

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE CORTE
DIRECTO PARA SUELOS GRAVOSOS EN EL
LABORATORIO**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

DANIEL JESÚS BASURTO RAVICHAGUA

LIMA – PERÚ

2010

PLAN DE TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

<u>Título:</u>	“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EQUIPO DE CORTE DIRECTO PARA SUELOS GRAVOSOS EN EL LABORATORIO”.
<u>Tesista:</u>	Bach. Daniel Jesús Basurto Ravichagua.
<u>Código:</u>	994523J
<u>Asesor:</u>	Dr. Ing. Zenón Aguilar Bardales. DPTO. ACAD. DE MECÁNICA DE SUELOS
<u>Co Asesor:</u>	M.I.M.S. Ing. Alberto José Martínez Vargas

ANTECEDENTES

Durante muchos años el ensayo de corte directo ha sido usado en diversos proyectos para determinar los parámetros de resistencia de los suelos. Hoy, aún se conserva el interés práctico debido a su simplicidad, aunque ha sido sustituido en buena parte por las pruebas de compresión triaxial en el laboratorio.

¿Pero, que sucede si al analizar la zona de emplazamiento de una cimentación o al realizar el estudio de estabilidad de un talud, encontramos terrenos aluvionales y fluviales constituidos por materiales gruesos como bolones y gravas inmersos en una matriz mas fina que puede estar constituida por arenas, limos y arcillas, como parte de su granulometría representativa?. Generalmente en estos casos particulares se utilizan valores asumidos o inferidos de los parámetros c y Φ que se referencian en los diversos textos o artículos técnicos, debido a que los equipos existentes en nuestro medio son de dimensiones reducidas (apropiados principalmente para arenas y suelos finos), que no permiten el trabajo en suelos gravosos. Esto conlleva a utilizar parámetros conservadores y además aplicar factores de seguridad compatibles con la limitada información disponible.

Existe la alternativa de realizar ensayos de corte directo "In Situ", que permiten obtener los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos. Estos ensayos han sido realizados en algunos estudios geotécnicos en nuestro medio, sin embargo su uso es poco frecuente debido a su alto costo.

JUSTIFICACIÓN

Proporcionar parámetros de resistencia cortante de suelos gravosos, contribuirá a la evaluación racional de la capacidad portante de cimentaciones sobre este tipo de suelos, el análisis de estabilidad de taludes y estructuras de suelos, entre otros, para así efectuar diseños técnicos y económicos óptimos que representen una alternativa ingenieril confiable.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Establecer los parámetros de resistencia cortante para suelos gravosos como el hormigón de Lima es un problema en la actualidad en nuestro país, por la falta de equipos de laboratorio para ensayar muestras de grandes dimensiones.

Por otro lado en la construcción de una presa de tierra o diques de gran altura se utilizan en sus espaldones materiales granulares con partículas de gran tamaño cuyo ángulo de rozamiento intrínseco juega un papel fundamental en los aspectos económicos y de seguridad del diseño.

De ahí el gran interés que tiene, el poder utilizar un equipo que permita la determinación de los parámetros de resistencia cortante, aproximando lo mas posible a la realidad el tamaño máximo de las partículas. Esto evitará estar analizando solamente la matriz del material y extrapolar los parámetros obtenidos con los equipos convencionales para simular el comportamiento del material gravoso.

El ensayo de corte directo "In-Situ", representa una alternativa importante para la evaluación de los parámetros de resistencia de los suelos gravosos, sin embargo su dificultad y alto costo, por el tamaño que requiere la muestra a ser ensayada y

las grandes cargas de reacción necesarios, limitan la utilización de esta metodología.

El equipo de Corte Directo a Gran Escala (Fig. 3) propuesto en esta investigación permitirá ensayar materiales granulares de hasta 10 cm de diámetro. Se podrán realizar ensayos con materiales en distintos estados de compactación, desde lo más suelto hasta las compactas.

OBJETIVOS

General

Diseño, construcción e implementación de un equipo de corte directo a gran escala de 0.60x0.60x0.60 m, para la cuantificación de los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos.

Específico

- Formular factores que controlan el diseño de la caja de corte de mayor dimensión que el equipo estándar.
- Formular especificaciones generales que se deben tener en cuenta para realizar el ensayo de Corte Directo a Gran Escala.

MARCO TEÓRICO

Criterio de Rotura

El criterio de rotura en suelos más difundido deriva del propuesto por Coulomb, que relaciona tensiones efectivas normales y tensiones tangenciales actuando en cualquier plano del suelo. Este criterio establece que, para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por la expresión:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'$$

Donde:

τ = Resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano

σ_n = Tensión total normal actuando sobre el mismo plano.

u = Presión intersticial.

c' = Cohesión efectiva.

ϕ' = Ángulo de rozamiento interno efectivo

La ecuación anterior representa una recta en el espacio (σ', τ) , que a menudo se denomina envolvente de rotura del suelo (Figura 1). Esta línea proporciona, para cada valor de la tensión efectiva normal a un plano que atraviesa un elemento del suelo, la máxima tensión tangencial movilizable a favor de dicho plano.

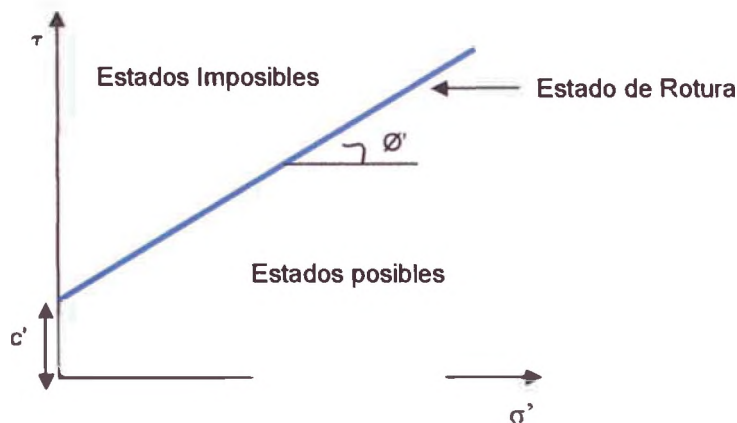


Figura 1: Criterio de Rotura en Suelos.

Ensayo de Corte Directo

El ensayo de corte directo convencional ha estado vigente por más de 100 años en la aplicación a la ingeniería geotécnica debido a su simplicidad y confiabilidad. La metodología de este ensayo consiste en hacer deslizar una porción de suelo respecto a otra a lo largo de un plano de falla predeterminado, mediante la acción de una fuerza de corte horizontal que se va incrementando para generar una velocidad de deslizamiento constante. La muestra se encuentra confinada con una carga normal al plano de deslizamiento, la cual se mantiene constante hasta originar la falla del espécimen (Ver figura 2).

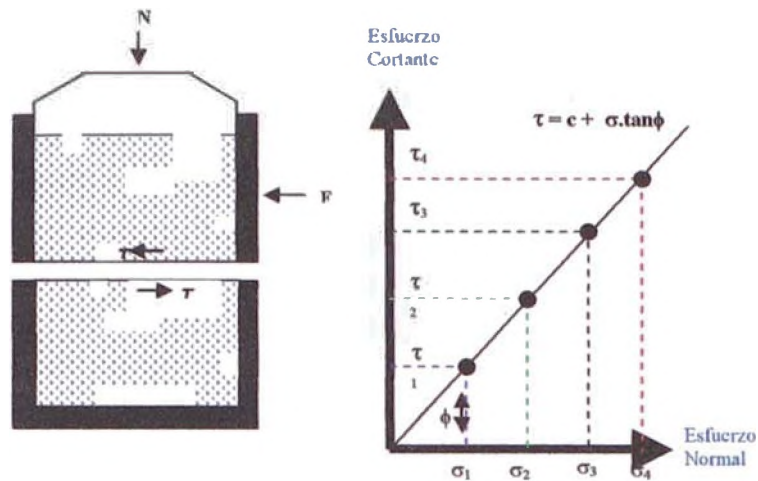


Figura 2. Ejemplo típico del ensayo de Corte Directo en arenas

El ensayo de corte directo impone sobre un suelo una condición de falla idealizada a través de un plano de localización predeterminada. Como se mencionó previamente, sobre este plano actúan dos esfuerzos; un esfuerzo normal debido a una carga vertical (N) aplicada externamente y un esfuerzo cortante debido a la aplicación de la carga horizontal (F).

Los esfuerzos se calculan simplemente como:

$$\sigma_n = N / A \qquad \tau = F / A$$

Donde:

A = Área nominal de la muestra (en el plano predeterminado).

La relación entre los esfuerzos de corte de falla (τ) y los esfuerzos normales (σ_n) se expresa mediante la ecuación de Coulomb, mencionada anteriormente.

Una prueba completa sobre un determinado suelo, consiste en ensayar tres muestras idénticas del mismo material bajo tres cargas verticales distintas (N_1 , N_2 , N_3).

FORMULACIÓN DE LA HIPOTESIS

El equipo de Corte Directo a Gran Escala (Fig. 3) permitirá evaluar los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos, mediante el criterio de rotura propuesto por Coulomb (1776). Este equipo a diferencia del equipo convencional (Fig. 4), permitirá ensayar suelos con partículas de tamaño máximo 10 cm.

La construcción del equipo y la ejecución de los ensayos de Corte Directo a Gran Escala serán establecidas teniendo como referencia la norma ASTM –D3080.

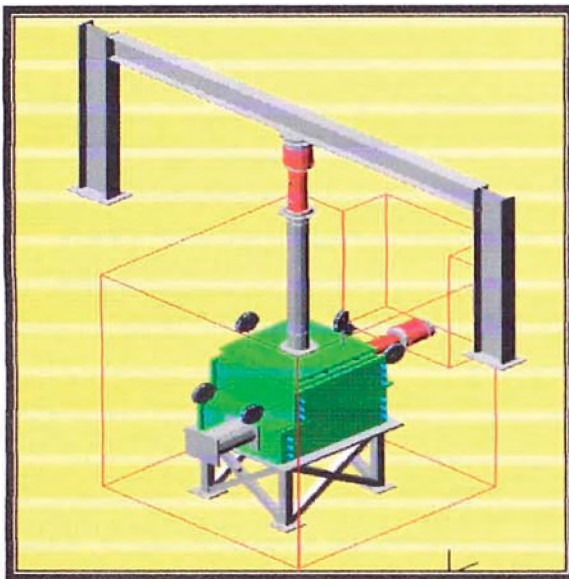


Fig. 3 Esquema del equipo de Corte Directo A Gran Escala (Caja de Corte, 0.60x0.60x0.60 m)

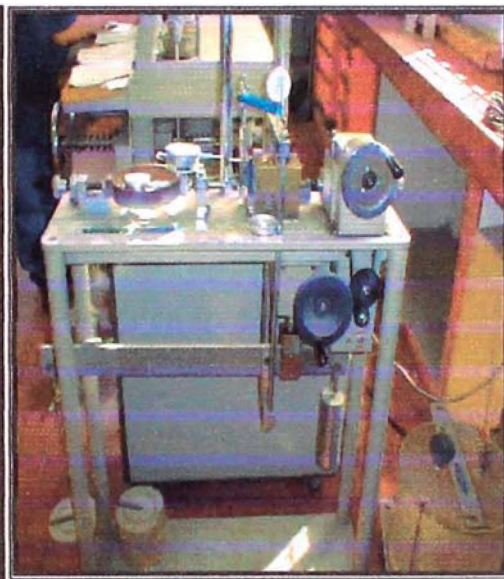


Fig. 4 Equipo de corte directo convencional CISMID – UNI (Caja de corte, diam.= 6cm, alt. = 2.0 cm)

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

- 1.1 Objetivos y Alcances.
- 1.2 Justificación.

CAPÍTULO II: CONCEPTOS GENERALES

- 2.1 Teoría de Resistencia al Esfuerzo Cortante.
- 2.2 Ensayo de Corte Directo Estándar.
- 2.3 Ensayo de Corte Directo In – Situ.
- 2.4 Pruebas y Análisis de Laboratorio.

CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE CORTE
DIRECTO A GRAN ESCALA.

- 3.1 Introducción.
- 3.2 Implementación del Pozo de Ensayo.
- 3.3 Factores que Controlan el Diseño del Equipo de Corte Directo.
- 3.4 Diseño e Instrumentación del Equipo de Corte Directo.

CAPÍTULO IV: ENSAYO EXPERIMENTAL DE CORTE DIRECTO EN SUELOS
GRAVOSOS

- 4.1 Introducción.
- 4.2 Características Físicas y Mecánicas.
- 4.3 Preparación de la Muestra.
- 4.4 Ensayo de Corte Directo en Suelos Gravosos.
- 4.5 Análisis e Interpretación de Resultados

CAPÍTULO V: ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

- 5.1 Análisis de Resultados
- 5.2 Discusión de Resultados.

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

ANEXOS

REFERENCIAS

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Tipo de Investigación.

Investigación Experimental aplicada.

Programa de Trabajo

Primera etapa.

1. Implementación del pozo de Ensayo.
2. Diseño y Construcción de la Caja de Corte y soporte.
3. Calibración de los Instrumentos a Utilizar.
 - Gato Hidráulico (02)
 - Celdas de Carga (02)
 - Deformímetros (06)
 - Datta Logger (Adquisición de datos)

Segunda etapa.

1. Evaluar el efecto de la escala, utilizando como material de ensayo suelos granulares gruesos o gravosos de cantos redondeados.

Tercera Etapa

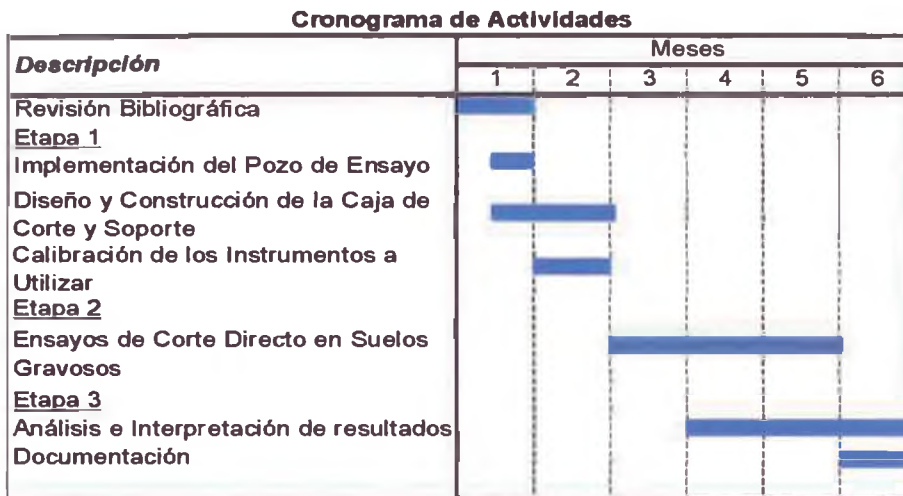
1. Realización de ensayos de Corte Directo en Suelos Gravosos
2. Evaluación de las Principales Variables Influyentes en la Resistencia al Corte de los Suelos Gravosos.
3. Establecer Especificaciones Generales para Futuros Ensayos.

Presentación de los Resultados.

Los resultados serán presentados de la siguiente manera:

- Resultados de la investigación documentada y bibliográfica.
- Consideraciones adoptadas para el diseño y construcción del equipo.
- Análisis e interpretación de los resultados de los ensayos a realizar.
- Cuadros comparativos, sistemáticos, etc.

CRONOGRAMA DE TRABAJO



REFERENCIAS

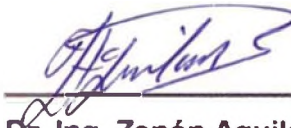
1. CERATO, Amy B. y LUTENEGGER, Alan J., "Specimen Size and scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands" Geotechnical Testing Journal, Vol. 29 N°6, 2006.
2. DE LA ROSA, Félix, "Ensayos de Corte Directo In Situ para los estudios de factibilidad del transporte masivo de la gran Lima" Tesis de grado, UNI, 1974.
3. GONZALES DE VALLEJO, Luis; FERRER, Mercedes; ORTUÑO, Luis; OTEO, Carlos, "Ingeniería Geológica", 2002.
4. LAMBE, William T. & WHITMAN, Robert V. "Mecánica de Suelos" Editorial Limusa, p. 151-164, 1984.
5. PALMEIRA, Ennio Marquez, "The study of soil – Reinforcement interaction by means of large scale Laboratory tests." University of Oxford, 1987.
6. PEDLEY, Martin Jhon, "The Performance of soil Reinforcement in Bending and Shear", University of Oxford, 1990.
7. SHUAN, Luisa, "Determinación de los parámetros de resistencia en suelos granulares mediante el ensayo de Corte Directo In Situ para fines de cimentación" Tesis de grado, UNI, 1997.
8. VERDUGO, Ramos "Caracterización Geomecánica de Suelos Granulares Gruesos", Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil Vol 6(2) 199-211, Universidad de Chile, 2006.



Bach. Daniel Jesús Basurto Ravichagua

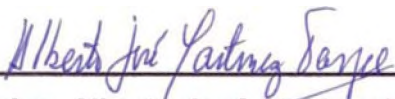
Código: 994523J

TESISTA



Dr. Ing. Zenón Aguilar Bardales

ASESOR



M.I.M.S. Ing. Alberto José Martínez Vargas

CO-ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres y hermana por la comprensión y confianza que depositaron en mí durante mis estudios en la Universidad Nacional de Ingeniería y durante la realización de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi Profesor y Asesor de tesis Dr. Ing. Zenón Aguilar Bardales por incentivar me a seguir la rama de la Ingeniería Geotécnica a través sus clases de Mecánica de Suelos dictadas en el programa de pregrado en la UNI y por guiarme en mi formación como asistente de investigación en el Laboratorio Geotécnico del CISMID. También agradecerle por el apoyo incondicional, comprensión y guía brindados durante el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Alberto José Martínez Vargas, co – asesor de esta tesis, por su constante apoyo, estímulo y consejos brindados durante el desarrollo de la presente tesis, sin su ayuda invaluable no hubiera podido terminar esta tesis.

Al Ing. David Luna Durán, por su valiosa colaboración brindada durante el desarrollo de la presente investigación.

Al Laboratorio Geotécnico del CISMID, en donde se desarrolló esta investigación y a mis amigos Henry Muñoz, Miguel Díaz y Pablo Peri, así como también al personal que labora en este laboratorio.

Al Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, por acogeme durante todo este tiempo.

Finalmente, agradecer a mi familia, especialmente a mis padres por el apoyo incondicional que me han brindado durante mi formación profesional.

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	
1.1 Objetivos y Alcances	1
1.2 Justificación	5
CAPÍTULO II: CONCEPTOS GENERALES	
2.1 Teoría de Resistencia al Esfuerzo Cortante	6
2.2 Ensayo de Corte Directo Estándar	9
2.2.1 Generalidades	9
2.2.2 Ventajas e Inconvenientes	11
2.2.3 Equipo	12
2.2.4 Tipos de Ensayos	14
2.2.5 Determinación de los Parámetros de Resistencia	15
2.3 Ensayo de Corte Directo "In Situ"	16
2.3.1 Generalidades	16
2.3.2 Procedimiento de Corte	18
2.3.3 Determinación de los Parámetros de Resistencia	18

2.4	Pruebas y Análisis de Laboratorio	19
2.4.1	Determinación de las Propiedades Índices	19
CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA		
3.1	Introducción	22
3.2	Implementación del Pozo de Ensayo	22
3.3	Factores que Controlan el Diseño del Equipo de Corte Directo	26
3.4	Diseño e Instrumentación del Equipo de Corte Directo	28
3.4.1	Descripción General del Equipo	28
3.4.2	Instrumentación	36
CAPÍTULO IV: ENSAYO EXPERIMENTAL DE CORTE DIRECTO EN SUELOS GRAVOSOS		
4.1	Introducción	41
4.2	Características Físicas y Mecánicas	41
4.3	Preparación de la Muestra	45
4.3.1	Instalación de la Caja de Corte	45
4.3.2	Conformación de la Muestra	48
4.3.3	Preparación de la Cara Superior de la Muestra para la Transmisión de la Carga Axial	52
4.4	Ensayo de Corte Directo en Suelos Gravosos	54
4.4.1	Generalidades	54
4.4.2	Descripción del Equipo	54

4.4.3	Montaje del Equipo	58
4.4.4	Ejecución del Ensayo de Corte Directo	67
4.4.5	Resultados del Ensayo de Corte Directo a Gran Escala	70
4.5	Análisis e Interpretación de Resultados	78
CAPÍTULO V: ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.		
5.1	Análisis de Resultados	83
5.1.1	Generalidades	83
5.1.2	Análisis Comparativo entre los Ensayos de Corte Directo "In situ" y Corte Directo a Gran Escala en Laboratorio para el Conglomerado de Lima	83
5.1.3	Análisis de Otros Resultados	87
5.2	Discusión de Resultados	88
CONCLUSIONES		93
RECOMENDACIONES		97
REFERENCIAS		99
ANEXO	Resultados de Ensayos de Laboratorio	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1. Modelo del criterio de rotura propuesto por Coulomb (Budhu 2000). Bloque de madera sobre un plano horizontal.	7
Figura 2.2. Envoltente de rotura del suelo o envoltente de falla.	8
Figura 2.3. Esquema del equipo de corte directo convencional.	10
Figura 2.4. Detalle del ensayo de corte directo según la Norma ASTM D 3080.	12
Figura 2.5. Trayectoria de la curva esfuerzo de corte versus deformación horizontal, para tres cargas diferentes.	13
Figura 2.6. Representación gráfica del esfuerzo de corte versus esfuerzo normal para obtener el ángulo de fricción.	15
Figura 2.7. Ensayo de corte directo "In situ". a) Tallado del espécimen, b) Uniformidad del espécimen mediante mezcla yeso – cemento, c) Ejecución del ensayo de corte directo "In situ".	16
Figura 3.1. a) Vista general del pórtico de acero de 10 ton de capacidad, b) Dimensiones del pozo de ensayo existente ubicado en el patio del Laboratorio Geotécnico del CISMID de la Universidad Nacional de Ingeniería.	23
Figura 3.2. Representación esquemática del equipo de Corte Directo a Gran Escala.	24
Figura 3.3. a) Vista en planta del pozo de ensayo, donde se muestra la nueva configuración de la base de cimentación para la respectiva implementación, b) Perfil del pozo de ensayo, donde se presenta el diseño de los muros de reacción y la base de cimentación (Unidad de medida = metro).	25
Figura 3.4. a), y b) Vista general de la implementación del pozo de ensayo acondicionado para el equipo de Corte Directo a Gran Escala.	26

Figura 3.5.	Esquema de la caja de corte para el ensayo de Corte Directo a Gran Escala.	28
Figura 3.6.	Diseño de la caja de corte (Unidad de medida = metro).	29
Figura 3.7.	Capa de arena fina de 1 cm de espesor para transmitir a la muestra una presión uniforme (Oldecop, 2000; citado por Chavez).	30
Figura 3.8.	Diseño de las planchas metálicas y los rodillos macizos (Unidad de medida = metro).	31
Figura 3.9	Diseño de soportes complementarios (Unidad de medida = metro).	32
Figura 3.10.	Construcción del equipo de corte. a) Mesa metálica, b) Caja de corte.	33
Figura 3.11.	Dispositivo de rodamiento colocado en los bordes de la caja de corte para reducir la fricción.	34
Figura 3.12.	Presentación de la caja de corte.	35
Figura 3.13.	Esquema de la instrumentación del equipo de corte directo a gran escala en 3-D. Implementado en el patio del Laboratorio Geotécnico del CISMID – UNI.	37
Figura 3.14.	Calibración de las celdas de carga.	38
Figura 3.15	Aplicación de la fuerza tangencial a la caja de corte sin muestra.	39
Figura 3.16	Cuantificación de la fricción remanente de la caja de corte ensamblado para el ensayo de Corte Directo a Escala.	40
Figura 4.1	Curva de distribución granulométrica de los suelos gravosos utilizados en el programa de investigación.	43
Figura 4.2.	Instalación de la mesa metálica. a), y b) Instalación de la estructura y el tablero de la mesa metálica.	45

- Figura 4.3.** Instalación de la mitad de la caja de corte sobre la mesa metálica. 46
- Figura 4.4.** Instalación del dispositivo de rodamiento. 47
- Figura 4.5.** Se muestra la caja de corte y soportes complementarios instalados, listo para la conformación del material gravoso. 47
- Figura 4.6.** Suelos gravosos utilizados en el ensayo de Corte Directo a Gran Escala en el laboratorio. a) GP, b) GW - GM, c) GC, d) GP – GM, e) Material granular de hasta 10 cm (4 pulgadas) de diámetro. 49
- Figura 4.7.** Balanza mecánica de 160 kilos de capacidad, utilizada para controlar el peso del suelo gravoso a conformarse en la caja de corte de acuerdo a la densidad requerida. 50
- Figura 4.8.** Llenado de la primera capa del material gravoso. 50
- Figura 4.9.** Compactación del material. Se muestra el pisón de concreto manipulado por el personal técnico del CISMID. Se acopló al dispositivo de soporte del pisón una soga y una polea para facilitar su manipulación. 51
- Figura 4.10.** Suelo gravoso conformado en la caja de corte. Se observa la no uniformidad en la cara superior de la muestra. 52
- Figura 4.11.** Preparación de la cara superior del espécimen. a) Colocación del manto de polietileno, b) Nivelación de la cara superior de la muestra con una capa de arena fina de 1.0 cm de espesor. 53
- Figura 4.12.** a) Instalación de la plancha metálica sobre la muestra debidamente nivelada, b) Colocación de rodillos macizos. 59
- Figura 4.13.** a) Colocación de la segunda plancha metálica sobre el arreglo de rodillos macizos, b) Muestra conformada en la caja de corte listo para el montaje de los equipos auxiliares. 60
- Figura 4.14.** Instalación del gato hidráulico vertical y el soporte de extensión (tubo metálico). 61

- Figura 4.15. Montaje vertical del equipo de Corte Directo a Gran Escala. 62
- Figura 4.16. a) Instalación del sistema de carga tangencial, b) Equipo de carga tangencial listo para ejecutar el ensayo de Corte Directo a Gran Escala. 63
- Figura 4.17. a) Instalación de los deformímetros, b) Vista general de la ubicación de los deformímetros apoyados en barras metálicas mediante soportes imantados. 65
- Figura 4.18. a) Vista general del montaje del equipo, b) Instrumentos de medición, conectados mediante cables de transmisión de señal al adquisidor de datos, asimismo, se muestra dos inyectores de presión conectados a los gatos hidráulicos horizontal y vertical. 66
- Figura 4.19. Ejecución del ensayo de Corte Directo a Gran Escala. Se muestra al operador aplicando la carga tangencial mediante el inyector de presión. El control de la velocidad de carga, se realiza mediante la lectura de deformación horizontal captada por el adquisidor de datos y el intervalo de tiempo controlado con un cronómetro. 67
- Figura 4.20. Adquisidor de datos. Se muestra la impresión (en papel térmico) de las deformaciones y los esfuerzos durante la ejecución del ensayo. 68
- Figura 4.21. Comportamiento del esfuerzo de corte versus deformación horizontal para las cinco muestras ensayadas bajo las secuencias de cargas normales de 0.50, 1.00 y 2.00 Kg/cm². a), y b) GP, c) GW - GM, d) GC, e) GP - GM. 72
- Figura 4.22. Comportamiento del esfuerzo de corte normalizado versus deformación horizontal para las cinco muestras ensayadas bajo las secuencias de cargas normales de 0.50, 1.00 y 2.00 Kg/cm². a), y b) GP, c) GW - GM, d) GC, e) GP - GM. 73

- Figura 4.23.** Comportamiento del asentamiento versus deformación horizontal para las cinco muestras ensayadas bajo las secuencias de cargas normales de 0.50, 1.00 y 2.00 Kg/cm². a), y b) GP, c) GW - GM, d) GC, e) GP - GM. 74
- Figura 4.24.** Envoltente de falla para esfuerzos máximos y residuales. a) GP (2.15 ton/m³), b) GP (2.20 ton/m³). 75
- Figura 4.25.** Envoltente de falla de resistencia máxima y residual para el material tipo GW - GM. 76
- Figura 4.26.** Envoltente de falla de resistencia máxima y residual para el material tipo GC. 76
- Figura 4.27.** Envoltente de falla para el material GP - GM. 77
- Figura 5.1** Trayectorias del esfuerzo de corte versus deformación horizontal. a) Ensayo de corte directo "In situ" (Cortesía del Dr. Jorge Alva Hurtado), b) Ensayo de Corte Directo a Gran Escala en laboratorio. 85
- Figura 5.2** Ángulo de fricción interna para enrocados (modificado de Leps, 1970). 91

LISTA DE TABLAS

	<u>Pág.</u>
Tabla 4.1. Propiedades índices de los suelos gravosos utilizados en el ensayo de Corte Directo a Gran Escala.	42
Tabla 4.2. Características físicas de los suelos gravosos ensayados con el equipo de Corte Directo a Gran Escala.	44
Tabla 4.3. Resumen de los resultados obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala.	71
Tabla 5.1. Parámetros de resistencia cortante para el material tipo GP determinado mediante los ensayos de corte directo "In situ" y Corte Directo a Gran Escala en laboratorio.	84
Tabla 5.2. Valores recomendados de precisión en la determinación de propiedades físicas y mecánicas de suelos fiables.	86
Tabla 5.3. Parámetros de resistencia al corte determinados mediante ensayos de Corte Directo "In situ".	87
Tabla 5.4. Valores del ángulo de rozamiento interno en suelos granulares (Hough 1957, citado por Gonzales de Vallejo).	89
Tabla 5.5. Variaciones del ángulo de fricción (Φ) en gravas con diferentes pruebas desarrollados en varios países.	89
Tabla 5.6. Comparación de los valores obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran escala, recopilación de ensayos In situ y valores reportados en la literatura técnica.	90

RESUMEN

El tema desarrollado en el presente trabajo de investigación está referido al diseño, construcción e implementación de un equipo de Corte Directo a Gran Escala de 0.60x0.60x0.60 m en el laboratorio, para la cuantificación de los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos. El diseño del equipo y la ejecución de los ensayos fueron establecidos teniendo como referencia las normas ASTM D 3080 y ASTM D 4554.

La evaluación de los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos ensayados con el equipo de Corte Directo a Gran Escala se efectúa mediante el criterio propuesto por Coulomb (1776). Este equipo a diferencia del equipo convencional (diámetro = 6.0 cm, altura = 2.0 cm) permite ensayar suelos gravosos con partículas de tamaño máximo 10 cm, conformados en distintos estados de compactación.

Los instrumentos usados en este equipo fueron calibrados en el Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Universidad Nacional de Ingeniería, esto con la finalidad de reducir los efectos externos que puedan influir en los resultados de los ensayos.

En el programa de investigación se ensayó cuatro tipos de materiales gravosos, que según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) fueron clasificados como: grava mal graduada (GP), grava arcillosa con arena (GC), grava bien graduada con limo y arena (GW – GM) y grava mal graduada con limo y arena (GP – GM).

La conformación del material dentro de la caja de corte se realizó en tres capas de igual espesor. La compactación de cada capa se llevó a cabo mediante un pisón, de manera que el número de golpes para cada capa fue ajustado hasta llegar a la densidad deseada.

Todos los ensayos fueron realizados usando una velocidad de corte de 0.5 mm/min. La secuencia del esfuerzo vertical aplicado a cada muestra fue de 0.50, 1.00 y 2.00 kg/cm².

La medición de la deformación horizontal, el asentamiento y las fuerzas horizontales y verticales fueron registrados usando un adquisidor de datos portátil.

Los resultados obtenidos se presentan mediante tablas y gráficos. Estos resultados demuestran que una de las principales variables que controlan la movilización de la resistencia cortante es la densidad del material conformado, observándose que un material suelto moviliza su máxima resistencia a grandes deformaciones, desarrollando una curva esfuerzo-deformación que asintóticamente alcanza la falla, mientras que el material en estado denso, moviliza primero una resistencia pico a niveles de deformación relativamente bajos, y luego disminuye hasta desarrollar una resistencia residual a grandes deformaciones. No obstante, también existen otras variables que posiblemente influyen en la determinación del ángulo de fricción del suelo gravoso, tales como: cantidad de gravas presentes en la muestra, rotura o fragilidad de las partículas, forma redondeada o angulosa de las partículas, tipo de gradación del suelos gravoso (GW o GP), rigidez de la muestra conformada, entre otros. La evaluación de estas variables no es motivo de la investigación.

En todos los casos la cohesión aparente se encuentra en el rango de 0.13 kg/cm^2 a 0.63 kg/cm^2 . Esta cohesión representa posiblemente la rigidez del material conformado y el comportamiento en rotura no lineal del material.

Con el propósito de verificar los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos empleados en el trabajo experimental, se comparó los resultados obtenidos del ensayo de corte directo "In situ" y el ensayo de Corte Directo a Gran Escala llevado a cabo en el laboratorio, utilizando el mismo material gravoso. Los resultados muestran una variación en el comportamiento de las curvas esfuerzo – deformación. Sin embargo, la tendencia de la envolvente de falla para ambos ensayos no presenta diferencias significativas ($\phi_{\text{IN SITU}} - \phi_{\text{LABORATORIO}} \leq 2^\circ$).

Finalmente, apoyándose en la recopilación de ensayos de corte directo "In situ" y la base de datos generados por diferentes investigadores en el mundo para este tipo de materiales, se concluye que los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos, obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala, son confiables.

INTRODUCCIÓN

El ensayo de corte directo es comúnmente usado en nuestro medio por los diferentes laboratorios geotécnicos para determinar la resistencia cortante de los suelos. Estos ensayos son ejecutados siguiendo los procedimientos descritos en la Norma ASTM D 3080.

¿Pero, que sucede si al analizar la zona de emplazamiento de una cimentación o al realizar el estudio de estabilidad de un talud, encontramos terrenos aluvionales y fluviales constituidos por materiales gruesos como bolones y gravas inmersos en una matriz mas fina que puede estar constituida por arenas, limos y arcillas, como parte de su granulometría representativa?. Generalmente en estos casos particulares se utilizan valores asumidos o inferidos de los parámetros C y Φ que se referencian en los diversos textos o artículos técnicos y que es comúnmente usado por la ingeniería práctica a través de la extrapolación de la información a otros suelos gruesos en proyecto específicos, debido a que los equipos existentes en nuestro medio son de dimensiones reducidas (apropiados principalmente para arenas y suelos finos), que no permiten el trabajo en suelos gravosos. Esto conlleva a utilizar parámetros conservadores y además aplicar factores de seguridad compatibles con la limitada información disponible.

Por otro lado, el uso de materiales gruesos es muy común en la construcción de grandes presas, donde una apropiada caracterización geomecánica de los suelos de grandes partículas resulta fundamental.

De ahí el gran interés que tiene, el poder utilizar un equipo que permita la determinación de los parámetros de resistencia cortante, aproximando lo más posible a la realidad el tamaño máximo de las partículas.

El ensayo de corte directo "In situ", representa una alternativa importante para la evaluación de los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos, sin embargo su dificultad y alto costo, por el tamaño que requiere la muestra a ser ensayada y las grandes cargas de reacción necesarios, limitan la utilización de esta metodología.

Estudios previos muestran que pueden ser obtenidos similares comportamientos de resistencia cortante a lo obtenido mediante el uso de la caja de corte

convencional, usando cajas de corte de mayor dimensión en el ensayo de corte directo (Taylor y Leps, 1938; Bishop, 1948; Palmeira y Milligan, 1989; citados por Edil y Benson, 2007). Sin embargo, estos estudios han sido limitados a suelos arenosos de granos uniformes, cada investigación focalizó su estudio en un solo tipo de arena. La influencia del contenido de gravas en el comportamiento de la resistencia cortante también fue estudiado (Fragaszy et. al. 1992; Simoni y Houlsby, 2006; citados por Edil y Benson, 2007), pero estos estudios han sido focalizados en un solo tipo de matriz arenosa mezclado con uno o dos tipos de gravas. El efecto de las características físicas y factores geológicos del suelo igualmente fue evaluado (Edil y Benson, 2007), no obstante, se empleó en la investigación gravas de hasta 1 pulgada de tamaño máximo.

El equipo de Corte Directo a Gran Escala de 0.60x0.60x0.60 m, diseñado y construido en esta investigación, permite ensayar materiales granulares de hasta 10 cm de diámetro, manteniendo constante la carga vertical sobre la muestra gracias a la retroalimentación del inyector de presión del gato hidráulico y la capacidad de reacción del pórtico de acero (10 toneladas). Se podrán realizar ensayos con materiales en distintos estados de compactación, desde lo más suelto hasta las compactas.

El autor del presente trabajo de investigación, espera, que el uso del equipo de Corte Directo diseñado y construido en el laboratorio, permita tener una idea más clara acerca de las características de resistencia cortante de los suelos gravosos, para de esta forma evitar utilizar parámetros conservadores, y aprovechar al máximo el buen comportamiento del material, ya que comparativamente desarrollan, en general, mayor rigidez y resistencia que suelos de granos más pequeños como suelos arenosos. Asimismo, se espera contribuir a resolver adecuadamente problemas de cimentación, excavaciones profundas, estabilidad de talud, entre otros, en materiales granulares con partículas de gran tamaño, para de esta forma optimizar los aspectos económicos y seguridad del diseño ingenieril.

El Autor

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 OBJETIVO Y ALCANCES

El objetivo del presente trabajo de investigación es el diseño, construcción e implementación de un equipo de Corte Directo a Gran Escala de 0.60x0.60x0.60 m, para la cuantificación de los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos, así como su respectiva difusión.

Establecer los parámetros de resistencia cortante para suelos gravosos como el conglomerado de Lima es un problema en la actualidad en nuestro país, por la falta de equipos de laboratorio para ensayar muestras de grandes dimensiones.

Existe la alternativa de realizar ensayos de corte directo "In situ", que permiten obtener los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos. Estos ensayos han sido realizados en algunos estudios geotécnicos (De la Rosa, 1974; Humala, 1988; Shuan, 1997; entre otros) en nuestro medio, sin embargo su uso es poco frecuente debido a su alto costo.

Por consiguiente, la construcción de una caja de corte de mayor dimensión que el convencional, representaría una alternativa importante para obtener los parámetros de resistencia cortante de los suelos gravosos en el laboratorio. Cabe indicar que varios investigadores en el mundo, emplearon cajas de corte de mayor dimensión que el estándar en sus investigaciones para evaluar el ángulo de fricción mediante el ensayo de corte directo. A continuación se da a conocer algunas investigaciones.

Taylor y Leps (1938; citado por Edil y Benson, 2007) ejecutaron ensayos comparativos de corte directo en arena seca (Ottawa) utilizando dos tipos de caja de corte cuadrada, una pequeña (76 mm) y otra mediana (305 mm), para evaluar la influencia de la dimensión del espécimen sobre el ángulo de fricción. Ellos reportaron que el valor del ángulo de fricción, utilizando la caja de corte mediana fue 0.5° en promedio más pequeño que el ángulo de fricción medida en la caja de menor dimensión.

Bishop (1948; citado por Edil y Benson, 2007) también realizó ensayos de corte directo en arena seca en cajas de corte pequeña (60 mm) y mediana (305 mm). Para intervalos de porosidades de 0.36 a 0.46, el ángulo de fricción medida en la caja pequeña se determinó dentro del intervalo $\pm 2^\circ$ del ángulo de fricción medida a través de la caja mediana. Bishop también investigó la influencia de la gradación en el comportamiento de resistencia cortante, utilizando una caja de corte de mayor dimensión y partículas gravosas bien graduadas de hasta 38 mm de diámetro. Concluyendo que las partículas de mayor dimensión no controlan el comportamiento de corte de las gravas bien graduadas.

Palmeira y Milligan (1989) ejecutaron ensayos de corte directo en arenas secas (Leighton Buzzard) en una caja de corte de 1 metro cúbico, utilizaron también una caja mediana de 252 mm por 152 mm y espesor 152 mm, y una caja de corte convencional de 60 mm de sección cuadrada y de espesor 32 mm, para analizar el efecto de escala. El tamaño de las partículas de las arenas variaron de 0.6 a 1.2 mm. Ellos reportaron valores de ángulo de fricción de 49 a 50° para muestras ensayadas en las tres cajas.

Las primeras pruebas con muestras de grava se efectuaron en la Universidad de Harvard en 1944, usando una cámara triaxial para especímenes de 4 pulgadas de diámetro, ensayados a presión confinante menor de 1.00 Kg/cm², habiendo otros estudios posteriormente.

Simoni y Houlsby (2006; citado por Edil y Benson, 2007) realizaron ensayos de corte directo en un aparato de mayor dimensión (254 mm x 152 mm, espesor del espécimen = 150 mm) que el estándar, en arenas pobremente gradadas mezcladas con gravas de 10 a 60 %. Estas partículas gravosas fueron mayores a 2 mm y menores que 20 mm. Ellos reportaron similar ángulo de fricción entre las arenas y las arenas mezcladas con gravas de hasta 20%. No obstante, para arenas mezcladas con gravas mayores a 30%, ellos reportaron un incremento en el ángulo de fricción.

Edil y Benson (2007) ejecutaron ensayos de corte directo en una caja mediana cuadrada de 305 mm de lado y en la caja de corte convencional (64 mm), también cuadrada. El material granular utilizado para el ensayo en la caja mediana contiene partículas gravosas de 0 a 30% (mayores a 4.75 mm. pero menores que 25.4 mm), mientras la caja convencional contiene partículas menores a 4.75 mm. Ellos reportaron que el ángulo de fricción medido en el mismo material en ambas cajas en su mayoría difiere en el rango de $\pm 2^\circ$.

En consecuencia, teniendo como precedente las investigaciones realizadas, se diseñó y construyó una caja de corte de mayor dimensión que el convencional en el Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Universidad Nacional de Ingeniería, para realizar ensayos de Corte Directo a Gran Escala en suelos gravosos.

El tema de investigación se desarrolla en cinco capítulos que se describe a continuación:

El Capítulo I, detalla el objetivo, alcances y la justificación del trabajo de investigación desarrollado en el Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Universidad Nacional de Ingeniería.

En el Capítulo II, se resume los conceptos generales básicos como la teoría de resistencia al esfuerzo cortante, descripción de los ensayos de corte directo estándar e “In situ” y descripción de pruebas y análisis de laboratorio complementario.

En el Capítulo III se detalla el diseño e implementación del equipo de Corte Directo a Gran Escala, siendo las variables principales la implementación del pozo de ensayo, los factores que controlan el diseño del equipo de corte directo y finalmente el diseño e instrumentación del equipo.

En el Capítulo IV, se intenta realizar una exposición detallada del ensayo de Corte Directo a Gran Escala para suelos gravosos en el laboratorio, comenzando con la caracterización física y mecánica del material a ensayar, preparación de la muestra en la caja de corte, ejecución del programa experimental de corte directo y el análisis e interpretación de resultados.

En el Capítulo V, se efectúa el análisis comparativo y la discusión de resultados de los parámetros de resistencia cortante para suelos gravosos, entre el ensayo de Corte Directo a Gran Escala, ejecutado en el laboratorio, y el ensayo de corte directo “In situ”. Adicionalmente, se tiene como referencia el rango de valores establecidos por diferentes investigadores en el mundo tales como Hough (1957), Terzaghi y Peck (1967), Marsal (1980), entre otros, en materiales granulares gruesos.

Finalmente, se presenta las conclusiones y recomendaciones más importantes que han podido establecerse luego de haberse concluido el presente trabajo de investigación.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Proporcionar parámetros de resistencia cortante de suelos gravosos, contribuirá a la evaluación racional de la capacidad portante de cimentaciones sobre este tipo de suelos, el análisis de estabilidad de taludes y estructuras de suelos, entre otros, para así efectuar diseños técnicos y económicos óptimos que representen una alternativa ingenieril confiable.

CAPÍTULO II

CONCEPTOS GENERALES

2.1 TEORÍA DE LA RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

Se define a la resistencia al corte, o resistencia al esfuerzo cortante de un suelo como el valor máximo, o límite, de la resistencia al corte que se puede inducir dentro de su masa antes de que ceda. El valor límite del esfuerzo cortante está influido tanto por la magnitud como por la velocidad de deformación, así como por la historia de esfuerzos del suelo.

La resistencia al corte del suelo no puede considerarse como un parámetro único y constante, ya que depende de su naturaleza, estructura, enlaces, nivel de deformaciones, etc. Así como muy especialmente de su estado tensional y de la presión del fluido que rellena sus poros (González de Vallejo, 2002).

El criterio de rotura en suelos más difundido deriva del propuesto por Coulomb, que relaciona esfuerzos efectivos normales y esfuerzos tangenciales actuando en cualquier plano del suelo (ver Figura 2.1). Este criterio establece que, para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por la expresión:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (2.1)$$

Donde:

τ = Resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano.

σ_n = Esfuerzo total normal actuando sobre el mismo plano.

u = Presión intersticial.

c' = Cohesión efectiva.

ϕ' = Ángulo de rozamiento interno efectivo.

La ecuación anterior representa una recta en el espacio (σ', τ) , que a menudo se denomina envolvente de rotura del suelo como se muestra en la Figura 2.2. Esta línea, proporciona para cada valor del esfuerzo efectivo normal a un plano que atraviesa un elemento del suelo, el máximo esfuerzo tangencial a favor de dicho plano.

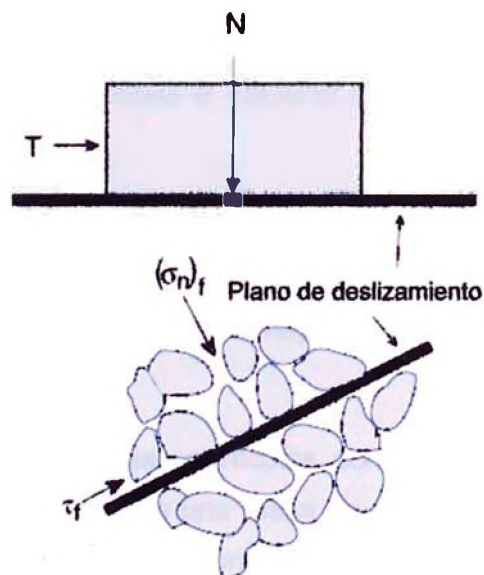


Figura 2.1. Modelo del criterio de rotura propuesto por Coulomb (Budhu 2000). Bloque de madera sobre un plano horizontal.

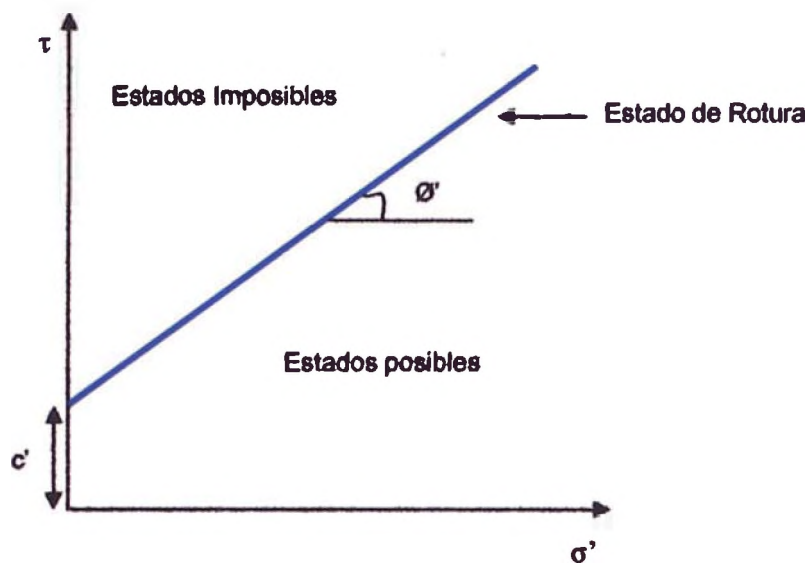


Figura 2.2. Envolvente de rotura del suelo o envolvente de falla.

De la figura 2.2 se pueden deducir algunos aspectos interesantes:

- La cohesión efectiva, es la ordenada en el origen de la envolvente de rotura. Representa por lo tanto, la máxima resistencia tangencial en un plano cualquiera cuando el esfuerzo efectivo normal en dicho plano es nula.
- El máximo esfuerzo tangencial en un plano es mayor a medida que aumenta el esfuerzo efectivo normal que actúa sobre dicho plano. Es decir, es más resistente cuando mayor es su nivel de esfuerzos efectivos.

El deslizamiento relativo entre las partículas constituye el mecanismo más importante de deformación en una masa de suelo. De aquí, que la resistencia de un suelo a la deformación venga fuertemente influenciado por la resistencia tangencial en los contactos entre partículas. Para un buen dominio de la mecánica de suelos es fundamental conocer la posible magnitud de esta resistencia tangencial y de los factores que influyen sobre la misma (Lambe y Whitman, 1972).

A manera de resumen podemos decir, que la resistencia tangencial total es proporcional a la fuerza normal ejercida entre ambas partículas, si esta resistencia normal disminuye se reduce la resistencia o el número de enlaces, con lo cual disminuye la resistencia tangencial total. Puede decirse por esto que la resistencia al deslizamiento tangencial entre partículas es de naturaleza friccional.

2.2 ENSAYO DE CORTE DIRECTO ESTÁNDAR

2.2.1 Generalidades

Durante muchos años el ensayo de corte directo ha sido usado en diversos proyectos para determinar los parámetros de resistencia de los suelos. Hoy, aún se conserva el interés práctico debido a su simplicidad, aunque ha sido sustituido en buena parte por las pruebas de compresión triaxial en el laboratorio.

El aparato del ensayo de corte directo estándar se representa esquemáticamente en la Figura 2.3. Se trata de una caja rígida de acero de sección circular o cuadrada, que se encuentra dividida en dos mitades y en cuyo interior se coloca la muestra de suelo. Encima de ésta, se coloca una placa rígida sobre la que se puede aplicar una carga vertical "N". La aplicación de la fuerza cortante en el suelo se logra trasladando horizontalmente la parte inferior de la caja de corte mientras que se impide el movimiento totalmente de la zona inferior (ver Figura 2.3).

Una prueba completa sobre un determinado suelo consiste en ensayar tres muestras idénticas del mismo material bajo tres cargas axiales distintas (N_1 , N_2 y N_3).

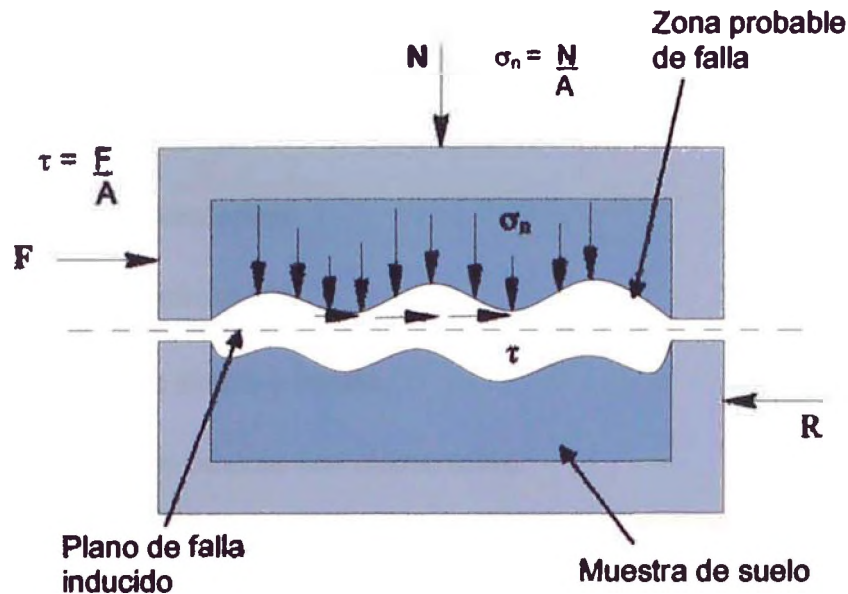


Figura 2.3. Esquema del equipo de corte directo convencional.

En cada uno de los ensayos individuales, a medida que se obliga a la parte inferior a desplazarse horizontalmente a velocidad constante, se va midiendo:

- La fuerza horizontal (F_H) necesaria para impedir el movimiento de la parte superior. Dividiendo dicha fuerza por la sección transversal de la muestra, se obtiene el esfuerzo cortante (τ) actuante en cada momento sobre el plano de corte.
- El desplazamiento vertical de la muestra, teniendo en cuenta que las paredes de la caja de corte son rígidas, la deformación vertical medida proporciona directamente el cambio de volumen de la muestra.
- Y el desplazamiento horizontal que permite controlar el movimiento relativo de la mitad inferior de la caja.

La resistencia al corte " τ " de un suelo, en términos del esfuerzo efectivo es expresado en la ecuación (2.1). Los esfuerzos normal y cortante en la falla son expresados en la ecuación (2.2) y la Figura 2.3:

$$\sigma = \frac{N}{A}, \quad \tau = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

2.2.2 Ventajas e Inconvenientes

Las principales ventajas son:

- Es un equipo simple y barato.
- Sus principios básicos son elementales.
- La preparación de la muestra es sencilla.
- Con cajas de mayor dimensión se pueden ensayar materiales granulares gruesos.
- Con algunas modificaciones se pueden emplear los mismos principios para determinar la resistencia de discontinuidades en roca, contacto hormigón-suelo, suelos gravosos, entre otros.

En cuanto a las limitaciones cabe citar:

- La superficie de rotura es predeterminada.
- La distribución de esfuerzos en la superficie de corte no es uniforme.
- No se puede medir en general presiones intersticiales, de manera que la única forma de controlar el drenaje es variando la velocidad de desplazamiento horizontal.
- El área de contacto disminuye a medida que se produce el desplazamiento horizontal relativo entre ambas mitades de la caja.

2.2.3 Equipo

El equipo consiste en una caja de corte metálica en la que se coloca el espécimen. Las muestras pueden ser cuadradas o circulares. El tamaño de los especímenes empleados generalmente es de 20 a 25 cm² transversalmente y de 25 a 30 mm de altura, aproximadamente. La caja está cortada horizontalmente en dos partes. La fuerza axial sobre el espécimen se aplica desde la parte superior de la caja de corte. La fuerza cortante es aplicada moviendo una mitad de la caja respecto de la otra para generar la falla en el espécimen del suelo. En la Figura 2.4, se muestra detalles del ensayo de corte directo.

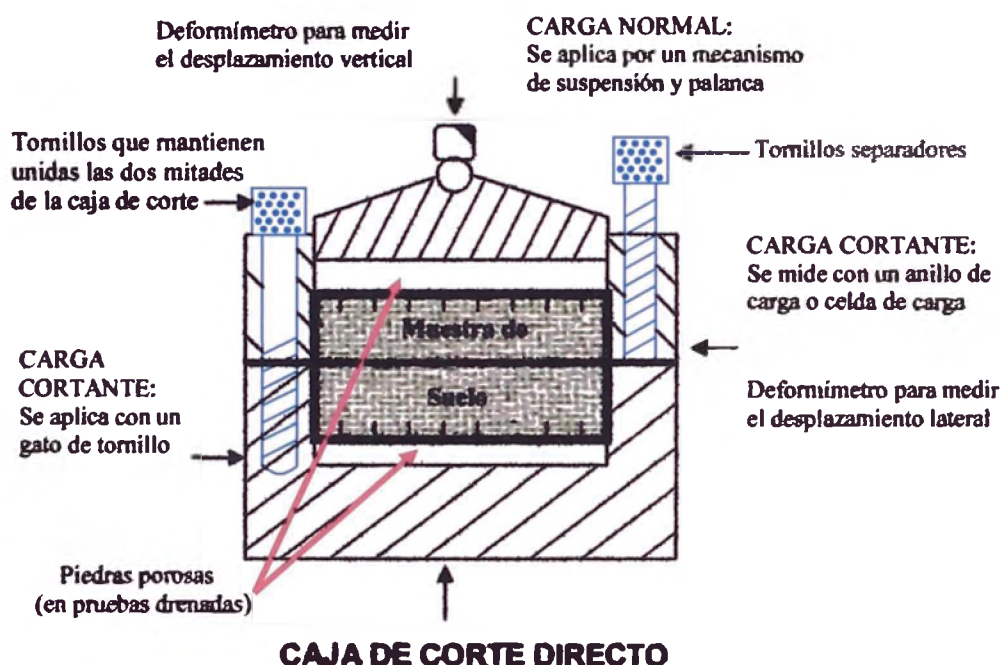


Figura 2.4. Detalle del ensayo de corte directo según la Norma ASTM D 3080.

Dependiendo del equipo, la prueba de corte puede ser controlada por el esfuerzo o por la deformación unitaria. En las pruebas controladas por el esfuerzo, la fuerza cortante es aplicada en incrementos iguales hasta que el espécimen falla. Después de la aplicación de cada incremento de carga, se mide el desplazamiento cortante de la caja movilizable por medio de un deformímetro horizontal.

En pruebas controladas por la deformación unitaria se aplica una razón constante de desplazamiento cortante a una mitad de la caja por medio de un motor que actúa a través de engranes. La deformación horizontal se mide con un deformímetro. La fuerza cortante resistente del suelo correspondiente a cualquier deformación horizontal se mide por medio de un anillo de carga horizontal o a través de una celda de carga. El cambio de volumen durante la prueba se obtiene a partir de la lectura del deformímetro vertical colocado sobre el espécimen.

La ventaja de las pruebas por deformación unitaria controlada es que, en el caso de arena densa, se observa y grafica la resistencia pico (es decir, en la falla) así como resistencias cortante menores (es decir, en un punto después de la falla llamado resistencia última). En las pruebas por esfuerzo controlado, sólo se observa y grafica la resistencia cortante. En la Figura 2.5, se muestra el gráfico correspondiente a la prueba controlada por deformación unitaria.

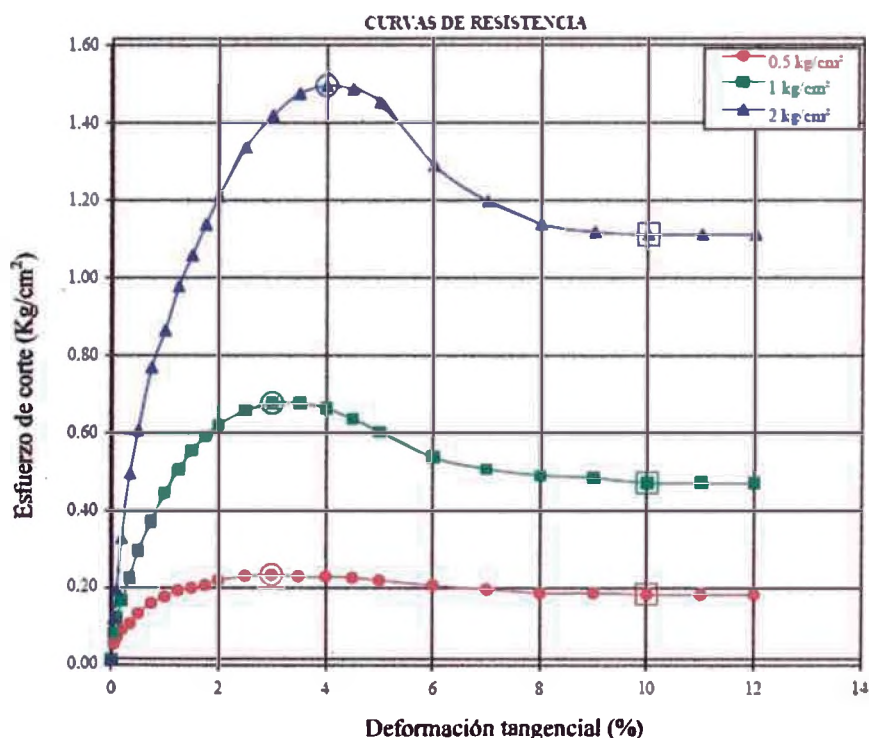


Figura 2.5. Trayectoria de la curva esfuerzo de corte versus deformación horizontal, para tres cargas diferentes.

2.2.4 Tipos de Ensayos

Los ensayos de corte pueden clasificarse como sigue:

a) Ensayos No Consolidado – No Drenado o Ensayos UU

El corte se inicia antes de consolidar la muestra bajo la carga normal, si el suelo es cohesivo y saturado, se desarrollará un exceso de presión de poros.

b) Ensayo Consolidado – No Drenado CU

Se aplica la fuerza normal y se observa el movimiento vertical del deformímetro hasta que se equilibre la deformación vertical (consolidación) antes de aplicar la fuerza cortante. Luego, la fuerza cortante es aplicada de forma rápida sin permitir la disipación del exceso de presión de poros generada en esta etapa.

c) Ensayo Consolidado – Drenado CD

Se aplica la fuerza normal, hasta que se equilibre la deformación vertical, luego se aplica la fuerza cortante tan lento como sea posible (de 0.125 a 0.25 mm/min, aprox.), para evitar el desarrollo de presiones de poros en la muestra.

Para suelos cohesivos, los parámetros de resistencia de los suelos están influenciados por el método de ensayo y por el grado de saturación, y por el hecho de que el material esté normalmente consolidado o sobre consolidado.

2.2.5 Determinación de los Parámetros de Resistencia

Ejecutando como mínimo tres pruebas con el mismo material a diferentes valores de la presión normal, pueden trazarse puntos en la gráfica " σ " vs " τ " con los valores de los esfuerzos normales " σ " y los valores máximos del esfuerzo cortante " τ ", obtenidos de cada una de las pruebas. Uniendo los puntos así obtenidos se tendrá la envolvente de falla del material. Del gráfico obtenido, se determina los parámetros de resistencia C y ϕ . Según los requerimientos del proyecto, estos parámetros pueden corresponder a la resistencia máxima o residual. En la Figura 2.6, se muestra una representación gráfica de la envolvente de falla.

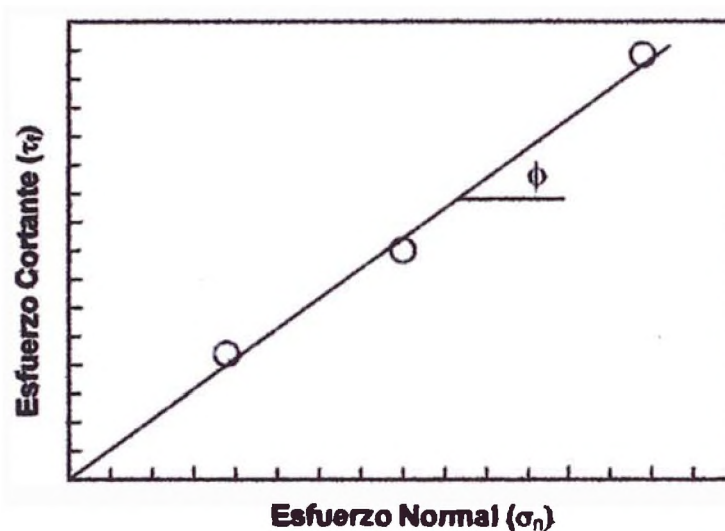


Figura 2.6. Representación gráfica del esfuerzo de corte versus esfuerzo normal para obtener el ángulo de fricción.

2.3 ENSAYO DE CORTE DIRECTO “IN SITU”

2.3.1 Generalidades

El ensayo de corte directo “In situ” representa una alternativa importante para la evaluación de los parámetros de resistencia de los suelos gravosos.

Aunque no existen especificaciones precisas sobre el ensayo, la idea es reproducir “In situ” el ensayo de corte directo efectuado en laboratorio. Por consiguiente, para realizar el ensayo, se diseñó los sistemas de transmisión de carga normal y tangencial; la forma y dimensión de los especímenes dependerá básicamente de las características granulométricas del material a ensayar, como lo sugieren los ensayos realizados en algunos estudios geotécnicos en nuestro medio (De la Rosa, 1974; Humala, 1988; Shuan, 1997, Alva, 2008, entre otros). En la Figura 2.7, se muestra a detalle el ensayo de corte directo “In situ”.

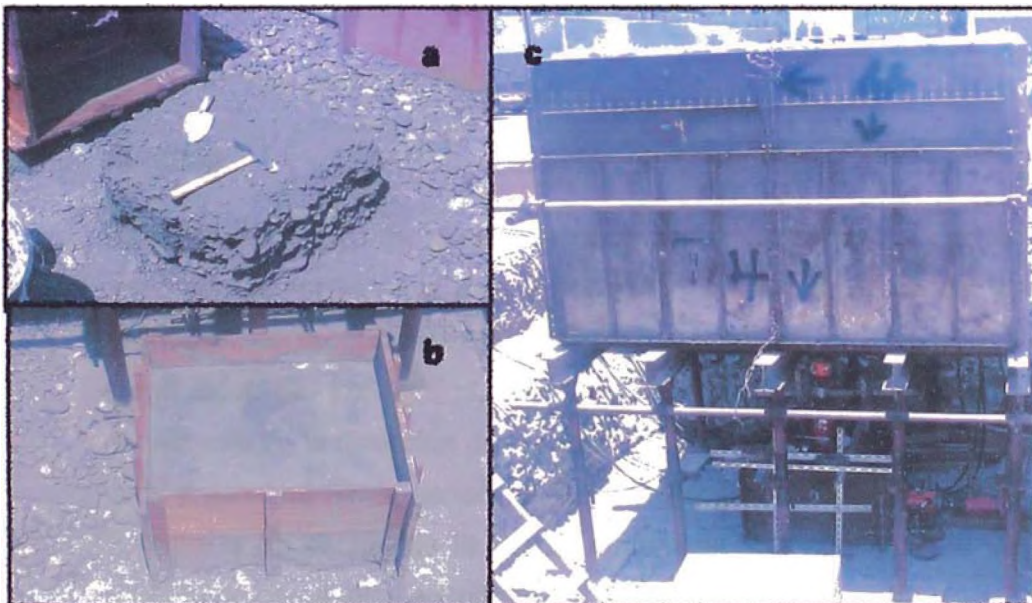


Figura 2.7. Ensayo de corte directo “In situ”. a) Tallado del espécimen, b) Uniformidad del espécimen mediante mezcla yeso – cemento, c) Ejecución del ensayo de corte directo “In situ”.

El equipo de corte directo "In situ" está constituido por las siguientes partes:

a) Equipo de Confinamiento

La función de este equipo es el de confinar el espécimen mediante planchas metálicas apropiadamente instaladas en las caras laterales y superior del espécimen, para posteriormente aplicar la carga axial y horizontal. Las dimensiones de las planchas estarán en función del tamaño del espécimen. Generalmente se utilizan planchas cuadradas de 70 cm de lado.

b) Sistema de Transmisión de Carga Axial

Es un sistema ideado según los equipos y materiales disponibles "In situ" y que sea capaz de conformar una sobrecarga suficiente, de tal forma que transmita las presiones normales requeridas para cada uno de los especímenes del ensayo.

c) Rodillos

Se emplean rodillos de alma llena perfectamente pulidos colocados entre dos planchas metálicas; su objetivo es evitar que durante la aplicación de la fuerza horizontal se desestabilice el sistema de carga axial. Sin los rodillos, todo el sistema de cargas tendería a moverse en la dirección de la fuerza tangencial. Al ser los rodillos lisos y de alma llena, tienen la cualidad de girar sobre si mismos durante la aplicación de la fuerza tangencial, por consiguiente el sistema de carga axial se mantendrá estable.

d) Gatos Hidráulicos

Se requieren dos gatos hidráulicos, una para transmitir la carga horizontal y la otra para la carga axial.

e) Deformímetros

Se requieren deformímetros para medir el asentamiento de la muestra producto de la aplicación de la carga normal así como también para medir el desplazamiento horizontal, debido a la aplicación de la fuerza horizontal durante el ensayo.

2.3.2 Procedimiento de Corte

Confinado el espécimen con las planchas metálicas apropiadamente instaladas, se procede a ejecutar el ensayo, para lo cual, primero se aplica la carga normal por incrementos. Luego, una vez alcanzado el asentamiento total se procede a aplicar la fuerza tangencial también por incrementos. Durante el proceso de ruptura, el esfuerzo normal deberá mantenerse constante, y la fuerza tangencial se incrementa en forma creciente y controlada hasta conseguir la ruptura.

2.3.3 Determinación de los Parámetros de Resistencia

Como se explicó anteriormente en el párrafo correspondiente al ensayo de corte directo estándar, la determinación de los parámetros de resistencia cortante C y Φ se calcula en base al gráfico " τ " vs " σ ", cuyo eje de abscisas representa a la presión normal " σ " y el eje de ordenadas representa el esfuerzo cortante máximo " τ ", el resultado será una recta definida por tres puntos o más, cuya inclinación con la abscisa corresponde al ángulo de fricción (Φ) y cuya intersección con el eje de ordenadas corresponde a la cohesión (C).

2.4 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

Las pruebas y análisis de laboratorio corresponden a los ensayos de laboratorios estándar y especiales, como se describe a continuación.

2.4.1 Determinación de las propiedades índices

Las propiedades índices permiten la diferenciación de suelos de una misma categoría, condiciones de estado del suelo y comportamiento físico, expresando cuantitativamente las características de un suelo.

Comprende los siguientes ensayos:

a) Contenido de Humedad

Se llama también contenido de agua y es la relación entre el peso del agua que contiene la muestra y el peso de sus sólidos, a determinar por secado en Horno o estufa. Suele expresarse como un porcentaje, como se muestra en la expresión (2.3).

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (2.3)$$

Donde:

$w(\%)$ = Contenido de humedad.

W_w = Peso de agua contenido en el suelo.

W_s = Peso del suelo seco

El contenido de humedad suele variar entre 5 a 8% en suelos granulares (arenas y gravas) y hasta en 60 a 70% en suelos arcillosos.

b) Análisis Granulométrico

El propósito del análisis granulométrico es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje del peso seco total.

El método más directo para separar un suelo en fracciones de distintos tamaños, consiste en hacer pasar la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas progresivamente más pequeñas (ASTM D 422).

c) Límites de Consistencia

Cuando existen minerales de arcilla en un suelo de grano fino, éste puede ser remodelado en presencia de alguna humedad sin desmoronarse. Esta naturaleza cohesiva es debida al agua absorbida que rodea a las partículas de arcilla. El científico sueco, Albert Mauritz Atterberg, desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables. A muy bajo contenido de humedad el suelo se comporta como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por consiguiente, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido. El contenido de humedad que produce el paso de un estado al otro es distinto para los diferentes tipos de materiales, de modo que puede ser utilizado para compararlos e identificarlos.

Los ensayos que han resultado más apropiados para determinar el contenido de humedad, que corresponden a los límites entre los distintos estados de consistencias, se conocen como límites de Atterberg y son: El límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción. Los contenidos de humedad entre los límites líquido y plástico se llaman contenidos de humedad de la zona plástica del

suelo y la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico se denomina índice de plasticidad.

De los ensayos de laboratorio se establece los límites de consistencia de los suelos y su variación, cuya información es de utilidad para la clasificación de los suelos.

d) Ensayos de Densidad Relativa

El término densidad relativa es comúnmente usado para indicar la compacidad "In situ" del suelo granular, se busca determinar el estado de densidad del suelo con respecto a sus densidades máxima y mínima.

La prueba para la determinación de la densidad máxima (Norma ASTM D 4253) supone generalmente cierta forma de vibración. Joseph Bowles en su Manual de Laboratorio de Mecánica de Suelos, propone la compactación del material granular en un molde patrón en varias capas y vibrando cada capa con golpes secos dados sobre los bordes del molde mediante un martillo de goma.

La prueba para determinar la densidad mínima (Norma ASTM D 4254) suelen hacerse por vertido del suelo en un molde calibrado, evitándose en todo momento que se produzca algún tipo de vibración.

La densidad relativa (D_r) de un suelo granular se define como:

$$D_r(\%) = \frac{\gamma_d - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \times \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_d} \quad (2.4)$$

donde:

γ_d = Densidad seca "In Situ"

γ_{dmax} = Densidad seca máxima

γ_{dmin} = Densidad seca mínima.

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se detalla el equipo implementado en el presente trabajo de investigación. Se hace un especial énfasis en la descripción del diseño, construcción e implementación del equipo de Corte Directo a Gran Escala. Asimismo, se da a conocer los equipos auxiliares necesarios para el montaje, manejo e instrumentación del equipo ensamblado.

3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL POZO DE ENSAYO

Para esta investigación se ha implementado el pozo de ensayo existente en el patio del Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID). El pozo existente de 1.50x1.50 m de lado por 2.00 m de profundidad tiene instalado un pórtico de acero para una capacidad de reacción de 10 toneladas (ver Figura 3.1), como parte de su infraestructura

implementada para otras investigaciones. Las columnas del pórtico de acero está anclado a bloques de concreto que han sido colocados en sus bases de cimentación (ver Figura 3.3b), suficiente para soportar la carga de reacción del pórtico. Esta capacidad del pórtico se usará como carga de reacción vertical para el equipo de Corte Directo a Gran Escala.

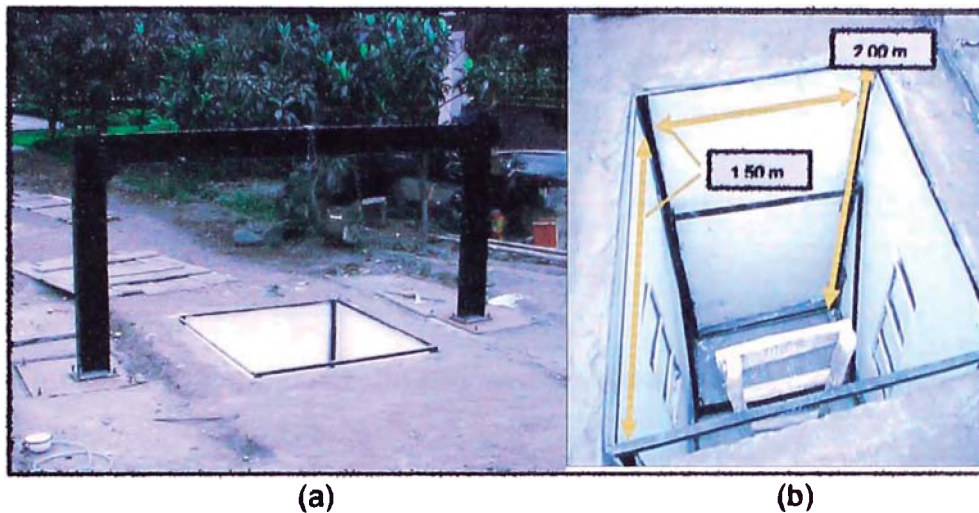


Figura 3.1. a) Vista general del pórtico de acero de 10 ton de capacidad, b) Dimensiones del pozo de ensayo existente ubicado en el patio del Laboratorio Geotécnico del CISMID de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La nueva configuración geométrica del pozo de ensayo, estará en función de las dimensiones de la caja de corte y de los equipos complementarios necesarios para llevar a cabo el programa de investigación. En la Figura 3.2, se muestra la nueva configuración geométrica del pozo de ensayo y el equipo ensamblado.

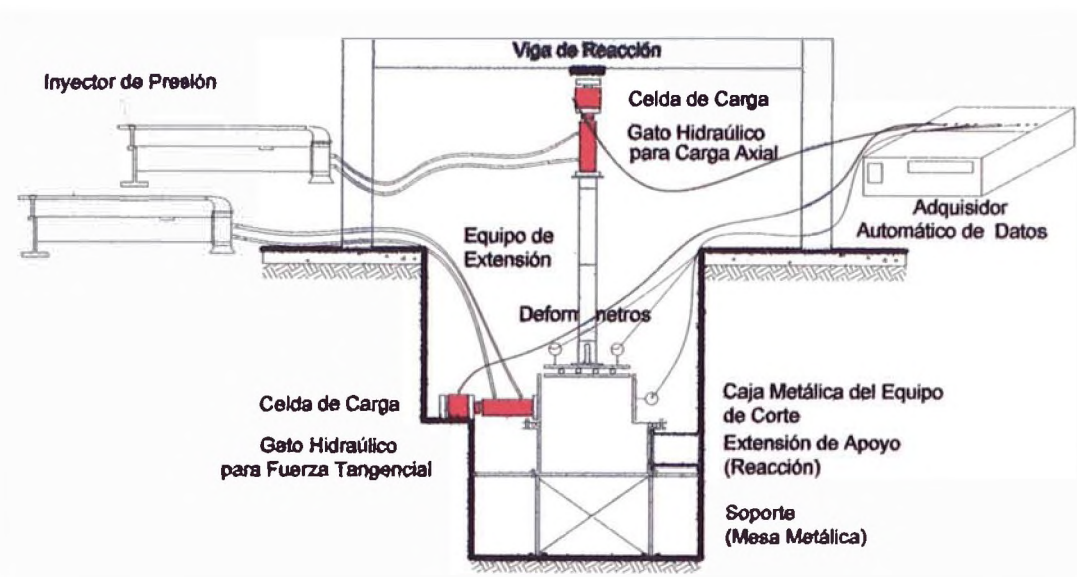


Figura 3.2. Representación esquemática del equipo de Corte Directo a Gran Escala.

Teniendo en cuenta que las cargas verticales y horizontales que se emplearán en la investigación son significativas (de 8 a 10 ton), y por consiguiente puedan dañar la infraestructura del pozo de ensayo, se contempló diseñar apropiadamente la implementación de este pozo como se explica a continuación: rigidizar las paredes laterales en la dirección de la aplicación de la carga horizontal, donde se apoyará el equipo que transmitirá la carga horizontal sobre la muestra, y en el lado opuesto donde se ubicará el soporte de reacción, además, se reforzará la base de cimentación, dado que soportará el peso del equipo y la transmisión de la carga axial durante el ensayo. Cabe indicar, que el nuevo diseño no afectará el propósito para el cual fue construido el pozo de ensayo. En la Figura 3.3, se presenta el diseño de la implementación del pozo de ensayo. En la Figura 3.4, se muestra una vista general del pórtico de acero y el pozo de ensayo implementado.

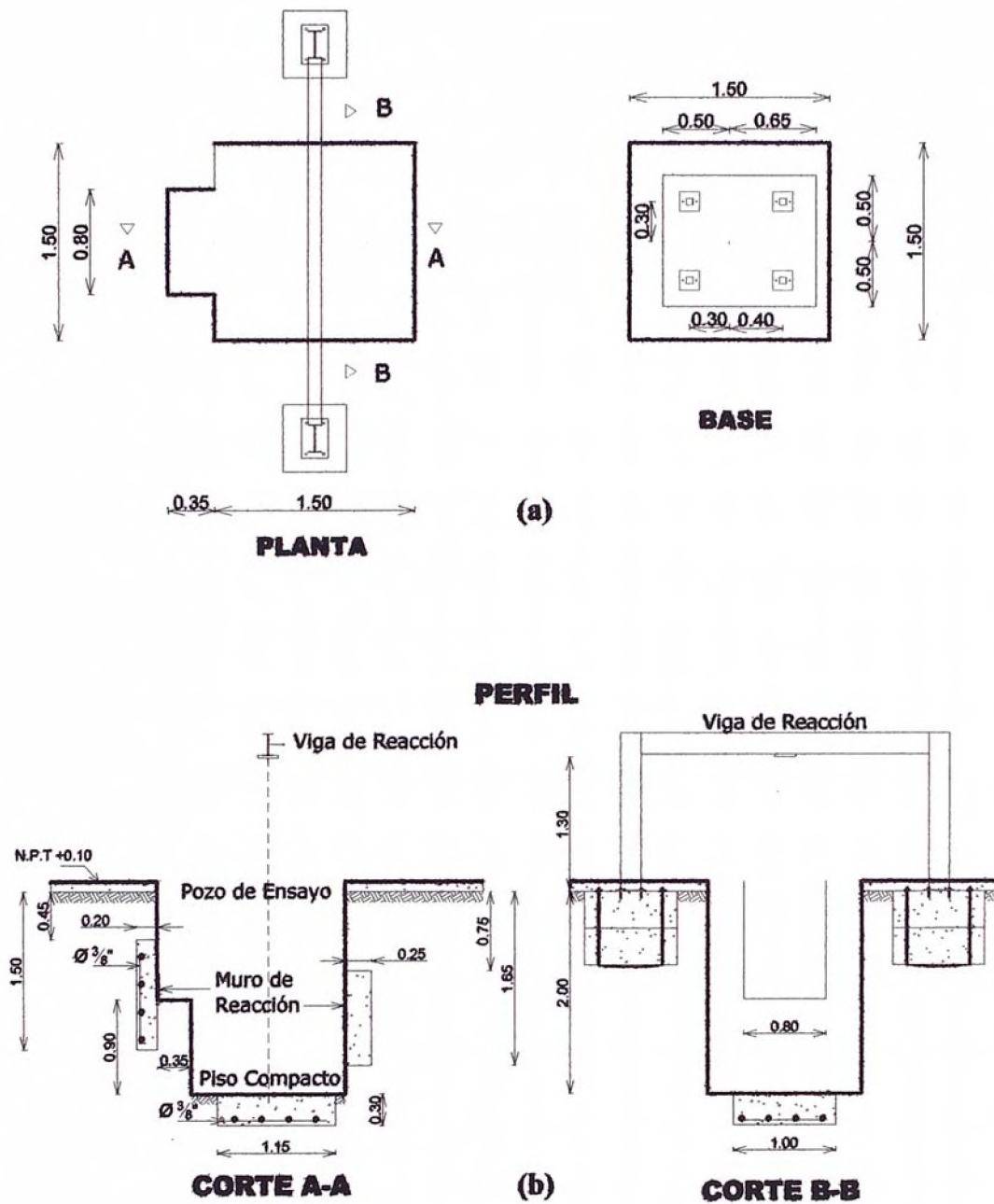


Figura 3.3. a) Vista en planta del pozo de ensayo, donde se muestra la nueva configuración de la base de cimentación para la respectiva implementación, b) Perfil del pozo de ensayo, donde se presenta el diseño de los muros de reacción y la base de cimentación (Unidad de medida = metro).



(a)

(b)

Figura 3.4. a), y b) Vista general de la implementación del pozo de ensayo acondicionado para el equipo de Corte Directo a Gran Escala.

3.3 FACTORES QUE CONTROLAN EL DISEÑO DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO

El ensayo de Corte Directo a Gran Escala es un procedimiento experimental razonable para proporcionar parámetros de resistencia cortante de suelos gravosos. Por consiguiente, fue necesario un diseño apropiado del aparato para reducir efectos adversos a los resultados de los ensayos. La dimensión del equipo fue establecido en base a lo siguiente:

1. La carga de reacción existente en el pórtico de acero tiene un límite de capacidad de hasta 10 toneladas. La dimensión del equipo está limitado a la capacidad de carga o presiones que se puede aplicar a la muestra, luego la dimensión apropiada del equipo estará en función de la capacidad de carga de reacción del pórtico. Teniendo como referencia las cargas normales probables 0.50, 1.00 y 2.00 kg/cm² para aplicar a la muestra, se diseñó en planta la caja de corte a una dimensión de 60x60 cm de lado que arroja un área de 3600 cm². La mayor carga normal aplicada a la muestra (2.00 kg/cm²) provoca una fuerza de reacción de 7.2 ton con una holgura de 1.8 ton para llegar a la carga máxima del pórtico.

2. A mayor dimensión del equipo se demanda mayor tiempo en la preparación de la muestra, por lo que se limita la versatilidad del equipo, siendo necesario un equipamiento adicional para su manejo. Sin embargo, la dimensión del equipo es más cercano a las condiciones reales del suelo gravoso para la determinación de los parámetros de resistencia cortante.
3. La restricción económica y funcional lleva por tanto a pensar en equipos que sean asequibles y se puedan manejar con relativa facilidad.
4. El tamaño máximo de la partícula depende de la dimensión de la caja de corte, generalmente se acepta que el tamaño máximo debe ser 1/6 del espesor del espécimen conformado en la caja de corte (ASTM D 3080), con la finalidad de evitar que la dimensión de la caja no influya en los resultados de la resistencia al corte del suelo, en consecuencia, dada las restricciones de la dimensión en planta de la caja de corte y la necesidad de involucrar suelos gravosos se propuso diseñar una caja de corte en forma de cubo de 60 cm de lado, donde se podrá ensayar suelos granulares con tamaño máximo de 10 cm (4 pulgadas).

Sin embargo, los efectos adversos presentados son reducidos en función de los beneficios que trae un aparato de mayor dimensión que el equipo convencional. El ritmo de los ensayos son lentos en comparación con el equipo estándar pero los resultados de los ensayos se da en un mayor rango del tamaño de los materiales granulares (tamaño de partículas de hasta 10 cm.) y evita estar analizando solamente la matriz del material y extrapolando los parámetros obtenidos con los equipos convencionales para simular el comportamiento del material gravoso.

3.4 DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO DE CORTE DIRECTO

El equipo de corte directo construido en esta investigación es una versión del equipo convencional a una escala mayor, por consiguiente su diseño cumple las especificaciones establecidas en la norma ASTM D 3080. Un esquema de la caja de corte se presenta en la Figura 3.5.

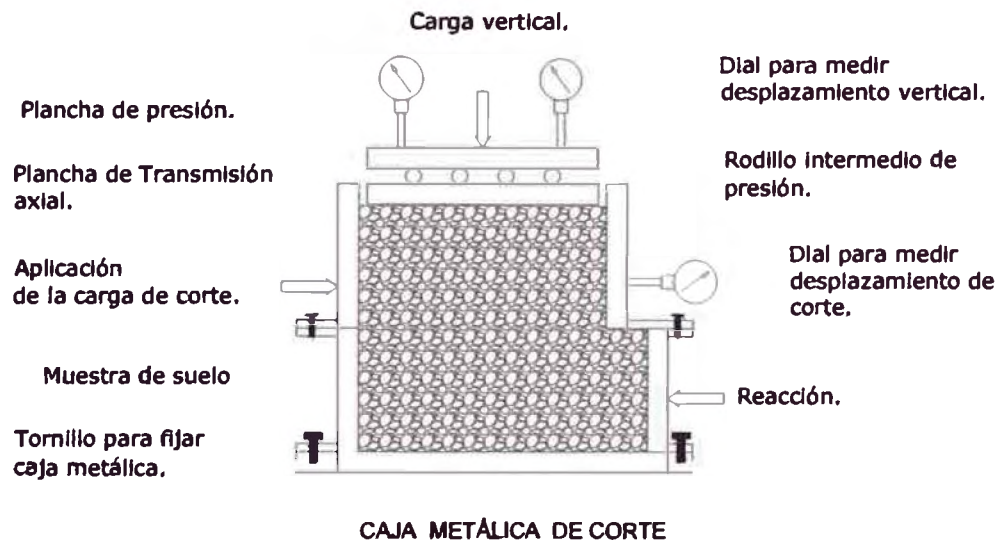


Figura 3.5. Esquema de la caja de corte para el ensayo de Corte Directo a Gran Escala.

3.4.1 Descripción General del Equipo

Las partes principales del equipo son: La caja de corte, gatos hidráulicos, instrumentación, adquisidor de datos y soportes complementarios para el montaje del equipo.

La sección en planta de la caja de corte del equipo de Corte Directo a Gran Escala es cuadrada de 60 cm de lado, contiene un espécimen de 60 cm de espesor, 06 veces el diámetro máximo (10 cm) del material granular considerado (ASTM D 3080), esta construida con planchas metálicas de acero de 1 pulgada de espesor. La caja de corte está dividida horizontalmente por la mitad para permitir el movimiento relativo

de la mitad superior sobre la inferior; en la caja inferior se incluyó 10 cm adicionales en la dirección de la aplicación de la fuerza de corte para evitar la pérdida del material gravoso de la caja superior durante el ensayo. En la Figura 3.6a, se muestra el diseño detallado de la caja de corte.

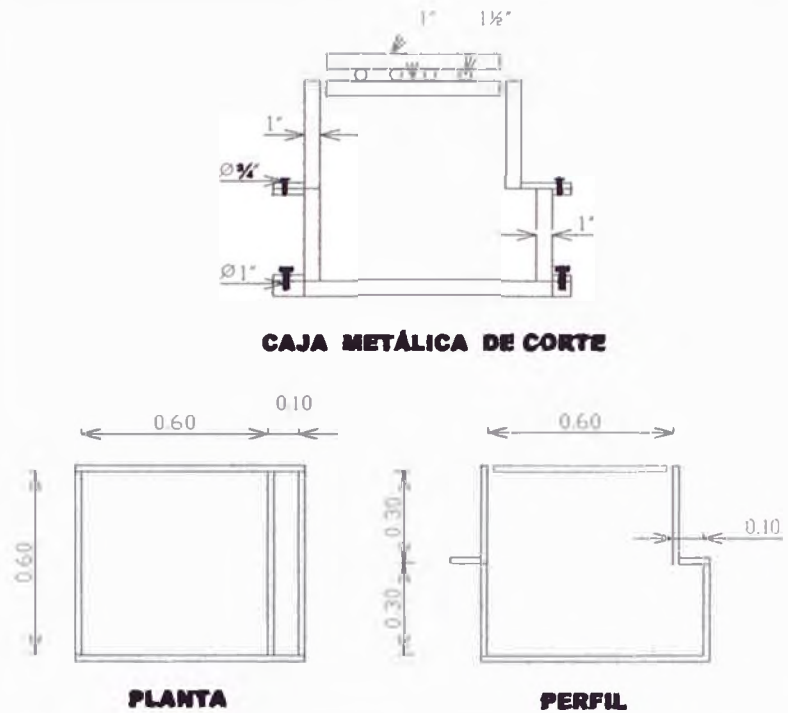


Figura 3.6. Diseño de la caja de corte (Unidad de medida = metro).

La fuerza horizontal es aplicada a la mitad superior de la caja de corte (ver Figura 3.5) mediante un gato hidráulico de 35 toneladas de capacidad, activado con un inyector de presión. La presión normal es aplicada a la muestra usando otro gato hidráulico de la misma capacidad que el anterior e igualmente activada mediante un inyector de presión. Cabe señalar que la presión transmitida a la muestra se da a través de una plancha metálica (59x59 cm por 1 pulgada de espesor) colocada sobre una capa de arena fina de 1 cm de espesor que va instalada en la parte superior de la muestra conformada y aislada de éste mediante un manto de polietileno para evitar que se contamine los materiales granulares durante el ensayo.

El uso de la arena fina de granos uniformes es una aplicación práctica con el fin de obtener una superficie homogénea para transmitir a la muestra una distribución de presión uniforme en cualquier estado del ensayo (ver Figura 3.7) y evitar de esta forma un diseño complejo y costoso para tal fin. Con una plancha rígida es difícil que ocurra una distribución homogénea de la carga axial sobre la muestra (Jewell, 1980; citado por Palmeira, 1987). El investigador Arthur et al (1977) demostró que el ensayo de corte directo con el contorno flexible en la parte superior de la muestra conduce a que el ángulo de fricción obtenido del ensayo esté muy cerca de los valores obtenidos por otros aparatos de deformación plana (Palmeira, 1987).

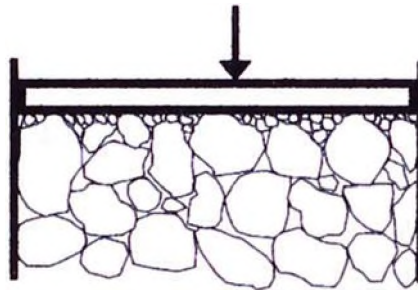


Figura 3.7. Capa de arena fina de 1 cm de espesor para transmitir a la muestra una presión uniforme (Oldecop, 2000; citado por Chavez).

El pórtico de acero usado como punto de apoyo de la carga axial es alcanzado mediante un soporte de extensión (tubo de acero de 10 cm de diámetro, 2.5 mm de espesor y 1.25 m de longitud), que va montado sobre las dos planchas de acero instaladas sobre la muestra conformada, el gato hidráulico y la celda de carga, respectivamente. Las dos planchas de acero están separadas por 06 rodillos macizos de alma llena (1 1/2 pulgadas de diámetro), colocadas sobre una de las planchas en forma transversal a la dirección del movimiento horizontal, de manera que se evita la desestabilización del sistema de carga durante la aplicación de la fuerza tangencial. Al ser los rodillos lisos y de alma llena, tienen la cualidad de girar sobre si mismo durante el movimiento relativo de la caja

de corte, por consiguiente el dispositivo que transmite la carga axial se mantendrá estable. En la Figura 3.8, se muestra el diseño de las planchas metálicas de presión y los rodillos macizos.

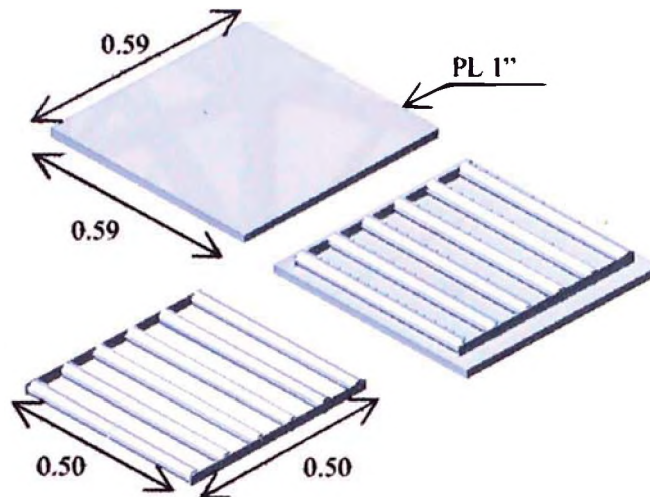
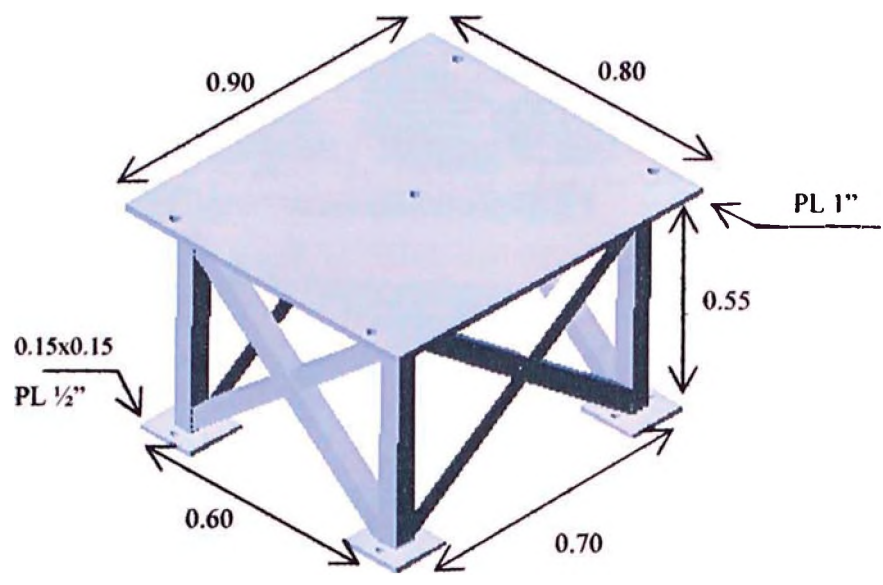
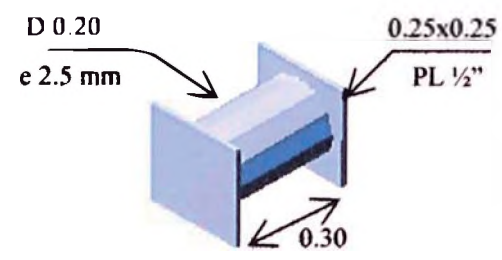


Figura 3.8. Diseño de las planchas metálicas y los rodillos macizos (Unidad de medida = metro).

Para evitar el movimiento de la caja inferior durante el ensayo, se fijó ésta a la mesa metálica mediante pernos (la mesa metálica fue construida con el propósito de implementar el equipo ensamblado en el futuro para ensayar suelos gravosos en condiciones drenadas), y a su vez la mesa metálica se fijó al piso a través de unos dispositivos que fueron empotrados en la cimentación como parte de la implementación del pozo de ensayo. Adicionalmente, se construyó un soporte metálico de reacción que fue instalado en la dirección opuesta al movimiento horizontal de corte, apoyado en la placa de concreto implementada en el pozo de ensayo. En la Figura 3.9, se muestra el diseño de la mesa metálica y el soporte de reacción. En la Figura 3.10, se muestra la construcción del soporte de apoyo (la mesa metálica) y la caja de corte.



Mesa Metálica



Soporte de Reacción

Figura 3.9 Diseño de soportes complementarios
(Unidad de medida = metro).



(a)



(b)

Figura 3.10. Construcción del equipo de corte. a) Mesa metálica, b) Caja de corte.

Para reducir la fricción entre la mitad inferior y superior de la caja de corte, se implementó un dispositivo de rodamiento de tubo macizo (5 mm. de diámetro), guiadas mediante una platina de 3 mm de espesor y 25.4 mm de ancho a lo largo de los dos bordes de la caja deslizante en la dirección del movimiento. En la Figura 3.11, se muestra el dispositivo de rodamiento. En la Figura 3.12, se presenta la caja de corte construida.



Figura 3.11. Dispositivo de rodamiento colocado en los bordes de la caja de corte para reducir la fricción.



Figura 3.12. Presentación de la caja de corte.

Para mantener constante la carga axial aplicada a la muestra durante el ensayo, se monitorea el inyector de presión manualmente. A través de la celda de carga y el adquisidor de datos se controla la lectura de la carga axial sobre la muestra y según las variaciones que presenta, se aumenta o disminuye la fuerza aplicada a la muestra.

La máxima carga axial aplicada a la muestra está limitada a la capacidad del pórtico de acero. Para el trabajo experimental se considera la carga axial de hasta 8 toneladas debido a la rigidez de la viga de reacción (cargas mayores provoca flechas significativas). La capacidad de diseño del pórtico de acero es de 10 toneladas.

La caja de corte es equipada con varios dispositivos para medir los desplazamientos (horizontal y vertical) y las fuerzas aplicadas a la muestra (horizontal y vertical). Las fuerzas son registradas usando dos celdas de carga, que van instaladas conjuntamente con los gatos

hidráulicos y las deformaciones vertical y horizontal son registrados por medio de 02 y 04 deformímetros, respectivamente. La capacidad para ambas celdas de carga es 50 toneladas. La capacidad de los deformímetros para medir el asentamiento y la deformación horizontal son 30 mm y 50 mm, respectivamente, con una sensibilidad de ± 0.01 mm. En la Figura 3.13, se muestra una vista general en 3-D de la instrumentación del equipo de Corte Directo a Gran Escala.

El registro de las mediciones de la deformación horizontal, del asentamiento, de la fuerza normal y de la fuerza de corte se realiza mediante un adquisidor de datos (Data Logger TDS – 301, Sensibilidad $\pm 0.05\%$ de lectura). Se registra los datos a intervalo constante de 0.50 mm/min, empleándose 3 horas aproximadamente en cada espécimen.

Posteriormente se digita los registros en una hoja de cálculo para los análisis respectivos.

3.4.2 Instrumentación

Se describe a continuación la calibración de los instrumentos que se utilizan para medir los esfuerzos y el comportamiento de la caja de corte sin muestra bajo la aplicación de la fuerza tangencial.

a) Calibración de las Celdas de Carga

La calibración, es la relación directa que hay entre la medición física y el voltaje de salida del transductor. La medición física en nuestro caso es la carga aplicada a la muestra. La señal en voltios es recogida por la tarjeta del adquisidor de datos (Data Logger).

A continuación se describe brevemente el procedimiento de calibración, con los resultados obtenidos, donde se valora el coeficiente de correlación de los datos y la precisión del transductor.

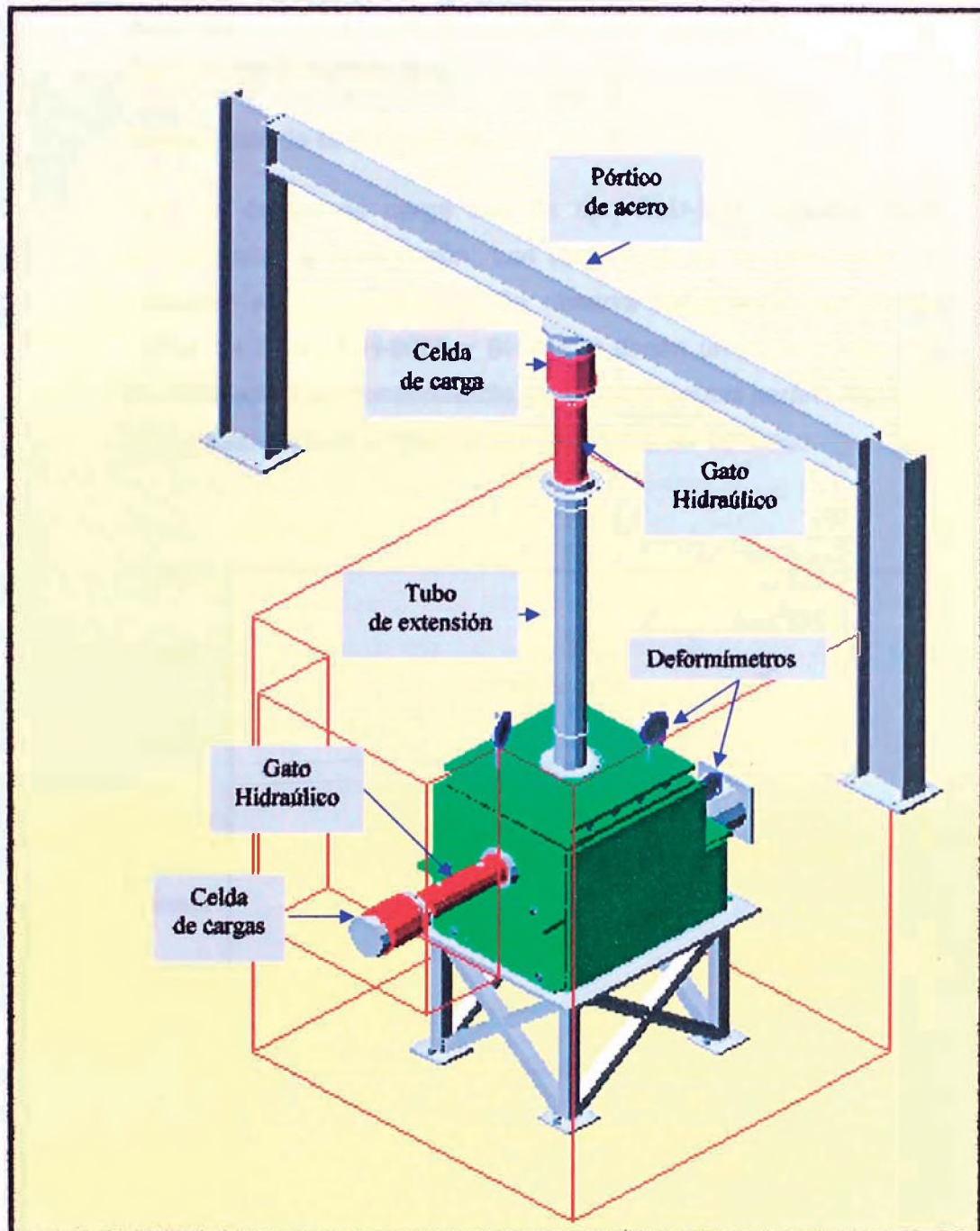


Figura 3.13. Esquema de la instrumentación del equipo de corte directo a gran escala en 3-D. Implementado en el patio del Laboratorio Geotécnico del CISMID – UNI.

La precisión se evalúa mediante la no linealidad de los resultados. El error de no linealidad es la desviación de la señal de salida del transductor de una línea que se obtiene de la regresión lineal de los datos de la calibración real.

Resultados de la Calibración

Las dos celdas de carga son de tipo CLU-50A, soporta hasta 50 toneladas a compresión. Los resultados de la calibración se muestran en la Figura 3.14. Se observa claramente que ambas celdas de carga (BH-9055 y BH-9054) tienen un buen coeficiente de correlación, en consecuencia, estos coeficientes serán utilizados más adelante en la programación del adquirente de datos.

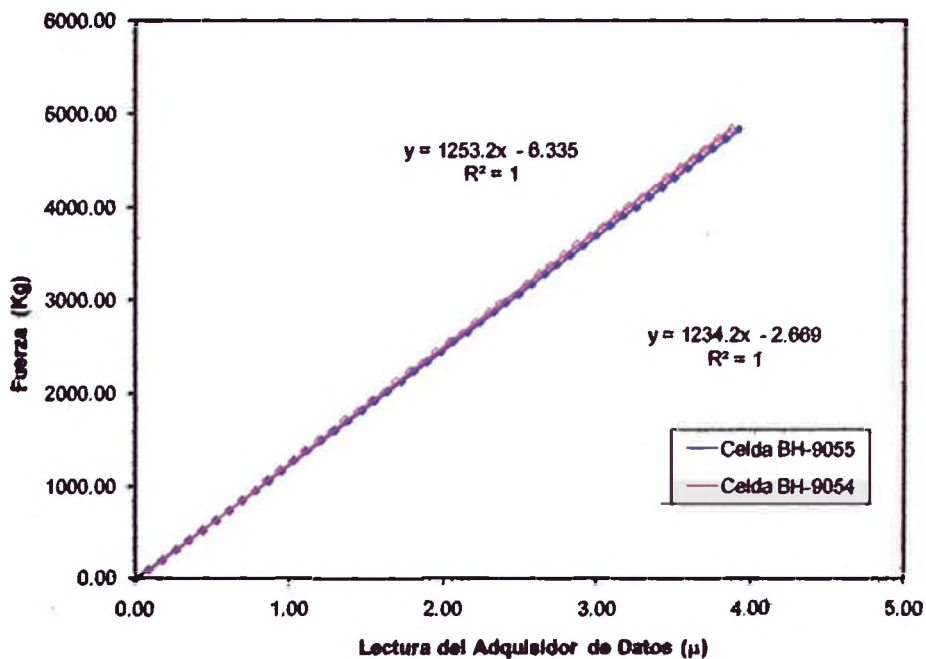


Figura 3.14. Calibración de las celdas de carga.

b) Comportamiento de la Caja de Corte Bajo la Aplicación de la Fuerza Tangencial

Como la caja de corte está dividida horizontalmente por la mitad para permitir el movimiento relativo, y en el contacto de éstas se implementó un dispositivo de rodamiento para reducir la fricción, se necesita verificar el funcionamiento del dispositivo implementado cuando la caja de corte esté sometida a la fuerza tangencial.

Se instaló la caja de corte sin muestra, como se observa en la Figura 3.15. Posteriormente, se aplicó la carga horizontal a la caja de corte, registrándose el esfuerzo tangencial y el desplazamiento de la mitad superior de la caja de corte. En la Figura 3.16 se muestra la respuesta de la fricción remanente a la aplicación de la carga horizontal

Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos el dispositivo de rodamiento no elimina totalmente la fricción (ver Figura 3.16). Sin embargo, la fricción remanente, cuyo valor máximo se acerca a 0.08 kg/cm^2 , se podrá emplear para realizar las correcciones respectivas durante el procesamiento de datos.



Figura 3.15 Aplicación de la fuerza tangencial a la caja de corte sin muestra.

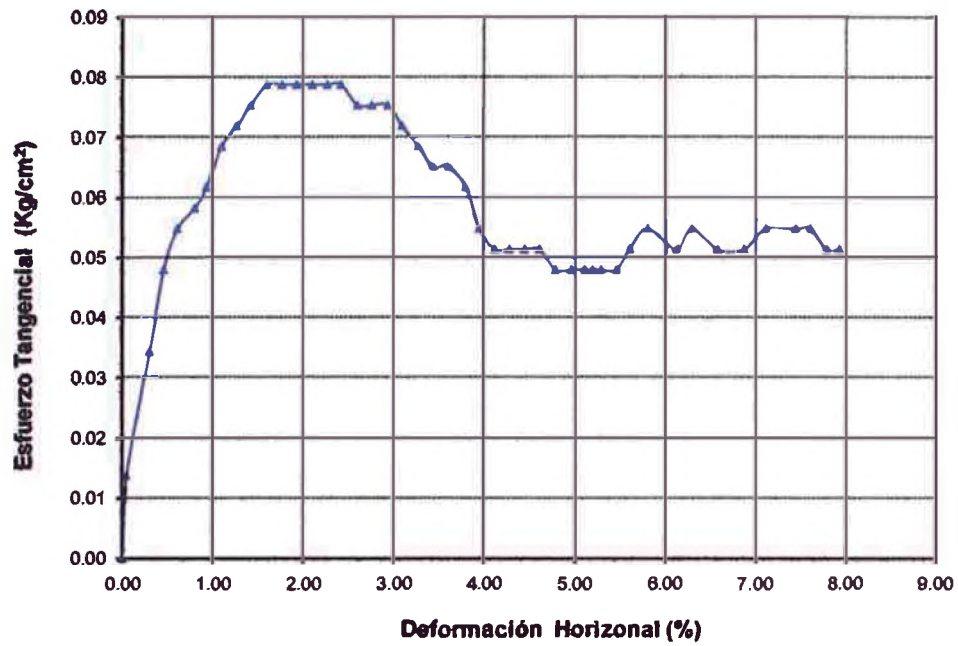


Figura 3.16 Cuantificación de la fricción remanente de la caja de corte ensamblado para el ensayo de Corte Directo a Gran Escala.

CAPÍTULO IV

ENSAYO EXPERIMENTAL DE CORTE DIRECTO EN SUELOS GRAVOSOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presenta los resultados obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala para suelos gravosos, con partículas granulares de hasta 10 cm de diámetro y conformados en distintos estados de compactación.

También se da a conocer las características físicas y mecánicas de las muestras utilizadas en la investigación. Asimismo, se intenta exponer detalladamente el trabajo experimental, desde la preparación de la muestra hasta la ejecución del ensayo.

4.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

Los ensayos de laboratorio se efectuaron en el Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID de la Universidad Nacional de Ingeniería. Básicamente se efectuaron ensayos para la determinación de las

propiedades índices y su respectiva clasificación SUCS de los materiales utilizados en el programa de investigación.

Se utilizaron cuatro tipos de muestras, de acuerdo al reporte del ensayo de laboratorio estos materiales granulares gruesos fueron clasificadas como suelos gravosos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) estipulado en la norma ASTM D 2487, cuyas propiedades índices son resumidas en la Tabla 4.1 y las curvas de distribución granulométrica son mostradas en la Figura 4.1. Las muestras gravosas fueron del tipo: grava mal graduada (GP), grava arcillosa con arena (GC), grava bien graduada con limo y arena (GW – GM) y grava mal graduada con limo y arena (GP – GM), con partículas de tamaño medio (D_{50}) de 4 a 20 mm y contenido de finos de 3.2 a 14.1 %. El contenido de grava de las muestras varía de 47.5 a 71 %. La forma de las partículas varía de angulosas o subangulosas a redondeadas o subredondeadas.

Tabla 4.1. Propiedades índices de los suelos gravosos utilizados en el ensayo de Corte Directo a Gran Escala.

Muestra	w (%)	F (%)	Ar (%)	Gr (%)	Gr > 3" (%)	D_{50} (mm)	$D_{máx}$ (mm)	LL (%)	LP (%)	IP	G_s	SUCS
M - 1	0.0	3.2	25.8	71.0	0.0	20.0	76.2	NP	NP	NP	2.80	GP
M - 2	2.5	7.3	23.7	62.7	8.3	15.0	100.0	21	NP	NP	2.75	GW - GM
M - 3	3.8	14.1	38.7	47.5	1.7	4.0	100.0	25	16	9	2.65	GC
M - 4	1.6	6.4	38.7	56.9	0.0	6.0	38.1	NP	NP	NP	2.73	GP - GM

- w = Contenido de humedad
- F = Finos
- Ar = Arenas
- Gr = Gravas
- D_{50} = Diámetro de tamaño medio de las partículas
- $D_{máx}$ = Diámetro máximo de las partículas
- LL = Límite líquido
- LP = Límite plástico
- IP = Índice de plasticidad
- G_s = Gravedad específica
- NP = No presenta

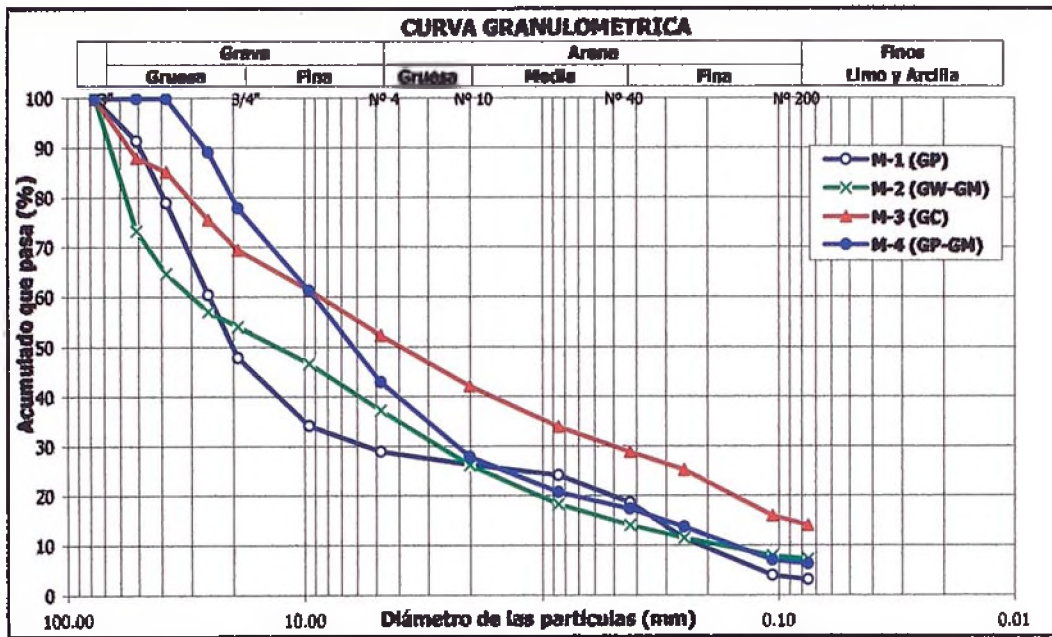


Figura 4.1 Curva de distribución granulométrica de los suelos gravosos utilizados en el programa de investigación.

El suelo gravoso clasificado como GP es el material granular perteneciente al conglomerado de Lima. El diámetro máximo de las partículas de esta muestra considerado en la investigación es de 76.2 mm, el cual satisface el requerimiento general de la Norma ASTM D 3080, donde estipula que la mínima proporción de la dimensión de la caja de corte debe ser 06 veces el diámetro máximo de la partícula, para evitar que la dimensión de la caja de corte influya en los resultados del ensayo. Este material granular se remoldeó dentro de la caja de corte en estado seco, considerando dos pesos unitarios diferentes de 2.20 ton/m³ y 2.15 ton/m³, que corresponden a un estado de compactación denso, tal como se verifica en algunos estudios geotécnicos en el conglomerado de Lima. Cabe señalar, que los contenidos de gravas y finos de la muestra compactada son 71 % y 3.2 % respectivamente, y además, las partículas de este suelo gravoso presentan bordes redondeadas o subredondeadas, cuyo diámetro promedio (D_{50}) es de 20 mm.

El material granular clasificado como GW – GM se compactó a un peso unitario de 2.02 ton/m³, con un contenido de humedad de 2.5 %. El diámetro máximo de la partícula es de 100 mm, siendo el diámetro promedio 15 mm. El porcentaje de gravas y finos presentes en la muestra son 62.7 % y 7.3 % respectivamente. La forma de la partículas son angulosas o subangulosas.

La muestra clasificada como GC se compactó al 95 % de la máxima densidad seca del ensayo de compactación (Proctor Modificado) y a su óptimo contenido de humedad (5.4 %). El peso unitario del espécimen conformado fue de 2.42 ton/m³. El diámetro máximo de la partícula es 100 mm. El material presenta partículas de bordes angulosos y frágiles. La cantidad de gravas y finos presentes en la muestra son 47.5 % y 14.1 % respectivamente.

Finalmente, el suelo gravoso clasificado como GP – GM se compactó a un peso unitario de 2.00 ton/m³, con contenido de humedad de 1.6 %. El diámetro máximo de la partícula es de 40 mm con partículas de bordes subangulosas.

En La Tabla 4.2, se presenta un resumen de las características físicas de los suelos gravosos empleados en la investigación.

Tabla 4.2. Características físicas de los suelos gravosos ensayados con el equipo de Corte Directo a Gran Escala.

Muestra	Finos (%)	Arenas (%)	Gravas (%)	Gravas > 3" (%)	D _{máx} (mm)	G _s	γ _d (ton/m ³)	w (%)	SUCS
M - 1a	3.2	25.8	71.0	0.0	76.2	2.80	2.15	0.0	GP
M - 1b	3.2	25.8	71.0	0.0	76.2	2.80	2.20	0.0	GP
M - 2	7.3	23.7	62.7	6.3	100.0	2.75	1.97	2.5	GW - GM
M - 3	14.1	36.7	47.5	1.7	100.0	2.65	2.30	5.4	GC
M - 4	6.4	36.7	56.9	0.0	38.1	2.73	1.98	1.6	GP - GM

D_{máx} = Diámetro máximo de las partículas

G_s = Gravedad específica

γ_d = Densidad seca

w = Contenido de humedad

4.3 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Para una mejor explicación lo dividimos en los siguientes pasos:

4.3.1 Instalación de la Caja de Corte

Antes de conformar los especímenes se instala la caja de corte como se explica a continuación:

- Se instala la caja inferior sobre la mesa metálica y se fija mediante pernos. Posteriormente, es colocado un soporte externo de reacción en la caja inferior en dirección contraria al movimiento relativo de la caja superior (ver Figuras 4.2 y 4.3).

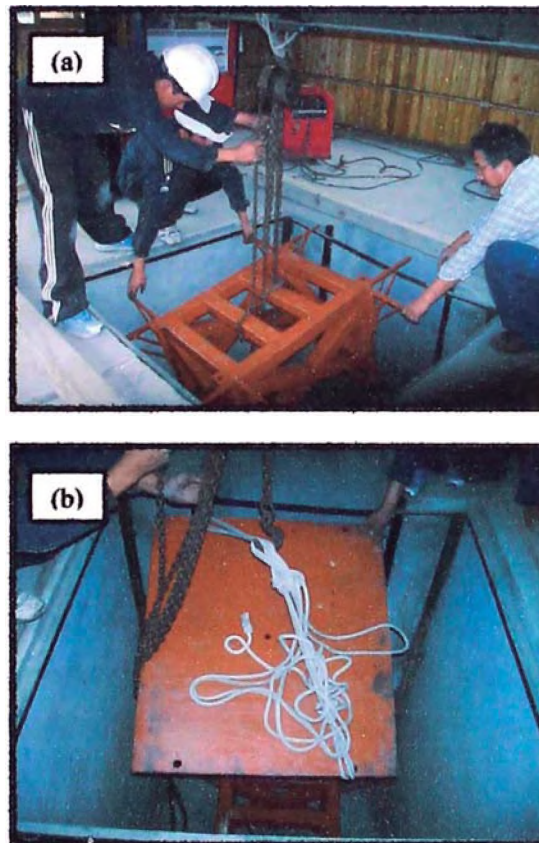


Figura 4.2. Instalación de la mesa metálica. a), y b) Instalación de la estructura y el tablero de la mesa metálica.

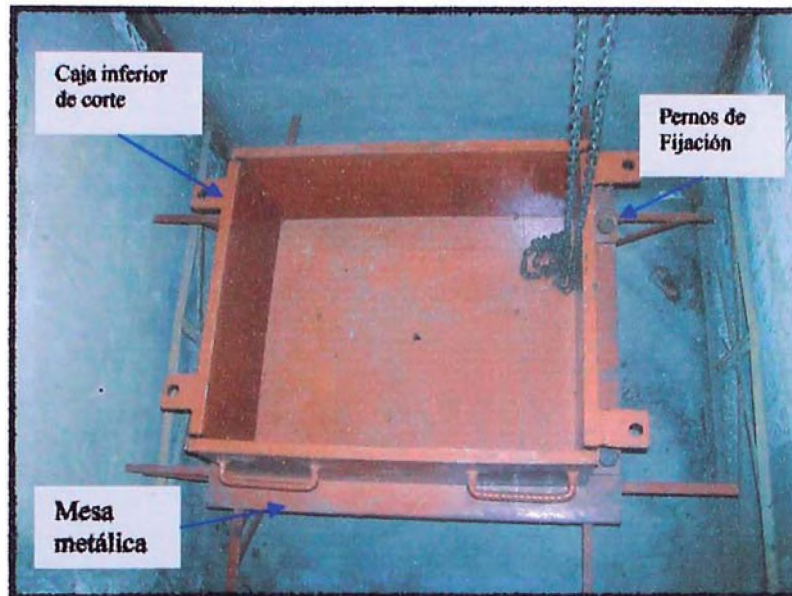


Figura 4.3. Instalación de la mitad de la caja de corte sobre la mesa metálica.

Luego se instala la caja superior sobre la caja inferior, y se fija a ésta, mediante pernos para evitar el movimiento de la caja superior durante la conformación del espécimen. Para reducir la fricción durante el ensayo, entre la caja superior e inferior, se coloca un dispositivo de rodamiento (ver Figura 4.4), y adicionalmente, se lubrica con grasa los bordes en contacto para facilitar el movimiento relativo. No obstante, a pesar de las medidas tomadas, no se logra eliminar la fricción como se verificó en el capítulo anterior. En la Figura 4.5, se muestra la caja de corte y soportes complementarios instalados.

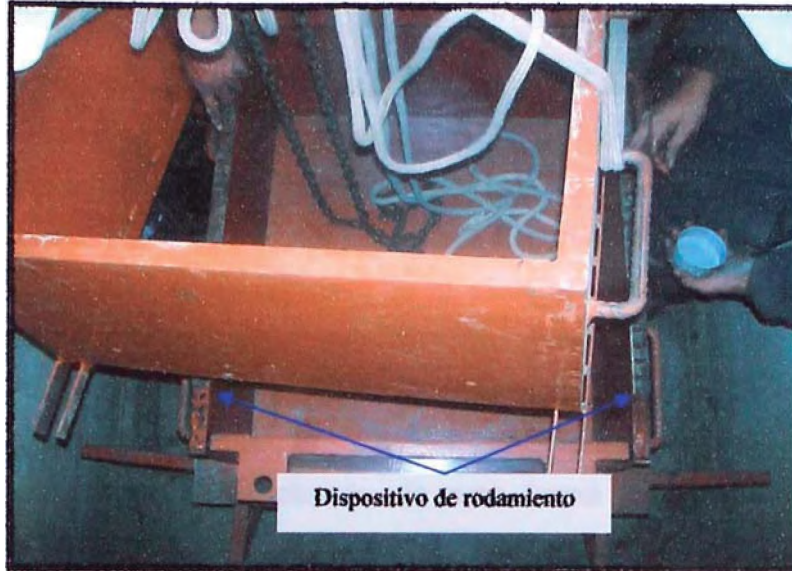


Figura 4.4. Instalación del dispositivo de rodamiento.

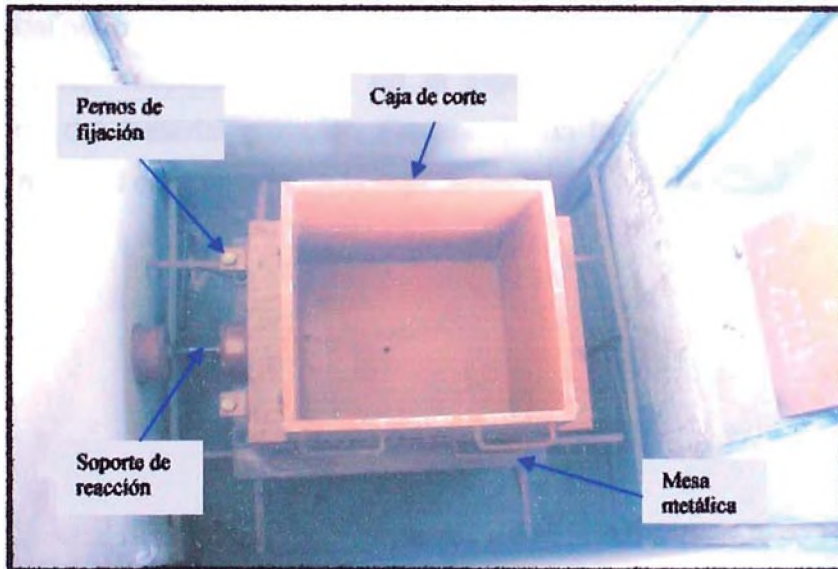
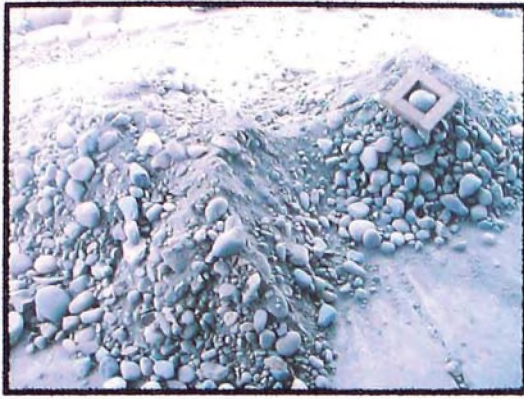


Figura 4.5. Se muestra la caja de corte y soportes complementarios instalados, listo para la conformación del material gravoso.

4.3.2 Conformación de la Muestra

Las muestras utilizadas en el ensayo de Corte Directo a Gran Escala son remoldeadas según los requerimientos de humedad y densidad. El material granular es compactado dentro de la caja de corte en tres capas de igual espesor (cada capa = 20 cm). Para la compactación del suelo gravoso se usó un pisón de concreto de 25 kilos, el cual tiene acoplado un dispositivo de soporte para su manipulación, el pisón tiene un área de contacto de 625 cm^2 , menor que la mitad de la sección transversal de la caja de corte (área de la sección transversal de la caja de corte = 3600 cm^2), cumpliendo de esta forma los lineamientos establecidos en la Norma ASTM D 3080. El número de golpes por cada capa es ajustado hasta alcanzar el peso unitario deseado del material granular a conformarse. El control del peso de la muestra por cada capa se realiza mediante una balanza mecánica (capacidad $160 \text{ Kg} \pm 200 \text{ gr}$). En la Figura 4.6, se presenta los suelos gravosos utilizados en la investigación. En las Figuras 4.7 y 4.8, se muestran la balanza mecánica controlando el peso del suelo gravoso y el llenado de la primera capa en la caja de corte, respectivamente. En la Figura 4.9 se muestra la compactación del material granular. Finalmente en la Figura 4.10, se presenta el material conformado en la caja de corte.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.6. Suelos gravosos utilizados en el ensayo de Corte Directo a Gran Escala en el laboratorio. a) GP, b) GW - GM, c) GC, d) GP - GM, e) Material granular de hasta 10 cm (4 pulgadas) de diámetro.



Figura 4.7. Balanza mecánica de 160 kilos de capacidad, utilizada para controlar el peso del suelo gravoso a conformarse en la caja de corte de acuerdo a la densidad requerida.



Figura 4.8. Llenado de la primera capa del material gravoso.

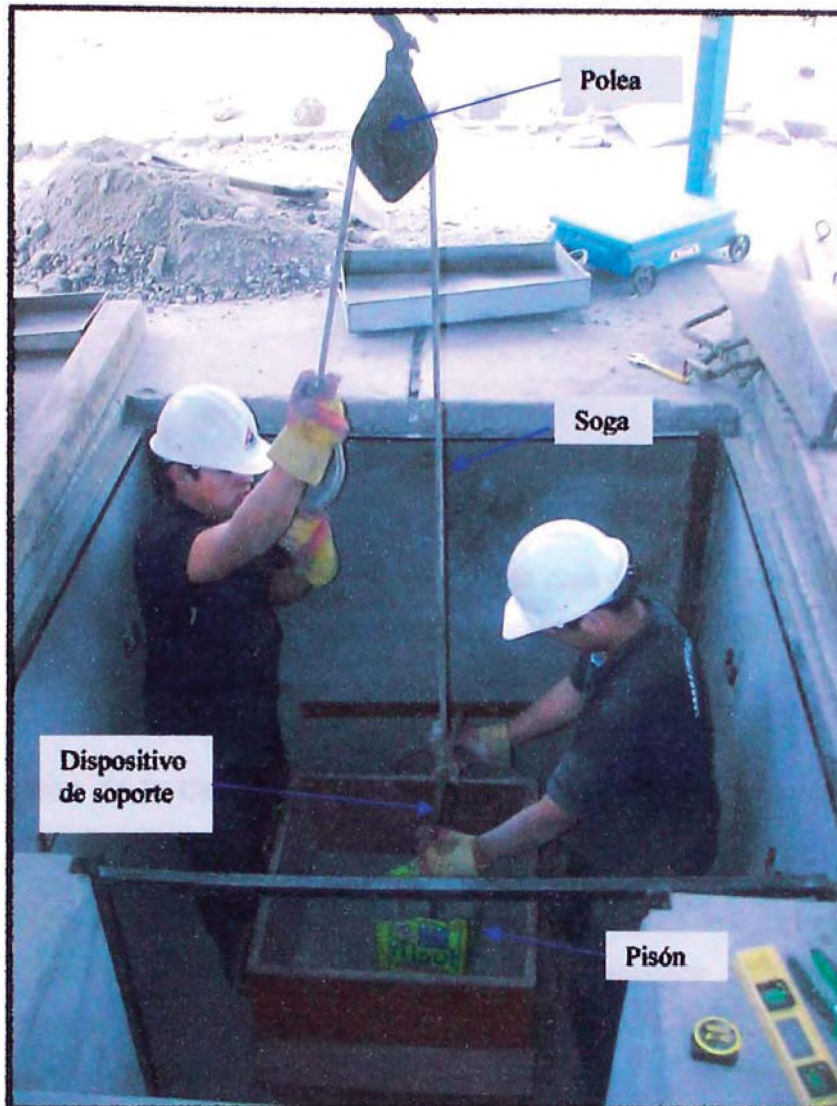


Figura 4.9. Compactación del material. Se muestra el pisón de concreto manipulado por el personal técnico del CISMID. Se acopló al dispositivo de soporte del pisón una soga y una polea para facilitar su manipulación.



Figura 4.10. Suelo gravoso conformado en la caja de corte. Se observa la no uniformidad en la cara superior de la muestra.

4.3.3 Preparación de la Cara Superior de la Muestra para la Transmisión de la Carga Axial

Conformado el material gravoso en la caja de corte, se nivela la cara superior con una capa de arena fina de 1 cm de espesor, de tal forma que al colocar la plancha metálica pueda transmitir a la muestra una distribución de presión uniforme durante el ensayo, y adicionalmente, quedar perfectamente nivelado para la colocación de los rodillos intermedios de presión, sobre los cuales se coloca otra plancha metálica que recibirá la carga vertical, transmitida por un gato hidráulico.

Para evitar la contaminación del suelo gravoso con la arena fina, se coloca un manto de polietileno sobre la muestra conformada antes de colocar la capa de arena como se muestra en la Figura 4.11.



(a)



(b)

Figura 4.11. Preparación de la cara superior del espécimen.
a) Colocación del manto de polietileno, b) Nivelación de la
cara superior de la muestra con una capa de arena fina de
1.0 cm de espesor.

4.4 ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELOS GRAVOSOS

4.4.1 Generalidades

El ensayo de Corte Directo a Gran Escala sigue los lineamientos establecidos en la Norma ASTM D 3080.

El uso de este equipo permite obtener los parámetros de resistencia cortante de suelos gravosos, empleándose partículas de hasta 10 cm de diámetro, con lo cual se puede representar mejor el comportamiento para suelos granulares gruesos. Esto evitará estar analizando solamente la matriz del material y extrapolando los parámetros obtenidos con los equipos convencionales para estimar los parámetros de resistencia cortante del material gravoso. Se podrán realizar ensayos con muestras en distintos estados de compactación, desde los simplemente vertidos hasta los compactados mediante un pisón.

Aunque no existen especificaciones sobre el ensayo, la idea es reproducir en el laboratorio el ensayo de corte directo estándar a una mayor escala. Para tal efecto, se explica a continuación los sistemas de transmisión de carga axial y tangencial. Cabe indicar, que los dispositivos empleados en la investigación son similares a los dispositivos del equipo de corte directo "In situ", este último detallado en el Capítulo II.

4.4.2 Descripción del Equipo

El equipo de Corte Directo a Gran Escala está constituido de las siguientes partes:

a) Caja de Corte

La función de este equipo es el de confinar la muestra, de acuerdo al peso unitario deseado, y transmitir durante el ensayo las cargas horizontal y vertical al espécimen. La dimensión de la caja de corte

es de 0.60x0.60x0.60 m, construida con planchas metálicas de 1 pulgada de espesor, dividida horizontalmente por la mitad para permitir el movimiento relativo de la mitad superior sobre la mitad inferior.

Se implementó un dispositivo de rodamiento, para reducir la fricción a lo largo del contacto de los bordes de la caja deslizante.

Adicionalmente, se construyeron una mesa metálica (fijada al piso) donde reposa la caja de corte y un soporte de reacción metálico que va apoyado entre la mitad inferior de la caja de corte y la pared del pozo de ensayo (ver Figura 4.5), para evitar el movimiento de la caja inferior durante el ensayo.

b) Sistema de Transmisión de Carga Axial

Forman parte de este sistema los siguientes elementos:

- **Pórtico de acero (reacción)**

Capacidad máxima: 10 toneladas.

Descripción: Elemento utilizado como marco de reacción para la transmisión de la carga axial, su capacidad limita la carga normal sobre la muestra.

- **Gato hidráulico**

Marca: Riken Power

Capacidad máxima: 35 toneladas

Descripción: Transmite la carga axial a la muestra teniendo como punto de apoyo el pórtico de acero.

- **Equipo de extensión**

Descripción: Tubos de acero de 4 pulgadas de diámetro, 2.5 mm de espesor y 1.25 m de longitud, utilizado como equipo auxiliar para el montaje de la carga axial.

- **Planchas de transmisión de la carga axial**

Dimensión: 0.59 m x 0.59 x 1 pulgada de espesor.

Cantidad: 02

Descripción: Planchas metálicas instaladas sobre la muestra y separadas por rodillos macizos colocados sobre una de las planchas.

- **Rodillos macizos**

Dimensión: Longitud 0.50 m, diámetro 1 ½ pulgadas.

Cantidad: 06

Descripción: Rodillos macizos de alma llena perfectamente pulidos colocados entre dos planchas metálicas. Su objetivo es evitar que se desestabilice el sistema de carga durante la aplicación de la fuerza tangencial.

c) Sistema de Transmisión de Fuerza Tangencial

Está constituido por los siguientes elementos:

- **Gato hidráulico**

Marca: Riken Power

Capacidad máxima: 35 toneladas

Descripción: Transmite la fuerza tangencial sobre la mitad superior de la caja de corte a una velocidad constante de 0.50 mm/min. Se apoya en la pared reforzada del pozo de ensayo, implementado para tal fin. La carga tangencial es

horizontal (no inclinada), debido al plano de falla predeterminado.

d) Equipos de Medición

Los instrumentos para medir las deformaciones (vertical y horizontal) y las fuerzas aplicadas a la muestra son los deformímetros y las celdas de carga, respectivamente. Las mediciones de las fuerzas y las deformaciones son registradas por un adquisidor de datos.

▪ Deformímetros

Para medir el asentamiento:

Marca: PEACOCK

Cantidad: 02

Carrera máxima: 30 mm.

Aproximación: 0.01 mm.

Para la deformación horizontal:

Marca: PEACOCK.

Cantidad: 04

Carrera máxima: 50 mm.

Aproximación. 0.01 mm.

Descripción: Se utiliza 04 deformímetros para el registro del desplazamiento horizontal, 02 deformímetros registran inicialmente las deformaciones, y posteriormente los otros dos completan el registro, esto como consecuencia de la limitación de la carrera máxima de los deformímetros para registrar la deformación total de la caja de corte.

- **Celdas de carga**

Tipo: CLU-50A

Cantidad: 02

Capacidad: 50 toneladas

Descripción: Una celda de carga se utiliza para monitorear la carga axial aplicada a la muestra y la otra para aplicar la fuerza tangencial a la muestra.

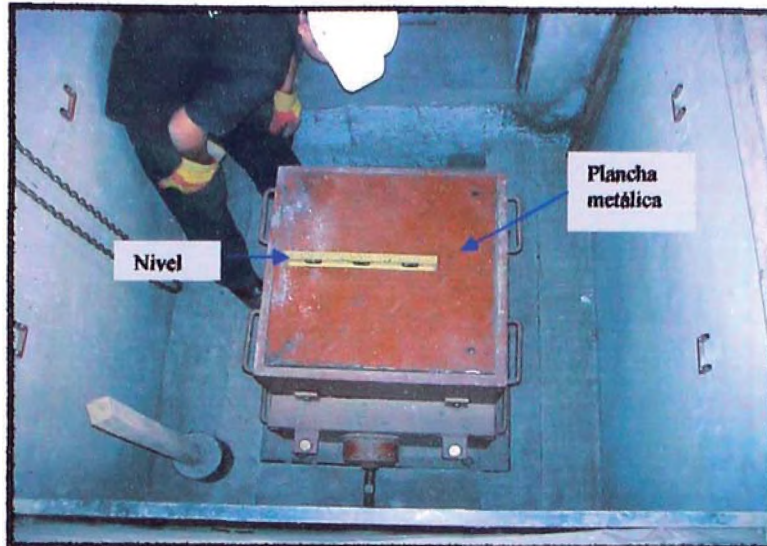
- **Adquisidor de datos**

Descripción: es un microprocesador portátil electrónico de adquisición de datos, modelo TDS-301 (sensibilidad ± 0.05 % de lectura), diseñado para la medición de deformaciones unitarias, carga, presión, voltaje, temperatura, y cualquier otra unidad de ingeniería que usa transductores o termocuplas tipo voltaje y strain gages. Este equipo, incorpora automáticamente la medición, impresión y mecanismo de control de tiempo. Las celdas y los deformímetros son conectados al adquisidor de datos mediante cables de transmisión de señal.

4.4.3 Montaje del Equipo

Luego de la preparación de la muestra en la caja de corte, se procede al montaje del equipo como se describe a continuación:

- ✓ Colocación de las planchas metálicas de transmisión de la carga axial sobre la muestra conformada y nivelada. Los rodillos macizos son colocados entre las planchas metálicas con la finalidad de evitar la desestabilización de la carga axial durante la aplicación de la fuerza tangencial. En las Figuras 4.12 y 4.13, se muestran la colocación de las planchas metálicas y los rodillos macizos sobre la muestra conformada.

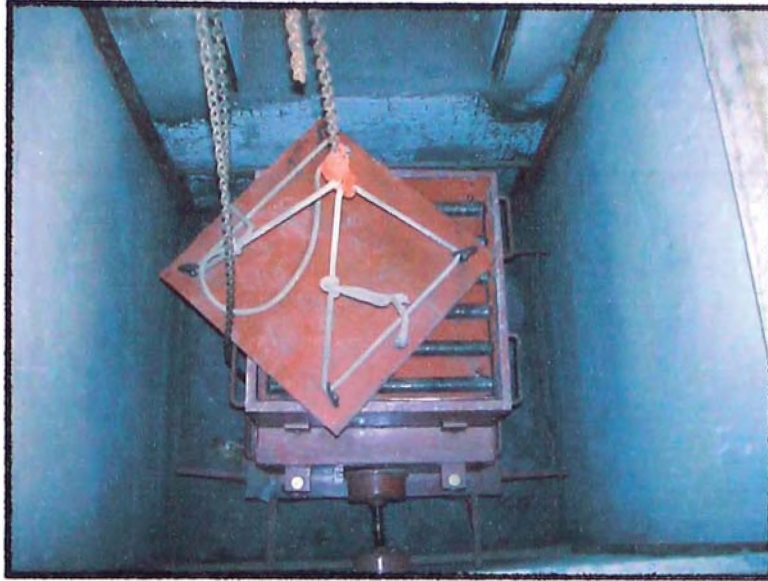


(a)



(b)

Figura 4.12. a) Instalación de la plancha metálica sobre la muestra debidamente nivelada, b) Colocación de rodillos macizos.



(a)



(b)

Figura 4.13. a) Colocación de la segunda plancha metálica sobre el arreglo de rodillos macizos, b) Muestra conformada en la caja de corte listo para el montaje de los equipos auxiliares.

- ✓ Instalación del equipo de extensión (tubo de acero) sobre la plancha metálica debidamente centrado al eje del pórtico de reacción como se muestra en la Figura 4.14.



Figura 4.14. Instalación del gato hidráulico vertical y el soporte de extensión (tubo metálico).

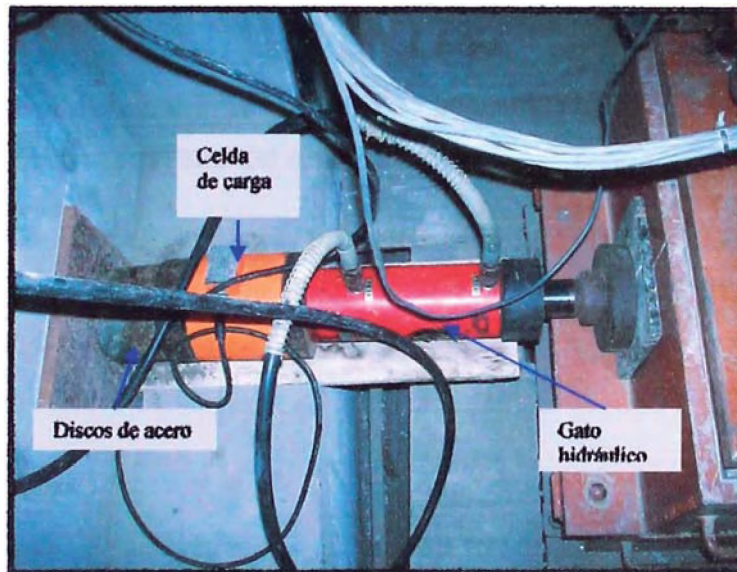
- ✓ Instalación de los gatos hidráulicos con sus respectivas celdas de carga para las aplicaciones de la carga axial y la fuerza tangencial respectivamente, como se muestra en las Figuras 4.15 y 4.16.



Figura 4.15. Montaje vertical del equipo de Corte Directo a Gran Escala.



(a)



(b)

Figura 4.16. a) Instalación del sistema de carga tangencial,
b) Equipo de carga tangencial listo para ejecutar el
ensayo de Corte Directo a Gran Escala.

- ✓ **Instalación de los deformímetros para el registro del asentamiento y la deformación horizontal (ver Figura 4.17). Los deformímetros son acoplados a pequeños soportes con bases imantados, de manera que para la instalación de los 04 deformímetros horizontales se colocó en la pared del pozo de ensayo una plancha de acero de 10x60 cm, colocando los soportes de los deformímetros sobre la plancha; en forma similar, para la instalación de los deformímetros verticales se ubicó dos tubos metálicos de sección rectangular por encima de la caja de corte apoyados en dispositivos tipo “gancho” (forma de “U”) adheridos a la pared del pozo de ensayo (ver Figura 4.18a), e igualmente se colocó en cada tubo los soportes imantados con su respectivo deformímetro.**
- ✓ **Para obtener la deformación horizontal total (75 mm aproximadamente), se configura 04 deformímetros disponibles, colocando 02 deformímetros para el registro inicial (debido a la limitación de la capacidad del instrumento para registrar deformaciones mayores a 50 mm), y posteriormente una vez alcanzada las carreras máximas respectivas, los otros dos restantes completan el registro del ensayo.**
- ✓ **Las dos celdas de carga y los seis deformímetros son conectados al adquisidor de datos mediante cables de transmisión de señal como se muestra en la Figura 4.18b.**

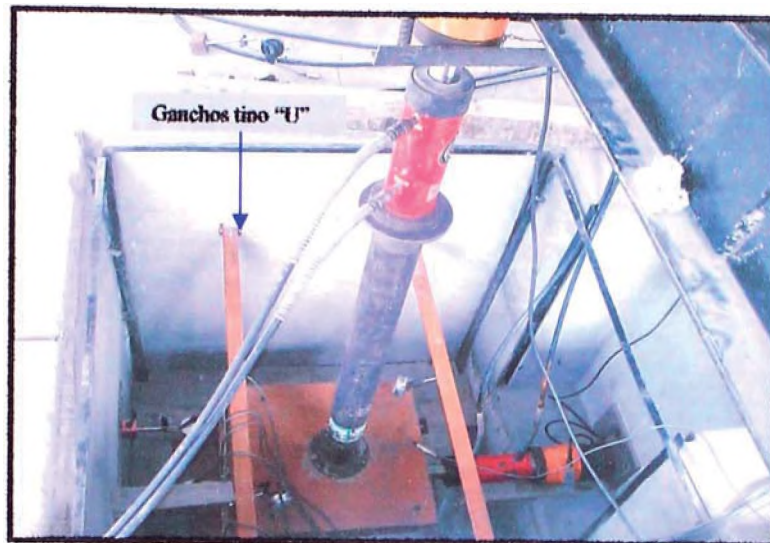


(a)

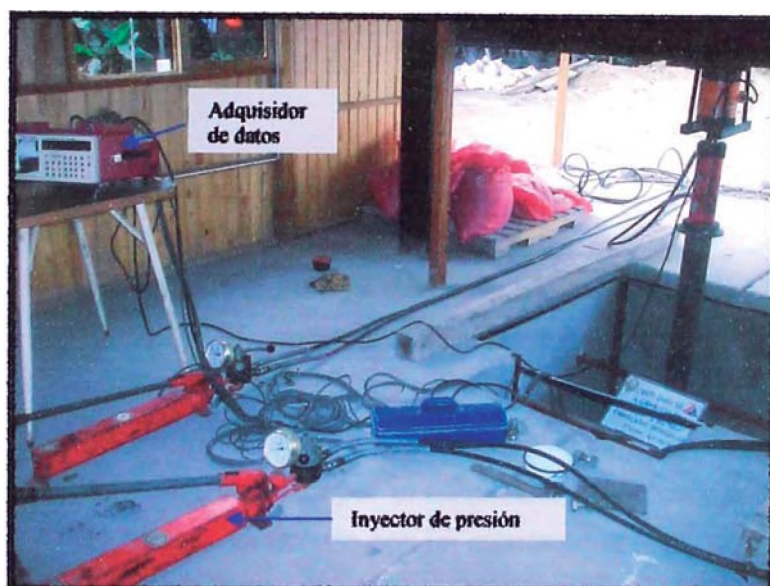


(b)

Figura 4.17. a) Instalación de los deformímetros, b) Vista general de la ubicación de los deformímetros apoyados en barras metálicas mediante soportes imantados.



(a)



(b)

Figura 4.18. a) Vista general del montaje del equipo, b) Instrumentos de medición, conectados mediante cables de transmisión de señal al adquisidor de datos, asimismo, se muestra dos inyectores de presión conectados a los gatos hidráulicos horizontal y vertical.

4.4.4 Ejecución del Ensayo de Corte Directo

Teniendo la muestra conformada y el equipo debidamente montado e instrumentado, se procede a ejecutar el ensayo de Corte Directo a Gran Escala (ver Figura 4.19) como se describe a continuación:

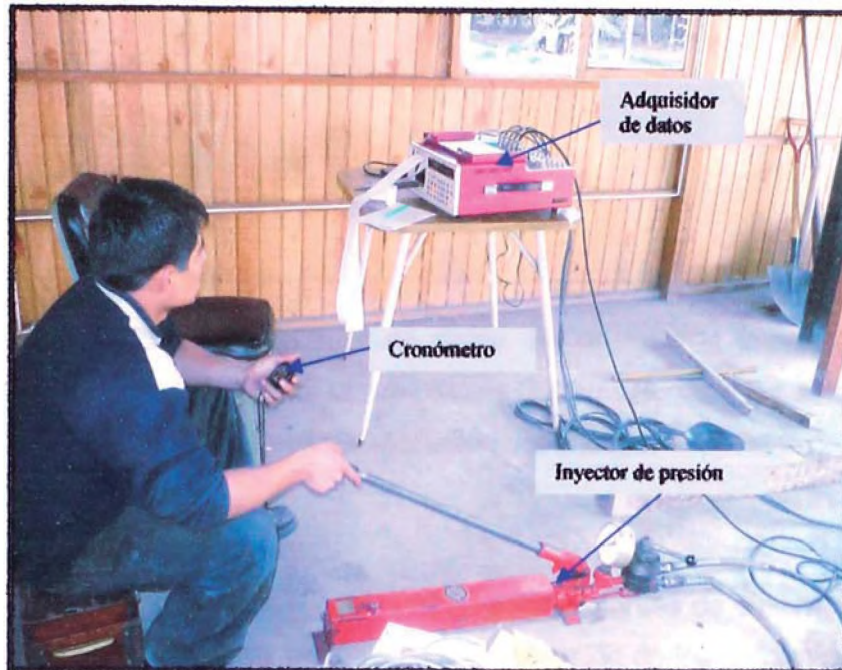


Figura 4.19. Ejecución del ensayo de Corte Directo a Gran Escala. Se muestra al operador aplicando la carga tangencial mediante el inyector de presión. El control de la velocidad de carga, se realiza mediante la lectura de deformación horizontal captada por el adquisidor de datos y el intervalo de tiempo controlado con un cronómetro.

a. Programación del Adquisidor de Datos

Antes de iniciar el ensayo se programa el adquisidor de datos para registrar e imprimir en tiempo real los esfuerzos aplicados a la muestra y las deformaciones producidas (ver Figura 4.20).

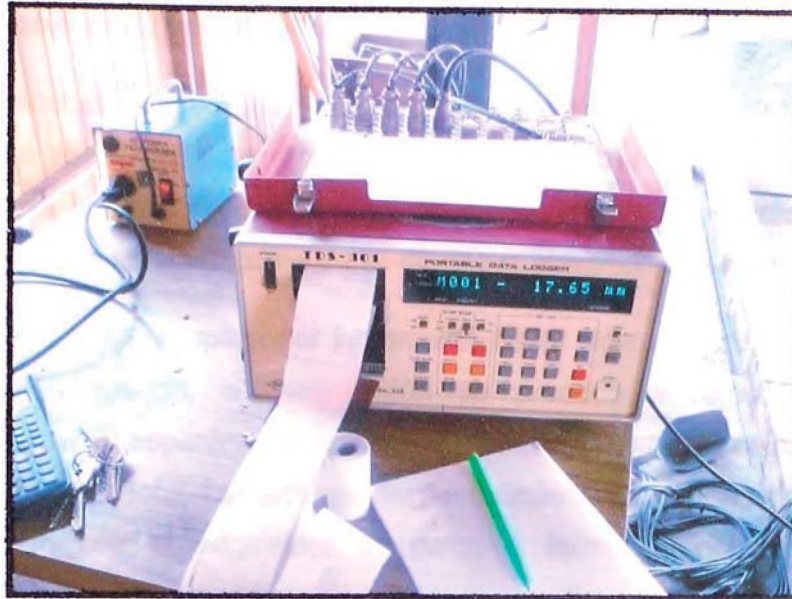


Figura 4.20 Adquisidor de datos. Se muestra la impresión (en papel térmico) de las deformaciones y los esfuerzos durante la ejecución del ensayo.

En la programación se especifica los coeficientes de calibración de las celdas de carga, coeficiente de calibración de los deformímetros, intervalo de tiempo para capturar los datos y las unidades respectivas.

Para el registro de las cargas aplicadas a la muestra se considera como unidad de medida al Kg/cm^2 , en consecuencia, para obtener esta unidad se divide el coeficiente de calibración de cada celda de carga (capítulo III) entre el área de corte de la muestra y se considera este nuevo coeficiente en la programación del equipo.

Para el caso de las deformaciones se considera como unidad de medida el milímetro, por lo tanto los coeficientes de los deformímetros a emplearse en la programación serán los respectivos coeficientes de calibración (coeficiente = 1).

Finalmente, se considera en la programación del equipo registrar los datos cada minuto, para obtener un mejor control del ensayo.

b. Aplicación del Esfuerzo Normal

La aplicación del esfuerzo normal o carga axial a la muestra, se lleva a cabo mediante el gato hidráulico, colocado verticalmente sobre la plancha de transmisión de carga (a través del tubo de extensión) y teniendo como punto de apoyo el pórtico de acero.

La carga axial se aplica por incremento hasta alcanzar el esfuerzo vertical requerido, a continuación se procede a registrar el asentamiento esperándose un tiempo prudencial para que ocurra el asentamiento total. Las lecturas del asentamiento y la carga axial se registran con el adquisidor de datos a intervalos del tiempo programado convenientemente.

Los esfuerzos normales aplicados a cada uno de los tres especímenes que conforman un juego de ensayo son 0.50, 1.00 y 2.00 Kg/cm², respectivamente.

c. Aplicación del Esfuerzo Tangencial

Una vez que la deformación vertical alcance su equilibrio, se aplica la carga horizontal en incrementos a razón de 0.50 mm/min, registrándose las deformaciones producidas.

La fuerza tangencial es ejercida mediante un gato hidráulico que se coloca en posición horizontal apoyándose sobre el muro de reacción.

El control de la velocidad para la aplicación de la fuerza tangencial se realiza manualmente, manipulando el inyector de presión de acuerdo a la deformación horizontal registrada en la pantalla del adquisidor de datos y el tiempo controlado con un cronómetro.

Durante la aplicación de la fuerza tangencial, se debe mantener constante la carga axial, manipulando el inyector de presión, que alimenta al gato hidráulico instalado verticalmente. La variación de

la carga axial durante el ensayo se cuantifica con la celda de carga, transmitiendo al adquirente de datos el registro correspondiente.

Este tipo de ensayo se denomina “prueba controlada por deformación unitaria” ya que se aplica una razón de desplazamiento en el tiempo y se registra la fuerza horizontal aplicada a la muestra.

4.4.5 Resultados del Ensayo de Corte Directo a Gran Escala

En este apartado se presentan los resultados del trabajo experimental efectuado con el equipo de Corte Directo a Gran Escala, mostrado previamente. Los ensayos realizados tienen distintos parámetros de resistencia cortante de acuerdo a las características físicas del material utilizado y el estado de compactación considerado para cada muestra.

a) Tabulación de los Resultados

Los registros obtenidos por el adquirente de datos se procesan en una hoja de cálculo (incluye la corrección por fricción remanente en la caja de corte cuantificado en el capítulo III), y se presentan los resultados mediante tablas y gráficos para su análisis posterior.

En el Anexo se presentan los registros del Esfuerzo Normal–Asentamiento y del Esfuerzo de Corte–Deformación horizontal, para cada uno de los especímenes ensayados.

La presentación gráfica de las trayectorias del esfuerzo de corte versus deformación horizontal se muestra en la Figura 4.21. En la Figura 4.22, se muestra las curvas del esfuerzo de corte normalizado versus deformación horizontal. En la Figura 4.23, se presenta el asentamiento de los suelos gravosos durante el ensayo.

b) Determinación de los Parámetros de Resistencia

La determinación de los parámetros de resistencia cortante C y ϕ para los cuatro tipos de suelos gravosos utilizados en la investigación están basados en la teoría de Mohr-Coulomb. Con base en lo explicado en el Capítulo II, podemos afirmar que la envolvente de falla es completamente lineal para este tipo de material. Por lo tanto, en el presente apartado se da a conocer los parámetros C y ϕ determinados con el equipo de Corte Directo a Gran Escala. En las Figuras 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27, se muestran gráficamente la envolvente de falla de resistencia máxima y residual, así como también la determinación de los parámetros de resistencia cortante C y ϕ para los suelos gravosos tipo GP, GW – GM, GC y GP – GM respectivamente; conformados en diferentes estados de compactación. Cabe destacar, que el material gravoso tipo GP se ensayó para dos densidades diferentes.

En la Tabla 4.3, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los cinco ensayos de Corte Directo a Gran Escala para suelos gravosos.

Tabla 4.3. Resumen de los resultados obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala.

MUESTRA	SUCS	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	σ_n (kg/cm ²)	$\tau_{máx.}$ (kg/cm ²)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
M - 1a	GP	0.00	2.15	0.50	0.80	0.34	41.9
				1.00	1.24		
				2.00	2.15		
M - 1b	GP	0.00	2.20	0.50	1.18	0.63	43.5
				1.00	1.58		
				2.00	2.50		
M - 2	GW - GM	2.50	1.97	0.50	0.87	0.27	50.0
				1.00	1.43		
				2.00	2.68		
M - 3	GC	5.40	2.30	0.50	0.89	0.30	42.0
				1.00	1.15		
				2.00	2.08		
M - 4	GP - GM	1.98	1.98	0.50	0.56	0.13	43.0
				1.00	1.10		
				2.00	1.98		

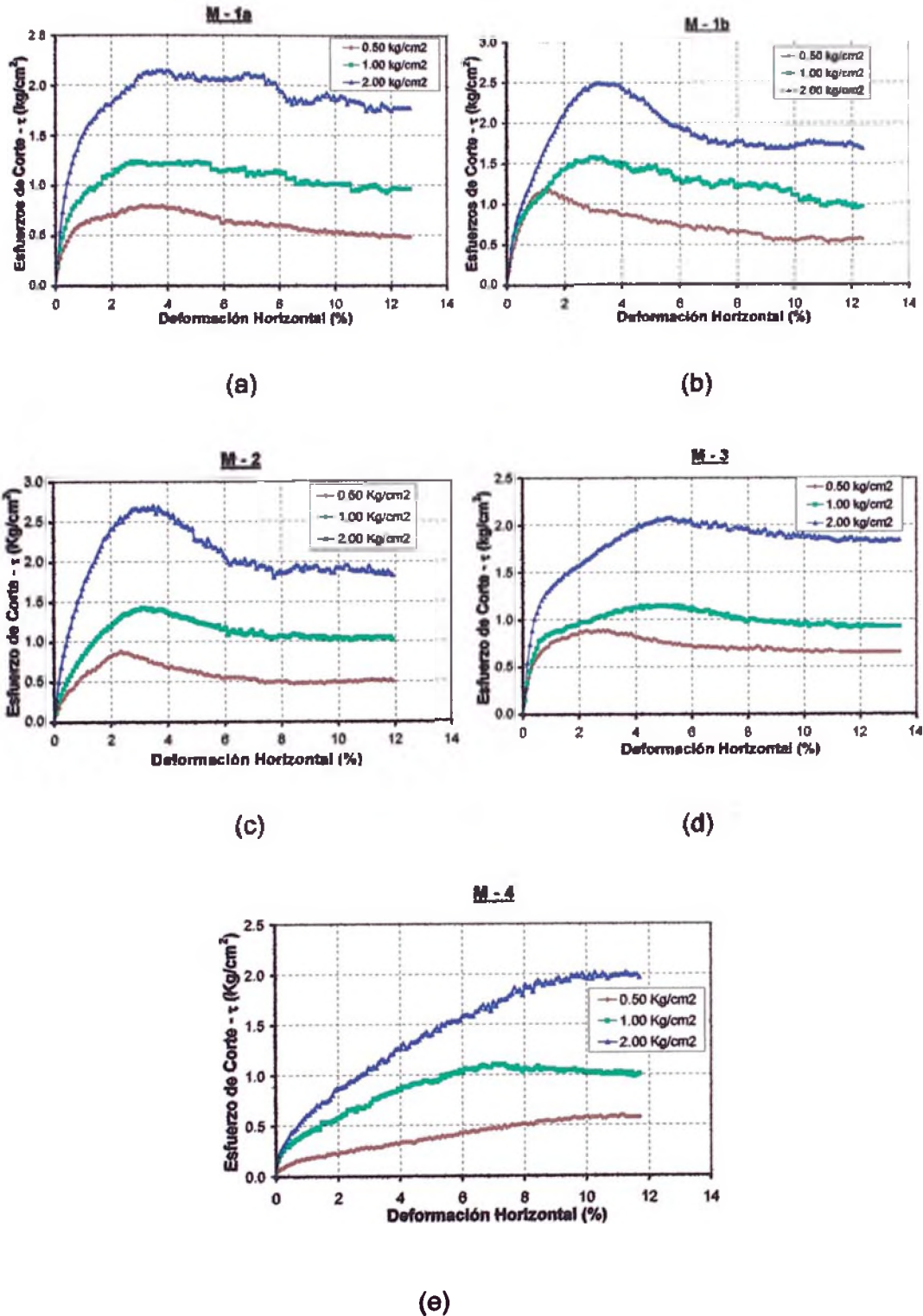


Figura 4.21. Comportamiento del esfuerzo de corte versus deformación horizontal para las cinco muestras ensayadas bajo las secuencias de cargas normales de 0.50, 1.00 y 2.00 Kg/cm^2 . a), y b) GP, c) GW - GM, d) GC, e) GP - GM.

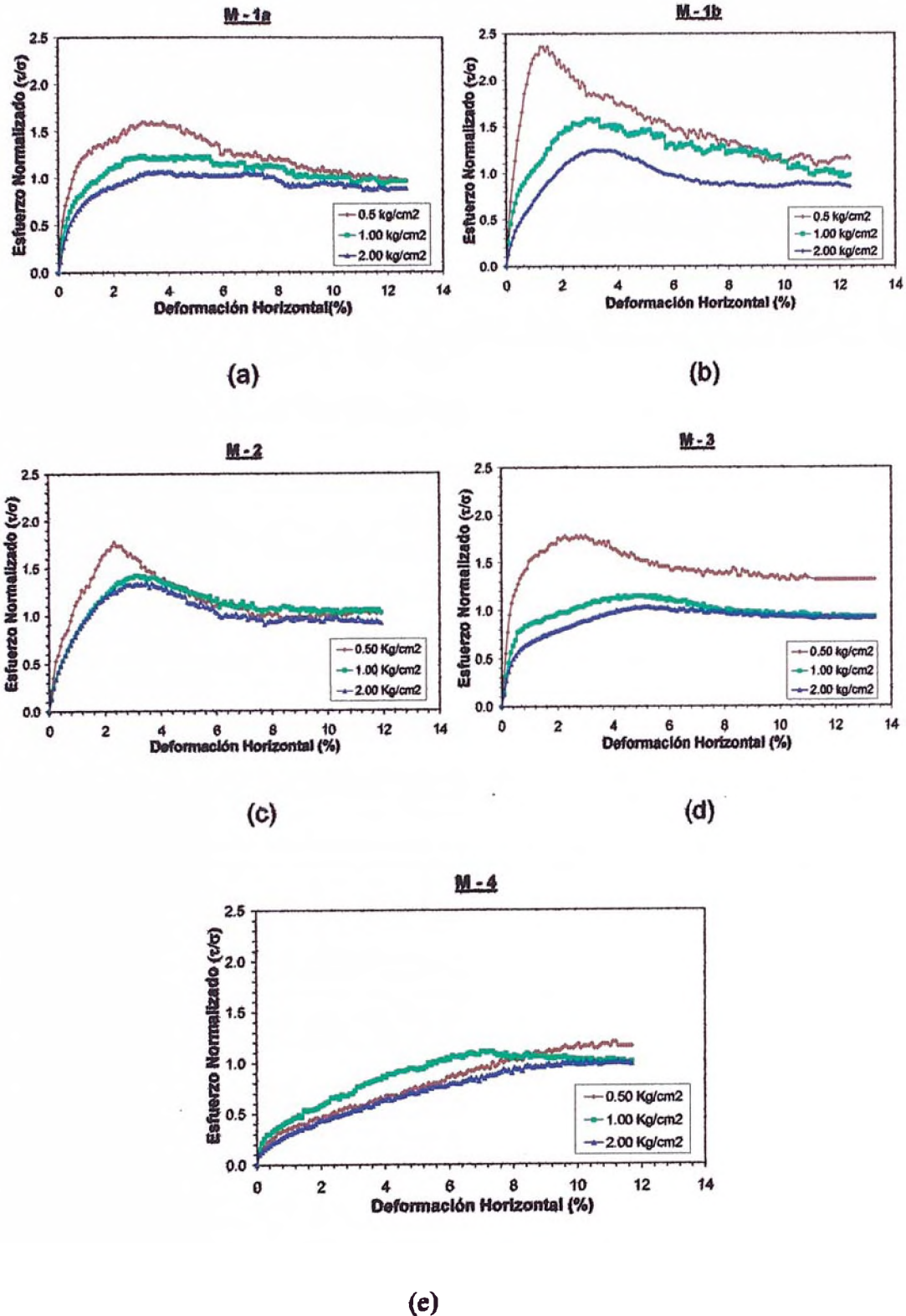


Figura 4.22. Comportamiento del esfuerzo de corte normalizado versus deformación horizontal para las cinco muestras ensayadas bajo las secuencias de cargas normales de 0.50, 1.00 y 2.00 Kg/cm². a), y b) GP, c) GW - GM, d) GC, e) GP - GM.

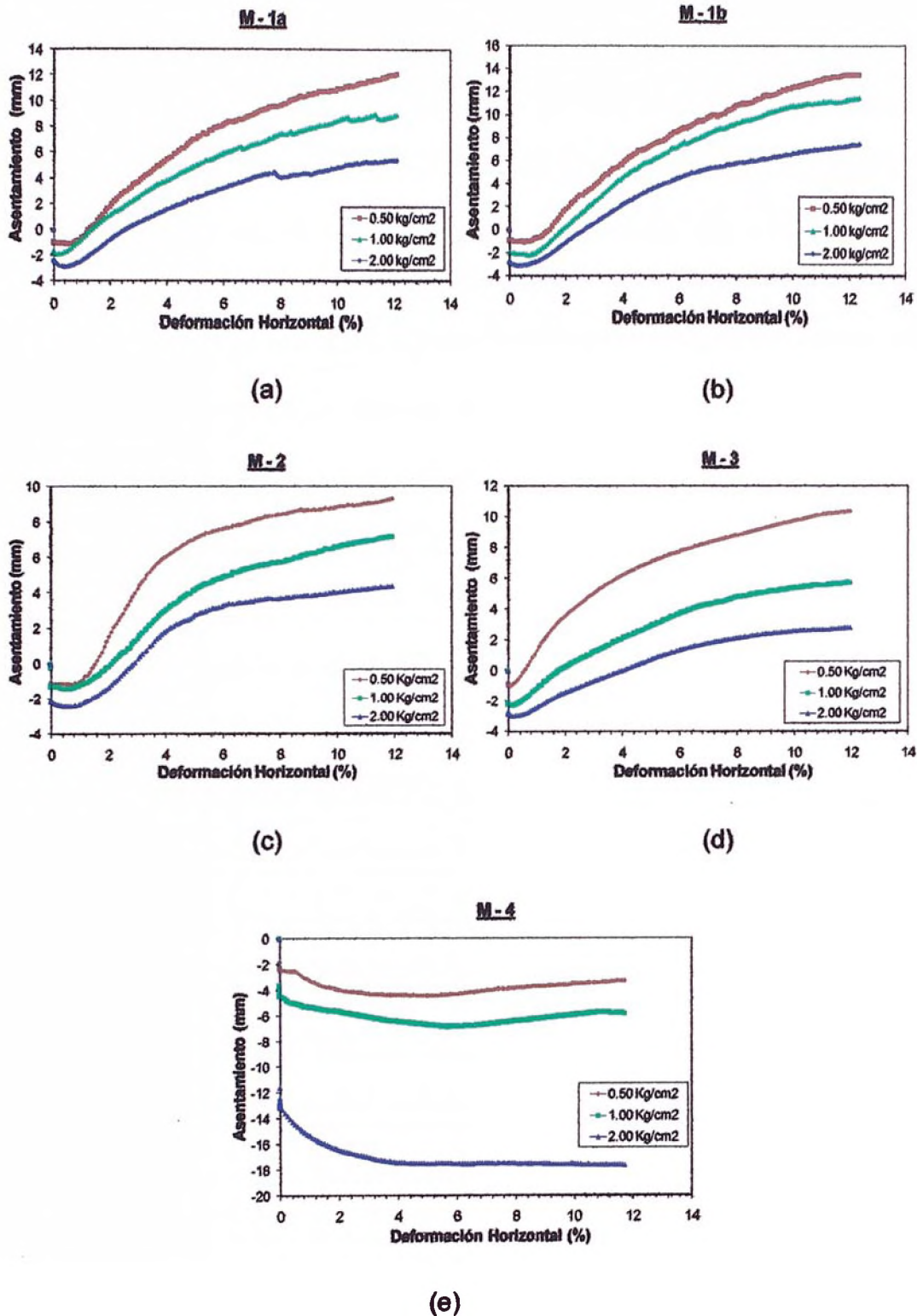
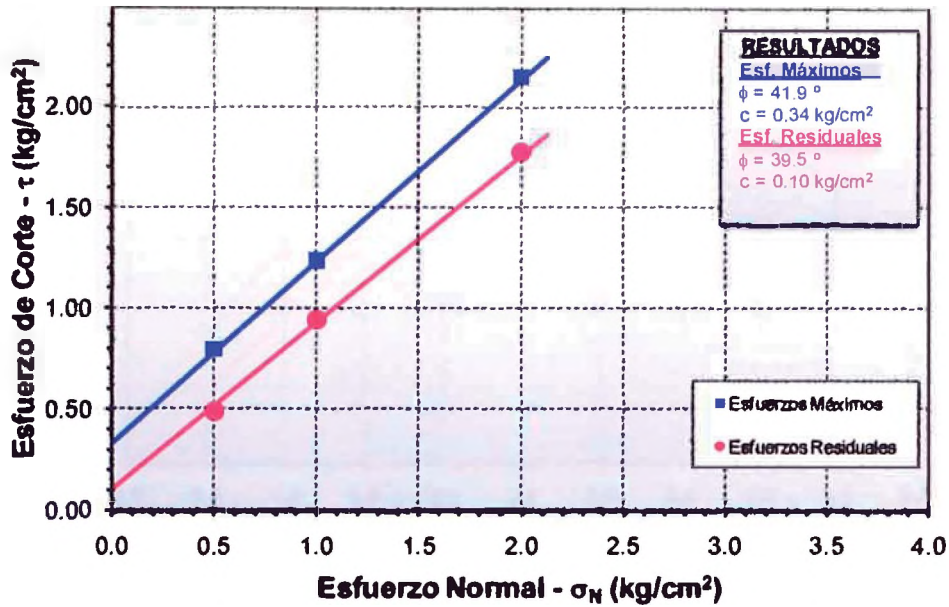


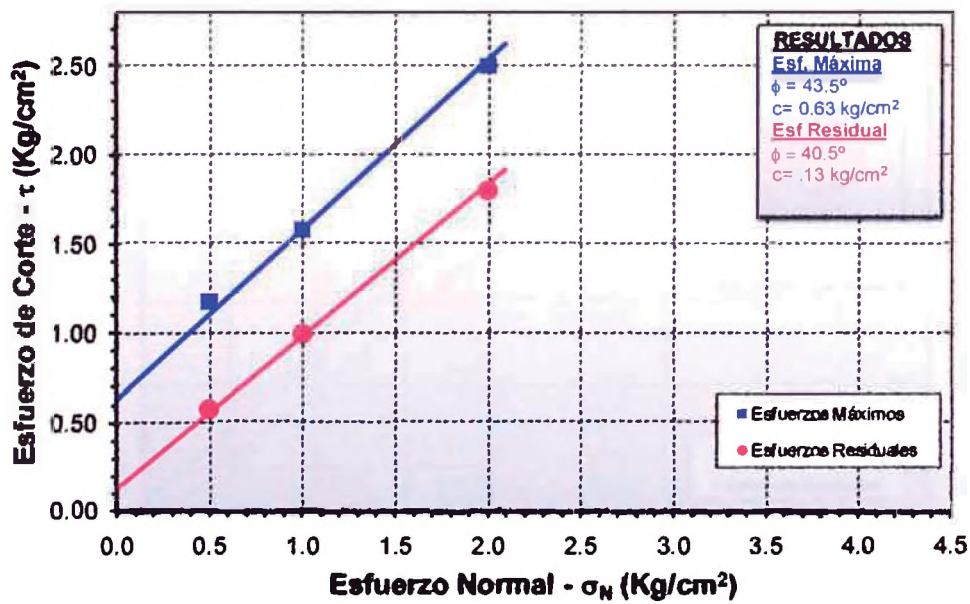
Figura 4.23. Comportamiento del asentamiento versus deformación horizontal para las cinco muestras ensayadas bajo las secuencias de cargas normales de 0.50, 1.00 y 2.00 Kg/cm². a), y b) GP, c) GW - GM, d) GC, e) GP - GM.

M - 1a



(a)

M - 1b



(b)

Figura 4.24. Envolvente de falla para esfuerzos máximos y residuales.
a) GP (2.15 ton/m³), b) GP (2.20 ton/m³).

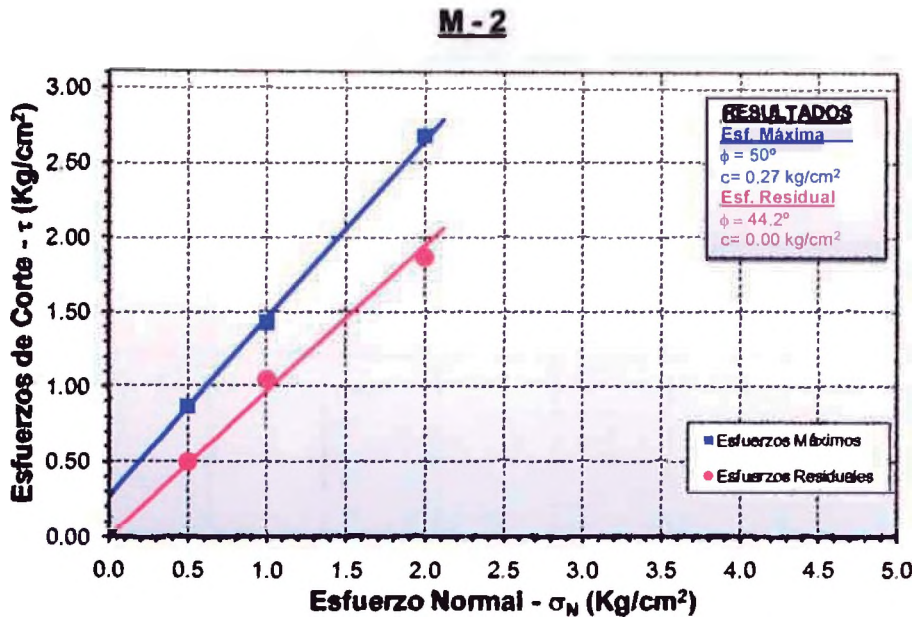


Figura 4.25. Envoltente de falla de resistencia maxima y residual para el material tipo GW - GM.

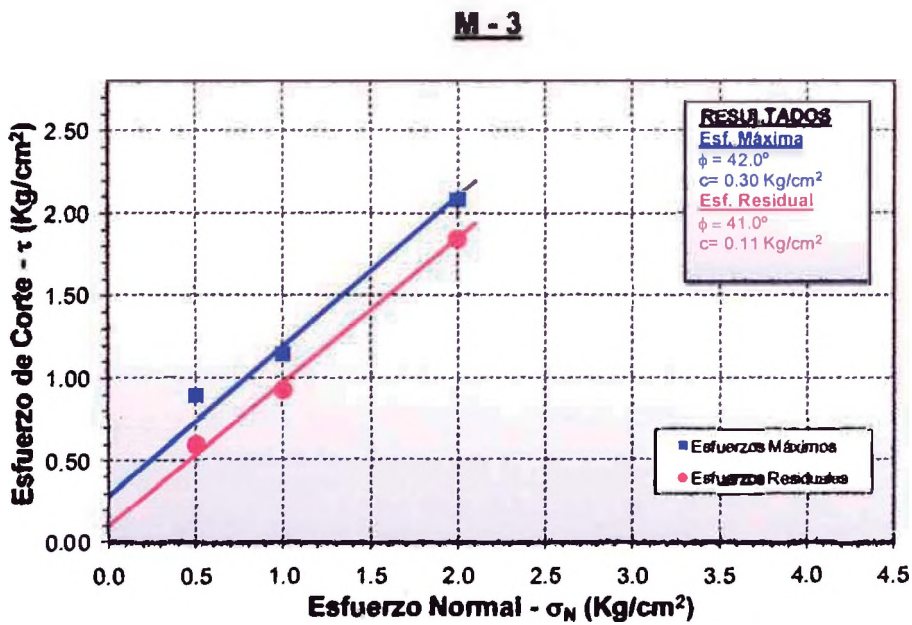


Figura 4.26. Envoltente de falla de resistencia maxima y residual para el material tipo GC.

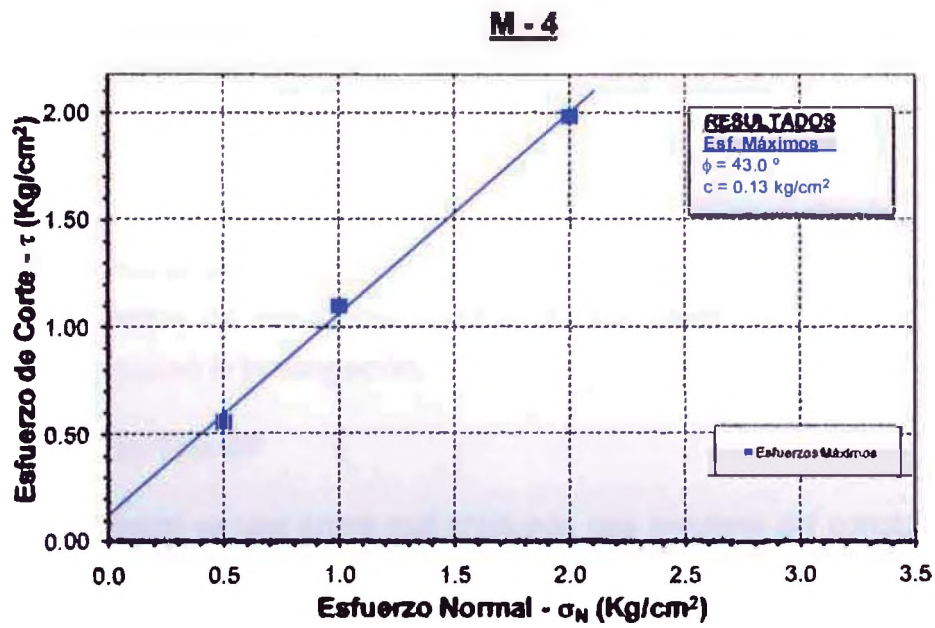


Figura 4.27. Envolvente de falla para el material GP - GM.

4.5 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del programa de ensayo de Corte Directo a Gran Escala son analizados e interpretados en esta sección teniendo como referencia los gráficos correspondientes a las curvas: esfuerzo de corte versus deformación horizontal, esfuerzo de corte normalizado versus deformación horizontal, asentamiento versus deformación horizontal y los parámetros de resistencia cortante de los diferentes suelos gravosos utilizados en la investigación.

Material tipo GP

El material es una grava mal graduada que proviene del conglomerado de Lima. El reporte del ensayo de laboratorio muestra que el 71% de la muestra son partículas gravosas, mientras que la cantidad de finos sólo representa el 3.2 % (ver Tabla 4.1). Asimismo, el material granular contiene partículas de hasta de 76.2 mm, con bordes redondeadas o subredondeadas. Para la conformación de los especímenes se consideró 02 pesos unitarios secos diferentes de 2.15 ton/m³ y 2.20 ton/m³, estos datos fueron tomados de algunos estudios geotécnicos elaborados en el CISMID-FIC-UNI que incluyeron ensayos de densidad de campo sobre el conglomerado de Lima.

Material tipo GW – GM

El material es una grava bien graduada con limo y arena. Esta constituido por 62.7% de partículas gravosas y 7.3% de finos según el reporte del ensayo de laboratorio (ver Tabla 4.1). La forma de las partículas son angulosas o subangulosas, cuyo diámetro máximo es de 100 mm. El peso unitario para la conformación de los especímenes de este material fue de 2.02 ton/m³.

Material tipo GC

La muestra es una grava arcillosa con arena. El reporte de laboratorio nos muestra que el contenido de partículas gravosas representa el 47.5% y un apreciable contenido de finos de 14.1%. El diámetro máximo de las partículas es de 100 mm. La muestra se ensayó a un peso unitario de 2.42 ton/m³.

Muestra GP – GM

El material es una grava mal graduada con limo y arena. Los resultados de laboratorio muestran que el material granular contiene 56.9 % de partículas gravosas y 6.4 % de contenido de finos. El diámetro máximo de las partículas es de 40 mm. El peso unitario de los especímenes fue de 2.00 ton/m³.

En la Figura 4.21, se presentan los resultados del esfuerzo de corte aplicado a cada muestra durante el ensayo de Corte Directo a Gran Escala para secuencias de cargas verticales de 0.50, 1.00 y 2.00 Kg/cm². En esta figura, en general, se observa claramente que a medida que la carga axial crece, la resistencia máxima se representa a una deformación horizontal cada vez mayor. Se aprecia también que algunos tramos de las trayectorias del esfuerzo de corte presentan formas de “zig zag”, quizás esto se debe al proceso de rotura del material granular para el caso de especímenes densos o el reacomodo de las partículas para materiales sueltos. Además, los resultados muestran para los suelos gravosos compactos, picos de resistencia de corte bien definidos, mientras que para las muestras sueltas, solo se presentan curvas crecientes. En general, el esfuerzo de corte máximo es alcanzado para desplazamientos horizontales menores a 30 mm (equivalente al 5 % del desplazamiento), tal como se evidencia en la Figura 4.21 (a, b, c y d), donde también se muestran que las trayectorias de las curvas esfuerzo de corte versus deformación horizontal para las diferentes cargas axiales son coherentes al grado de intensidad de las cargas aplicadas a las muestras.

La coherencia de proporcionalidad del esfuerzo de corte respecto a las secuencias de cargas axiales aplicadas a cada muestra (esfuerzo de corte normalizado) en el ensayo de Corte Directo a Gran Escala, se evidencia en los resultados que se presentan en la Figura 4.22. Al examinar dicho gráfico se observa que las trayectorias de las curvas de esfuerzo de corte normalizado tienden a unirse.

Los resultados del asentamiento versus deformación horizontal mostradas en la Figura 4.23, demuestran que el comportamiento de

contracción o dilatación del suelo gravoso depende del grado de densificación del material. La contracción del material se desarrollará durante el ensayo para muestras sueltas. Sin embargo, para suelos gravosos densos, los especímenes del ensayo exhiben una dilatación con el incremento del desplazamiento de corte.

Los parámetros de resistencia cortante C y ϕ de los suelos gravosos ensayados en el equipo de Corte Directo a Gran Escala se muestran en la Tabla 4.3. Se observa diferentes ángulos de fricción de acuerdo a las características físicas y mecánicas de las muestras utilizadas en la investigación.

El conglomerado de Lima clasificado como GP presenta ángulos de fricción similares (variación $\leq 2^\circ$) para muestras ensayadas a diferentes densidades (ver Tabla 4.3), mostrándonos que pequeñas variaciones de la densidad en este tipo de material no influye significativamente sobre el ángulo de fricción. Sin embargo, los resultados también muestran una cohesión aparente. Esta cohesión posiblemente representa la rigidez inicial del material y la no linealidad del aparato cerca del origen.

En la Figura 4.25, se muestra que el material gravoso clasificado como GW – GM presenta mayor ángulo de fricción que la muestra GP ($50^\circ > 43.5^\circ$). No obstante, el material GW – GM está conformado a una densidad menor que el suelo tipo GP, lo que posiblemente demuestra que la densidad del material no es la única variable que controla la movilización de resistencia. Posiblemente, existan otras variables que influyen en la determinación de la resistencia cortante del suelo gravoso, tales como: la variedad del tamaño de las partículas, el contenido de gravas, la forma y dureza de las partículas, la estructura del suelo conformado, entre otros.

El material gravoso tipo GC presenta una cantidad significativa de arenas y finos ($52.5\% \leq$ malla N°4). Este material muestra un ángulo de fricción de 42° (ver Figura 4.26) bajo una densidad bien compacta. Posiblemente la forma y dureza de las partículas (angulosas pero deleznable o débiles que se evidenciaron visualmente durante la compactación del material), y

la cantidad de finos tenga influencia en la determinación del ángulo de fricción.

Finalmente, el suelo gravoso GP – GM se conformó en un estado medianamente denso, presentando un ángulo de fricción de 43° (ver Figura 4.27).

CAPÍTULO V

ANÁLISIS COMPARATIVO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se corrobora la consistencia de los parámetros de resistencia cortante para suelos gravosos obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala en laboratorio. Para ello, se realiza un análisis comparativo con los resultados del ensayo de corte directo "In situ" de un lugar de donde se obtuvo el material para el ensayo de Corte Directo a Gran Escala. Los resultados obtenidos de la investigación presentados en el capítulo anterior, la recopilación de algunos ensayos de corte directo "In situ" sobre ciertos materiales similares a los empleados en la investigación y una base de datos generados de la evaluación experimental de la resistencia al corte para este tipo de materiales por diferentes investigadores en el mundo, son la base del análisis comparativo y la discusión de resultados presentados en este capítulo.

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.1 Generalidades

En este acápite, se presenta el análisis comparativo entre los ensayos de corte directo "In situ" y Corte Directo a Gran Escala para suelos gravosos en laboratorio, utilizando el mismo material gravoso (Conglomerado de Lima). Este análisis, permitirá verificar la idoneidad del equipo ensamblado.

Adicionalmente, se lleva a cabo otros ensayos de Corte Directo a Gran Escala empleando diferentes materiales gravosos. Cabe indicar, además, que la recopilación de los diferentes ensayos de corte directo "In situ", realizados en algunos estudios geotécnicos de nuestro medio, reforzará el análisis.

5.1.2 Análisis Comparativo entre los Ensayos de Corte Directo "In situ" y Corte Directo a Gran Escala en Laboratorio para el Conglomerado de Lima

El conglomerado de Lima identificado según la clasificación SUCS como material tipo GP en su mayoría con predominio de gravas y cantos rodados, es el material utilizado para la evaluación de la influencia de la dimensión de la caja de corte y otros factores externos del ensayo que podrían alterar la determinación de los parámetros de resistencia cortante C y Φ . Esta evaluación, se determinó mediante el análisis comparativo de los resultados obtenidos con los equipos de corte directo "In situ" y Corte Directo a Gran Escala en el laboratorio sobre el mismo material. En el capítulo II, se describe brevemente el ensayo de corte directo "In situ".

Los resultados obtenidos con el equipo ensamblado fueron dados en el Capítulo IV, donde se indica que el material granular GP (conglomerado de Lima) se ensayó en dos diferentes estados de compactación, con la finalidad de aproximar la conformación de la muestra a las condiciones naturales del terreno, ante la falta de información respecto a la densidad del suelo donde se realizó el ensayo de corte directo "In situ" (ver Tabla 5.1). En la Figura 5.1, se muestran las curvas esfuerzo-

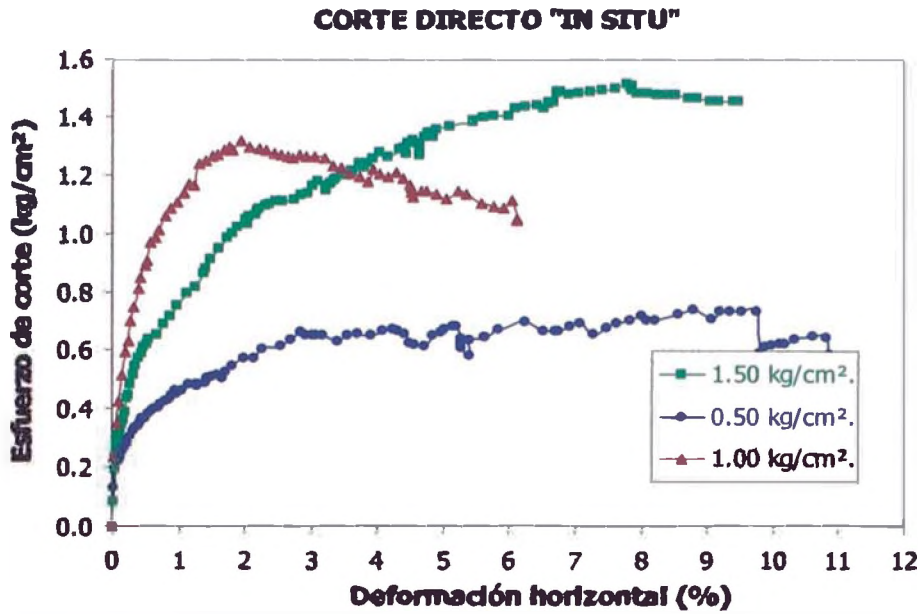
deformación de los ensayos de corte directo "In situ" y Corte Directo a Gran Escala. Se observa que existen ciertas diferencias en el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación, pues las trayectorias de las curvas del ensayo "In situ" no son tan homogéneas y consistentes con los niveles de esfuerzos normales aplicados, sin embargo, la variación de los valores de esfuerzo de corte máximo para cargas normales de 0.50 y 1.00 kg/cm² son mínimos. Consecuentemente, la tendencia de la envolvente de falla, no presenta diferencias significativas, el cual se evidencia en los valores de los parámetros de resistencia cortante obtenidos, como se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros de resistencia cortante para el material tipo GP determinado mediante los ensayos de corte directo "In situ" y Corte Directo a Gran Escala en laboratorio.

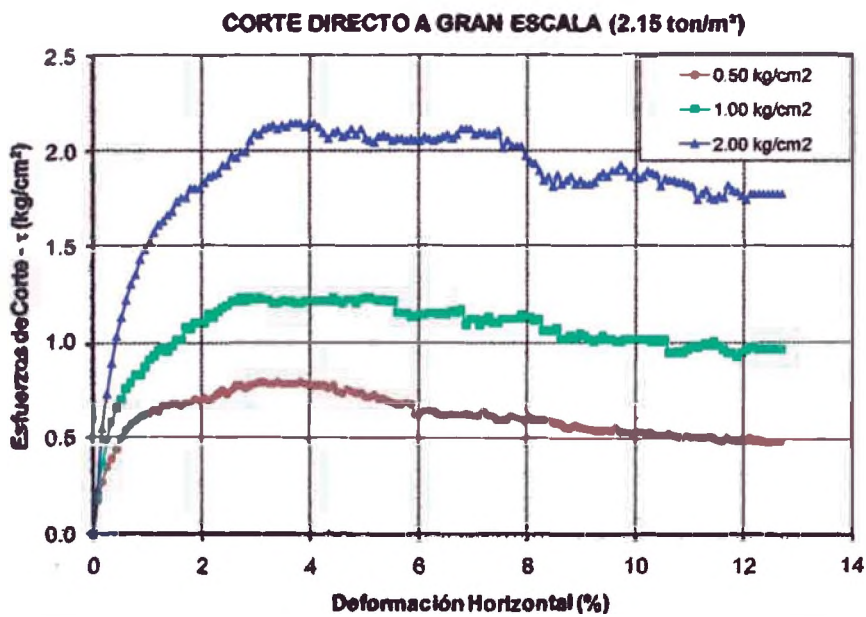
MUESTRA	SUCS	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	σ_n (kg/cm ²)	$\tau_{máx}$ (kg/cm ²)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)
Laboratorio	GP	0.00	2.15	0.50	0.80	0.34	41.9
				1.00	1.24		
				2.00	2.15		
Laboratorio	GP	0.00	2.20	0.50	1.18	0.63	43.5
				1.00	1.58		
				2.00	2.60		
In situ *	GP	-	-	0.50	0.75	0.27	43.5
				1.00	1.32		
				1.50	1.52		

* Los parámetros físicos y los resultados del ensayo de corte directo In situ del material gravoso (GP), fueron tomados del informe geotécnico elaborado por la empresa del Dr. Jorge Alva. El ensayo se ejecutó a 1.20 m de profundidad.

La pequeña diferencia encontrada en el ángulo de fricción entre los ensayos de corte directo "In situ" y el ensayo de Corte Directo a Gran Escala, cae dentro del rango de dispersión de $\pm 2^\circ$ para este tipo de ensayo, como muestra el método de selección doble de Stein (ver Tabla 5.2), adecuado por el Ingeniero Alberto Martínez Vargas (1985). En consecuencia, la dimensión de la Caja de Corte y posible presencia de partículas mayores a 3 pulgadas en el caso del ensayo "In situ", no influyen en la determinación del ángulo de fricción, lo cual da confiabilidad al equipo ensamblado.



(a)



(b)

Figura 5.1 Trayectorias del esfuerzo de corte versus deformación horizontal. a) Ensayo de corte directo "In situ" (Cortesía del Dr. Jorge Alva Hurtado), b) Ensayo de Corte Directo a Gran Escala en laboratorio.

Tabla 5.2. Valores recomendados de precisión en la determinación de propiedades físicas y mecánicas de suelos fiebles.

DENOMINACIÓN DE LOS ÍNDICES	LÍMITE DE VARIACIÓN DE LOS ÍNDICES						VARIACIÓN DE EXACTITUD
	< 2.4	2.4 - 2.6	2.6 - 2.8	2.8 - 3.0	> 3.0	-	
Densidad, t/m ³	< 2.4	2.4 - 2.6	2.6 - 2.8	2.8 - 3.0	> 3.0	-	
Exactitud de Determinación, t/m ³	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	-	0.02
Masa Volumétrica, t/m ³	< 1.6	1.6 - 1.8	1.8 - 2.1	2.1 - 2.3	> 2.3	-	
Exactitud de Determinación, t/m ³	0.02	0.03	0.05	0.05	0.10	-	0.02 a 0.10
Humedad (w), %	< 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60	> 60	-	
Exactitud de Determinación, %	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	-	0.5 a 3
Humedad al límite de fluencia (w _L), %	< 20	20 - 40	40 - 60	> 60	-	-	
Exactitud de Determinación, %	1	2	3	4	-	-	1 a 4
Humedad al límite de plasticidad (w _p), %	< 10	10 - 20	20 - 30	> 30	-	-	
Exactitud de Determinación, %	1.0	1.5	2.0	3.0	-	-	1 a 3
Ángulo de rozamiento, (Φ°)	< 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	25 - 30	> 30	
Exactitud de Determinación	0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5	0.5 a 2.5
Cohesión (C), MPa.	< 0.05	0.05 - 0.10	0.10 - 0.50	0.50 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2	
Exactitud de Determinación	0.001 - 0.005	0.005 - 0.01	0.01 - 0.05	0.05 - 0.10	0.10 - 0.15	0.15	0.001 a 0.15
Módulo de Deformación, MPa.	< 1	1 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	> 40	
Exactitud de Determinación	0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.5	2.5 - 5	5	0.1 a 5

Obtenido por el método, Selección Doble de Stein
Adecuado por el Ingeniero A. MARTÍNEZ V. (1985)

Por otro lado, según los reportes de algunos estudios geotécnicos que involucran ensayos de corte directo "In situ" en diferentes zonas de Lima (donde predomina el típico conglomerado GP), el ángulo de fricción varía de 37° a 40°, lo cual nos confirma la tendencia de los valores obtenidos en el trabajo de investigación. En la Tabla 5.3, se muestra una recopilación de ensayos de corte directo "In situ".

Estos resultados ayudan a explicar la coherencia en la determinación de los parámetros de resistencia cortante con el equipo de Corte Directo a Gran Escala. Cabe indicar que los valores del ángulo de fricción en la literatura técnica, para suelos gravosos densos con características físicas similares a las del conglomerado de Lima, presentan tendencias cercanas a los resultados obtenidos en la investigación. Este análisis se discutirá más adelante.

Tabla 5.3 Parámetros de resistencia al corte determinados mediante ensayos de corte directo "In situ".

Ubicación	Clasificación SUCS	Ángulo de Fricción (°)	Cohesión (Kg/cm ²)	Esfuerzos Normales Aplicados (Kg/cm ²)	Referencias
Banco de Vivienda Av. Emancipación y Jr. Camaná, Cercado de Lima.	GP	40	0.40	1.00, 2.00 y 3.00	Estudio de Factibilidad Técnico, Económico y Anteproyecto del Sistema de Transporte Rápido Masivo de Pasajeros en el Área Metropolitana Lima - Calleo - Metro, Lima.
Beneficencia de Lima Av. Abancay y Nicolas de Pierola, Cercado de Lima.	GP	37	0.60	1.00, 2.00 y 3.00	Estudio de Factibilidad Técnico, Económico y Anteproyecto del Sistema de Transporte Rápido Masivo de Pasajeros en el Área Metropolitana Lima - Calleo - Metro, Lima.
Molecón de la Marina, en los Acañilados de la Costa Verde, Miraflores.	GP	39.9	0.55	0.80, 1.00 y 1.50	Estabilidad de Taludes de la Costa Verde, Hidroenergía Consultores en Ingeniería.
Intercambio Vial, cruce Av. Universitaria y Av. Venezuela, Cercado de Lima.	GM	34	0.15	1.13, 2.18 y 3.32	Intercambio Vial Av. Universitaria - Av. Venezuela, Alpha Consult.
Centro Empresarial San Isidro, cruce Av. República de Panamá y Calles Miguel Seminario y San Cristóbal, San Isidro.	GP	43.5	0.27	0.50, 1.00 y 1.50	Proyecto Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación del Centro Empresarial San Isidro.
Carretera Central Km. 14.8, Ate Vitarte, Lima.	(*)	48.5°	0.6	1.00, 2.00 y 4.00	Estabilidad de Talud Cantera - La Gloria, Cia Minera la Gloria S.A.

(*) No identificado el tipo de material de acuerdo a la clasificación SUCS en el informe geotécnico, posiblemente se trata de un material tipo GW-GM de acuerdo al registro fotográfico del material

5.1.3 Análisis de Otros Resultados.

Se realizaron tres ensayos adicionales sobre otros tipos de materiales gravosos identificado de acuerdo a SUCS como material tipo: GW – GM ó grava bien graduada con limo y arena, GP – GM ó grava mal graduada con limo y arena y GC ó grava arcillosa con arena, en diferentes estados de compactación.

De los resultados mostrados en el capítulo anterior, se muestra que la envolvente de resistencia máxima del material tipo GW – GM, da como resultado un ángulo de fricción de 50°. Por otro lado, el ángulo de fricción para materiales angulosos (según imágenes fotográficas mostradas en el informe geotécnico "Estabilidad de Talud, Cantera - La Gloria" elaborado por el CISMID) determinado mediante el ensayo de corte directo "In situ", es igual a 48.5° (ver Tabla 5.3). La variación de $\pm 2^\circ$ cae dentro del rango de incertidumbre para este tipo de ensayo (ver Tabla 5.2), corroborando de esta forma el resultado obtenido con el equipo de Corte Directo a Gran Escala.

En el caso de los materiales tipo GC y tipo GP - GM, los resultados mostrados son consistentes con los valores reportados por diferentes investigadores en el mundo (Ver Tablas 5.4 y 5.5).

5.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos en el programa de investigación, se observa que la cohesión aparente del conglomerado de Lima aumenta (de 0.34 a 0.63 Kg/cm²) a medida que se incrementa la densidad del material. Este incremento posiblemente refleja la influencia de factores tales como: la rigidez inicial del material compactado, rotura de partículas, entre otros. Edil y Benson (2007) en sus ensayos de Corte Directo a Gran Escala (caja de corte = 30.5 x 30.5 cm), interpretaron que la cohesión aparente del material representa la fricción en la caja de corte y la no linealidad del aparato cerca del origen. En este caso, para el equipo ensamblado la fricción en la caja de corte es mínima y corregible, dado que se cuantifica, sin embargo, la no linealidad del aparato cerca del origen y la rigidez inicial del material conformado, factores no controlados, posiblemente influyen en el incremento de la cohesión aparente. Por otro lado, el ángulo de fricción, de acuerdo a la literatura técnica, es influenciado además de la compacidad del material, por la forma de la partícula. Hough (1957; citado por Gonzáles de Vallejo, 2002) sugiere emplear valores de ángulo de fricción, para mezclas de arena y grava en estado denso, de 40° a 48° (ver Tabla 5.4), indicando emplear los valores más bajos para suelos con partículas redondeadas o subredondeadas. Norris (1977; citados por Selig y Roner, 1987) demostró que la resistencia al corte disminuye de manera importante con el incremento de la redondez, el mismo concepto fue demostrado por Frossard (Selig y Roner 1987). Sherd et.al. (1963), también sugirió valores de ángulo de fricción para mezclas de material (SP y GP), indicando que para densidades relativas mayores a 70% el ángulo de fricción varía de 37° a 45° (ver Tabla 5.5). Con base en estas referencias y los ensayos de corte directo "In situ" (ver Tabla 5.6), se corrobora la consistencia de los parámetros de resistencia cortante para el conglomerado de Lima obtenido con el equipo de Corte Directo a Gran Escala.

Tabla 5.4. Valores del ángulo de rozamiento interno en suelos granulares (Hough 1957, citado por Gonzales de Vallejo).

Tipo de Suelo	Ángulo de rozamiento interno en función de la densidad inicial (*)		
	Suelto	Medianamente denso	Denso
Limo no plástico	26 a 30	28 a 32	30 a 34
Arena uniforme fina a media	26 a 30	30 a 34	32 a 36
Arena bien gradada	30 a 34	34 a 40	38 a 46
Mezclas de arena y grava	32 a 36	36 a 42	40 a 48

(*) Hough (1957) sugiere emplear los valores más bajos de cada rango para los suelos redondeados o para aquellos que poseen partículas débiles (micas, esquistos), los más elevados para suelos con partículas angulosas y resistentes

Tabla 5.5. Variaciones del ángulo de fricción (Φ) en gravas con diferentes pruebas desarrollados en varios países.

SUELO	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EN GRADOS (Φ)			REFERENCIA	TIPO DE PRUEBA
	> 70%	50% - 70%	< 50%		
Densidad Relativa (D_r)	> 70%	50% - 70%	< 50%		
Grava Bien Graduada (GW).	50°	-	-	Bishop - 1948 - Inglaterra	-
(GW o SW) Seca - Angulosa.	46°	34°	-	Whitney y Colaboradores - 1957	-
(GP o SP) Redondeada Uniforme.	35°	28°	-		
Mezcla (SW y GW).	40° - 45°	36° - 41°	33° - 36°	Sherd y Colaboradores - 1963 - EEUU	-
Mezcla (SP y GP).	37° - 45°	33° - 36°	30° - 33°		
Gravas.	45°	37°	-	Cuyas - 1977-78 - URSS	TRIAXIAL (Laboratorio) d = 0.75 m, h = 1.50 m
Conglomerado Silíceo del infiernillo.	34° - 47°	-	35.5°	Mansal - Pensendiz - 1979 - México	TRIAXIAL (Laboratorio) d = 1.13 m, h = 2.5 m
Conglomerado y Arena de Matpaso.	37° - 52°	37°	-		
Grava Pinzanderán y Arena de Angostura.	36° - 55°	-	34°		
Macro Clásico no Cementado, Boleos, Gujarrós, Gravos y Carifos.	45°	-	30°	Paniukov - 1981 - URSS	-
Grava Arenosa.	50°	-	35°	Peck y Colaboradores - 1982 - EEUU	-
Gravas del Conglomerado de Lima - Perú (forma subredondeadas).	40°	37°	-	FIC-UNI - Humala - 1982 - Lima - Perú	CORTE DIRECTO (In situ)
Gravas Típicas de Santiago - Chile.	44°	-	-	Monsante H., Ortigosa P., Valencia U. 1987 - Chile R. Verdugo y K. De la Hoz (2006)	TRIAXIAL (In situ) d = 0.85 m, h = 1.70 m
Gravas de Lima - Campus UNMS - Perú (forma subredondeadas).	-	-	34°	FIC - UNI - Humala - 1996	CORTE DIRECTO (In situ)
Gravas de Lima, Miraflores - Lima - Perú (forma subredondeadas).	-	40°	-	CISMID - FIC - UNI - 1997	CORTE DIRECTO (In situ)

Tabla Elaborada por A. Martínez V. - 1997, en su investigación de gravas.

Tabla 5.6. Comparación de los valores obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran escala, recopilación de ensayos In situ y valores reportados en la literatura técnica.

Muestra	Corte Directo a Gran Escala	Corte Directo In situ (recopilados)	Houg (1957) EE.UU	Marsal (1979) México
GP	41.9° a 43.6°	37.0° a 43.6°	40.0° a 48.0°	37.0° a 55.0°
GW - GM	50.0°	48.5°		
GC	42.0°	-		
GP - GM	43.0°	-		

Hough (1957) sugiere emplear los valores mas bajos de cada rango para los suelos redondeados o para aquellos que poseen partículas débiles, los más elevados para suelos con partículas angulosas y resistentes.

Los resultados obtenidos para el material tipo GW – GM, muestra el valor del ángulo de fricción relativamente alto (50°) con una cohesión de 0.27 Kg/cm². Según Hough (1957) el ángulo de fricción que le corresponde a un material denso con partículas angulosas es el más elevado dentro del rango que sigue (40° a 48°). Marsal (1965) ensayó materiales de enrocamiento de presas con un tamaño máximo de partículas de 20 cm utilizando una gran celda triaxial de alta presión, reportando que la resistencia al corte se incrementa cuando la granulometría se amplía (materiales bien graduadas). Marachi et.al. (1972; citados por Selig y Roner, 1987) llegó a la misma conclusión después de hacer ensayos con energías de compactación similares. Chen (1948; citados por Selig y Roner, 1987) en pruebas triaxiales encontró que el incremento en el coeficiente de uniformidad aumenta la resistencia al corte, aunque ello no afecta la dureza. Holubec y D'Appolonia (1973, citados por Selig y Roner, 1987) encontraron que la angularidad de las arenas contribuye significativamente al aumento de la resistencia al corte. Pike (1973; citados por Selig y Roner, 1987) realizó pruebas de corte directo sobre 17 agregados en tamaño de partículas que iban desde gravas gruesas hasta arenas finas, reportando que el incremento en la angularidad o en la rugosidad de la superficie, generalmente produce un peso específico bajo para la misma energía de compactación, pero la resistencia aún así aumenta. En consecuencia, el valor alto del ángulo de fricción del material tipo GW-GM, que se obtiene con el equipo de Corte Directo a Gran Escala, posiblemente ha sido

influenciado por el estado de compactación del material (denso) y la forma de las partículas (angulosas), tal como se verifica con los valores reportados por diferentes investigadores (ver Tabla 5.5 y Figura 5.2), certificando la validez de los parámetros de resistencia cortante obtenidos con el equipo ensamblado en laboratorio.

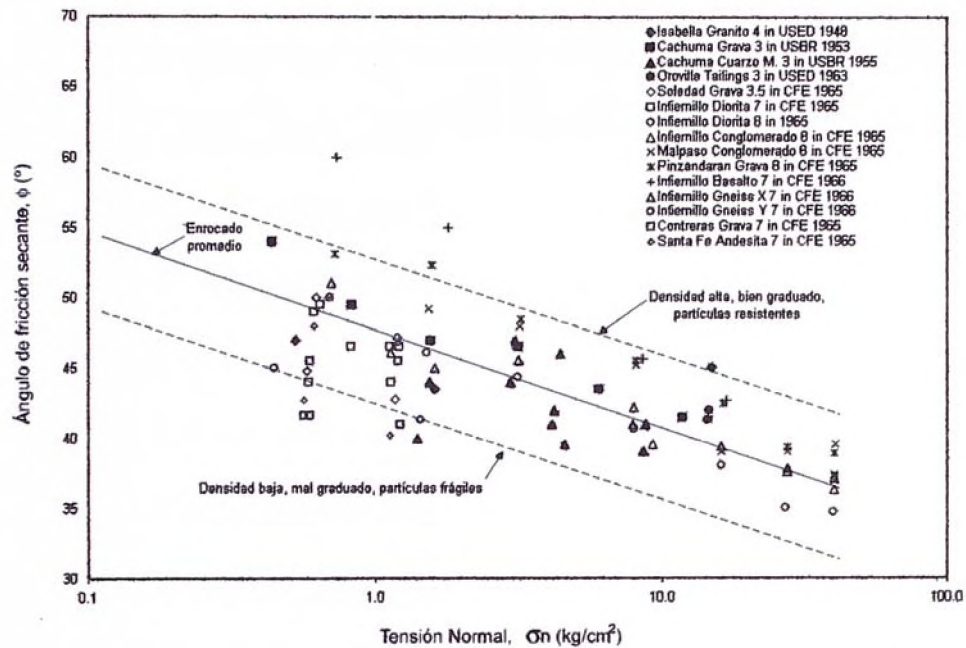


Figura 5.2 Ángulo de fricción interna para enrocados (modificado de Leps, 1970).

El material tipo GC, conformado en un estado de compactación densa (2.30 ton/jm^3), presenta un ángulo de fricción de 42° , con una cantidad significativa de partículas finas ($52.5\% < \text{Malla N}^\circ 4$). Fragazi et. al. (1992) sugiere que el contenido de gravas de forma redondeada o subredondeada menor a 40% no afecta los parámetros de resistencia cortante si se analiza solo la matriz del material. Edil y Benson (2007), reportaron que la matriz del material gravoso se ve afectado cuando el contenido de gravas (material $> \text{Malla N}^\circ 4$) es mayor a 30%. Lo que significa que la cantidad mínima de partículas gravosas debe ser aproximadamente 30% para evitar analizar solo la matriz del material (variable no discutido en la investigación). Por otro lado, durante la conformación del material granular GC, se observó visualmente la

fragilidad de las partículas, incrementando la cantidad de finos en el espécimen conformado. Hough (1957) menciona que los suelos gravosos con partículas frágiles, para el caso del estado denso, presentan valores cercanos a 40° , confirmando la coherencia del ángulo de fricción determinado con el equipo de Corte Directo a Gran Escala.

El análisis de la investigación en estado medianamente denso (1.98 ton/m^3), se evaluó con el empleo del material tipo GP-GM. De acuerdo a las características físicas de este material dadas en el Capítulo anterior, el diámetro máximo de las partículas es de 2 pulgadas, mientras que sus bordes presentan formas angulosas. Las referencias bibliográficas mencionan que, para suelos gravosos en estado medianamente denso el valor del ángulo de fricción puede ser de hasta 41° (ver Tabla 5.5). Hough (1957) también hace referencia para suelos gravosos medianamente densos y propone emplear valores de 36° a 42° . El resultado obtenido con el equipo de Corte Directo a Gran Escala muestra un valor de 43° , verificándose la tendencia del resultado con valores reportados en la literatura técnica.

Finalmente, los resultados obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala en laboratorio son coherentes con los resultados del ensayo "In situ" y valores reportados en la literatura técnica para este tipo de materiales (ver Figura 5.6), lo cual da confiabilidad del equipo ensamblado y consistencia de los parámetros de resistencia cortante obtenidos para suelos gravosos.

CONCLUSIONES

El comportamiento mecánico de los suelos gravosos tiene particularidades muy importantes, que determinan su respuesta a una sollicitación específica. Partiendo de que el suelo gravoso es un material granular, que presenta un buen comportamiento y comparativamente desarrolla, mayor resistencia que otros materiales de menor tamaño como suelos arenosos, se identificaron la necesidad de establecer sus propiedades geomecánicas, de forma de resolver adecuadamente problemas de cimentaciones, excavaciones profundas, estabilidad de taludes, entre otros, que involucran estos materiales gruesos. Tomando en cuenta este hecho, se diseñó y construyó un equipo de Corte Directo a Gran Escala de 0.60x0.60x0.60 m, en el Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Universidad Nacional de Ingeniería, teniendo como referencia los lineamientos establecidos en las Normas ASTM D 3080 y ASTM D 4554.

El interés prioritario de esta investigación es corroborar los resultados obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala mediante el análisis comparativo con otros tipos de pruebas referenciados en algunos estudios geotécnicos o establecidos en la literatura técnica. El conglomerado de Lima es una de las muestras más importantes empleadas en la investigación, ya que se tiene algunos registros de ensayos de corte directo "In situ" para este tipo de material,

y, además, se realizó un ensayo de Corte Directo a Gran Escala con el material obtenido de un lugar donde se realizó un ensayo de de corte directo "In situ".

El equipo de Corte Directo a Gran Escala nos permite determinar la resistencia de suelos gravosos de hasta 10 cm (4 pulgadas) de tamaño máximo. De esta manera se puede incluir partículas de mayor tamaño en el ensayo, que representa con mayor aproximación el comportamiento de la grava en su conjunto evitando estar analizando solamente la matriz del material y extrapolando los parámetros obtenidos con los equipos convencionales.

La conformación de la muestra depende principalmente de las propiedades físicas requeridas del material. Este equipo se diseñó con la finalidad de obtener especímenes conformados en distintos estados de compactación, desde los más sueltos hasta los compactos.

La calibración de los equipos utilizados en la instrumentación del equipo de Corte Directo a Gran Escala se realizó en el laboratorio geotécnico del CISMID – UNI (ver Capítulo III). De acuerdo a los resultados de calibración, la fricción existente en los bordes de contacto entre las dos mitades de la caja de corte que se evidenciaron durante el movimiento relativo, se redujo a través de la instalación de un sistema de rodamiento diseñado apropiadamente para este fin, sin embargo, no se elimina totalmente la fricción, en consecuencia, la cuantificación de la fricción remanente (0.08 kg/cm^2), se podrá emplear para realizar las correcciones respectivas.

Se realizaron ensayos de Corte Directo a Gran Escala para cuatro tipos de suelos gravosos a diferentes densidades. Los materiales utilizados fueron clasificados según SUCS como: grava mal graduada (GP), grava arcillosa con arena (GC), grava bien graduada con limo y arena (GW – GM) y grava mal graduada con limo y arena (GP – GM), con partículas de tamaño medio (D_{50}) de 4 a 20 mm y contenido de finos de 3.2 a 14.1 %. El contenido de grava de las muestras varía de 47.5 a 71 %. La forma de las partículas varía de angulosas o subangulosas a redondeadas o subredondeadas.

Para verificar la consistencia de los resultados obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala, se realizó un ensayo con el material obtenido de un lugar donde se realizó el ensayo de corte directo "In situ" (conglomerado de Lima). Las curvas de esfuerzo de corte versus deformación horizontal y los parámetros de

resistencia cortante obtenidos (ver Tabla 5.1), muestran que estos resultados son consistentes, lo cual da confiabilidad al equipo ensamblado, corroborando que la dimensión de la caja de corte no influye en los resultados.

La determinación de los ángulos de fricción de los cuatro tipos de suelos gravosos ensayados en el laboratorio, están dentro del rango de valores dados en la literatura técnica para este tipo de material (ver Tabla 5.6), según los reportes de diferentes investigadores. Verificándose la consistencia de los parámetros de resistencia cortante obtenidos con el equipo de Corte Directo a Gran Escala.

En todos los casos la cohesión aparente se encuentra en el rango de 0.13 kg/cm^2 a 0.63 kg/cm^2 . Esta cohesión representa posiblemente la rigidez del material conformado y el comportamiento en rotura no lineal del material gravoso.

El criterio de rotura establecido por Coulomb (1776), que explica la relación de esfuerzos efectivos y esfuerzos tangenciales actuando en cualquier plano del suelo, ha sido el modelo utilizado para la determinación de los parámetros de resistencia cortante.

El estado de compactación del espécimen influye significativamente en la determinación del ángulo de fricción. La literatura técnica especifica tres estados de compactación bien diferenciados, estos son: sueltos, medianamente densos y densos.

La precarga inicial en los especímenes conformados están dados por el peso propio de las planchas metálicas y el rodillo que van instalados sobre la muestra, generando un esfuerzo vertical de 0.05 kg/cm^2 , aproximadamente.

Se utilizó una capa de arena de 1.00 cm de espesor en la parte superior del espécimen, con la finalidad de uniformizar la superficie de contacto del material gravoso con la plancha metálica, y a su vez transmitir a la muestra una distribución uniforme de la carga axial durante el ensayo.

Cada tipo de suelo gravoso ensayado en el equipo de Corte Directo a Gran Escala se sometió a secuencias de cargas verticales de 0.50, 1.00 y 2.00 kg/cm^2 , con la finalidad de ajustar la tendencia de la envolvente de falla. Todos los especímenes fueron ensayados a una proporción constante de

desplazamiento de 0.50 mm/min hasta un desplazamiento promedio de 75 mm aproximadamente, se registraron 300 puntos durante cada ensayo.

Si bien el procedimiento del ensayo con el equipo de Corte Directo a Gran Escala es similar al realizado con el equipo convencional de corte directo en el laboratorio, la mayor escala del espécimen lo hace más engorroso e implica un mayor tiempo en la ejecución del ensayo.

La cantidad mínima de material granular, en peso, usado para el ensayo de Corte Directo a Gran Escala, en estado suelto, es de 500 kg aproximadamente.

De las investigaciones consultadas, en la que se discute la influencia de algunas variables en la determinación del ángulo de fricción para muestras gravosas, se concluye que efectivamente el ángulo de fricción se ve afectado por varios factores tales como: densidad de conformación de la muestra, forma de las partículas, variedad del tamaño de las partículas, cantidad de gravas presentes en la muestra, dureza de las partículas y estructura del material conformado. La evaluación de cada uno de estas variables no es motivo de la investigación.

Finalmente, la disponibilidad de este equipo permitirá realizar investigaciones para entender la influencia del tamaño y forma de las partículas así como el contenido de finos en los parámetros de resistencia cortante de suelos gravosos.

RECOMENDACIONES

El trabajo de investigación descrito en este documento abre el camino como toda investigación hacia nuevas interrogantes. En esta sección se plantean algunas ideas que podrían desarrollarse para mejorar el entendimiento de los materiales granulares cuando se determina los parámetros de resistencia cortante.

Como herramienta primordial para obtener información de primera mano, es necesario tener un equipo adecuado a las exigencias actuales. Un equipo de Corte Directo a Gran Escala construido es susceptible de mejoras, sobre todo después de tenerlo a prueba después de su construcción. Así que, se plantean algunas posibles mejoras que podrían contribuir a obtener resultados más confiables.

El incremento de la capacidad de reacción del marco de carga contribuiría a incrementar la aplicación de la carga axial sobre la muestra, mejorando de este modo el modelamiento de corte directo para este tipo de materiales.

La implementación de la caja de corte con dispositivos adecuados para la saturación del material gravoso, complementaria el ensayo de Corte Directo a Gran Escala. Los ensayos realizados en la investigación se han llevado a cabo en muestras no saturadas, la implementación para saturar la muestra mejoraría la evaluación del material gravoso en condiciones críticas.

La implementación de un sistema de registro de datos automatizados permitiría la visualización de los resultados durante el ensayo, lo cual es una ayuda muy importante para el seguimiento de las trayectorias de las curvas de esfuerzo de corte y la obtención de los parámetros de resistencia al corte del material granular grueso.

Una de las condiciones de la Norma ASTM D 3080, establece que el diámetro del equipo debe ser 10 veces mayor que el diámetro máximo de la partícula, en consecuencia, para tener en cuenta esta condición, se exige que al menos 75 % de la muestra tenga un diámetro inferior a 6 cm, de acuerdo a experiencias anteriores (Laboratorio CEDEX, España). Se recomienda investigar esta variable.

El comportamiento en rotura del material gravoso es bastante no lineal (Dr. José Estaire Gepp, 2008), ese comportamiento es el que explica que aparezca una cohesión en un material fundamentalmente granular, por lo que se recomienda ajustar la tendencia de la envolvente de falla con cuatro muestras (en vez de tres).

Como referencia adicional a lo establecido, el porcentaje de grava en la curva granulométrica debe ser mayor a 30% de acuerdo a los investigadores (Fragazi et. al. 1992 y Edil y Benson, 2007), esto con la finalidad de obtener la influencia del suelo gravoso en la determinación de los parámetros de resistencia cortante de la muestra global.

REFERENCIAS

- 1) ABDELRAHMAN, Ahmed H.; ASHMAWY, Alaa K.; ABDELMONIEM, Mohamed "Development of a Large-Scale Universal Apparatus for Testing Geosynthetic-Soil Systems", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2007.
- 2) ALVA, Jorge E.; GUTIERREZ, José W.; Chariarse, V. "Comparación de la Resistencia Drenada de un Suelo In Situ y en Laboratorio", VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huaraz – Perú, 1988.
- 3) BUDHU Muni "Soil Mechanics and Foundations", Segunda Edición, 2007.
- 4) CERATO, Amy B. y LUTENEGGER, Alan J., "Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands", Geotechnical Testing Journal, Vol. 29 N°6, 2006.
- 5) CHAVEZ, Carlos, "Estudio del Comportamiento Triaxial de Materiales Granulares de Tamaño Medio con Énfasis en la Influencia de la Succión", Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.
- 6) DAS, Braja M. "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", Cuarta edición, 2000.
- 7) DE LA ROSA, Félix, "Ensayos de Corte Directo In Situ para los Estudios de Factibilidad del Transporte Masivo de la Gran Lima", Tesis de grado, UNI, 1974.
- 8) DYER, M. R. "Observation of the Stress Distribution in Crashed Glass with Applications to Soil Reinforcement", University of Oxford, 1985.

- 9) EDIL, Tuncer B. y BENSON, Craig H. "Determination of Shear Strength Values for Granular Backfill Material Used by the Wisconsin Department of Transportation", University of Wisconsin-Madison, 2007.
- 10) ESTAIRE, José "Resistencia de Escolleras en Ensayos de Corte de Gran Tamaño", Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), Madrid, 2008.
- 11) FERNÁNDEZ, Carlos "Resistencia al Corte de los Suelos Gravosos", VIII Congreso de Mecánica de Suelos, Geo – Lima 1998.
- 12) GARNICA, Paul; GÓMEZ, José; SUÁREZ, Luis "Efecto de Rotura de Granos en Material de Balasto Bajo Carga Repetida", Publicación técnica N° 91, Sanfadila, Qro, 1997.
- 13) GHANBARI, Ali; SADEGHPOUR, Amir H. "An Experimental Study on the Behavior of Rockfill Materials Using Large Scale Tests", EJGE, Vol. 13, 2008.
- 14) GONZALES DE VALLEJO, Luis; FERRER, Mercedes; ORTUÑO, Luis; OTEO, Carlos, "Ingeniería Geológica", Pearson Educación, Madrid, 2002.
- 15) HUMALA, G. "Ensayos de Corte Directo In Situ en Lima", IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo – Perú, 1982.
- 16) JUAREZ B., Eulallo; Rico R., Alonso "Mecánica de Suelos, Tomo I. Fundamentos de la Mecánica de suelos", Editorial Limusa, México, 1984.
- 17) JUAREZ B., Eulalio; Rico R., Alonso "Mecánica de Suelos, Tomo II. Fundamentos de la Mecánica de suelos", Editorial Limusa, México, 1987.
- 18) LAMBE, William T. & WHITMAN, Robert V. "Mecánica de Suelos", Editorial Limusa, p. 151-164, 1984.

- 19) LIU, Chia-Nan; HO, Yu-Hsien; HUANG, Jian-Wen "Large scale Direct Shear Tests of Soil/Pet-yarn Geogrid Interfaces", University Road, Puli, Nantou, Civil Engineering Department, National Chi-Nan University, Nantou 545, Taiwan, 2008.
- 20) LIU, S.H^a.; SUN, De'an^b; MATSUOKA, Hajime^c "On the Interface Friction in Direct Shear Test", ^aCollegue of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, PR China; ^bDepartment of Civil, Surveying and Engineering, University of Newcastle, Australia; ^cDepartment of Civil Engineering, Nagoya Institute of technology, Japan; 2005.
- 21) MARSAL, Raúl J. "Investigaciones Sobre el Comportamiento de Suelos Granulares y Muestras de Enrocamiento", Comisión Federal de Electricidad, México D.F., 1965.
- 22) MARSAL, Raúl J. "Contribuciones a la Mecánica de Medios Granulares", Comisión Federal de Electricidad, México D.F., 1980.
- 23) MARTÍNEZ, Alberto J. "Estabilidad de los Acantilados de la Costa Verde", Bolitin Científico, Instituto de Investigación, Universidad Nacional de ingeniería, 2003.
- 24) NORMA ASTM D 3080 "Standar Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidate Drained Conditions", ASTM International, 2002.
- 25) NORMA ASTM D 4554 "Standar Test Method for In Situ Determination of Direct Shear Strength of Rock Discontinuities", ASTM International, 2002.
- 26) OLDECOP, L. "Compresibilidad de Escolleras Influencia de la Humedad", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 2000.
- 27) PALMEIRA, Ennio Marquez, "The Study of Soil – Reinforcement Interaction by Means of Large Scale Laboratory Tests", University of Oxford, 1987.

- 28) PEDLEY, Martin Jhon, "The Performance of Soil Reinforcement in Bending and Shear", University of Oxford, 1990.
- 29) SELIG E. T. y RONER C. J. "Effects of Particle Characteristics on Behavior of Granular Material", Transportation Research Record, N° 1131, 1987.
- 30) SHUAN, Luisa, "Determinación de los Parámetros de Resistencia en Suelos Granulares Mediante el Ensayo de Corte Directo In Situ para Fines de Cimentación", Tesis de grado, UNI, 1997.
- 31) VERDUGO, Ramón; De la Hoz, Karem "Caracterización Geomecánica de Suelos Granulares Gruesos", Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil Vol 6(2) 199-211, Universidad de Chile, 2006.

ANEXO

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA M-2

Solicitante : COMPAÑÍA MINERA ATACOOCHA S.A.A.
 Proyecto : Crecimiento del Dique de Relaves Atacocha

Fecha : Julio, 2008

Ubicación : Pasco, Perú

Procedencia : Cantera Enrocado

Muestra : M - 2

Profundidad (m) : 2.00

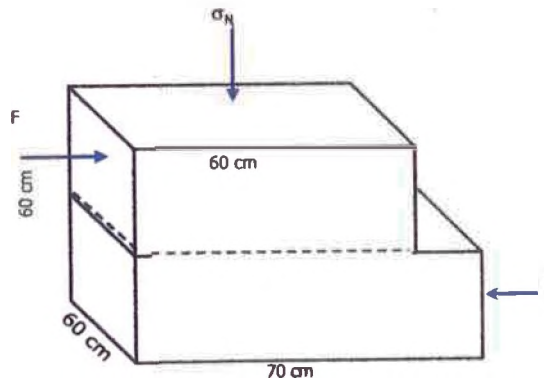
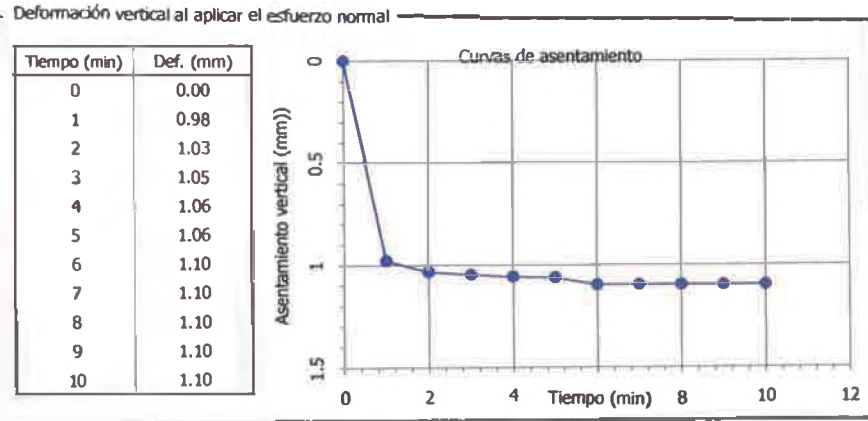
Esfuerzo Normal : 0.50 kg/cm²

1 de 3

Características del espécimen
 Velocidad : 0.50 mm/min
 Estado : Remoldeado
 Condición : Sin saturar
 Humedad : 2.5 %
 Densidad seca : 1.97 g/cm³

Etapa inicial del ensayo
 Humedad : 2.5 %
 Densidad seca : 1.97 g/cm³

Etapa final del ensayo
 Humedad : 2.5 %
 Densidad seca : 1.98 g/cm³



ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-2

Solicitante : COMPAÑIA MINERA ATACCOCHA S.A.A.
 Proyecto : Crecimiento del Dique de Relaves Atacocha

Ubicación : Pasco, Peru

Procedencia : Cantera Enrocado

Muestra : M - 2

Profundidad (m) : 2.00

Esfuerzo Normal : 0.50 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Tiempo (min)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Def. Tang. (%)	Def. Tang. (mm)	Esf. de corte (kg/cm ²)
0	1.10	0.00	0.00	0.00	35	0.00	-5.23	16.92	0.82
1	1.15	0.56	0.09	0.11	36	0.18	-5.28	17.42	0.83
2	1.14	0.97	0.16	0.18	37	0.37	-5.53	17.95	0.81
3	1.07	1.58	0.26	0.27	38	0.81	-5.68	18.43	0.81
4	1.02	1.88	0.31	0.30	39	0.80	-5.79	19.01	0.80
5	0.95	2.25	0.38	0.35	40	0.79	-5.91	19.40	0.79
6	0.95	2.27	0.38	0.34	41	0.76	-6.02	19.96	0.76
7	0.84	2.66	0.44	0.39	42	0.76	-6.11	20.42	0.76
8	0.68	3.31	0.55	0.41	43	0.74	-6.20	20.93	0.74
9	0.62	3.60	0.60	0.43	44	0.74	-6.28	21.41	0.74
10	0.46	4.19	0.70	0.48	45	0.73	-6.38	21.94	0.73
11	0.22	4.73	0.79	0.51	46	0.73	-6.48	22.40	0.73
12	0.01	5.23	0.87	0.56	47	0.70	-6.58	23.07	0.70
13	-0.24	5.74	0.96	0.58	48	0.69	-6.65	22.42	0.69
14	-0.48	6.27	1.05	0.60	49	0.68	-6.74	23.93	0.68
15	-0.70	6.79	1.13	0.64	50	0.70	-6.82	24.43	0.70
16	-0.99	7.32	1.22	0.63	51	0.68	-6.92	24.95	0.68
17	-1.28	7.84	1.31	0.66	52	0.67	-6.99	25.43	0.67
18	-1.58	8.36	1.39	0.66	53	0.67	-7.04	25.92	0.67
19	-1.84	8.88	1.48	0.70	54	0.67	-7.10	26.28	0.67
20	-2.10	9.38	1.56	0.71	55	0.66	-7.17	26.95	0.66
21	-2.30	9.91	1.65	0.75	56	0.66	-7.24	27.45	0.65
22	-2.51	10.40	1.73	0.77	57	0.64	-7.30	27.95	0.64
23	-2.69	10.90	1.82	0.80	58	0.65	-7.35	28.47	0.65
24	-2.88	11.39	1.90	0.82	59	0.63	-7.40	28.97	0.63
25	-3.14	11.91	1.99	0.83	60	0.64	-7.44	29.42	0.64
26	-3.36	12.40	2.07	0.85	61	0.61	-7.49	29.97	0.61
27	-3.62	12.91	2.15	0.85	62	0.63	-7.52	30.43	0.63
28	-3.82	13.40	2.23	0.87	63	0.61	-7.57	30.94	0.61
29	-4.03	13.92	2.32	0.89	64	0.59	-7.60	31.43	0.59
30	-4.29	14.46	2.41	0.87	65	0.60	-7.64	31.96	0.60
31	-4.49	14.93	2.49	0.87	66	0.59	-7.67	32.46	0.59
32	-4.68	15.46	2.58	0.87	67	0.58	-7.69	33.46	0.58
33	-4.87	15.91	2.65	0.85	68	0.57	-7.72	33.97	0.57
34	-5.06	16.42	2.74	0.84	69	0.58	-7.76	33.99	0.58
35	-5.23	16.92	2.82	0.82	70	0.58	-7.82	34.48	0.58

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA
M-2

Solicitante : COMPAÑÍA MINERA ATACCOCHA S.A.A.
Proyecto : Crecimiento del Dique de Relaves Atacocha

Fecha : Julio, 2008

Ubicación : Pasco, Perú

Procedencia : Cantera Enrocado

Muestra : M - 2

Profundidad (m) : 2.00

Esfuerzo Normal : 0.50 kg/cm²

3 de 3

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
70	-7.82	34.48	5.75	0.58	105	-8.71	52.91	8.82	0.49
71	-7.85	35.02	5.84	0.55	106	-8.74	53.41	8.90	0.49
72	-7.88	35.47	5.91	0.55	107	-8.73	53.90	8.98	0.49
73	-7.89	35.98	6.00	0.56	108	-8.78	54.42	9.07	0.50
74	-7.93	36.48	6.08	0.56	109	-8.79	54.91	9.15	0.50
75	-7.98	37.02	6.17	0.56	110	-8.79	55.40	9.23	0.50
76	-8.02	37.49	6.25	0.56	111	-8.81	55.91	9.32	0.50
77	-8.06	38.03	6.34	0.56	112	-8.82	56.43	9.40	0.50
78	-8.13	38.48	6.41	0.56	113	-8.85	56.89	9.48	0.50
79	-8.16	39.00	6.50	0.55	114	-8.73	57.41	9.57	0.49
80	-8.19	39.52	6.59	0.56	115	-8.91	57.92	9.65	0.50
81	-8.24	40.03	6.67	0.55	116	-8.96	58.44	9.74	0.49
82	-8.29	40.54	6.76	0.54	117	-8.93	58.89	9.81	0.49
83	-8.34	41.05	6.84	0.54	118	-8.98	59.42	9.90	0.49
84	-8.35	41.51	6.92	0.54	119	-9.00	59.94	9.99	0.49
85	-8.39	42.11	7.02	0.54	120	-8.98	60.43	10.07	0.49
86	-8.40	42.49	7.08	0.53	121	-8.97	60.94	10.16	0.49
87	-8.42	43.05	7.17	0.50	122	-8.99	59.92	9.99	0.49
88	-8.49	43.53	7.25	0.51	123	-8.99	61.95	10.32	0.49
89	-8.47	44.04	7.34	0.49	124	-9.02	62.46	10.41	0.49
90	-8.50	44.53	7.42	0.50	125	-9.05	62.93	10.49	0.50
91	-8.50	45.06	7.51	0.50	126	-9.07	63.44	10.57	0.50
92	-8.53	45.55	7.59	0.50	127	-9.10	63.92	10.65	0.50
93	-8.56	46.06	7.68	0.50	128	-9.09	64.42	10.74	0.50
94	-8.58	46.54	7.76	0.51	129	-9.11	64.94	10.82	0.51
95	-8.63	47.17	7.86	0.51	130	-9.12	65.46	10.91	0.51
96	-8.66	47.58	7.93	0.50	131	-9.15	65.98	11.00	0.50
97	-8.71	48.20	8.03	0.51	132	-9.18	66.48	11.08	0.51
98	-8.74	48.63	8.11	0.51	133	-9.21	66.98	11.16	0.51
99	-8.71	49.75	8.29	0.49	134	-9.25	67.48	11.25	0.49
100	-8.67	50.45	8.41	0.49	135	-9.26	67.95	11.33	0.49
101	-8.69	50.93	8.49	0.48	136	-9.29	68.47	11.41	0.48
102	-8.70	51.43	8.57	0.49	137	-9.34	68.97	11.50	0.49
103	-8.72	51.92	8.65	0.49	138	-9.33	69.46	11.58	0.49
104	-8.72	52.42	8.74	0.49	139	-9.32	69.95	11.66	0.49
105	-8.71	52.91	8.82	0.49	140	-9.35	70.48	11.75	0.49

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-2

Solicitante : COMPAÑÍA MINERA ATACOCHA S.A.A.
Proyecto : Crecimiento del Dique de Relaves Atacocha

Fecha : Julio, 2008

Ubicación : Pasco, Perú

Sondaje : Cantera Enrocado

Muestra : M - 2

Profundidad (m) : 2.00

Esfuerzo Normal : 1.00 kg/cm²

1 de 3

Características del espécimen

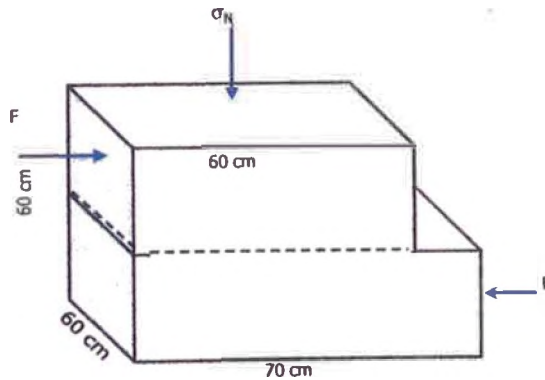
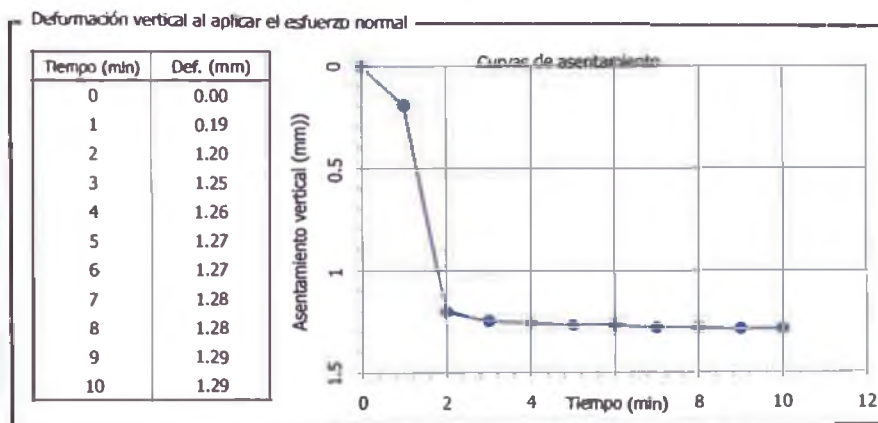
Velocidad : 0.50 mm/min
Estado : Remoldeado
Condición : Sin saturar
Humedad : 2.5 %
Densidad seca : 1.97 g/cm³

Etapa inicial del ensayo

Humedad : 2.5 %
Densidad seca : 1.97 g/cm³

Etapa final del ensayo

Humedad : 2.5 %
Densidad seca : 1.95 g/cm³



ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA M-2

Solicitante : COMPAÑÍA MINERA ATACOCHA S.A.A.
 Proyecto : Creclimiento del Dique de Relaves Atacocha

Fecha : Julio, 2008

Ubicación : Pasco, Perú

Sondaje : Cantera Enrocado

Muestra : M - 2

Profundidad (m) : 2.00

Esfuerzo Normal : 2.00 kg/cm²

1 de 3

Características del espécimen

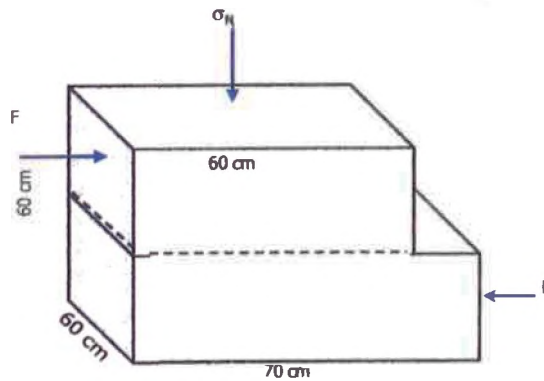
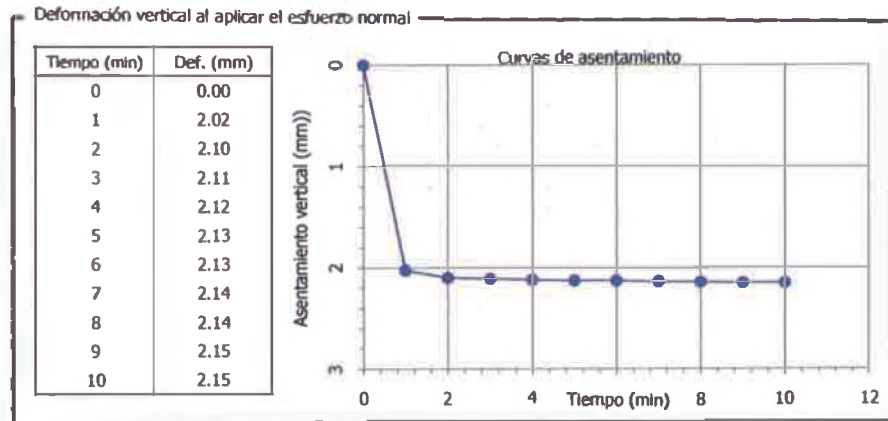
Velocidad : 0.50 mm/min
 Estado : Remoldeado
 Condición : Sin saturar
 Humedad : 2.5 %
 Densidad seca : 1.97 g/cm³

Etapas Inicial del ensayo

Humedad : 2.5 %
 Densidad seca : 1.98 g/cm³

Etapas final del ensayo

Humedad : 2.5 %
 Densidad seca : 1.96 g/cm³



ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA
M-2

Solicitante : COMPAÑÍA MINERA ATACOCHA S.A.A.
Proyecto : Crecimiento del Dique de Relaves Atacocha

Fecha : Julio, 2008

Ubicación : Pasco, Perú

Sondaje : Cantera Enrocado

Muestra : M - 2

Profundidad (m) : 2.00

Esfuerzo Normal : 2.00 kg/cm²

3 de 3

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
70	-3.22	35.26	5.88	2.16	105	-3.84	52.64	8.77	1.89
71	-3.26	35.82	5.97	2.09	106	-3.86	53.11	8.85	1.96
72	-3.32	36.27	6.04	2.06	107	-3.86	53.62	8.94	1.92
73	-3.37	36.79	6.13	2.00	108	-3.85	53.96	8.99	1.93
74	-3.42	37.26	6.21	1.97	109	-3.87	54.58	9.10	1.93
75	-3.40	37.88	6.31	2.01	110	-3.88	55.09	9.18	1.95
76	-3.41	38.23	6.37	2.03	111	-3.90	55.55	9.26	1.95
77	-3.43	38.81	6.47	1.99	112	-3.94	56.11	9.35	1.90
78	-3.46	39.36	6.56	2.01	113	-3.93	56.60	9.43	1.89
79	-3.45	39.80	6.63	1.99	114	-3.93	57.03	9.51	1.89
80	-3.48	40.31	6.72	2.04	115	-3.95	57.59	9.60	1.91
81	-3.50	40.82	6.80	1.97	116	-3.99	58.16	9.69	1.91
82	-3.51	41.32	6.89	1.98	117	-4.01	58.58	9.76	1.87
83	-3.54	41.80	6.97	2.01	118	-4.06	59.11	9.85	1.87
84	-3.54	42.33	7.06	2.01	119	-4.03	59.56	9.93	1.93
85	-3.62	42.79	7.13	1.92	120	-4.05	60.06	10.01	1.93
86	-3.60	43.30	7.22	1.95	121	-4.07	60.55	10.09	1.93
87	-3.63	43.82	7.30	1.96	122	-4.08	61.05	10.18	1.92
88	-3.66	44.43	7.41	1.95	123	-4.10	61.50	10.25	1.96
89	-3.68	44.91	7.48	1.91	124	-4.12	62.06	10.34	1.96
90	-3.70	45.39	7.57	1.93	125	-4.13	62.51	10.42	1.91
91	-3.72	45.92	7.65	1.92	126	-4.16	63.07	10.51	1.90
92	-3.69	46.43	7.74	1.88	127	-4.16	63.54	10.59	1.89
93	-3.69	47.06	7.84	1.86	128	-4.16	64.00	10.67	1.90
94	-3.68	47.61	7.94	1.89	129	-4.18	64.55	10.76	1.89
95	-3.70	48.12	8.02	1.87	130	-4.21	65.06	10.84	1.91
96	-3.73	48.70	8.12	1.87	131	-4.21	65.53	10.92	1.90
97	-3.75	49.13	8.19	1.88	132	-4.22	66.09	11.01	1.88
98	-3.76	49.61	8.27	1.89	133	-4.24	66.54	11.09	1.95
99	-3.75	49.91	8.32	1.90	134	-4.26	67.02	11.17	1.89
100	-3.78	50.59	8.43	1.93	135	-4.28	67.52	11.25	1.88
101	-3.82	51.12	8.52	1.96	136	-4.32	68.01	11.34	1.86
102	-3.82	51.60	8.60	1.95	137	-4.30	68.54	11.42	1.88
103	-3.83	52.12	8.69	1.91	138	-4.35	69.01	11.50	1.86
104	-3.83	52.43	8.74	1.92	139	-4.33	69.50	11.58	1.89
105	-3.84	52.64	8.77	1.89	140	-4.34	69.98	11.66	1.85

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
 Proyecto : Recreimiento de Presa de Relaves Andaychagua Alto

Fecha : Agosto, 2008

Ubicación : Yaull, Junín

Procedencia : Desmonte de Mina

Material : M-3 (Mat. < 4")

Profundidad (m) : —

Página : 1 de 9

Esfuerzo Normal : 0.50 kg/cm²

Características del espécimen

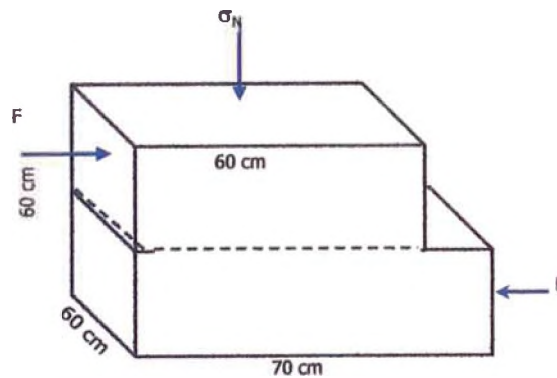
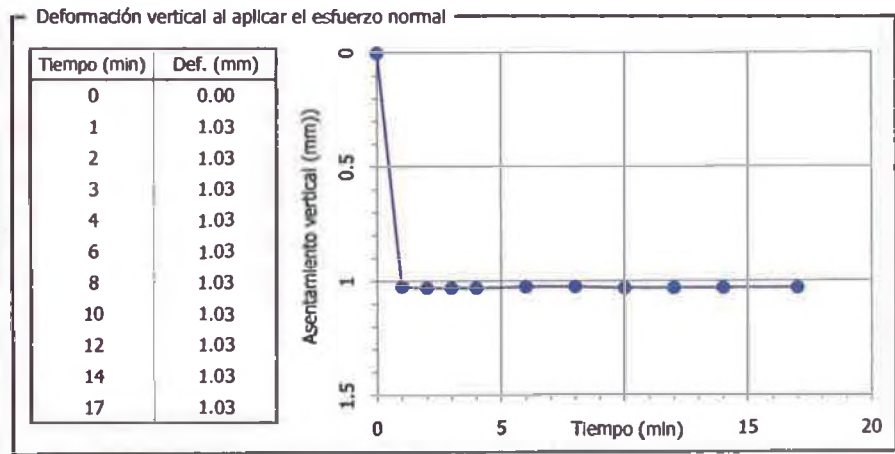
Velocidad : 0.50
 Estado : Remoldeado
 Condición : Sin saturar
 Humedad : 5.9
 Densidad seca : 2.30 g/cm³

Etapas inicial del ensayo

Humedad : 5.9%
 Densidad seca : 2.29 g/cm³

Etapas final del ensayo

Humedad : 5.9%
 Densidad seca : 2.29 g/cm³



ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
Proyecto : Recreimiento de Presa de Relaves Andaychagua Alto

Fecha : Agosto, 2008

Ubicación : Yauil, Junín

Procedencia : Desmante de Mina

Muestra : M-3 (Mat. < 4")

Profundidad (m) : ---

Página : 2 de 9

Esfuerzo Normal : 0.50 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
0	1.03	0.00	0.00	0.00	35	2.82	17.63	2.94	0.62
1	1.06	0.51	0.08	0.10	36	2.95	18.13	3.02	0.62
2	1.11	1.01	0.17	0.15	37	3.04	18.64	3.11	0.62
3	1.10	1.51	0.25	0.21	38	3.11	19.14	3.19	0.63
4	1.08	2.01	0.33	0.25	39	3.18	19.65	3.27	0.63
5	1.00	2.50	0.42	0.29	40	3.26	20.15	3.36	0.63
6	0.90	2.99	0.50	0.31	41	3.34	20.65	3.44	0.65
7	0.80	3.45	0.57	0.33	42	3.41	21.15	3.53	0.64
8	0.91	3.98	0.66	0.35	43	3.48	21.64	3.61	0.65
9	1.00	4.49	0.75	0.37	44	3.57	22.16	3.69	0.66
10	1.09	4.98	0.83	0.38	45	3.63	22.68	3.78	0.65
11	1.18	5.48	0.91	0.39	46	3.70	23.16	3.86	0.66
12	1.28	5.99	1.00	0.42	47	3.77	23.67	3.94	0.66
13	1.41	6.50	1.08	0.42	48	3.85	24.16	4.03	0.66
14	1.54	7.00	1.17	0.43	49	3.94	24.68	4.11	0.66
15	1.65	7.50	1.25	0.44	50	4.02	25.17	4.20	0.66
16	1.71	8.01	1.34	0.46	51	4.09	25.67	4.28	0.66
17	1.74	8.53	1.42	0.46	52	4.17	26.17	4.36	0.66
18	1.77	9.03	1.51	0.49	53	4.24	26.68	4.45	0.67
19	1.82	9.54	1.59	0.50	54	4.30	27.18	4.53	0.66
20	1.92	10.06	1.68	0.50	55	4.38	27.68	4.61	0.67
21	2.03	10.56	1.76	0.52	56	4.44	28.18	4.70	0.67
22	2.12	11.07	1.85	0.51	57	4.50	28.65	4.77	0.68
23	2.17	11.57	1.93	0.54	58	4.57	29.18	4.86	0.66
24	2.25	12.08	2.01	0.54	59	4.64	29.68	4.95	0.66
25	2.34	12.58	2.10	0.55	60	4.69	30.17	5.03	0.68
26	2.37	13.12	2.19	0.56	61	4.77	30.68	5.11	0.66
27	2.41	13.63	2.27	0.57	62	4.82	31.17	5.20	0.68
28	2.41	14.13	2.35	0.58	63	4.90	31.68	5.28	0.67
29	2.44	14.62	2.44	0.58	64	4.96	32.18	5.36	0.66
30	2.52	15.11	2.52	0.61	65	5.02	32.67	5.44	0.69
31	2.67	15.63	2.61	0.59	66	5.09	33.18	5.53	0.69
32	2.70	16.12	2.69	0.60	67	5.15	33.68	5.61	0.67
33	2.78	16.66	2.78	0.60	68	5.22	34.17	5.69	0.69
34	2.82	17.14	2.86	0.62	69	5.29	34.67	5.78	0.68
35	2.82	17.63	2.94	0.62	70	5.36	35.17	5.86	0.70

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA
M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
Proyecto : Recreimiento de Presa de Relaves Andaychagua Alto

Fecha : Agosto, 2008

Ubicación : Yauil, Junín

Procedencia : Desmonte de Mina Muestra : M-3 (Mat. < 4") Profundidad (m) : — Página : 3 de 9

Esfuerzo Normal : 0.50 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
70	5.36	35.17	5.86	0.70	105	7.21	54.81	9.14	0.67
71	5.41	35.65	5.94	0.69	106	7.25	55.32	9.22	0.67
72	5.48	36.17	6.03	0.69					
73	5.54	36.68	6.11	0.67					
74	5.60	37.20	6.20	0.69					
75	5.65	37.67	6.28	0.69					
76	5.71	38.17	6.36	0.69					
77	5.75	38.62	6.44	0.68					
78	5.83	39.17	6.53	0.70					
79	5.89	39.67	6.61	0.69					
80	5.95	40.14	6.69	0.70					
81	6.01	40.67	6.78	0.70					
82	6.07	41.17	6.86	0.69					
83	6.13	41.68	6.95	0.69					
84	6.18	43.95	7.32	0.68					
85	6.21	44.27	7.38	0.66					
86	6.28	44.80	7.47	0.68					
87	6.36	45.74	7.62	0.70					
88	6.41	46.29	7.72	0.69					
89	6.46	46.80	7.80	0.67					
90	6.51	47.29	7.88	0.69					
91	6.54	47.76	7.96	0.70					
92	6.60	48.29	8.05	0.68					
93	6.65	48.77	8.13	0.69					
94	6.70	49.30	8.22	0.68					
95	6.76	49.80	8.30	0.69					
96	6.80	50.30	8.38	0.68					
97	6.84	50.78	8.46	0.66					
98	6.89	51.29	8.55	0.68					
99	6.93	51.78	8.63	0.67					
100	6.98	52.29	8.72	0.66					
101	7.03	52.80	8.80	0.67					
102	7.07	53.31	8.88	0.69					
103	7.12	53.80	8.97	0.67					
104	7.16	54.30	9.05	0.68					
105	7.21	54.81	9.14	0.67					

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
 Proyecto : Recreimiento de Presa de Relaves Andaychagua Alto

Fecha : Agosto, 2008

Ubicación : Yaull, Junín

Sondaje : Desmonte de Mina

Muestra : M-3 (Mat. < 4")

Profundidad (m) : —

Página : 4 de 9

Esfuerzo Normal : 1.00 kg/cm²

Características del espécimen

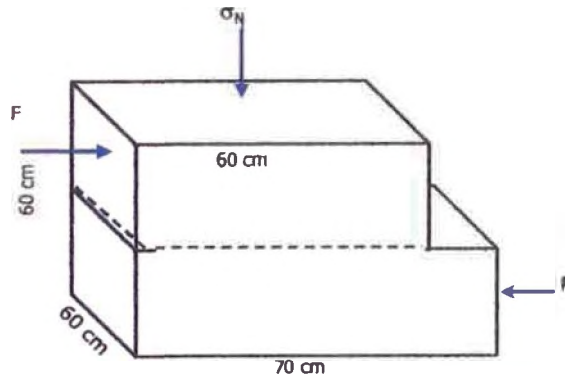
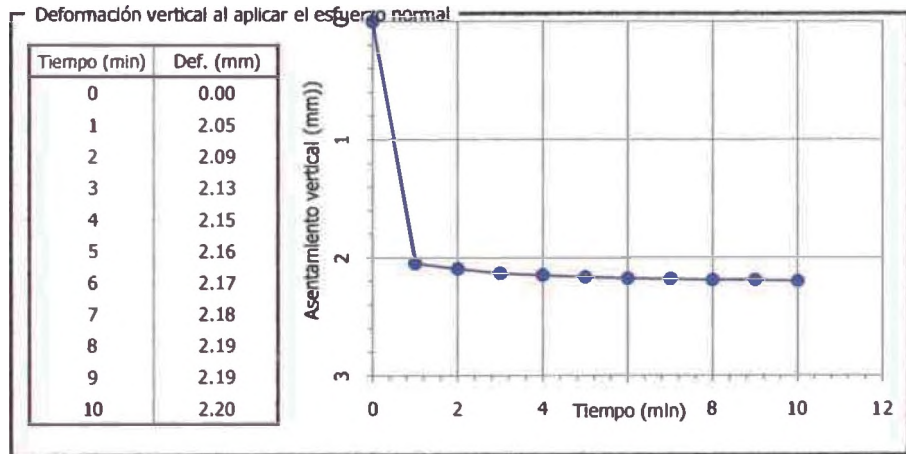
Velocidad : 0.50 mm/min
 Estado : Remoldeado
 Condición : Sin saturar
 Humedad : 5.90%
 Densidad seca : 2.30 g/cm³

Etapas inicial del ensayo

Humedad : 5.90%
 Densidad seca : 2.29 g/cm³

Etapas final del ensayo

Humedad : 5.90%
 Densidad seca : 2.29 g/cm³



ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
Proyecto : Recreimiento de Presa de Relaves Andaychagua Alto

Fecha : Agosto, 2008

Ubicación : Yaull, Junín

Sondaje : Desmonte de Mina

Muestra : M-3 (Mat. < 4")

Profundidad (m) : —

Página : 5 de 9

Esfuerzo Normal : 1.00 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
0	2.20	0.00	0.00	0.00	35	2.56	17.63	2.94	1.04
1	2.21	0.50	0.08	0.15	36	2.59	18.13	3.02	1.06
2	2.26	0.99	0.17	0.33	37	2.62	18.62	3.10	1.07
3	2.26	1.52	0.25	0.46	38	2.73	19.12	3.19	1.07
4	2.22	2.03	0.34	0.57	39	2.74	19.60	3.27	1.09
5	2.15	2.53	0.42	0.64	40	2.75	20.10	3.35	1.10
6	2.05	3.03	0.51	0.70	41	2.74	20.58	3.43	1.09
7	1.93	3.53	0.59	0.78	42	2.77	21.11	3.52	1.09
8	1.82	4.04	0.67	0.79	43	2.78	21.61	3.60	1.11
9	1.69	4.54	0.76	0.81	44	2.79	22.10	3.68	1.12
10	1.54	5.05	0.84	0.86	45	2.81	22.61	3.77	1.12
11	1.39	5.57	0.93	0.84	46	2.83	23.11	3.85	1.10
12	1.27	6.06	1.01	0.86	47	2.84	23.60	3.93	1.13
13	1.45	6.57	1.09	0.87	48	2.85	24.08	4.01	1.13
14	1.57	7.07	1.18	0.88	49	2.86	24.60	4.10	1.13
15	1.67	7.58	1.26	0.89	50	2.86	25.06	4.18	1.15
16	1.72	8.09	1.35	0.88	51	2.85	25.61	4.27	1.12
17	1.79	8.59	1.43	0.89	52	2.83	26.09	4.35	1.14
18	1.87	9.10	1.52	0.91	53	2.82	26.60	4.43	1.15
19	1.93	9.60	1.60	0.93	54	2.80	27.10	4.52	1.13
20	1.98	10.11	1.68	0.93	55	2.79	27.53	4.59	1.14
21	2.04	10.60	1.77	0.94	56	2.81	28.10	4.68	1.14
22	2.10	11.14	1.86	0.94	57	2.79	28.60	4.77	1.15
23	2.14	11.61	1.94	0.95	58	2.77	29.10	4.85	1.15
24	2.18	12.10	2.02	0.97	59	2.75	29.60	4.93	1.16
25	2.24	12.61	2.10	0.98	60	2.88	30.08	5.01	1.15
26	2.29	13.11	2.19	0.98	61	2.96	30.60	5.10	1.15
27	2.33	13.62	2.27	0.98	62	3.03	31.10	5.18	1.14
28	2.43	14.12	2.35	0.98	63	3.08	31.60	5.27	1.14
29	2.43	14.61	2.44	0.99	64	3.16	32.10	5.35	1.15
30	2.45	15.13	2.52	1.01	65	3.23	32.60	5.43	1.13
31	2.47	15.63	2.60	1.02	66	3.31	33.09	5.52	1.15
32	2.49	16.13	2.69	1.03	67	3.37	33.59	5.60	1.12
33	2.50	16.64	2.77	1.04	68	3.45	34.08	5.68	1.14
34	2.54	17.13	2.86	1.04	69	3.51	34.59	5.76	1.12
35	2.56	17.63	2.94	1.04	70	3.58	35.08	5.85	1.12

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
Proyecto : Recreclmento de Presa de Relaves Andaychagua Alto

Fecha : Agosto, 2008

Ubicación : Yauil, Junín

Sondaje : Desmonte de Mina

Muestra : M-3 (Mat. < 4")

Profundidad (m) : —

Página : 6 de 9

Esfuerzo Normal : 1.00 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
70	3.58	35.08	5.85	1.12	105	5.02	56.03	9.34	0.98
71	3.63	35.58	5.93	1.10	106	5.05	56.53	9.42	0.99
72	3.70	36.08	6.01	1.13	107	5.07	57.03	9.50	0.97
73	3.75	36.57	6.10	1.11	108	5.12	57.53	9.59	0.98
74	3.81	37.07	6.18	1.10	109	5.13	58.04	9.67	0.98
75	3.87	37.57	6.26	1.09	110	5.16	58.54	9.76	0.97
76	3.93	38.07	6.35	1.09	111	5.18	59.04	9.84	0.98
77	3.98	38.57	6.43	1.09	112	5.20	59.48	9.91	0.96
78	4.06	39.07	6.51	1.10	113	5.21	60.05	10.01	0.96
79	4.12	39.57	6.60	1.10	114	5.23	60.53	10.09	0.98
80	4.15	40.06	6.68	1.06	115	5.26	61.06	10.18	0.97
81	4.19	40.55	6.76	1.08	116	5.28	61.55	10.26	0.95
82	4.23	41.09	6.85	1.07	117	5.30	62.05	10.34	0.97
83	4.27	41.57	6.93	1.06	118	5.33	62.55	10.42	0.94
84	4.30	42.08	7.01	1.06	119	5.35	63.05	10.51	0.95
85	4.32	42.58	7.10	1.05	120	5.37	63.55	10.59	0.96
86	4.35	43.07	7.18	1.04	121	5.40	64.05	10.67	0.97
87	4.42	46.99	7.83	1.06	122	5.42	64.56	10.76	0.93
88	4.44	47.45	7.91	1.03	123	5.44	64.88	10.81	0.95
89	4.49	48.04	8.01	1.01	124	5.45	65.55	10.92	0.95
90	4.50	48.46	8.08	1.03	125	5.48	66.05	11.01	0.95
91	4.54	49.06	8.18	1.01	126	5.49	66.55	11.09	0.96
92	4.58	49.55	8.26	1.02	127	5.50	67.05	11.18	0.95
93	4.61	50.05	8.34	1.01	128	5.52	67.55	11.26	0.95
94	4.64	50.55	8.43	1.00	129	5.55	68.06	11.34	0.97
95	4.75	51.11	8.52	0.96	130	5.57	68.53	11.42	0.97
96	4.77	51.52	8.59	0.99	131	5.58	69.05	11.51	0.96
97	4.80	52.05	8.67	1.01	132	5.59	69.55	11.59	0.95
98	4.84	52.53	8.75	1.01	133	5.59	70.05	11.68	0.94
99	4.86	53.03	8.84	1.00	134	5.59	70.56	11.76	0.92
100	4.88	53.53	8.92	0.99	135	5.61	71.05	11.84	0.95
101	4.91	54.02	9.00	0.99	136	5.63	71.56	11.93	0.93
102	4.95	54.52	9.09	0.99	137	5.64	72.05	12.01	0.95
103	4.97	55.02	9.17	0.98	138	5.64	72.56	12.09	0.93
104	5.00	55.53	9.25	0.98	139	5.65	73.06	12.18	0.92
105	5.02	56.03	9.34	0.98	140	5.68	73.56	12.26	0.92

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
 Proyecto : Recreimiento de Presa de Relaves Andaychagua Alto

Fecha : Agosto, 2008

Ubicación : Yauil, Junín

Sondaje : Desmonte de Mina

Muestra : M-3 (Mat. < 4")

Profundidad (m) : —

Página : 7 de 9

Esfuerzo Normal : 2.00 kg/cm²

Características del espécimen

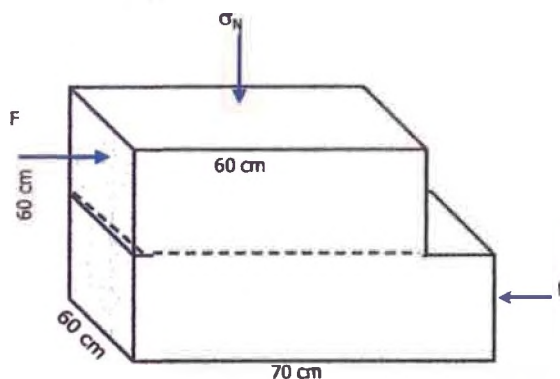
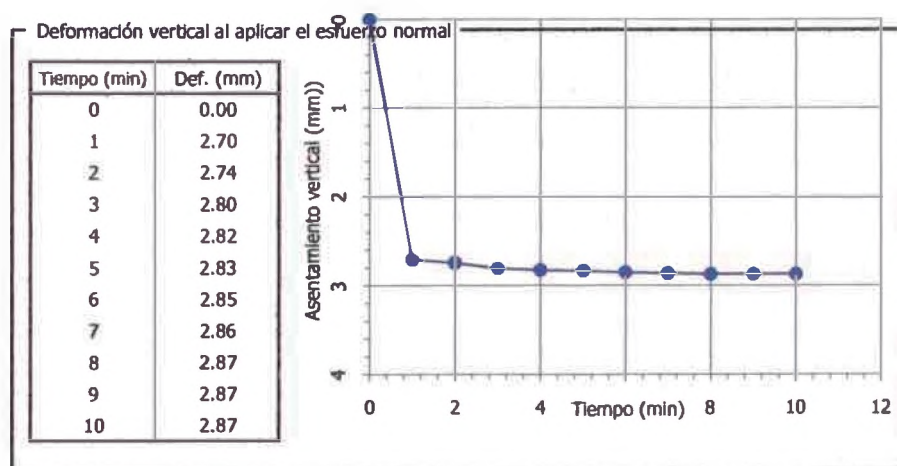
Velocidad : 0.50 mm/min
 Estado : Remoldeado
 Condición : Sin saturar
 Humedad : 5.90%
 Densidad seca : 2.30 g/cm³

Etapa Inicial del ensayo

Humedad : 5.90%
 Densidad seca : 2.29 g/cm³

Etapa final del ensayo

Humedad : 5.90%
 Densidad seca : 2.29 g/cm³



ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
Proyecto : Recreimiento de Presa de Relaves Andaychagua Alto
Ubicación : Yauli, Junín

Fecha : Agosto, 2008

Sondaje : Desmonte de Mina Muestra : M-3 (Mat. < 4") Profundidad (m) : — Página : 8 de 9

Esfuerzo Normal : 2.00 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
0	2.87	0.00	0.00	0.00	35	2.34	17.69	2.95	1.79
1	2.93	0.48	0.08	0.26	36	2.38	18.21	3.04	1.79
2	2.96	1.03	0.17	0.55	37	2.41	18.71	3.12	1.80
3	2.95	1.55	0.26	0.74	38	2.46	19.22	3.20	1.82
4	2.93	2.07	0.34	0.89	39	2.50	19.73	3.29	1.85
5	2.91	2.57	0.43	1.01	40	2.53	20.22	3.37	1.86
6	2.86	3.08	0.51	1.08	41	2.59	20.73	3.46	1.87
7	2.79	3.59	0.60	1.15	42	2.60	21.22	3.54	1.90
8	2.72	4.09	0.68	1.21	43	2.61	21.76	3.63	1.90
9	2.65	4.60	0.77	1.25	44	2.63	22.27	3.71	1.92
10	2.56	5.10	0.85	1.29	45	2.65	22.75	3.79	1.94
11	2.48	5.60	0.93	1.31	46	2.68	23.25	3.87	1.95
12	2.40	6.10	1.02	1.34	47	2.70	23.75	3.96	1.96
13	2.30	6.60	1.10	1.37	48	2.72	24.26	4.04	1.96
14	2.21	7.10	1.18	1.39	49	2.74	24.76	4.13	2.01
15	2.12	7.60	1.27	1.42	50	2.75	25.27	4.21	1.99
16	2.03	8.10	1.35	1.43	51	2.77	25.76	4.29	2.01
17	1.92	8.67	1.44	1.46	52	2.77	26.28	4.38	2.02
18	1.85	9.10	1.52	1.49	53	2.77	26.77	4.46	2.02
19	1.77	9.61	1.60	1.49	54	2.77	27.27	4.54	2.03
20	1.69	10.11	1.68	1.52	55	2.76	27.80	4.63	2.04
21	1.85	10.62	1.77	1.54	56	2.76	28.27	4.71	2.05
22	1.90	11.12	1.85	1.55	57	2.75	28.76	4.79	2.07
23	1.95	11.62	1.94	1.57	58	2.75	29.27	4.88	2.06
24	1.99	12.13	2.02	1.58	59	2.75	29.78	4.96	2.06
25	2.03	12.64	2.11	1.60	60	2.75	30.27	5.04	2.07
26	2.06	13.14	2.19	1.62	61	2.75	30.77	5.13	2.08
27	2.10	13.66	2.28	1.64	62	2.75	31.29	5.21	2.08
28	2.12	14.16	2.36	1.65	63	2.74	31.76	5.29	2.08
29	2.15	14.66	2.44	1.67	64	2.73	32.25	5.37	2.06
30	2.19	15.16	2.53	1.69	65	2.72	32.75	5.46	2.06
31	2.22	15.68	2.61	1.71	66	2.71	33.25	5.54	2.04
32	2.25	16.18	2.70	1.74	67	2.70	33.76	5.63	2.05
33	2.28	16.71	2.79	1.75	68	2.70	34.25	5.71	2.06
34	2.31	17.18	2.86	1.77	69	2.68	34.73	5.79	2.05
35	2.34	17.69	2.95	1.79	70	2.67	35.25	5.88	2.04

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-3

Solicitante : ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C.
Proyecto : Recreimiento de Presa de Relaves Andaychagua Alto

Fecha : Agosto, 2008

Ubicación : Yauli, Junín

Sondaje : Desmonte de Mina

Muestra : M-3 (Mat. < 4")

Profundidad (m) : —

Página : 9 de 9

Esfuerzo Normal : 2.00 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
70	2.67	35.25	5.88	2.04	105	2.36	56.85	9.47	1.92
71	2.66	35.74	5.96	2.06	106	2.38	57.36	9.56	1.91
72	2.64	36.24	6.04	2.02	107	2.39	57.86	9.64	1.89
73	2.63	36.73	6.12	2.00	108	2.42	58.36	9.73	1.91
74	2.62	37.23	6.20	2.01	109	2.43	58.86	9.81	1.93
75	2.60	37.73	6.29	1.99	110	2.45	59.36	9.89	1.92
76	2.58	38.21	6.37	2.03	111	2.46	59.86	9.98	1.90
77	2.56	38.70	6.45	2.02	112	2.47	60.37	10.06	1.87
78	2.54	39.21	6.54	2.03	113	2.48	60.86	10.14	1.90
79	2.52	39.74	6.62	1.98	114	2.50	61.36	10.23	1.87
80	2.51	40.21	6.70	1.99	115	2.53	61.87	10.31	1.91
81	2.49	40.70	6.78	2.02	116	2.53	62.36	10.39	1.89
82	2.48	41.20	6.87	2.03	117	2.56	62.87	10.48	1.90
83	2.46	41.71	6.95	1.99	118	2.58	63.37	10.56	1.88
84	2.45	42.19	7.03	1.99	119	2.59	63.87	10.64	1.91
85	2.43	42.70	7.12	2.00	120	2.60	64.37	10.73	1.88
86	2.42	43.19	7.20	2.01	121	2.61	64.87	10.81	1.89
87	2.39	47.72	7.95	1.96	122	2.63	65.38	10.90	1.89
88	2.39	48.31	8.05	1.95	123	2.63	65.88	10.98	1.87
89	2.38	48.82	8.14	1.96	124	2.64	66.38	11.06	1.89
90	2.37	49.32	8.22	1.98	125	2.66	66.83	11.14	1.86
91	2.35	49.81	8.30	1.98	126	2.66	67.43	11.24	1.88
92	2.34	50.32	8.39	1.97	127	2.66	67.89	11.32	1.87
93	2.32	50.79	8.46	1.98	128	2.67	68.39	11.40	1.87
94	2.31	51.31	8.55	1.96	129	2.67	68.90	11.48	1.87
95	2.29	51.81	8.64	1.97	130	2.68	69.40	11.57	1.87
96	2.27	52.29	8.72	1.96	131	2.69	69.90	11.65	1.86
97	2.26	52.81	8.80	1.93	132	2.69	70.40	11.73	1.85
98	2.24	53.32	8.89	1.93	133	2.70	70.90	11.82	1.84
99	2.24	53.82	8.97	1.92	134	2.70	71.40	11.90	1.83
100	2.23	54.30	9.05	1.95	135	2.72	71.91	11.98	1.84
101	2.27	54.83	9.14	1.92	136	2.73	72.41	12.07	1.85
102	2.30	55.33	9.22	1.94	137	2.74	72.90	12.15	1.87
103	2.32	55.82	9.30	1.96	138	2.75	73.43	12.24	1.85
104	2.34	56.35	9.39	1.90	139	2.76	73.91	12.32	1.87
105	2.36	56.85	9.47	1.92	140	2.77	74.43	12.41	1.87

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-4

Solicitante : GOLDER ASSOCIATES PERU S. A.
Proyecto : Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación del Molino SAG By Pass Crushing Option 5
Ubicación : Concentradora, Antamina, Ancash

Fecha : Octubre, 2008

Sondaje

Muestra : M-4

Profundidad (m) : —

Esfuerzo Normal : 0.50 kg/cm²

Características del espécimen

Velocidad : 0.50 mm/min
Estado : Remoldeado
Condición : Sin saturar
Humedad : 2.50%
Densidad seca : 1.97 g/cm³

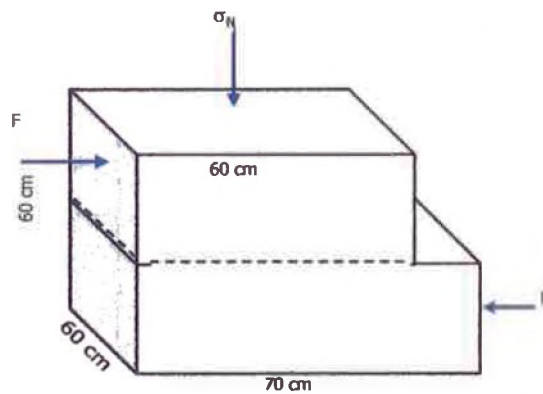
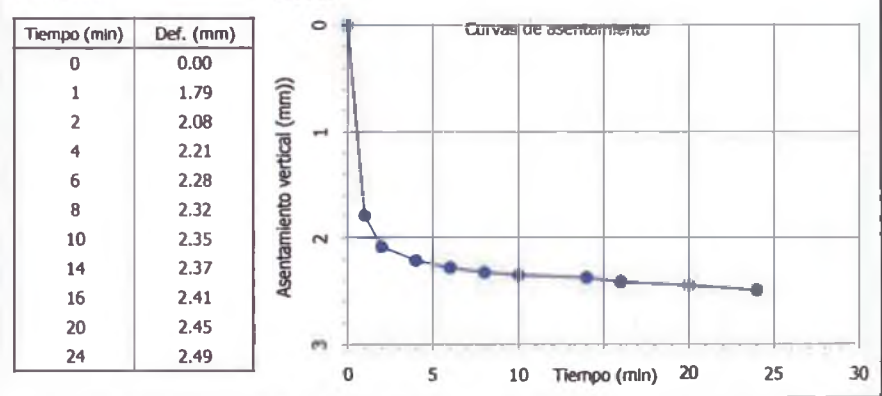
Etapa inicial del ensayo

Humedad : 2.50%
Densidad seca : 1.98 g/cm³

Etapa final del ensayo

Humedad : 2.50%
Densidad seca : 1.98 g/cm³

Deformación vertical al aplicar el esfuerzo normal



ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-4

Solicitante : GOLDER ASSOCIATES PERU S. A.
 Proyecto : Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación del Molino SAG By Pass Crushing
 Ubicación : Concentradora, Antamina, Ancash
 Fecha : Octubre, 2008

Sondaje : ---
 Muestra : M-4
 Profundidad (m) : ---

Esfuerzo Normal : 0.50 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)			
				Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)
0	2.49	0.00	0.00	4.30	17.37	2.90	0.29
1	2.58	0.47	0.08	4.28	16.86	2.81	0.28
2	2.73	0.93	0.16	4.27	16.37	2.73	0.28
3	2.84	1.40	0.23	4.27	15.86	2.64	0.27
4	2.98	1.88	0.31	4.26	15.36	2.56	0.27
5	3.06	2.35	0.39	4.24	14.86	2.48	0.25
6	3.20	2.84	0.47	4.23	14.38	2.40	0.26
7	3.29	3.33	0.55	4.19	13.85	2.31	0.25
8	3.38	3.80	0.63	4.14	13.36	2.23	0.24
9	3.45	4.31	0.72	4.12	12.85	2.14	0.24
10	3.53	4.81	0.80	4.12	12.37	2.06	0.24
11	3.60	5.30	0.88	4.10	11.88	1.98	0.22
12	3.65	5.79	0.96	4.08	11.33	1.89	0.23
13	3.70	6.30	1.05	4.07	10.83	1.81	0.23
14	3.74	6.79	1.13	4.04	10.34	1.72	0.22
15	3.76	7.33	1.22	4.01	9.83	1.64	0.22
16	3.84	7.82	1.30	3.96	9.33	1.55	0.20
17	3.89	8.33	1.39	3.93	8.83	1.47	0.20
18	3.89	8.83	1.47	3.93	8.33	1.39	0.20
19	3.96	9.33	1.55	3.93	7.82	1.30	0.20
20	4.01	9.83	1.64	3.93	7.33	1.22	0.19
21	4.04	10.34	1.72	4.01	6.79	1.13	0.19
22	4.07	10.83	1.81	4.01	6.30	1.05	0.18
23	4.08	11.33	1.89	4.08	5.79	0.96	0.18
24	4.10	11.88	1.98	4.10	5.30	0.88	0.17
25	4.12	12.37	2.06	4.12	4.81	0.80	0.17
26	4.12	12.85	2.14	4.12	4.31	0.72	0.16
27	4.14	13.36	2.23	4.14	3.80	0.63	0.16
28	4.19	13.85	2.31	4.19	3.33	0.55	0.14
29	4.23	14.38	2.40	4.23	2.84	0.47	0.13
30	4.24	14.86	2.48	4.24	2.35	0.39	0.12
31	4.26	15.36	2.56	4.26	1.88	0.31	0.11
32	4.27	15.86	2.64	4.27	1.40	0.23	0.09
33	4.27	16.37	2.73	4.27	0.93	0.16	0.08
34	4.28	16.86	2.81	4.28	0.47	0.08	0.06
35	4.30	17.37	2.90	4.30	0.00	0.00	0.00
36	4.31	18.87	4.32	4.31	4.30	4.30	4.30
37	4.32	18.87	4.33	4.32	4.30	4.30	4.30
38	4.33	19.38	4.33	4.33	4.30	4.30	4.30
39	4.33	19.87	4.34	4.33	4.30	4.30	4.30
40	4.34	20.37	4.34	4.34	4.30	4.30	4.30
41	4.34	20.88	4.35	4.34	4.30	4.30	4.30
42	4.35	21.42	4.35	4.35	4.30	4.30	4.30
43	4.35	21.88	4.36	4.35	4.30	4.30	4.30
44	4.36	22.41	4.36	4.36	4.30	4.30	4.30
45	4.36	22.89	4.36	4.36	4.30	4.30	4.30
46	4.35	23.39	4.36	4.35	4.30	4.30	4.30
47	4.36	23.88	4.37	4.36	4.30	4.30	4.30
48	4.37	24.39	4.37	4.37	4.30	4.30	4.30
49	4.36	24.88	4.38	4.36	4.30	4.30	4.30
50	4.38	25.37	4.38	4.38	4.30	4.30	4.30
51	4.38	25.88	4.38	4.38	4.30	4.30	4.30
52	4.37	26.39	4.37	4.37	4.30	4.30	4.30
53	4.38	26.90	4.38	4.38	4.30	4.30	4.30
54	4.38	27.42	4.39	4.38	4.30	4.30	4.30
55	4.39	27.92	4.39	4.39	4.30	4.30	4.30
56	4.38	28.42	4.38	4.38	4.30	4.30	4.30
57	4.37	28.91	4.37	4.37	4.30	4.30	4.30
58	4.37	29.44	4.37	4.37	4.30	4.30	4.30
59	4.36	29.92	4.36	4.36	4.30	4.30	4.30
60	4.36	30.41	4.36	4.36	4.30	4.30	4.30
61	4.35	30.90	4.35	4.35	4.30	4.30	4.30
62	4.33	31.42	4.33	4.33	4.30	4.30	4.30
63	4.31	31.91	4.31	4.31	4.30	4.30	4.30
64	4.30	32.42	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30
65	4.27	32.88	4.27	4.27	4.30	4.30	4.30
66	4.27	33.39	4.27	4.27	4.30	4.30	4.30
67	4.26	33.89	4.26	4.26	4.30	4.30	4.30
68	4.25	34.39	4.25	4.25	4.30	4.30	4.30
69	4.22	34.91	4.22	4.22	4.30	4.30	4.30
70	4.19	35.42	4.19	4.19	4.30	4.30	4.30

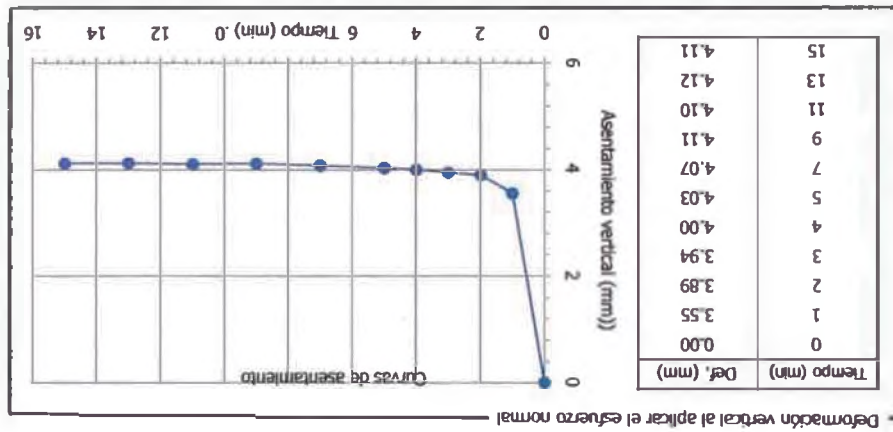
ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-4

Solicitante : GOLPER ASSOCIATES PERU S. A.
 Proyecto : Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cementación del Molino SAG By Pass Crushing
 Ubicación : Concentradora, Antamina, Ancash
 Fecha : Octubre, 2008

Sondaje : — Muestra : M-4 Profundidad (m) : —

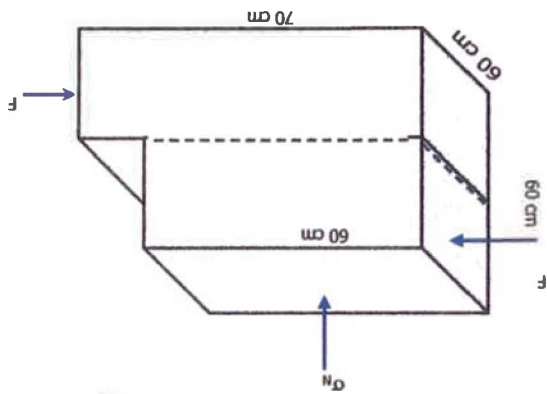
Esfuerzo Normal : 1.00 kg/cm²



Características del espécimen
 Velocidad : 0.50 mm/mín
 Estado : Remoldeado
 Condición : Sin saturar
 Humedad : 2.50%
 Densidad seca : 1.97 g/cm³

Etapa Inicial del ensayo
 Humedad : 2.50%
 Densidad seca : 1.98 g/cm³

Etapa Final del ensayo
 Humedad : 2.50%
 Densidad seca : 1.97 g/cm³



M-4 ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

Solicitante : GOLDER ASSOCIATES PERU S. A.
 Proyecto : Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación del Molino SAG By Pass Crushing
 Ubicación : Conceptradora, Antamina, Ancash
 Fecha : Octubre, 2008

Sondaje : — Muestra : M-4 Profundidad (m) : —

Esfuerzo Normal : 1.00 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Tempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Tempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)
0	4.11	0.00	0.00	35	5.67	17.51	2.92	0	4.11	0.00	0.00
1	4.21	0.09	0.16	36	5.69	18.02	3.00	1	4.21	0.51	0.70
2	4.32	0.18	0.22	37	5.70	18.51	3.09	2	4.32	1.07	0.73
3	4.45	0.25	0.26	38	5.70	19.03	3.17	3	4.45	1.50	0.77
4	4.56	0.33	0.30	39	5.71	19.53	3.26	4	4.56	2.00	0.77
5	4.79	0.50	0.30	40	5.71	20.05	3.34	5	4.79	2.49	0.78
6	4.88	0.58	0.33	41	5.71	20.53	3.42	6	4.88	2.99	0.80
7	4.88	0.58	0.35	42	5.71	21.05	3.51	7	4.88	3.51	0.80
8	4.96	0.67	0.37	43	5.70	21.52	3.59	8	4.96	4.02	0.81
9	5.02	0.75	0.38	44	5.70	22.00	3.67	9	5.02	4.52	0.82
10	5.07	0.84	0.40	45	5.69	22.52	3.75	10	5.07	5.03	0.83
11	5.12	0.92	0.42	46	5.70	23.06	3.84	11	5.12	5.53	0.84
12	5.17	1.01	0.43	47	5.69	23.57	3.93	12	5.17	6.03	0.84
13	5.24	1.10	0.44	48	5.68	24.13	4.02	13	5.24	6.58	0.87
14	5.27	1.18	0.46	49	5.67	24.64	4.11	14	5.27	7.08	0.86
15	5.30	1.26	0.47	50	5.67	25.10	4.18	15	5.30	7.57	0.89
16	5.33	1.34	0.49	51	5.66	25.63	4.27	16	5.33	8.06	0.89
17	5.36	1.43	0.47	52	5.66	26.10	4.35	17	5.36	8.58	0.89
18	5.39	1.52	0.54	53	5.66	26.65	4.44	18	5.39	9.10	0.91
19	5.44	1.60	0.53	54	5.66	27.13	4.52	19	5.44	9.60	0.92
20	5.47	1.68	0.54	55	5.65	27.65	4.61	20	5.47	10.11	0.92
21	5.50	1.77	0.54	56	5.64	28.19	4.70	21	5.50	10.61	0.92
22	5.52	1.85	0.55	57	5.63	28.66	4.78	22	5.52	11.08	0.93
23	5.55	1.93	0.56	58	5.62	29.18	4.86	23	5.55	11.57	0.95
24	5.57	2.01	0.58	59	5.57	29.69	4.95	24	5.57	12.08	0.95
25	5.58	2.10	0.59	60	5.47	30.17	5.03	25	5.58	12.59	0.94
26	5.61	2.18	0.61	61	5.39	30.70	5.12	26	5.61	13.10	0.93
27	5.62	2.26	0.62	62	5.28	31.25	5.21	27	5.62	13.56	0.95
28	5.63	2.33	0.66	63	5.36	31.62	5.27	28	5.63	13.99	0.94
29	5.64	2.42	0.66	64	5.31	32.23	5.37	29	5.64	14.50	0.96
30	5.65	2.50	0.67	65	5.22	32.75	5.46	30	5.65	14.97	1.00
31	5.65	2.58	0.65	66	5.25	33.23	5.54	31	5.65	15.48	0.98
32	5.66	2.67	0.69	67	5.21	33.78	5.63	32	5.66	16.01	1.01
33	5.66	2.75	0.68	68	5.15	34.28	5.71	33	5.66	16.51	1.00
34	5.67	2.83	0.68	69	5.15	34.80	5.80	34	5.67	16.96	1.02
35	5.67	2.92	0.70	70	5.14	35.15	5.86	35	5.67	17.51	1.03

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-4

Solicitante : GOLDER ASSOCIATES PERU S. A.
 Proyecto : Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación del Molino SAG By Pass Crushing
 Ubicación : Concentradora, Antamina, Ancash

Fecha : Octubre, 2008

Sondaje : --- Muestra : M-4 Profundidad (m) : ---

Esfuerzo Normal : 1.00 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Vertical (mm)	Tiempo (min)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Def. Tang. (%)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Esf. de corte (kg/cm ²)
70	5.14	35.15	5.86	103	1.03	5.97	35.83	5.97	1.06
71	5.06	35.83	5.97	102	1.02	8.88	53.26	8.88	1.06
72	4.98	36.32	6.05	107	1.05	8.96	53.78	8.96	1.06
73	4.97	36.80	6.13	108	1.03	9.06	54.33	9.06	1.06
74	4.95	37.31	6.22	109	1.07	9.13	54.80	9.13	1.05
75	4.91	37.80	6.30	110	1.06	9.22	55.31	9.22	1.04
76	4.85	38.31	6.38	111	1.06	9.30	55.79	9.30	1.05
77	4.81	38.76	6.46	112	1.07	9.38	56.31	9.38	1.04
78	4.76	39.32	6.55	113	1.05	9.47	56.82	9.47	1.05
79	4.71	39.81	6.63	114	1.07	9.55	57.31	9.55	1.05
80	4.68	40.27	6.71	115	1.09	9.64	57.84	9.64	1.05
81	4.63	40.81	6.80	116	1.10	9.71	58.29	9.71	1.06
82	4.59	41.28	6.88	117	1.09	9.81	58.83	9.81	1.04
83	4.53	41.84	6.97	118	1.08	9.89	59.32	9.89	1.04
84	4.49	42.29	7.05	119	1.08	9.97	59.85	9.97	1.04
85	4.42	42.78	7.13	120	1.11	10.05	60.31	10.05	1.03
86	4.37	43.25	7.21	121	1.11	10.14	60.87	10.14	1.02
87	4.30	43.77	7.30	122	1.10	10.22	61.35	10.22	1.03
88	4.25	44.24	7.37	123	1.11	10.31	61.85	10.31	1.02
89	4.21	44.76	7.46	124	1.11	10.40	62.37	10.40	1.03
90	4.12	45.27	7.54	125	1.09	10.48	62.90	10.48	1.02
91	4.06	45.75	7.63	126	1.07	10.56	63.33	10.56	1.03
92	4.00	46.26	7.71	127	1.08	10.64	63.86	10.64	1.01
93	3.99	46.78	7.80	128	1.06	10.73	64.37	10.73	1.01
94	3.89	47.35	7.89	129	1.09	10.81	64.89	10.81	1.02
95	3.83	47.84	7.97	130	1.06	10.89	65.36	10.89	1.01
96	3.76	48.31	8.05	131	1.04	10.98	65.89	10.98	1.01
97	3.71	48.81	8.13	132	1.07	11.05	66.30	11.05	1.03
98	3.66	49.26	8.21	133	1.06	11.14	66.86	11.14	1.01
99	3.62	49.75	8.29	134	1.05	11.23	67.40	11.23	1.03
100	3.56	50.22	8.37	135	1.05	11.31	67.89	11.31	1.01
101	3.51	50.74	8.46	136	1.07	11.40	68.37	11.40	1.02
102	3.44	51.23	8.54	137	1.09	11.48	68.90	11.48	1.00
103	3.40	51.75	8.63	138	1.05	11.56	69.36	11.56	1.02
104	3.34	52.28	8.71	139	1.07	11.65	69.92	11.65	0.99
105	3.30	52.79	8.80	140	1.06	11.73	70.40	11.73	1.00

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

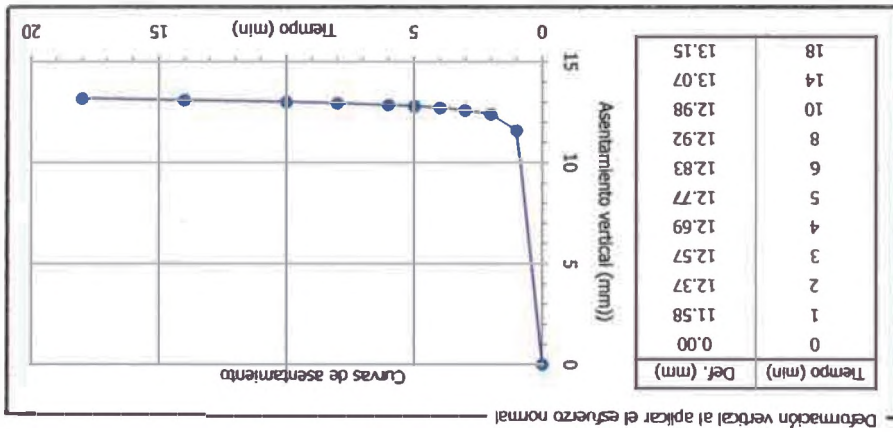
M-4

Solicitante : GOLDER ASSOCIATES PERU S. A.
 Proyecto : Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cementación del Molino SAG By Pass Crushing
 Ubicación : Concentradora, Antamina, Ancash

Fecha : Octubre, 2008

Sondaje : — Muestra : M-4 Profundidad (m) : —

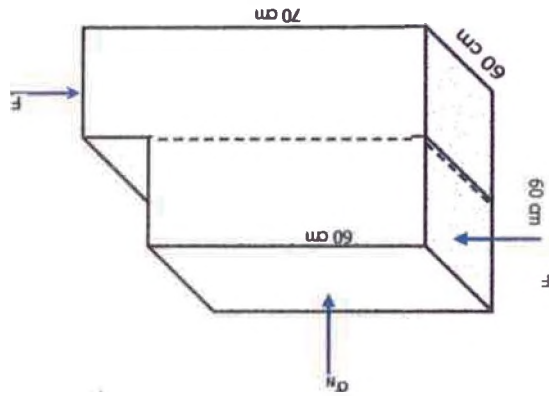
Esfuerzo Normal : 2.00 kg/cm²



Características del espécimen
 Velocidad : 0.50 mm/min
 Estado : Remoldeado
 Condición : Sin saturar
 Humedad : 2.50%
 Densidad seca : 1.97 g/cm³

Etapa inicial del ensayo
 Humedad : 2.50%
 Densidad seca : 1.98 g/cm³

Etapa final del ensayo
 Humedad : 2.50%
 Densidad seca : 1.98 g/cm³



ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-4

Solicitante : GOLDFER ASSOCIATES PERU S. A.
 Proyecto : Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cementación del Molino SAG By Pass Crushing
 Ubicación : Concentradora, Antamira, Ancash
 Fecha : Octubre, 2008

Sonaje : ---
 Muestra : M-4
 Profundidad (m) : ---

Esfuerzo Normal : 2.00 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
0	13.15	0.00	0.00	0.00	35	16.95	17.49	2.91	1.03
1	13.29	0.50	0.08	0.21	36	16.99	17.96	2.99	1.08
2	13.55	0.99	0.17	0.26	37	17.03	18.41	3.07	1.07
3	13.79	1.51	0.25	0.31	38	17.10	18.96	3.16	1.09
4	14.01	2.01	0.34	0.35	39	17.16	19.43	3.24	1.08
5	14.23	2.52	0.42	0.39	40	17.19	19.92	3.32	1.13
6	14.42	3.03	0.51	0.44	41	17.23	20.43	3.41	1.16
7	14.60	3.52	0.59	0.46	42	17.24	20.81	3.47	1.16
8	14.74	4.01	0.67	0.48	43	17.25	21.19	3.53	1.14
9	14.90	4.52	0.75	0.52	44	17.29	21.70	3.62	1.16
10	15.07	5.02	0.84	0.55	45	17.32	22.20	3.70	1.21
11	15.21	5.50	0.92	0.58	46	17.37	22.70	3.78	1.22
12	15.30	5.99	1.00	0.61	47	17.38	23.20	3.87	1.26
13	15.45	6.49	1.08	0.62	48	17.42	23.69	3.95	1.27
14	15.55	6.98	1.16	0.65	49	17.44	24.21	4.03	1.27
15	15.66	7.49	1.25	0.67	50	17.43	24.66	4.11	1.32
16	15.77	8.00	1.33	0.71	51	17.42	25.20	4.20	1.27
17	15.87	8.48	1.41	0.70	52	17.44	25.71	4.29	1.29
18	15.94	8.99	1.50	0.74	53	17.45	26.21	4.37	1.33
19	16.05	9.49	1.58	0.74	54	17.47	26.70	4.45	1.33
20	16.13	10.00	1.67	0.75	55	17.46	27.20	4.53	1.34
21	16.23	10.49	1.75	0.77	56	17.47	27.70	4.62	1.36
22	16.28	10.99	1.83	0.81	57	17.48	28.20	4.70	1.39
23	16.36	11.48	1.91	0.86	58	17.49	28.69	4.78	1.41
24	16.43	11.98	2.00	0.88	59	17.49	29.19	4.87	1.43
25	16.49	12.49	2.08	0.88	60	17.50	29.70	4.95	1.40
26	16.54	12.98	2.16	0.89	61	17.50	30.19	5.03	1.41
27	16.59	13.49	2.25	0.90	62	17.50	30.69	5.12	1.45
28	16.64	14.01	2.33	0.93	63	17.50	31.19	5.20	1.48
29	16.68	14.50	2.42	0.95	64	17.48	31.69	5.28	1.45
30	16.73	14.99	2.50	0.95	65	17.49	32.18	5.36	1.51
31	16.79	15.50	2.58	0.97	66	17.49	32.67	5.45	1.50
32	16.83	15.98	2.66	0.99	67	17.49	33.16	5.53	1.53
33	16.87	16.50	2.75	1.01	68	17.49	33.66	5.61	1.53
34	16.91	17.00	2.83	1.02	69	17.49	34.15	5.69	1.54
35	16.95	17.49	2.91	1.03	70	17.49	34.67	5.78	1.54

ENSAYO DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

M-4

Solicitante : GOLDER ASSOCIATES PERU S. A.

Proyecto : Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación del Molino SAG By Pass Crushing
Option 5

Fecha : Octubre, 2008

Ubicación : Concentradora, Antamina, Ancash

Sondaje : —

Muestra : M-4

Profundidad (m) : —

Esfuerzo Normal : 2.00 kg/cm²

Aplicación del Esfuerzo de Corte (Hoja de detalle)

Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)	Tiempo (min)	Def. Vertical (mm)	Def. Tang. (mm)	Def. Tang. (%)	Esf. de corte (kg/cm ²)
70	17.49	34.67	5.78	1.54	105	17.50	52.20	8.70	1.93
71	17.50	35.16	5.86	1.54	106	17.50	52.71	8.79	1.91
72	17.50	35.64	5.94	1.55	107	17.50	53.27	8.88	1.93
73	17.49	36.13	6.02	1.59	108	17.52	53.72	8.95	1.91
74	17.50	36.65	6.11	1.60	109	17.52	54.24	9.04	1.95
75	17.52	37.13	6.19	1.60	110	17.53	54.72	9.12	1.97
76	17.52	37.64	6.27	1.59	111	17.55	55.22	9.20	1.93
77	17.52	38.12	6.35	1.59	112	17.55	55.73	9.29	1.94
78	17.52	38.61	6.44	1.63	113	17.55	56.22	9.37	1.96
79	17.51	39.11	6.52	1.64	114	17.55	56.73	9.45	1.94
80	17.49	39.60	6.60	1.67	115	17.55	57.24	9.54	1.99
81	17.48	40.11	6.69	1.70	116	17.55	57.74	9.62	1.98
82	17.48	40.61	6.77	1.66	117	17.55	58.27	9.71	2.00
83	17.47	41.10	6.85	1.70	118	17.54	58.73	9.79	1.98
84	17.48	41.60	6.93	1.64	119	17.54	59.26	9.88	2.01
85	17.48	42.11	7.02	1.73	120	17.54	59.74	9.96	1.97
86	17.48	42.61	7.10	1.69	121	17.56	60.25	10.04	1.96
87	17.49	43.12	7.19	1.74	122	17.57	60.69	10.12	2.00
88	17.49	43.62	7.27	1.75	123	17.59	61.23	10.21	1.96
89	17.48	44.15	7.36	1.75	124	17.60	61.73	10.29	2.02
90	17.45	44.64	7.44	1.76	125	17.59	62.22	10.37	1.98
91	17.45	45.18	7.53	1.79	126	17.59	62.73	10.45	1.98
92	17.46	45.67	7.61	1.81	127	17.60	63.22	10.54	2.01
93	17.45	46.20	7.70	1.87	128	17.60	63.77	10.63	1.99
94	17.47	46.70	7.78	1.83	129	17.60	64.21	10.70	1.96
95	17.47	47.19	7.86	1.85	130	17.60	64.72	10.79	1.98
96	17.48	47.73	7.95	1.80	131	17.62	65.20	10.87	1.99
97	17.49	48.22	8.04	1.90	132	17.61	65.72	10.95	2.00
98	17.51	48.72	8.12	1.87	133	17.62	66.20	11.03	1.99
99	17.50	49.21	8.20	1.88	134	17.62	66.70	11.12	2.00
100	17.50	49.72	8.29	1.83	135	17.61	67.21	11.20	2.00
101	17.50	50.25	8.38	1.91	136	17.61	67.69	11.28	2.02
102	17.51	50.70	8.45	1.94	137	17.61	68.20	11.37	2.00
103	17.51	51.20	8.53	1.92	138	17.62	68.70	11.45	1.99
104	17.50	51.72	8.62	1.89	139	17.63	69.20	11.53	2.00
105	17.50	52.20	8.70	1.93	140	17.64	69.70	11.62	2.00