado



 **Mitad de Área Reducida**

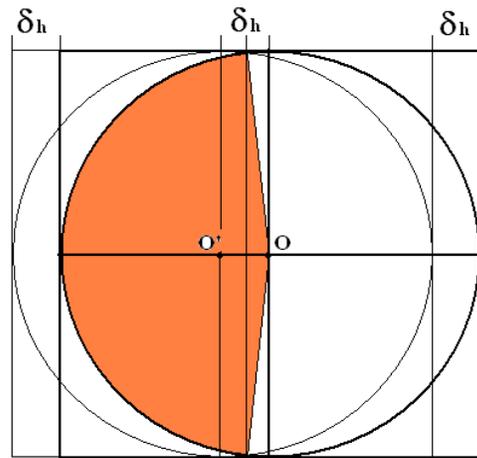


$\delta_h$  = deformación horizontal  
 $F$  = fuerza horizontal  
 $O$  = centro del círculo inicial  
 $O'$  = centro del círculo desplazado



 **Área Reducida**

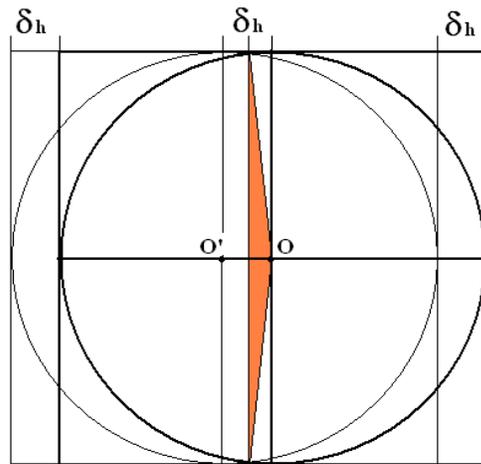
**IMAGEN 2**



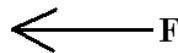
$\delta_h$  = deformación horizontal  
**F** = fuerza horizontal  
 O = centro del círculo inicial  
 O' = centro del círculo desplazado



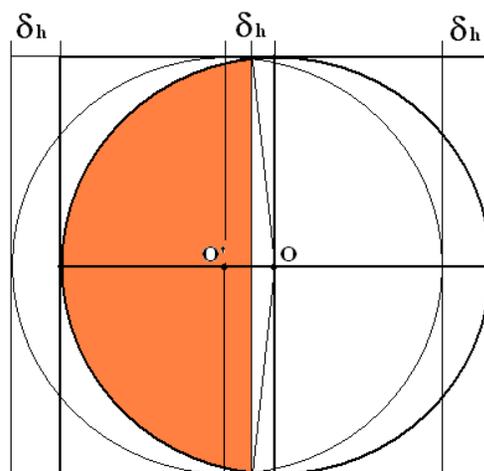
**Sector del  
Círculo**



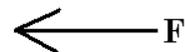
$\delta_h$  = deformación horizontal  
**F** = fuerza horizontal  
 O = centro del círculo inicial  
 O' = centro del círculo desplazado



**Triángulo del  
Sector del  
Círculo**



$\delta_h$  = deformación horizontal  
**F** = fuerza horizontal  
 O = centro del círculo inicial  
 O' = centro del círculo desplazado



**Segmento del  
Círculo**

**IMAGEN 3**

**Usando la nomenclatura y geometría mostrada en la Imagen 1 determinamos la longitud de la secante “ab”.**

El triángulo “bOa” está formado por dos triángulos rectángulos iguales “acO” y “bcO”, las hipotenusas de estos triángulos “aO” y “bO” son iguales al Radio “R” del Círculo Inicial y el cateto compartido “cO” igual a la mitad de la traslación horizontal “ $\delta_h$ ” entre los marcos en el sentido de la carga “F”.

**Las longitudes de “ca” y “cb son iguales a:**

$$\text{“ca”} = \text{“cb”} = \text{Raíz}(\mathbf{R^2 - (\delta_h/2)^2}) \text{ y}$$

$$\text{“ba”} = \mathbf{2 \text{ Raíz}(R^2 - (\delta_h/2)^2)}$$

$$\text{“bO”} = \text{“Oa”} = \mathbf{R}$$

$$\text{“cO”} = \mathbf{\delta_h/2}$$

**Obtenidos los triángulos y sus lados calculamos sus ángulos en radianes:**

$$\text{Ángulo “cOa”} = \text{Ángulo “cOb”}$$

$$\text{cos “cOa”} = \mathbf{(\delta_h/2)/R}$$

$$\text{Ángulo “cOa”} = \mathbf{\text{acos}((\delta_h/2)/R), \text{ (operar en radianes)}}$$

$$\text{Ángulo “caO”} = \text{Ángulo “cbO”}$$

$$\text{Ángulo “caO”} = \mathbf{(\pi/2) - \text{cos}((\delta_h/2)/R), \text{ (operar en radianes)}}$$

$$\text{Ángulo “aOb” (ángulo central “ObidlaO”)} = \mathbf{2 \text{ acos}((\delta_h/2)/R)}$$

**El área del triángulo “Oab” es igual a:**

$$\text{Altura “cd”} = \mathbf{\delta_h/2}$$

$$\text{Base del triángulo “ba”} = \mathbf{2 \text{ Raíz}(R^2 - (\delta_h/2)^2)}$$

$$\text{Área del Triángulo “Oab”} = \mathbf{\text{“ba”} (\delta_h/2) / 2}$$

**La Imagen 3 muestra la secuencia de los cálculos de las áreas desde el área inicial hasta el final del ensayo.**

**Sustituyendo el valor de “ba” en la expresión tenemos:**

$$\text{Área del Triángulo “Oab”} = \mathbf{(\delta_h/2) \text{ Raíz}(R^2 - (\delta_h/2)^2)}$$

$$\text{Área del Sector del círculo} = \mathbf{(R^2/2) (2 \text{ acos}((\delta_h/2)/R))}$$

$$\text{Área del Segmento del Círculo} = \mathbf{\text{Área Reducida} / 2}$$

$$\text{Área Reducida} = R^2 \text{acos}((\delta h/2)/R) - (\delta h/2) \text{Raíz}(R^2 - (\delta h/2)^2)$$

Sustituyendo “R” por “D/2” tenemos:

$$2 \text{ Área Reducida} = A_c$$

$$2 A_c = (D^2/4) \text{acos}(\delta h/D) - (\delta h/2) \text{Raíz}((D^2/4) - (\delta h/2)^2)$$

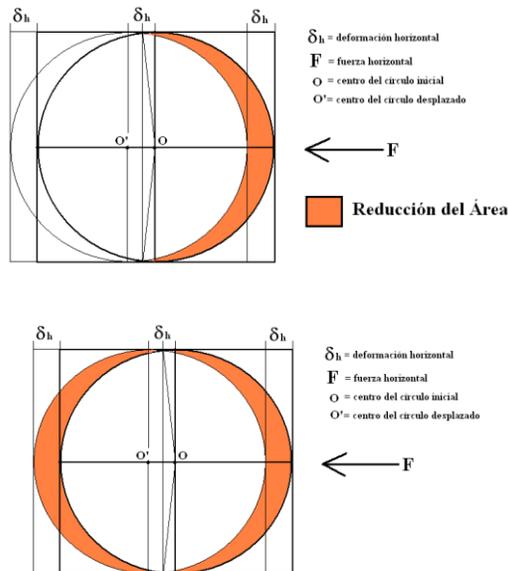
Simplificando:

$$A_c = (D^2/2) \text{acos}(\delta h/D) - (\delta h/2) \text{Raíz}(D^2 - \delta h^2)$$

Esta ecuación es idéntica a la utilizada en muchos cálculos deducida por **Bardet (1997)** pero su obtención no aparece en los documentos consultados y no ha sido publicada por su autor.

Posteriormente definiremos “Ac” como área de contacto suelo-suelo “Ass” y “Ao-Ac” como la diferencia entre el área inicial y la corregida o áreas en las zonas de contacto suelo-metal y metal-suelo “Asm y Ams” que denominaremos “Ad = Ao-Ac”.

En la Imagen 4 observamos el proceso de reducción del área donde las zonas sombreadas corresponden a las indicadas en el párrafo anterior como “Asm” y “Ams”.



**IMAGEN 4**

La presentación de la deducción en este trabajo tiene como objetivo clarificar su uso por otros autores y la utilización que haremos en las correcciones que propondremos a los resultados y el efecto de la variación del área.

En trabajos de fecha posterior a **Bardet /1997)** aparecen modificaciones que son matemáticamente iguales.

### **Muestras Cuadradas**

Para muestras cuadradas la reducción del área de corte es lineal y la ecuación para el área corregida es:

$$A_c = A_o - \delta_h (B)$$

$$A_c = B^2 - \delta_h (B) = B (B - \delta_h)$$

**Donde:**

**B = lado del cuadrado**

**$\delta_h$  = deformación o traslación horizontal**

### **Discusión**

La ecuación para muestras circulares ha sido utilizada por varias investigaciones con variantes matemáticas, a continuación presentamos las diferentes versiones de la ecuación de **Bardet (1997)**.

Las variantes encontradas en varias publicaciones son iguales a la ecuación original de **Bardet (1997)** deducida en este trabajo y que identificaremos en adelante como “hipa”.

$$A_c = (D^2/2) (\theta - \cos(\theta) \text{ seno}(\theta)); \text{ donde: } \theta = \text{acos}(\delta_h/D)$$

**Sustituyendo el valor de “ $\theta$ ” tenemos:**

$$1. A_c = (D^2/2) (\text{acos}(\delta_h/D) - \cos(\text{acos}(\delta_h/D)) \text{ seno}(\text{acos}(\delta_h/D)))$$

**Esta ecuación podemos convertirla en:**

$$2. A_c = (D^2/2) (\text{acos}(\delta_h/D) - (\delta_h/D) \text{ seno}(\text{acos}(\delta_h/D)))$$

**También en:**

$$3. A_c = (D^2/2) (\cos(\delta_h/D) - (\delta_h/D) \text{ raíz}(1-(\delta_h/D)^2))$$

**La ecuación “hipa”:**

$$4. A_c = (D^2/2) \cos(\delta_h/D) - (\delta_h/2) \text{ raíz}(D^2 - \delta_h^2)$$

El primer término es igual para todas y el cálculo del segundo término en las ecuaciones “1, 2, 3 e hipa” da resultados idénticos.

Una variante a las ecuaciones es expresar el área corregida como resultado de multiplicar el área inicial por un factor de reducción.

$$A_c = A_o Fr$$

El “Fr” se deduce extrayendo como factor común “ $A_o = \pi D^2/4$ ” área inicial de la muestra. Tomando la ecuación “hipa” tenemos:

$$A_c = (\pi D^2/4) [(2/\pi)\cos(\delta h/D) - (\delta_h)(2/\pi)(1/D^2) \text{ Raíz}(D^2 - \delta_h^2)]$$

**Ordenando valores y términos:**

$$A_c = A_o [2/\pi[\cos(\delta h/D) - (\delta_h/D^2) \text{ Raíz}(D^2 - \delta_h^2)]] \text{ ó}$$

$$A_c = A_o [2/\pi[\cos(\delta h/D) - (\delta_h/D) \text{ Raíz}(1 - (\delta h/D)^2)]]$$

$$A_c = A_o Fr$$

**Donde:**

$$Fr = 2/\pi[\cos(\delta h/D) - (\delta_h/D^2) \text{ Raíz}(D^2 - \delta_h^2)]$$

**ó**

$$Fr = 2/\pi[\cos(\delta h/D) - (\delta_h/D) \text{ Raíz}(1 - (\delta h/D)^2)]$$

Para todas las expresiones el ángulo “ $\cos(\delta h/D)$ ” esta expresado en radianes.

Algunos textos GEOCOMPCORP (2013), Ölmez (2008), Bareither et al (2006 y 2007) muestran modificaciones a las ecuaciones convirtiendo grados a radianes, asumimos que el término “ $\cos(\delta h/D)$ ” fue calculado en grados.

**Si en las ecuaciones deducidas en este trabajo calculamos “ $\cos(\delta_h/D)$ ” en “grados” debemos multiplicar su valor por “ $\pi/180$ ”.**

A continuación algunas referencias cuyas expresiones pueden traer confusión a los usuarios, son parecidas pero con variantes que dan resultados imprecisos.

**Sarmiento et al (2007)** presenta una aproximación no ajustada al valor de la ecuación deducida.

**Skuodis et al (2014), refieren a Lai (2004).** La ecuación no es válida, posible error en la publicación.

**India (1996)**, nos dan una expresión simple y sencilla, con una variación porcentual de signo negativo del área reducida inferior al 10%, si la comparamos con el resultado de la solución exacta. Por su sencillez luce atractiva para un cálculo seguro y conservador. La ecuación es:

$$A_c = A_o (1 - \delta h/3); \text{ (cálculos en centímetros)}$$

Lo anterior es solo una muestra de los errores que se están cometiendo al reportar resultados imprecisos y que como veremos son significativos.

#### **IV. Determinación del Esfuerzo Cortante en un Ensayo de Corte Directo.**

Existen varios criterios de los expertos sobre la aplicación de la reducción del área de corte a los resultados del ensayo y la obtención del esfuerzo cortante en el plano o zona horizontal donde se desarrollan los esfuerzos.

##### **Criterios**

##### **1. Sin corrección de área para Esfuerzos Cortante y Normal**

Se considera innecesaria una corrección, entre otras razones porque complica el cálculo y la variación en los resultados no es significativa, **Lambe (1951)**. Cuando no existe efecto de adherencia el efecto de la corrección del área es nulo, por ello en la mayoría de los laboratorios no se efectúa esa corrección, **Marr (2006)**.

##### **2. Aplicación de la misma corrección del área para Esfuerzo Cortante y Normal**

Si corregimos el área para obtener el esfuerzo cortante debemos hacerlo con el esfuerzo normal que también variará, al graficar el esfuerzo normal corregido se desplaza a la derecha disminuyendo la pendiente de la envolvente, en

consecuencia obtenemos un valor similar para la envolvente con valores no corregidos, **Petley (1966)**.

### **3. Aplicación de corrección del área para Esfuerzos Cortante**

Corregir solo el área de corte para la obtención del esfuerzo cortante y mantener el esfuerzo normal sin variación. Esta variante es muy utilizada en equipos y programas, **DShear: MS User's Manual (2013)**. Adicionalmente hablan del problema de la inhabilidad que tienen para controlar el esfuerzo normal durante el ensayo.

### **4. Corrección del área para Esfuerzo Cortante en zona de contacto Suelo-Suelo previa disminución de la Fuerza Horizontal por Esfuerzos de Fricción y Cohesión en zonas de contacto Suelo-Metal, el esfuerzo normal inicial se mantiene constante**

Este criterio es una propuesta de este trabajo como alternativa a las anteriores, requiere la ejecución de ensayos paralelos para evaluar la resistencia al corte entre metal y suelo o la utilización de valores referenciales. La alternativa permite mantener el criterio de esfuerzo normal constante durante el ensayo y la reducción del área de corte para la estimación de la resistencia, en aparte de este documento presentamos el método y las correcciones propuestas.

No existe una opinión referente al efecto del cambio de las dimensiones de las muestras, **Skudis (2014)** afirma que los parámetros de resistencia no cambian con las dimensiones del equipo pero puede haber una diferencia de hasta el 10% ,si tomamos el área corregida solo para el esfuerzo cortante.

**Xu et al (2007)** comparan resultados en equipos pequeños y de grandes dimensiones sin tomar correcciones del área, cuando el desplazamiento no es mayor al 8%, coinciden con la afirmación anterior y afirman que la disminución del área en la estimación de los parámetros de resistencia al corte puede ser ignorada.

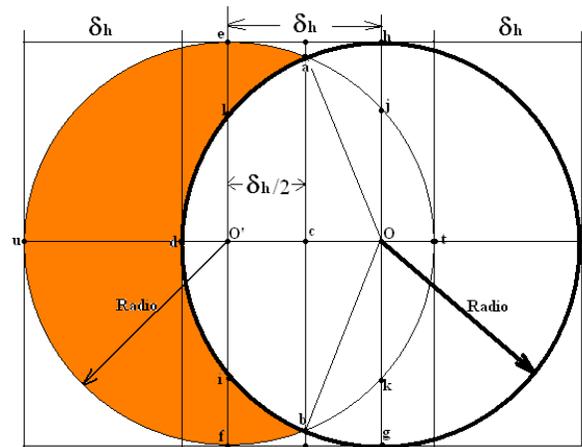
No existe suficiente información comparativa de resultados obtenidos en equipo de marcos cuadrados y su equivalente circular para ensayos de la misma muestra.

## **V. Proposición de Correcciones para un Ensayo de Corte Directo**

Cuando aplicamos una carga horizontal en un marco circular o cuadrado que se desplaza uno sobre el otro, mantenemos un esfuerzo normal constante sobre la parte superior de la muestra.; es evidente que durante el desplazamiento y el corte, parte de la muestra se desplaza sobre el metal del otro marco y sigue sometida al esfuerzo normal inicial. En la parte opuesta también tenemos una zona de contacto suelo

metal pero que no está sometida a esfuerzo normal; en caso de material granular podemos estimar cero la resistencia al corte en esa zona.

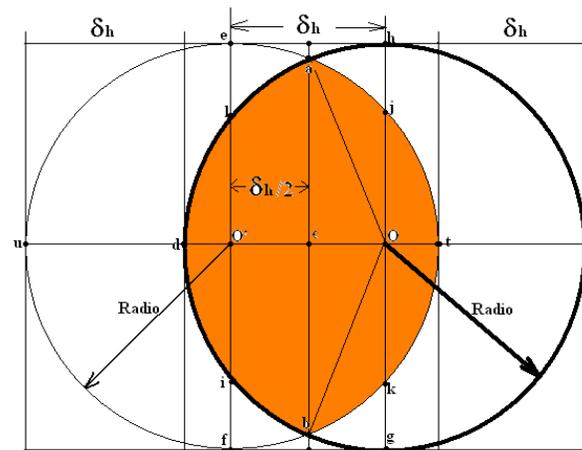
Si tenemos un material cohesivo adherente debemos efectuar la corrección por este factor en ambas áreas, así podemos dividir la fuerza “F” horizontal actuando en tres zonas con resistencias diferentes. Imagen 5



AREA REDUCIDA  
METAL-SUELO  
 $A_{r_{ms}}$

**Geometría  
Referencial**

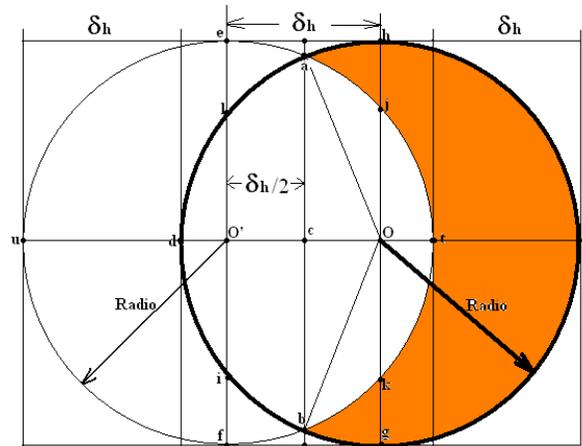
**Alta  
Deformación  
Horizontal**



AREA CORREGIDA  
SUELO-SUELO  
 $A_c$

**Geometría  
Referencial**

**Alta  
Deformación  
Horizontal**



AREA REDUCIDA  
SUELO-METAL  
 $A_{rsm}$

Geometría  
Referencial

Alta  
Deformación  
Horizontal

## IMAGEN 5

**La primera zona** corresponde al área de contacto no cargada por el esfuerzo normal solo actúa el peso propio del marco superior y se origina una superficie de contacto del metal de un marco sobre el otro. La parte del esfuerzo “F” que toma esta zona puede considerarse nula o muy pequeña, basta con aplicar un lubricante adecuado a las superficies en contacto y aplicar una corrección al equipo operado sin muestra, o usar los tornillos de separación de los marcos (Mínimo 0,5 mm, aproximadamente ½ vuelta) posterior a la aplicación de la carga normal retirando el enroscado después de la separación.

**La segunda zona** es la correspondiente al contacto suelo-suelo en el área corregida ( $A_c = A_{ss}$ ) cuya fórmula hemos deducido y presentado al inicio de este documento.

**La tercera zona** corresponde a la zona de contacto suelo-metal que se desarrolla durante el desplazamiento horizontal. Existen dos zonas opuestas de esta naturaleza, una no sometida al esfuerzo normal de la porción del marco sobre la muestra ( $A_{ms}$ ) y la otra en la parte de avance de la muestra sobre el marco donde tenemos el suelo sometido a carga normal ( $A_{sm}$ ). La primera solo actuara en el caso de arcillas adherentes en la segunda habrá fricción y adherencia. **Estas áreas las llamaremos desplazadas “ $A_d = A_o - A_c$ ”.**

Si definimos “F” como la fuerza horizontal externa podemos subdividirla en las componentes que se sobreponen.

$$F = F_{ss} + F_{sm} + F_{ms} + F_{mm}$$

Ó estimando  $F_{mm} = 0$

$$F = F_{ss} + F_{sm} + F_{ms}$$

Donde:

$F_{ss}$  = componente de la fuerza actuando en la superficie de contacto suelo-suelo y sometida a esfuerzo normal constante.

$F_{sm}$  = componente de la fuerza actuando en la superficie de contacto suelo-metal sometida a esfuerzo normal constante con componente adherente y friccionante.

$F_{ms}$  = componente de la fuerza actuando en la superficie de contacto metal-suelo no sometida a esfuerzo normal.

$F_{mm}$  = componente de la fuerza actuando en la superficie de contacto metal-metal no sometida a esfuerzo normal y que podemos asumir nula.

La fuerza “F” la leemos directamente durante el ensayo para cada desplazamiento horizontal “ $\delta_h$ ” entre marcos.

**Para la obtención de las componentes “ $F_{sm}$  y  $F_{ms}$ ” estimamos la resistencia al corte del suelo con el metal o efectuamos un ensayo paralelo con esta finalidad.**

Este ensayo puede ejecutarse sin variar el área ya que el marco inferior será sustituido por una base plana del metal que ensayaremos contra el suelo. Los parámetros de resistencia al corte serán “adherencia y fricción suelo-metal”.

Con estos parámetros podemos estimar la resistencia al corte “ $\tau_{sm}$ ” para cada esfuerzo normal que usemos en el ensayo tradicional suelo-suelo.

$$F_{sm} = \tau_{sm} / A_{sm}$$

Donde:  $A_{sm}$  = Área donde actúa el esfuerzo normal en la zona suelo-metal igual a “ $A_d = A_o - A_c$ ”.

Esta área “ $A_{sm}$ ” la podemos determinar a partir del área inicial “ $A_o$ ” y el área corregida “ $A_c$ ” para cada variación o desplazamiento horizontal “ $\delta_h$ ”.

Observando la Imagen 5. Deducimos para un material con fricción y adherente:

$$A_{sm} = A_o - A_c$$

$$A_{ms} = A_o - A_c$$

Para el caso de material adherente, en la parte sin carga normal desplazada, debemos tomar el valor de “ $A_{sm}$ ” y sumarle el efecto puramente adherente que se observa en la Imagen 4 como “ $2 A_d = 2 A_{sm} = 2 (A_o - A_c)$ ”, la adherencia puede

estimarse como “ $a = (c/2)$ ” actuando en “ $2 (A_o - A_c)$ ” ; una parte la sometida a carga normal y la posterior sin carga normal, asumimos que el esfuerzo normal no afecta la cohesión ni la adherencia.

Con estos valores y la resistencia al corte suelo-metal obtenemos “ $F_{sm}$ ” que restada al valor “ $F$ ” nos permite obtener “ $F_{ss}$ ” que es la fuerza real que produce el corte en la superficie suelo-suelo.

La ecuación general propuesta es:  $F_{ss} = F - F_{sm}(\text{friccionante}) - F_{sm}(\text{adherente})$

$$\tau_{ss} = F_{ss}/A_c = \{F - F_{sm}(\text{friccionante}) - F_{sm}(\text{adherente})\}/A_c$$

$$F_{sm}(\text{friccionante}) = \sigma_n \tan(\phi_{sm}) * A_d$$

$$F_{sm}(\text{adherente}) = (a * 2 A_d)$$

Sustituyendo:

$$\tau_{ss} = (F - \sigma_n \tan(\phi_{sm}) A_r - a 2 A_r) / A_c$$

$$\tau_{ss} = \{F - (A_d \sigma_n \tan(\phi_{sm}) - 2 a A_d)\} / A_c$$

Esta ecuación es de fácil solución usando las ecuaciones deducidas al principio de este trabajo y que son función del diámetro inicial “ $D$ ” en caso de muestra circular o del valor del lado “ $B$ ” de una muestra Cuadrada y del desplazamiento horizontal de un marco sobre otro “ $\delta_h$ ”.

**Nota:** En ejemplo de cálculo presentaremos una comparación de los resultados de los parámetros de resistencia al corte incluyendo el criterio y procedimiento anterior. En los cálculos asumimos  $\phi_{sm} = \phi/2$  y  $a = c/2$

Para estimaciones iniciales de la fricción y adherencia nos remitimos a **Potyondy (1960)** quien investigó estos parámetros con varios materiales, entre ellos con acero suave y pulido, dando los valores siguientes:

|  |   |
|--|---|
| Arenas Secas Densas                            | $f(\phi) = 0,54$  |
| Arenas Saturadas Densas                        | $f(\phi) = 0,64$  |
| Limos no Cohesivos Densos y secos              | $f(\phi) = 0,79$  |
| Limos no Cohesivos Saturados Suelos            | $f(\phi) = 0,40$  |
| Limos no Cohesivos Saturados Densos            | $f(\phi) = 0,68$  |
| Granulares Cohesivos (50-50), Cr entre 1 y 0,5 | $f(\phi) = 0,40; f(c) = 0,2$                                |
| Arcillas, Cr entre 1 y 0,73                    | $f(\phi) = 0,50; f(c) = 0,25$ y $f(c_{m\acute{a}x}) = 0,50$ |

Donde:

$$f(\phi) = \phi_{sm}/\phi;$$

$f(c)$ =adherencia/cohesión y  $f(c_{m\acute{a}x})$ =adherencia máxima/cohesión máx.

$Cr = (LL - \omega)/IP$ . (Consistencia Relativa)

El **Manual de Diseño, NFEC (1986)**, nos da algunos valores estimados de la fricción suelo-metal. Para arenas limosas y arcillosas  $\phi_{sm} = 14^\circ$ , para arena fina limosa y limos no plásticos  $\phi_{sm} = 11^\circ$ .

Otros autores, Lambe (1951), recomiendan para arenas una resistencia última de  $30^\circ$ , podemos asumir " $\phi_{sm}=30^\circ/2$ " y para la adherencia "cohesión/2", ambos valores nos permiten hacer estimaciones iniciales. Este criterio lo utilizamos en los cálculos de este trabajo.

Como procedimiento alternativo asumimos un valor de " $\phi_{sm}$ " para calcular el valor de  $F_{sm}$  y  $F_{ss}$ , con la envolvente para tres cargas normales, chequeamos el valor asumido con el valor de la fricción a la falla " $\phi_{m\acute{a}x}$ ", repetimos el cálculo con "0,5 de  $\phi_{m\acute{a}x}$ ." hasta lograr una convergencia de valores. Este procedimiento es programable y se puede adaptar a una hoja de cálculo.

En el caso de adherencia suelo-metal (arcillas) partimos del valor " $a = c/2$ ".

Podemos ejecutar ensayos paralelos del suelo en contacto con metal y determinar sus parámetros de resistencia al corte con mayor precisión.

Es conveniente recordar que para disminuir el efecto de las paredes interiores por la aplicación del esfuerzo vertical sobre el marco que contiene la muestra debemos lubricarlas antes de colocarla. La determinación del efecto del esfuerzo normal en estas zonas es de difícil predicción y la estimamos igual a cero.

**Potts et al. (1987)** han intentado dar respuesta simulando el ensayo de Corte Directo con mallas de elementos finitos. Estos trabajos se han orientado a un equipo de corte cuadrado y mallas bidimensionales en un plano vertical, sus soluciones no aplican al equipo circular.

El problema tridimensional en muestras circulares es complejo, podemos intuir una mejor distribución de la fuerza horizontal por la concavidad de la circunferencia en dirección a la zona central de la muestra y en toda la franja del plano probable de corte. Esta observación está basada en modelos visuales cualitativos de muestras en anillos circulares en movimiento sin cargas normales.

Para esta fecha ya existen algunas experiencias que demuestran cuantitativamente la validez de este planteamiento.

**Altaf, O. et al. (2016)** efectuaron ensayos paralelos en muestras similares cuadradas y circulares demostrando que los valores de resistencia al corte son mayores en muestras circulares. Es conveniente efectuar mas ensayos en muestras iguales usando equipos circulares y cuadrados de dimensiones equivalentes (Áreas iguales) y comparar los resultados.

Por otra parte, **Manole-Stelian, Serbulea (2013)** ha mostrado como el efecto de dilatación " $(\Delta H/H_0)$ " no es uniforme en marcos cuadrados producido por la expansión o contracción de la muestra durante el rodamiento y desplazamiento de las partículas en la zona de corte, ocurre una concentración o fluencia de partículas en dirección a la parte del marco en donde aplicamos la carga horizontal y se produce un desnivel con referencia a la zona opuesta en el cabezal de carga.

Podemos intuir que este fenómeno es menor en muestras circulares, la fuerza horizontal actúa y se distribuye en la mitad de la muestra, en la muestra cuadrada la fuerza horizontal se concentra en la zona cercana al marco que recibe la carga, las zonas laterales no actúan como en el marco circular.

La aparición de marcos cuadrados para ser usados en equipos de corte puede haber sido para facilitar los cálculos y efectuar correcciones al área en una época donde los cálculos repetidos con expresiones trigonométricas nos obligaban a soluciones más sencillas.

**Los marcos cuadrados facilitaron el cálculo pero desmejoraron las ventajas en la preparación de muestras**, especialmente inalteradas y que requieren tallado de especímenes provenientes de tubos de pared delgada circulares.

No es clara la necesidad de las correcciones al área en la aplicación de resultados a problemas geotécnicos comunes. Este punto lo trataremos al final de este documento.

## **VI. Preparación de Muestras.**

Una de las tareas más importantes para obtener resultados comparables de un ensayo de Corte Directo es la preparación de muestras granulares con igual relación de vacíos y en caso de suelos cohesivos igual grado de consolidación en la matriz dominante.

Experiencias de laboratorio con arcillas muy blandas normalmente consolidadas, preparadas con humedades cercanas a la humedad del límite líquido, mezcladas en diferentes proporciones con arena, nos han servido de base para diseñar una propuesta para la preparación de la muestras. **Serrano (1998)**.

Para el trabajo referido efectuamos varias mezclas de arcilla incrementando el porcentaje de arena. El objetivo fue la obtención de una relación entre la mezcla arcilla-arena y su resistencia al corte.

Cuando evaluamos la relación de vacíos y el peso unitario observamos que para garantizar homogeneidad en la fracción de arcilla y comportamiento similar de la matriz arcillosa en cada combinación para cada grupo decidimos preparar las mezclas y homogenizar la matriz de arcilla mediante igual carga de consolidación con igual porcentaje de arena antes de aplicar la carga normal.

En suelos granulares, investigaciones como la de **Bareither et al (2007)** se refleja una gran dispersión en resultados provenientes de distintos laboratorios y operadores para arenas similares. Los laboratorios siguen los métodos considerados como “Estándares” pero lamentablemente este tipo de ensayo está sujeto a muchas variables, **las variaciones ocurren principalmente por interpretación de resultados y los procedimientos de preparación de las muestras** que impiden la obtención de resultados comparables.

Basándonos en esta experiencia y otras similares proponemos las alternativas de preparación de muestras y al final sugerencias que permitan una interpretación real de los resultados.

Ejecutamos el ensayo de Corte Directo sin consolidar y sin drenar (UU) en suelos cohesivos y drenados en granulares, preparando todas las muestras con precarga o pre consolidación antes del ensayo. Posteriormente mantenemos la carga de preparación y la disminuimos a la requerida para efectuar el corte siguiendo los procedimientos siguientes.

### **Procedimiento para suelos cohesivos.**

#### **Ensayos (UU) y (C, UU)**

1. Efectuar un ensayo de consolidación unidimensional en anillo simple y obtener la carga de pre consolidación en muestra saturada.
2. En muestras talladas, Normalmente Consolidadas y saturadas planificar el ensayo de las probetas previa consolidación de las mismas a cargas iguales a la carga de pre consolidación obtenida en el ensayo convencional.

3. La carga normal máxima será la de la carga de pre consolidación para la primera muestra, para las restantes pre consolidamos a la misma carga y la disminuimos la carga normal para el corte de cada una.
4. Para muestras arcillosas húmedas planificar el trabajo aplicando igual carga de compresión inicial a todas las probetas. La primera probeta se ensayara con esta carga de compresión, la siguiente la comprimimos a igual carga y la reducimos a la carga normal requerida y así sucesivamente.
5. Las cargas Normales en muestras talladas y preparadas húmedas no deben superar 1 kg/cm<sup>2</sup>, una secuencia recomendada es 0,8, 0,4 y 0,2 kg/cm<sup>2</sup>. Esto tiene como única finalidad garantizar el confinamiento de la muestra durante el corte.
6. La consolidación ha ocurrido cuando se observe que no existe variación en el dial vertical de deformación.
7. Para todos los casos la velocidad de corte estipulada es 0,5 mm/minuto. El proceso de corte debe hacerse inmediatamente al aplicar la carga normal y haber ejecutado la separación de marcos, esto para disminuir el drenaje y fluencia por la ranura de separación en muestras saturadas y muy húmedas y poder asumir parámetros totales de resistencia.
8. Para ensayos Consolidados Sin Drenar (CU) las cargas de consolidación variaran en cada grupo de probetas (C, UU) y la envolvente resultante será la obtenida del ensayo de varios grupos y diferentes secuencias de cargas normales determinadas por las diferentes cargas de consolidación.
9. **El ensayo Consolidado Drenado en el equipo de Corte Directo no se recomienda en materiales saturados donde la matriz arcillosa determina el comportamiento** (Porcentaje tamaño arcilla menor a 2 micras igual o mayor al 40%), Los equipos convencionales de Corte Directo no permiten el control de velocidades muy bajas, ni medir presiones de poros durante el corte para estimar parámetros efectivos, de resistencia al corte puede obtenerse con ensayos Triaxiales que permiten la lectura de presiones de poros y su control durante el corte.
10. Recordar que la realización de un ensayo de consolidación en un equipo de corte, aún y cuando obtenemos curvas similares a los ejecutados en un odómetro tradicional es diferente por la presencia de una zona de drenaje perimetral en el contacto entre marcos que genera drenaje radial. Solo debe tomarse la lectura de deformación vertical como indicativo de estabilización de la muestra antes del corte.
11. Caso especial son las arcillas potencialmente expansivas, la carga normal será siempre superior a la presión de expansión obtenida en un odómetro en muestra seca sometida a un proceso de saturación.

## **Procedimiento para Suelos Granulares.**

Para el caso de arenas o materiales predominantemente granulares (mas del 60% granular, limo mas otros granulares) asumimos que los parámetros de resistencia al corte son iguales para esfuerzos efectivos y totales al no generarse presiones de poros durante el ensayo por una rápida disipación de la presión y su alta permeabilidad. En este trabajo presentamos observaciones al grado de humedad bajo en granulares finos y limosos cuyo comportamiento difiere de granulares secos o de alto grado de humedad.

El procedimiento propuesto es similar al de las arcillas aplicando iguales cargas de compresión que garanticen iguales o similares relaciones de vacíos y pesos unitarios en muestras de un mismo material. Para todos los casos es conveniente efectuar pruebas previas en el equipo que nos permitan ajustar el procedimiento y las cargas propuestas.

1. Preparar porciones de material de igual peso para cada probeta. Inicialmente probamos la capacidad de la caja de corte y procedemos a la obtención del peso que servirá como patrón.
2. Precargar cada muestra antes del corte a la carga normal máxima que será utilizada en el grupo, para cargas normales inferiores cargar hasta el valor máximo la primera probeta y en las siguientes repetir a igual carga y descargar a la carga normal de ensayo. El procedimiento con precarga en muestras de poco espesor nos da como resultado muestras sometidas a igual compresión que mostraran relaciones de vacíos similares antes del corte.
3. Como secuencia de preparación podemos establecer varias cargas máximas para obtener muestras con relaciones de vacíos altas, intermedias o bajas. (Relaciones de vacíos altas: 0,15 - 0,30 - 0,60 Kg/cm<sup>2</sup>; Intermedias: 0,5 - 1 - 2 kg/cm<sup>2</sup>; bajas: 1 - 2 - 4 kg/cm<sup>2</sup>; muy bajas 2 - 4 - 8 kg/cm<sup>2</sup>, en todos los casos aplicar siempre la carga mayor como precarga de preparación).
4. En todos los casos podemos verificar la relación de vacíos y el peso unitario de la muestra antes del corte tomando las dimensiones iniciales de la muestra comprimida.

En ambos casos queda la interpretación de los resultados obtenidos en laboratorio de los parámetros de resistencia al corte. Esto parte está al margen de la ejecución del ensayo y debe ser realizada por un especialista, no puede ser estandarizada.

## **VII. Comparación de Resultados de Ensayos de Corte Directo en Muestras Granulares para Diferentes Relaciones de Vacíos Iniciales.**

Con el objeto de efectuar una comparación de los criterios empleados para las corrección de resultados del ensayo de Corte Directo efectuamos una serie de ensayos en una muestra granular en estado natural.

Efectuamos cinco (5) ensayos con tres (3) probetas cada uno, aplicamos los mismos esfuerzos normales en cada ensayo y preparamos las muestras por ensayo con diferentes relaciones de vacíos iniciales. Los ensayos fueron para material suelto seco, denso seco, intermedio seco, denso saturado y por último suelto con humedad natural. **Las tres muestras secas fueron preparadas con material secado al horno.**

Adicionalmente efectuamos ensayos de granulometría, gravedad específica y humedad natural al material obtenido en campo.

En el campo obtuvimos los resultados de la Prueba Normal de Penetración y el valor de “**Ncampo (SPT)**” a la profundidad de toma de la muestra.

Para completar la investigación efectuamos un ensayo a compresión axial Consolidado Drenado (CD) cuyos resultados presentamos en este trabajo.

### **Caracterización Geotécnica de las Muestras.**

#### **Descripción Visual.**

Suelo natural obtenido a 0,5 metros de profundidad, color marrón claro, seco en su estado natural al tacto, no plástico, granular fino areno-limoso en estado suelto de baja densidad. Prueba Normal de Penetración 7 golpes/pié, martillo de seguridad de 60% de eficiencia.

#### **Clasificación en Laboratorio.**

Humedad Natural: 5%

Límites de Consistencia: No Plástico

Granulometría:

Pasante Tamiz N° 20: 100 %

Pasante Tamiz N° 40: 99 %

Pasante Tamiz N° 100: 28,1 %

Pasante Tamiz N° 200: 4,7%

Clasificación Unificada: Arena Mal Gradada con algo de Limo (SP)

Gravedad Específica: 2,67

#### **Ensayo Triaxial CID:**

Tres Especímenes

Alturas Iniciales (Lo): 8,02 – 8,057 – 7,970 cm

Diámetros Iniciales (Do): 3,557 - 35,780 – 35,706 mm

Áreas Iniciales (Ao): 9,94 – 10,053 – 10,0129 cm<sup>2</sup>

Pesos Iniciales (Wm): 134,45 – 136,9 - 134,4 gramos

Velocidad de Corte: 0,4 mm/minuto

Esfuerzos de Cámara y de Consolidación (Compresión Inicial):

0,5 – 1,0 – 2,0 (kg/cm<sup>2</sup>)

Esfuerzos Desviadores durante el corte:

2,0 – 3,8 – 6,6 (kg/cm<sup>2</sup>)

Relación de Vacíos Inicial promedio 0,59

Resultados:

Cohesión (c) 0,12 kg/cm<sup>2</sup> y Fricción (φ) 37,1 grados sin tomar punto 0,0

Cohesión (c) 0 kg/cm<sup>2</sup> y Fricción (φ) 39,2 grados con punto 0,0

### **Estimaciones Basadas en $N_{1,60}$ y Correlaciones (Ver Anexo: “Memoria de Cálculo”)**

Correcciones de  $N_{1,60}$  por confinamiento. (Bowles (1988) y Cetin et al (2004))

Corrección por longitud de barra. (McGregor (1998))

Datos:

Profundidad de la Muestra 0,5 metros.

Ncampo (60% eficiencia) 7 golpes/pié

Valores Estimados:

Compacidad Relativa “Cr” 34,78% (Estimación del autor)

Peso Unitario Seco ( $\gamma_{seca}$ ) 1,54 ton/m<sup>3</sup> (Estimación del autor)

Fricción (φ) 21,37 grados (Hatanaka (1996))

Humedad Natural 5%

Gravedad Específica 2,67

Peso Unitario de la masa húmeda ( $\gamma_m$  húmeda), 1,52 ton/m<sup>3</sup>

Peso Unitario Saturado Equivalente ( $\gamma_m$  saturada), 1,97 ton/m<sup>3</sup>

Relación de Vacíos (e) 0,84

Grado de Saturación (%S), 15,83%

### **Resumen de Resultados de Ensayos de Corte Directo en Muestra de Arena Limosa Seca (Ver Anexo: “Muestra de Resultados de un Ensayo de Corte Directo”)**

En la Imagen 6 presentamos un cuadro que resume los resultados de los ensayos de Corte Directo.

**En la primera columna** tenemos la relación de vacíos a las que fueron preparados cada grupo de tres muestras y los pesos unitarios secos o secos equivalentes.

**En la segunda columna** la numeración de las muestras y los esfuerzos normales aplicadas a cada muestra antes del Corte.

**En la tercera columna** las relaciones de vacíos y pesos unitarios secos o secos equivalentes al final de cada ensayo de acuerdo a la dilatación.

**En la cuarta columna** se indica el estado de humedad de cada grupo de muestras.

**En la quinta columna** una referencia por número del criterio empleado en los cálculos según se describe a continuación:

**Casos Numerados en el Cuadro:**

- 1 – Sin corrección de área para Esfuerzos Cortante y Normal.**
- 2 – Aplicación de corrección del área para Esfuerzo Cortante.**
- 3 – Aplicación de corrección del área para Esfuerzos Cortante y Normal.**
- 4 - Corrección del área para Esfuerzo Cortante en zona de contacto Suelo-Suelo previa disminución de la Fuerza Horizontal por Esfuerzos de Fricción y Cohesión en zonas de contacto Suelo-Metal, considerar que de esta forma el esfuerzo normal en toda el área se mantiene constante.**

**En la sexta columna** tenemos los resultados de los parámetros de resistencia al corte calculados para cada criterio o caso descrito y un estimado de la resistencia al corte asumiendo con fines de comparación un esfuerzo normal de  $2 \text{ kg/cm}^2$  y el criterio de falla Mohr-Coulomb. Para este grupo no se tomó el punto de origen “0,0” como punto de la envolvente.

**En la séptima columna** tenemos los resultados de los parámetros de resistencia al corte calculados para cada criterio o caso descrito y un estimado de la resistencia al corte asumiendo con fines de comparación un esfuerzo normal de  $2 \text{ kg/cm}^2$  y el criterio de falla Mohr-Coulomb. Para este grupo se tomó el punto de origen “0,0” como punto de la envolvente.

**En la octava columna** presentamos las diferencias en el parámetro de fricción y de corte entre la información de las columnas sexta y séptima.

IMAGEN 6

| 1                          | 2  | 3  | 4  | 5                            | 6       | 7   | 8  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|------------------------------|---------|---|--|--|--|--|
| Relación de vacíos Inicial | Peso Unitario Seco Inicial $\gamma_{seco}$<br>gr/cm <sup>3</sup> | Esfuerzo Normal Inicial $\sigma_n$<br>kg/cm <sup>2</sup> | Peso Unitario Seco Final $\gamma_{seco}$<br>gr/cm <sup>3</sup> | Estado Inicial de la Muestra | Caso n° | Sin Pto. 0,0 Cohesión<br>kg/cm <sup>2</sup> | para $\sigma_n$<br>Fricción 2 kg/cm <sup>2</sup><br>$\phi$<br>grados | Con para $\sigma_n$<br>Fricción 2 kg/cm <sup>2</sup><br>$\phi$<br>grados | diferencia diferencia<br>Fricción $\Delta\phi$<br>grados | Corte $\Delta\tau$<br>kg/cm <sup>2</sup> |
| 0,69                       | 1,59   | 0,14   | 1,58   | seca                         | 1       | 0,070                                       | 36,9   | 42,2   | 5,3  | 0,24                                     |
|                            |  | 0,70   | 1,58   |                              | 2       | 0,069                                       | 38,2   | 43,1   | 4,9  | 0,23                                     |
|                            |  | 0,66   | 1,62   |                              | 3       | 0,071                                       | 37,6   | 42   | 4,4  | 0,19                                     |
|                            |  |  |  |                              | 4       | 0,070                                       | 37,4   | 42,6   | 5,2  | 0,24                                     |
| 0,71                       | 1,57   | 0,14   | 1,56   | saturada                     | 1       | 0,007                                       | 37,7   | 38,2   | 0,5  | 0,02                                     |
|                            |  | 0,71   | 1,57   |                              | 2       | 0,004                                       | 39,6   | 39,8   | 0,2  | 0,01                                     |
|                            |  | 0,70   | 1,57   |                              | 3       | 0,007                                       | 37,7   | 38,3   | 0,6  | 0,03                                     |
|                            |  |  |  |                              | 4       | 0,006                                       | 38,7   | 39,1   | 0,4  | 0,02                                     |
| 0,77                       | 1,52   | 0,14   | 1,52   | seca                         | 1       | 0,029                                       | 34,3   | 36,7   | 2,4  | 0,10                                     |
|                            |  | 0,77   | 1,52   |                              | 2       | 0,030                                       | 35,7   | 38,1   | 2,4  | 0,10                                     |
|                            |  | 0,77   | 1,52   |                              | 3       | 0,031                                       | 34,3   | 36,7   | 2,4  | 0,10                                     |
|                            |  |  |  |                              | 4       | 0,030                                       | 35   | 37,4   | 2,4  | 0,10                                     |
| 0,88                       | 1,42   | 0,14   | 1,42   | húmeda                       | 1       | 0,078                                       | 24,4   | 31,9   | 7,5  | 0,26                                     |
|                            |  | 0,88   | 1,42   |                              | 2       | 0,077                                       | 25,6   | 32,8   | 7,2  | 0,25                                     |
|                            |  | 0,88   | 1,42   |                              | 3       | 0,079                                       | 24,5   | 31,8   | 7,3  | 0,25                                     |
|                            |  |  |  |                              | 4       | 0,078                                       | 25   | 32,4   | 7,4  | 0,26                                     |
| 0,93                       | 1,39   | 0,14   | 1,40   | seca                         | 1       | 0,008                                       | 27,9   | 28,6   | 0,7  | 0,02                                     |
|                            |  | 1,0  | 1,37   |                              | 2       | 0,006                                       | 29   | 29,5   | 0,5  | 0,02                                     |
|                            |  | 0,9  | 1,40   |                              | 3       | 0,008                                       | 27,9   | 28,7   | 0,8  | 0,03                                     |
|                            |  |  |  |                              | 4       | 0,007                                       | 28,4   | 29,1   | 0,7  | 0,02                                     |

## VIII. Discusión.

Los resultados de los ensayos, resumidos en la Imagen 6, nos permiten observar todos los ensayos para diferentes relaciones de vacíos iniciales lo siguiente:

Los parámetros de resistencia al corte cuando no efectuamos correcciones al área, son inferiores a los obtenidos cuando efectuamos solo corrección al esfuerzo cortante y similar cuando efectuamos corrección del área para el esfuerzo normal y de corte simultáneamente.

La corrección del área con sobre posición de efectos en la fuerza cortante en zonas suelo-suelo, suelo bajo esfuerzo normal sobre metal y metal sobre suelo arroja valores intermedios entre los obtenidos sin corrección y aquellos con solo corrección al área por corte.

Cualitativamente la intersección en el eje de la envolvente Mohr-Coulomb para todos los criterios no muestran variaciones significativas.

Tomar el punto de origen “0,0” como punto de la envolvente arroja variaciones significativas en el parámetro de fricción aumentando su valor para todos los casos y criterios de corrección de áreas.

La muestra húmeda arroja un incremento en la intersección de cohesión aparente que disminuye la inclinación de la envolvente y el ángulo de fricción, esto tiene su explicación en las tensiones capilares entre granulares muy finos limosos a bajas humedades y que se rompen a altas humedades o cuando llegamos a la saturación. Tomando el mismo material y preparando ensayos a diferentes humedades podríamos observar y evaluar este comportamiento. La diferencia en la fricción es significativa al comparar su valor en envolvente que no toma el origen y aquella que toma el origen como punto.

La variación en la resistencia al corte para envolventes que pasan por el origen y las que no lo hacen pueden ser significativas en suelos granulares finos y húmedos.

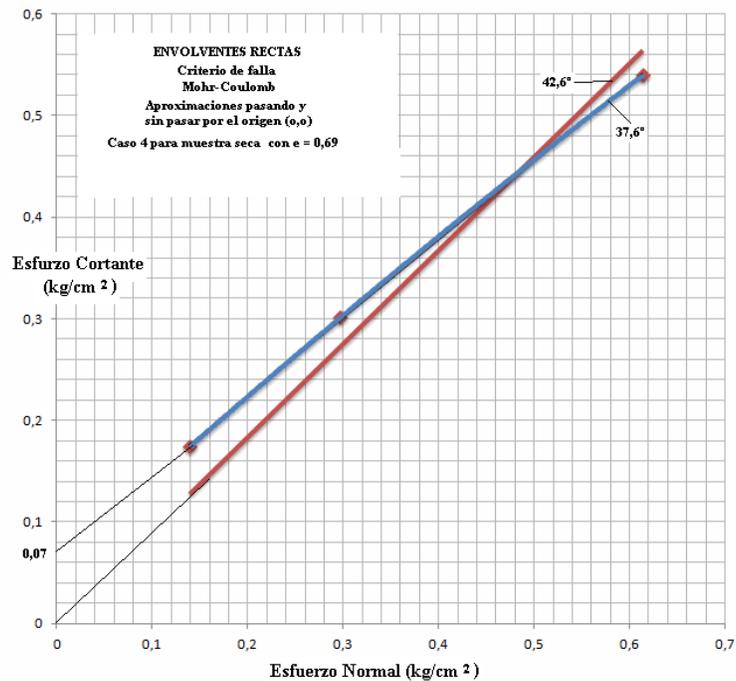
Los resultados son coherentes y muestran que a mayor esfuerzo normal mayor resistencia al corte y a mayor relación de vacíos menor resistencia al corte para todos los casos.

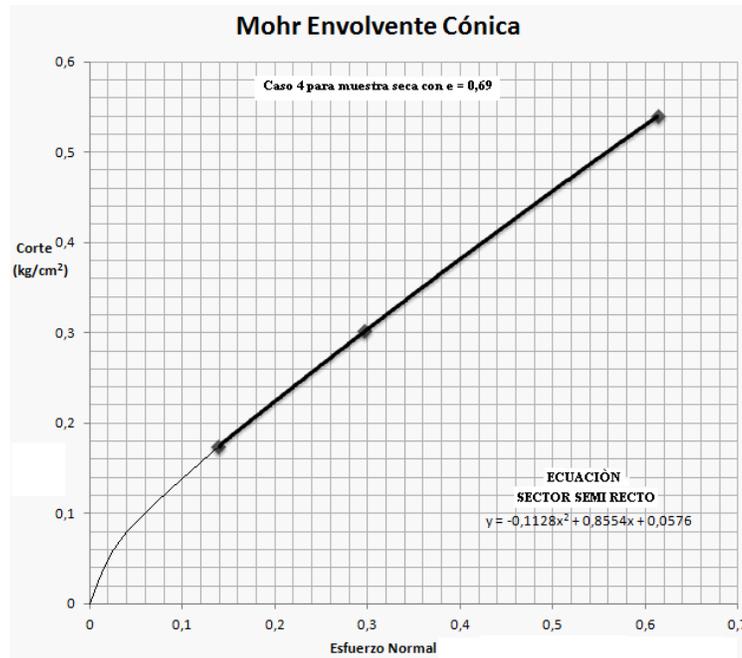
Los resultados de los parámetros de resistencia al corte del ensayo Triaxial (CIU) y los valores estimados de la Prueba Normal de Penetración “N” son coherentes con los resultados obtenidos en los ensayos de Corte Directo, ver muestra húmeda  $e = 0,69$  y  $\phi = 37^\circ$  y para ensayo Triaxial  $e = 0,59$  y  $\phi = 37^\circ$  para envoltentes sin punto origen.

Debemos recordar que la envolvente de **Mohr-Coulomb es una aproximación de una recta a la propuesta inicial de Mohr que es una curva cónica aproximable a una parábola.**

Si analizamos las envoltentes de rectas aproximadas, una pasando por el origen y otra tomando solo los puntos resultantes de Esfuerzo Normal vs Esfuerzo cortante de cada probeta,, para los casos presentados en este trabajo, podemos observar una gran dispersión en el valor de la fricción. Esto ocurre en todas las muestras ensayadas.

En los gráficos siguientes se muestran las envoltentes señaladas en el punto anterior para un caso y la curva de la ecuación de 2º grado que resulta similar a la recta que no obligamos a pasar por el origen. Observar que la aproximación recta, que no incluye el origen, es más precisa y pasa por todos los puntos obtenidos en el ensayo.





La curva en el segundo gráfico representa el criterio de falla de Mohr y las rectas del primer gráfico la aproximación propuesta por Coulomb. Es evidente que la mejor apreciación de la fricción del material la obtenemos de la recta aproximada a los resultados de cada muestra para diferentes esfuerzos normales sin incluir el origen.

El gráfico anterior es representativo para suelos granulares y cohesivos saturados normalmente consolidados muy blandos.

En materiales cohesivos cuya envolvente no pasa por el origen, la recta desde cero carga normal es representativa porque el vértice de la parábola cae del lado negativo en el eje de esfuerzos normales y la recta aproximada también es similar a la parábola.

## IX. Conclusiones.

Como resultado de esta investigación podemos concluir en los puntos siguientes:

1. Queda demostrado que en la práctica de la Mecánica de Suelos no se justifican las correcciones del área de corte en el ensayo para la obtención de parámetros de resistencia y uso en problemas de ingeniería, los resultados son coherentes y conservadores.
2. No deben realizarse correcciones del área limitadas al esfuerzo cortante, deben mejorarse con el método de sobre posición de efectos en la fuerza cortante final propuesto en este trabajo. Esto se recomienda para trabajos de investigación que requieran ajustes a los resultados para correlaciones y comparaciones con otros parámetros, ensayos y comprobación de métodos numéricos tridimensionales capaces de simular los efectos en los planos circulares, hasta la fecha estos métodos no se han desarrollado.
3. Es importante un análisis comparativo de resultados en muestras circulares y cuadradas; intuimos diferencias significativas que favorecen el uso de muestras circulares y que permiten muestras cohesivas talladas con mejores resultados que en muestras cuadradas de área equivalente, basamos esta conclusión en experiencias cualitativas con muestras cuadradas que muestran fluencia del material de un marco a otro con variación de la dilatación de un extremo a otro de la muestra, esto no se observa en muestras circulares donde ocurre una concentración y distribución de esfuerzos horizontales más uniforme en toda el área, existen algunas experiencias que confirman esta observación **Altaf, O., et al. (2016)**.
4. No incluir, para material granular y arcilla normalmente consolidada muy blanda o en estado de preconsolidación, en la envolvente de Mohr-Coulomb el punto "0,0" correspondiente al origen ya que altera significativamente la pendiente resultante y en consecuencia el parámetro de fricción. Recordamos que la envolvente real de falla no es recta y el criterio de falla modificado por Coulomb no nos da una aproximación real.

5. Se recomienda referir los valores de resistencia al corte a la variación porcentual del área de corte suelo-suelo y no la representación de la variación relativa del desplazamiento de un marco sobre otro versus resistencia al corte. La variación porcentual del área es un parámetro de más significado, especialmente cuando analizamos el esfuerzo cortante último o residual, en estos casos es conveniente la utilización de las correcciones propuestas en este trabajo porque para grandes variaciones del área los resultados varían significativamente.
6. La preparación de las muestras para un ensayo de corte directo y la interpretación de resultados por el ingeniero especialista son aspectos fundamentales para completar el ensayo que no pueden estar sujetos a una estandarización, dependen del objetivo, el riesgo y la precisión en los parámetros de resistencia en cálculos aplicables al problema de ingeniería.
7. **Resumen del procedimiento y ecuaciones propuestas en esta investigación para efectuar las correcciones al área en un ensayo de Corte Directo:**

1. **Área Inicial.**

$$A_o = \pi D^2/4$$

$$A_o = B^2$$

2. **Área Corregida.**

$$A_c = (D^2/2) \text{acos}(\delta h/D) - (\delta_h/2) \text{Raíz}(D^2 - \delta_h^2)$$

$$A_c = A_o - \delta_h (B)$$

3. **Factor de Corrección del Área.**

$$F_r = 2/\pi[\text{acos}(\delta h/D) - (\delta_h/D^2) \text{Raíz}(D^2 - \delta_h^2)]$$

$$F_r = 1 - \delta_h/B$$

4. **Área Desplazada.**

$$A_d = A_o - A_c$$

5. **Fuerza Cortante en Zona Suelo-Suelo.**

$$F_{ss} = F - (F_{sm} + F_{ms})$$

6. **Esfuerzo Cortante en la Zona Suelo-Suelo.**

$$\tau_{ss} = \{F - (Ad \sigma_n \tan (\phi_{sm}) - 2 a Ad)\} / Ac$$

**Para la obtención del Esfuerzo Cortante en la zona Suelo-Suelo las expresiones usadas para las muestras circulares y cuadradas son iguales.**

## REFERENCIAS

Altaf, O., Rehman, A., Mujtaba, H., Ahmad, M. (2016). "Study of the Effects of Specimen Shape and Remoulding on Shear Strength Characteristics of Fine Alluvial Sand in Direct Shear Test". *Sei. Int. (Lahore)*, 28(2), 1115-1119.

Bareither, C. A.; Edil, T. B. Benson, G. H.; Mickelson, D. M. (2008). "Geological and Physical Factors Affecting the Friction Angle of Compacted Soils". *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 134 (10). US

Bareither, C. A.; Benson, G. H.; Edil, T. B. (2007). "Reproducibility of Direct Shear Tests Conducted on Granular Backfill Materials". *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 31, N° 1.

Bareither, C. A. (2006). "Shearstrendt of Backfill Sands in Wisconsin". MSc Thesis, Department of Geological Engineering, University of Wisconsin-Madison. Madison, WI.

Bareither, C. A.; Benson, C.H.; Edil, T.B. (2007). "Reproducibility of Direct Shear Tests Conducted on Granular Backfill Materials". *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 31, N°1, ASTM, USA.

Bardet, J. P. (1997). "Experimental Soil Mechanics". Prentice-Hall, Inc. US.

Bowles, J.E. (1988). "Foundation Analysis and Design". Forth Edition. McCraw-Hill Book Company, New York.

Cetin, K.O.; Seed, R.B.; Derkinrenghian, A.; Tokimatsu, K.; Horder, L.F.; Kayan, R.E.; Moss, R.E. (2004). "StandardPenetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Licuefaction Potencial". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.

Geocomp Corp (2013). "DShear: MS User's Manual".

Geosim (2016). "Progressive Mobilization of Soil Shear Stregth". Numerical Modelling in Geomechanics at Memorial University of Newfoundland.

Ghazavi, M., Hosseini, M. Mallanowu, M. (2008). "A comparison Between Angle of response and Friction Angle of Sand". 12<sup>th</sup> International Conference for International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa, India.

Hatamaka, M.; Uchida, A. (1996). "Empirical Correlation Between Penetration Resistance and Internal Friction Angle of Sandy Soils", Soil Foundation Journal, vol. 36, N°4.

Head, K. H. (1982). "Manual of Soil Laboratory Testing", Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Test. Pentech Press, London; p 509-533.

Hudson, Ralph G. (1917-1939). "The Engineers' Manual". Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. New York.

Indian Institute of Thechnology Gandhimagar. (1986). "Direct Shear Test (IS-2720-part-13-1986) Reaffirmed 2002". Department of Civil Engineering, Soil Mechanics Laboratory. And, Burea of Indian.

Lai, J. (2004). "Direct Shear Testing". Department of Construction Engineering. Chaoyang University of Technology.

Lambe, T. William (1951). "Soil Testing for Engineers". John Wiley & Sons, Inc. New York.

McGregor, J.A.; Duncan, J.M. (1988). "Performance and Use of Standard Penetration Test in Geotechnical Engineering Practice". Virginia Polytechnic and State University. Virginia, USA.

Manole-Stelian Serbulea (2013). "Soil/Geotextile Interface Behavior in Direct Shear and Pullout Movement". Lopez & Silvano.

Marr, W. A. (2006). "Interface and Internal Shear Testing Procedures to Obtain Peak and Residual Values". Geosynthetic Instiyute 475 Kedron Avenue, Folsom, PA and Geotesting Express, Inc. Boxborough, MA.

Mehmet Salih Ölmez (2008). "Shear Strenght Behaviour af Sand-Clay Mixtures". Thesis Summitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences. Middle East Technical University.

NFEC, Naval Facilities Engineering Comand. (1986). "Foundation and Earth Structures". Design Manual 7.02. Alexandria, Virginia, US.

Olson, R. E. (1989). Modified by Lai, J. (2004). "Direct Shear Testing". Chaoyang University of Technology. Chaoyang.

Petley, D. T. (1966). "The Shear Strength of Soils at Large Strains". PhD Thesis, University of London (Unpublished). London.

Potts, D. M., Dounias, G. T., Vaughan, P. R. (1987). "Finite Element Analysis of the Direct Shear Box Test". Géotechnique, N°1, 11-23. London.

Potyondy, J. G. (1960). "Skin Friction Between Soils and Constructions Materials". Geotechnique,

Saada, A. S., Townsend, F. C. (1981). "Laboratory Shear Strength of Soil". State of the Art. ASTM Special Technical Publication (PCN) 740 04-74000-38. Yong, R. N., Townsend, F. C. (1980). University of Florida, Editors. FL.

Sarmiento F., C.A., Vidal R., H. D. (2007). "Caracterización Geomecánica de Mezclas de Suelos para Modelos Físicos por el Método de Materiales Equivalentes". Tesis Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia.

Serrano, C.; Nuti, R. (1999). "Comportamiento de un Suelo Granular en Matriz Cohesiva". Trabajo de Grado, Universidad Católica Andrés Bello, Ingeniería Civil. Caracas.

Skuodis, S., Tamosuinas, T. (2014). "Direct Shear Tests With Evaluation of Variable Shearing Area". Vilnius Gediminas Technical University. Statyba, Transportas, Aviacines Technologijos, Civil and Transport Engineering, Aviation Technologies. Statyba, Lithuania.

Standards. (1987). Manak Bhavan, 9 Bahadur Shah Zafar Marg, New Delhi.

Thermann, K., Gau, C., Tiedemann, J. (2006). "Shear Strength Parameters from Direct Shear Test – Influence Factors and their Significance". IAEG paper number 484.

Xu, Z., Zhou, G., Liu, Z., Zhou, J., Tiant, Q. (2007). "Correcting Method and Error Analysis for sample Area in Direct Shear Test". School of Architecture & Civil Engineering, China University of mining & Technology, State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering. Xuzhou, Jiangsu, China.

## NOMENCLATURA

|   |   |
|---|---|
| $\phi$                                  | Ángulo de fricción del suelo.                                 |
| $\phi_{sm}$                             | Fricción Suelo Metal  |
| $\phi_u$                                | Fricción Última a Relación de Vacíos Crítica                  |
| $\phi_{m\acute{a}x.}$                   | Fricción Máxima   |
| $\phi_{ss}$                             | Fricción Suelo-Suelo  |
| <b>F</b>                                | <b>Fuerza Horizontal</b>                                      |
| <b>Fss</b>                              | <b>Fuerza Horizontal en Zona Suelo-Suelo</b>                  |
| <b>Fsm</b>                              | <b>Fuerza Horizontal en Zona Suelo-Metal con Carga Normal</b> |
| <b>Fmm</b>                              | <b>Fuerza Horizontal en Zona Metal-Metal sin Carga Normal</b> |
| <b><math>e_{cr\acute{i}tica}</math></b> | <b>Relaci3n de Vac\edos Cr\edica</b>                          |
| <b>e</b>                                | <b>Relaci3n de Vac\edos</b>                                   |
| <b><math>e_o</math></b>                 | <b>Relaci3n de Vac\edos Inicial</b>                           |
| <b><math>e_{m\acute{i}nima}</math></b>  | <b>Relaci3n de Vac\edos M\edica</b>                           |
| <b><math>e_{m\acute{a}xima}</math></b>  | <b>Relaci3n de Vac\edos M\edica</b>                           |
| <b><math>e_{intermedia}</math></b>      | <b>Relaci3n de Vac\edos Intermedia</b>                        |
| <b><math>\Delta e</math></b>            | <b>Variaci3n de la Relaci3n de Vac\edos</b>                   |
| <b>A</b>                                | <b>rea Total</b>   |
| <b><math>A_o</math></b>                 | <b>rea Inicial</b>   |
| <b><math>A_c</math></b>                 | <b>rea Corregida Suelo-Suelo</b>                             |
| <b><math>A_d</math></b>                 | <b>rea Desplazada</b>  |
| <b><math>A_r</math></b>                 | <b>rea Reducida Suelo-Metal y Metal-Suelo</b>                |
| <b><math>A_{ss}</math></b>              | <b>rea Suelo-Suelo</b>                                       |
| <b><math>A_{sm}</math></b>              | <b>rea Suelo-Metal (Suelo sobre Metal con carga Normal))</b> |
| <b><math>A_{ms}</math></b>              | <b>rea Metal-Suelo (Metal sobre Suelo sin Carga Normal)</b>  |
| <b><math>\delta_h</math></b>            | <b>Deformaci3n Horizontal (Desplazamiento Horizontal)</b>     |
| <b><math>\delta_v</math></b>            | <b>Deformaci3n Vertical (Desplazamiento Vertical)</b>         |
| <b>N</b>                                | <b>Carga Normal</b>   |
| <b><math>N_{spt}</math></b>             | <b>N prueba normal de penetraci3n</b>                         |
| <b><math>\sigma_n</math></b>            | <b>Esfuerzo Normal</b>  |
| <b><math>\tau</math></b>                | <b>Resistencia al Corte Horizontal</b>                        |
| <b><math>\Delta H</math></b>            | <b>Variaci3n de Altura</b>                                    |
| <b><math>H_o</math></b>                 | <b>Altura o Espesor Inicial</b>                               |
| <b><math>H_f</math></b>                 | <b>Altura o Espesor final</b>                                 |
| <b>D</b>                                | <b>Diámetro</b>   |
| <b><math>D_o</math></b>                 | <b>Dimetro Inicial</b>                                       |
| <b><math>\Delta L</math></b>            | <b>Variaci3n de Longitud</b>                                  |

|                        |                                     |
|------------------------|-------------------------------------|
| <b>Lo</b>              | <b>Longitud Inicial</b>             |
| <b>c</b>               | <b>Cohesión</b>                     |
| <b>c<sub>màx</sub></b> | <b>Cohesión Máxima</b>              |
| <b>a</b>               | <b>Adherencia</b>                   |
| <b>Fr</b>              | <b>Factor de Reducción del Área</b> |
| <b>R</b>               | <b>Radio</b>                        |

## **ANEXOS**

- A. Ensayo de Corte Directo, Ejemplo de Cálculo.
- B. Memoria de Cálculo en Base a “N” (SPT).