

# Trabajo Profesional de Construcciones

## Arenas refuladas

Aplicación al Proyecto Carena

### **Autores**

Iñaki García Mendive

Federico Paz Walther

Gonzalo Rellán

### **Director del programa**

Ing. Rogelio Percivati Franco

### **Tutor del proyecto**

Dr. Ing. Alejo O. Sfriso

Laboratorio de Mecánica de Suelos  
Departamentos de Estabilidad y Construcciones  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de Buenos Aires

Octubre 2012

# Índice

|   |           |  |           |
|---|-----------|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b>  | <b>3</b>  | <b>4. Interpretación de resultados</b>                                     | <b>28</b> |
| <b>2. Comportamiento de las arenas en el ensayo triaxial</b>                    | <b>7</b>  | 4.1. Resumen de resultados obtenidos . . . . .                             | 28        |
| 2.1. Introducción . . . . .   | 7         | 4.2. Errores experimentales previos  | 28        |
| 2.2. Nomenclatura . . . . .   | 7         | 4.2.1. Muestreo y transporte . . . . .                                     | 28        |
| 2.3. Definición de resistencia y falla en los materiales friccionales . . . . . | 7         | 4.2.2. Método de armado . . . . .  | 29        |
| 2.4. Fricción y dilatancia . . . . .  | 8         | 4.3. Saturación y consolidación . . . . .                                  | 29        |
| 2.5. Estado crítico y estado de deformación constante . . . . .                 | 8         | 4.3.1. Saturación . . . . .  | 29        |
| 2.6. El ensayo triaxial . . . . .   | 9         | 4.3.2. Incidencia de la saturación parcial . . . . .                       | 30        |
| 2.6.1. Introducción . . . . .   | 9         | 4.3.3. Consolidación . . . . .   | 31        |
| 2.6.2. Preparación de muestras . . . . .  | 10        | 4.4. Carga . . . . .   | 31        |
| 2.6.3. Etapas del ensayo triaxial . . . . .                                     | 11        | 4.4.1. Medición de deformación axial global . . . . .                      | 31        |
| 2.7. Rigidez . . . . .  | 11        | 4.4.2. Medición de deformación axial local . . . . .                       | 31        |
| 2.8. Comportamiento de arenas en ensayo triaxial drenado . . . . .              | 12        | 4.4.3. Velocidad de deformación y tiempo estimado para la rotura . . . . . | 31        |
| 2.9. Comportamiento de arenas en ensayo triaxial no drenado . . . . .           | 12        | 4.4.4. Sistema de adquisición de datos . . . . .                           | 32        |
| 2.9.1. Licuación . . . . .  | 13        | <b>5. Modelación constitutiva</b>  | <b>33</b> |
| 2.10. Ablandamiento y localización de deformaciones . . . . .                   | 13        | 5.1. Introducción . . . . .  | 33        |
| <b>3. Programa experimental</b>   | <b>16</b> | 5.2. Nomenclatura . . . . .  | 33        |
| 3.1. Equipamiento . . . . .   | 16        | 5.3. Modelos de Elastoplasticidad . . . . .                                | 34        |
| 3.1.1. Adquisición de datos . . . . .   | 16        | 5.3.1. Deformaciones en el rango elástico . . . . .                        | 34        |
| 3.1.2. Instrumental . . . . .   | 16        | 5.3.2. Deformaciones fuera del rango elástico . . . . .                    | 34        |
| 3.1.3. Equipos periféricos . . . . .  | 18        | 5.4. Hardening Soil Model . . . . .  | 34        |
| 3.2. Materiales y métodos . . . . .   | 18        | 5.4.1. Deformaciones por corte . . . . .                                   | 35        |
| 3.2.1. Procedimiento . . . . .  | 18        | 5.4.2. Función de endurecimiento por consolidación . . . . .               | 37        |
| 3.3. Caracterización física . . . . .   | 19        | <b>6. Modelación numérica</b>  | <b>39</b> |
| 3.4. Ensayos triaxiales CIDC . . . . .  | 22        | 6.1. Estructura modelada . . . . .   | 39        |
| 3.5. Ensayos triaxiales CIUC . . . . .  | 22        |  |           |
| 3.6. Línea de estado crítico . . . . .  | 23        |  |           |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 6.2. Materiales . . . . .  | 39        |
| 6.3. Condiciones de vínculo . . .                                  | 45        |
| 6.4. Etapas de cálculo . . . . .                                   | 45        |
| 6.5. Niveles freáticos y condicio-<br>nes de borde hidráulicas . . | 46        |
| 6.6. Flujo en régimen permanente                                   | 47        |
| 6.7. Factor de seguridad numérico                                  | 47        |
| 6.8. Desplazamientos horizonta-<br>les del coronamiento . . . .    | 47        |
| <b>7. Conclusiones</b>   | <b>51</b> |
| 7.1. Trabajos en laboratorio . . .                                 | 51        |
| 7.2. Resultados . . . . .  | 51        |
| 7.3. Métodos y errores . . . . .                                   | 51        |
| 7.4. Modelación numérica . . . .                                   | 52        |

## 1. Introducción

La obra de Carena consistió en el cierre temporario del dique seco de la base naval Puerto Belgrano en Bahía Blanca con el fin de efectuar tareas de mantenimiento en la compuerta y los sistemas mecánicos. El cierre se materializó mediante la construcción de tres ataguías celulares cilíndricas autoportantes de  $21.77m$  de diámetro, unidas por interceldas de  $4.98m$  de radio y dos riñones extremos y asimétricos que conforman el vínculo de las ataguías con el muelle existente — figura 1.1 —. Las celdas, interceldas y riñones fueron materializados mediante el hincado de tablestacas y su posterior relleno con la arena Carena.

En la figura 1.2 se muestran las etapas que conforman el proceso constructivo. En primer lugar se construyeron y rellenaron las celdas principales autoportantes para luego construir y rellenar las interceldas y los riñones. Para el hincado de las tablestacas se empleó un marco guía apoyado sobre cuatro pilotes de acero hincados en el lecho.

El material de relleno de las celdas se obtuvo de una cantera próxima al dique — figura 1.3 —, se lo colocó por refulado en las celdas — figura 1.4 — y luego se lo densificó mediante la vibrohinca de tubo aleteado con punta roma según una grilla de  $3.0m \times 3.0m$  — figura 1.5 —.

Los objetivos del proyecto de investigación son caracterizar en laboratorio las propiedades físicas y mecánicas del material utilizado como relleno y simular el comportamiento estructural de las ataguías con el fin de comparar los resultados obtenidos con los valores relevados en obra.



Figura 1.3: Ubicación del dique seco y de la cantera.



Figura 1.4: Llenado de las celdas mediante refulado.



Figura 1.5: Densificación con tubo aleteado.



Figura 1.1: Vista general de la ataguía celular.

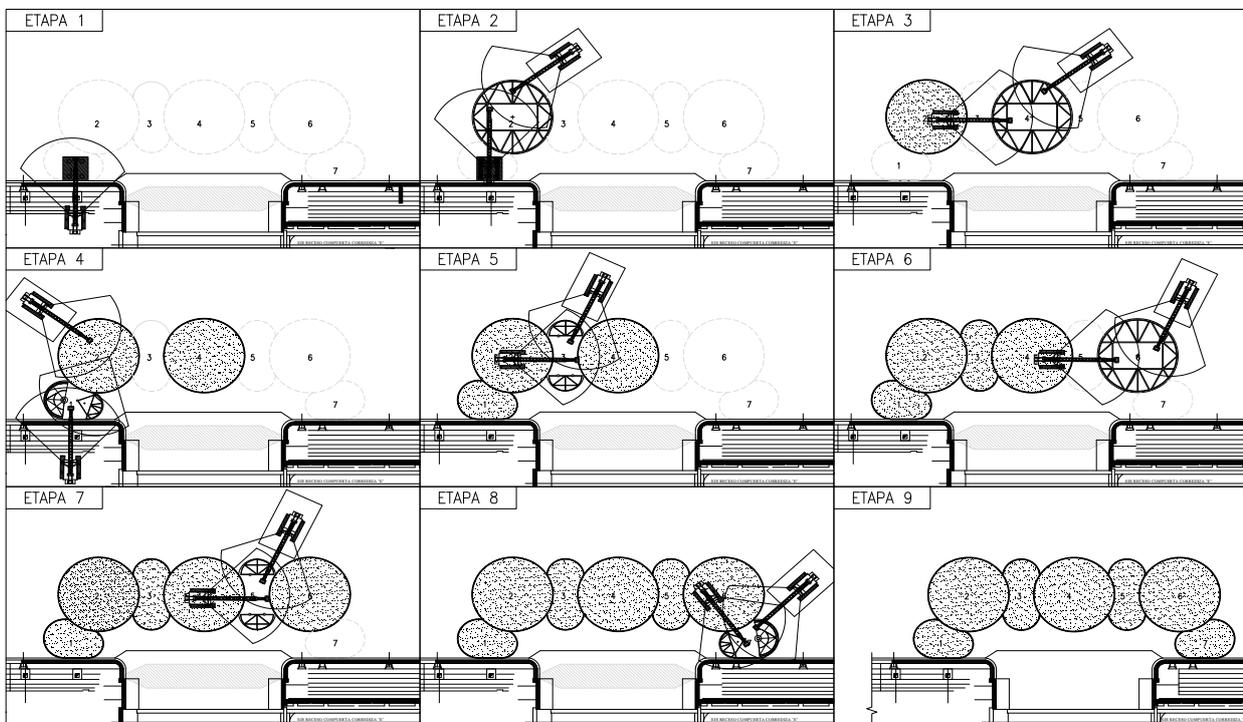


Figura 1.2: Proceso constructivo de la ataguía.

De la caracterización física y mecánica del material se obtuvieron los valores de ciertos parámetros mecánicos con los que se calibraron los modelos constitutivos utilizados en la simulación.

La etapa de caracterización del material en laboratorio se desarrolló conjuntamente con los alumnos Ignacio Ezama e Ignacio Vernengo Lezica que estudiaron el material empleado en el proyecto Tecplata que consiste en la excavación y refulado de material granular para la creación de una terminal de contenedores en Ensenada, provincia de Buenos Aires.

**Organización y presentación** El documento se organiza en ocho capítulos:

1. Introducción.
2. Comportamiento de las arenas en el ensayo triaxial: se desarrollan los conceptos teóricos, base para la realización del proyecto.
3. Programa experimental: se explican y describen los trabajos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos — LMS —.
4. Interpretación de resultados: se analizan e interpretan los resultados obtenidos.
5. Modelación constitutiva: se explican los conceptos básicos del modelo constitutivo utilizado en la simulación presentada en el capítulo 6.
6. Modelación numérica: se emplean los resultados de los ensayos de laboratorio y la calibración de los modelos constitutivos para simular el comportamiento de la estructura.

7. Conclusiones: se resumen los trabajos realizados y los resultados obtenidos.

8. Anexos.

**Agradecimientos** El equipo de estudiantes, conformado por Iñaki García Mendive, Federico Paz Walther y Gonzalo Rellán, agradece a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires — FIUBA — por proveer el espacio de trabajo y los equipos utilizados; en particular, al Laboratorio de Mecánica de Suelos, al Laboratorio de Materiales y Estructuras, al Laboratorio de Sólidos Amorfos, y al Laboratorio de Instrumental y Mediciones.

Al Dr. Ing. Alejo Oscar Sfriso, por liderar el equipo de investigación y ofrecer la oportunidad de dedicar el proyecto final de la carrera a temas relacionados a la mecánica de suelos e ingeniería geotécnica. Al Ing. Rogelio Percivati Franco, por permitir el desarrollo de este trabajo en el marco de Trabajo Profesional con orientación en Construcciones. Al Ing. Mauro Codevilla, por su constante apoyo y seguimiento en los trabajos realizados en laboratorio. Al Dr. Ing. Diego Manzanal y los Ings. Osvaldo Ledesma y Gastón Quaglia, por su excelente disposición para responder nuestras consultas. A los Sres. Ignacio Ezama e Ignacio Vernengo Lezica con quienes se desarrolló conjuntamente la etapa de caracterización en laboratorio.

Al Ing. David Kadener, por el asesoramiento brindado en la adecuación del instrumental. Al Dr. Marcelo Fontana, por su colaboración en los ensayos de difracción y difracción. A Guillaume Chastel, estudiante de intercambio del Institut Natio-

nal des Sciences Appliquées de Lyon, por la colaboración en los primeros meses de trabajo.

A nuestras familias y amigos, por la comprensión, contención y soporte dados a lo largo de todos estos años.

## 2. Comportamiento de las arenas en el ensayo triaxial

### 2.1. Introducción

En este capítulo se presenta una introducción a la resistencia al corte de los suelos friccionales. Se describen las variables que afectan la resistencia al corte y los diferentes mecanismos que intervienen en ella.

Se presentan algunos resultados típicos de ensayos triaxiales utilizados para estimar los parámetros de resistencia y el criterio de falla utilizado para analizar esos resultados.

Las principales fuentes de consulta para la redacción del trabajo son [25, 12, 22, 29, 13]

### 2.2. Nomenclatura

Se definen los siguientes parámetros que serán utilizados en el desarrollo del trabajo de investigación.

|                           |                                    |
|---------------------------|------------------------------------|
| $\psi$                    | Ángulo de dilatancia               |
| $\phi_c$                  | Ángulo de fricción interna crítico |
| $\phi$                    | Ángulo de fricción interna pico    |
| $\varepsilon_1$           | Deformación axial                  |
| $\varepsilon_v$           | Deformación específica volumétrica |
| $D_r$                     | Densidad relativa                  |
| $\frac{dx}{dt} = \dot{x}$ | Derivada respecto al tiempo        |
| $E_i$                     | Módulo de Young inicial            |
| $B$                       | Parámetro B de Skempton            |

|                |  |
|----------------|--|
| $\sigma_c$     | Presión de confinamiento                 |
| $p$            | Presión media                            |
| $u$            | Presión neutra                           |
| $e_c$          | Relación de vacíos crítica               |
| $\tau$         | Tensión de corte                         |
| $q$            | Tensión diferencia                       |
| $\sigma_n$     | Tensión normal                           |
| $\sigma_1$     | Tensión principal mayor total            |
| $\sigma_{2,3}$ | Tensiones principales intermedia y menor |
| $t_{50}$       | Tiempo del 50 % de la consolidación      |

### 2.3. Definición de resistencia y falla en los materiales friccionales

La resistencia al corte de un material friccional se define como la capacidad que tiene para resistir esfuerzos que tienden a distorsionarlo; no es una propiedad del material sino que depende de las presiones efectivas y la densidad del empaquetamiento.

Las componentes que constituyen la resistencia al corte son la fricción intergranular y la interferencia entre los desplazamientos relativos de las partículas durante la deformación.

La fricción depende de los minerales que componen las partículas, la presencia y cantidad de contaminantes superficiales y, en menor medida, del fluido intergranular. La interferencia depende de la forma de las partículas, de la distribución granulométrica y de la densidad del suelo.

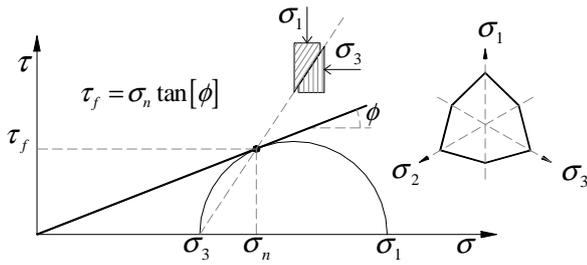


Figura 2.1: Criterio de Mohr-Coulomb.

Se define la falla de un material friccional al instante en que el cociente  $\sigma'_1/\sigma'_3$  alcanza su valor máximo. Se caracteriza a este estado a partir del adimensional  $N_\phi$  — ecuación 2.1 —.

$$N_\phi = \left( \frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} \right)_{max} \quad (2.1)$$

Para calcular la tensión de corte asociada al plano de falla  $\tau$  se considera el criterio de Mohr-Coulomb — ecuación 2.2 —.

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\phi) \quad (2.2)$$

donde  $\sigma_n$  es la tensión normal al plano de falla,  $\phi$  es el ángulo de fricción interna. No se incluye el término correspondiente a la cohesión puesto que en este trabajo de investigación se estudian materiales puramente friccionales — figura 2.1 —.

En la ecuación 2.3 se explicita la relación entre  $\phi$  y  $N_\phi$ .

$$N_\phi = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} \quad (2.3)$$

## 2.4. Fricción y dilatancia

El ángulo de fricción interna  $\phi$  utilizado en el criterio de falla de Mohr-Coulomb está compuesto por dos componentes, el ángulo de fricción interna crítico  $\phi_c$  y la dilatancia  $\psi$ , que se relacionan según la ecuación 2.4.

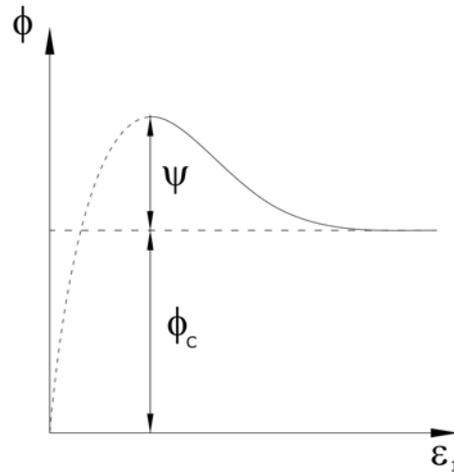


Figura 2.2: Componentes de la resistencia al corte.

ción 2.4.

$$\phi = \phi_c + \psi \quad (2.4)$$

Cada componente de  $\phi$  se asocia a una componente de la resistencia al corte. La primera,  $\phi_c$ , está asociada a la fricción entre partículas y se la define en el momento en que un suelo deforma a volumen constante. La segunda,  $\psi$ , se asocia al aporte de la interferencia y se la define en el instante en que la resistencia del suelo alcanza su valor máximo. En la figura 2.2 se observa el aporte de cada componente a la resistencia.

## 2.5. Estado crítico y estado de deformación constante

En 1936 Casagrande realizó una serie de ensayos triaxiales drenados y descubrió que para un mismo confinamiento y a grandes deformaciones, muestras de un suelo con diferentes densidades iniciales se aproximan a una misma relación de vacíos a la cual continúan deformando a volumen y tensiones efectivas constantes.

Casagrande definió a este estado como Estado Crítico y lo caracterizó a partir del ángulo de fricción interna crítica  $\phi_c$  y la relación de vacíos crítica  $e_c$ .

Poulos repitió la experiencia con ensayos no drenados y descubrió que para cualquier confinamiento y densidad inicial las muestras alcanzan un estado tensional para el cual la deformación es a velocidad, volumen y tensiones efectivas constantes. A este estado lo definió como el Estado de Deformación Constante y se cumple que:

$$N_c = \frac{1 + \sin(\phi_c)}{1 - \sin(\phi_c)} \quad (2.5)$$

Estos estados fueron objeto de numerosos estudios, concluyéndose que representan el mismo fenómeno físico pudiéndose definir, tanto en condiciones drenadas como no drenadas, un único  $\phi_c$ .

La relación de vacíos crítica depende de las tensiones efectivas principales del suelo mientras que  $\phi_c$  es independiente y es una propiedad del material.

En el caso de un ensayo triaxial, dicha dependencia se puede expresar en función de  $\sigma'_3$  dado que al inicio del ensayo  $\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$ .

En la figura 2.3 se grafica la Línea de Estado Crítico — LEC — donde se evidencia la relación entre la  $p'$  y  $e_c$ . Toda muestra ubicada sobre esta curva se encuentra en el estado crítico.

## 2.6. El ensayo triaxial

### 2.6.1. Introducción

La utilización del ensayo triaxial para la caracterización mecánica de los materia-

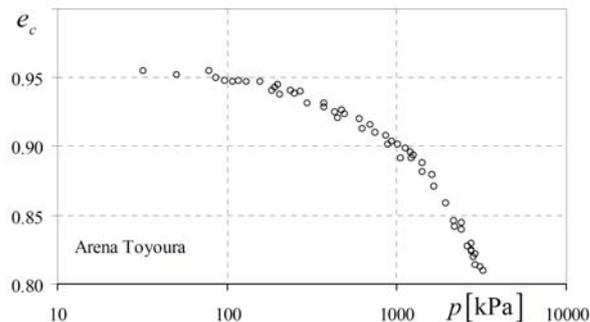


Figura 2.3: Línea de Estado Crítico para arena Toyoura[31].

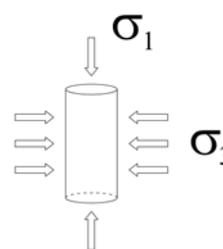


Figura 2.4: Tensiones principales en la cámara triaxial.

les permite medir y controlar las tensiones principales totales, la presión neutra  $u$  y las condiciones de drenaje.

El ensayo triaxial fija la dirección de las tensiones principales gracias a la simetría axial de la muestra, el sistema de confinamiento mediante cámara y la aplicación de tensión diferencia axial — figura 2.4 —. Se confina mediante la aplicación de una presión  $\sigma_c$  de aire o agua en la cámara y se genera la tensión diferencia  $\sigma_d$  con un vástago superior.

Permite desarrollar una presión neutra  $u$  distinta de la de confinamiento  $\sigma_c$  mediante el uso de una membrana impermeable que aísla las fases fluidas del interior de la muestra de la presión exterior.

Se controla el drenaje de la muestra mediante un sistema de válvulas conectadas a ambos cabezales. Esto permite realizar en-

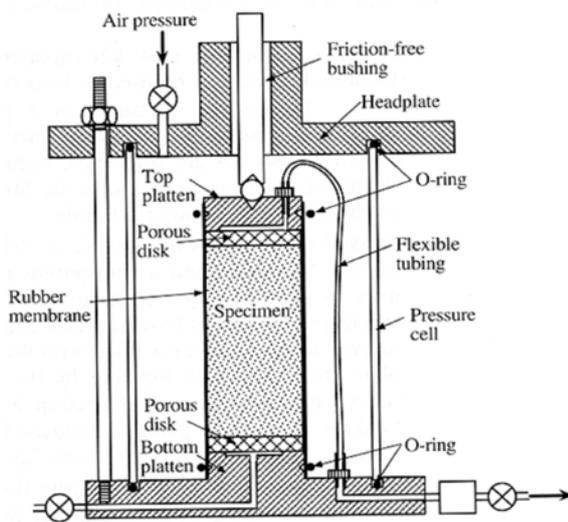


Figura 2.5: Componentes de una cámara triaxial.

sayos drenados y no drenados.

En la figura 2.5 se muestran los componentes de una cámara triaxial.

Debido a la simetría axial y conocidos los valores de  $\sigma_d$  y  $\sigma_c$  se obtienen en forma directa las tensiones principales radiales  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_c$  y la tensión principal axial  $\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_c$ .

Se calculan las tensiones principales efectivas como  $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$  y  $\sigma'_3 = \sigma_3 - u$ .

### 2.6.2. Preparación de muestras

La etapa de preparación de la muestra consiste en el armado de la probeta mediante un método preestablecido con el objetivo de lograr las medidas y densidades deseadas. Los métodos de armado de mayor difusión son *Dry Pluviation*, *Wet Pluviation* y *Moist Tamping* [15] — figura 2.6 —.

En el *Dry Pluviation* se deja precipitar suelo seco en el molde desde una altura determinada. Mediante un adecuado control de la altura de caída y de la velocidad de llenado se logran densidades relativas del

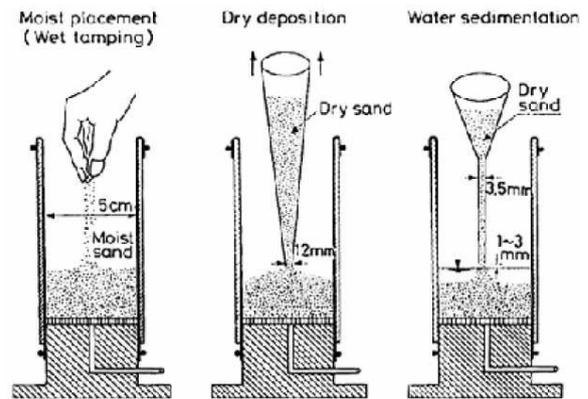


Figura 2.6: Métodos de armado de muestras, extraída de [13].

orden del 30 % al 70 %. El rango de densidades alcanzables es limitado y es imposible la obtención de muestras muy sueltas y muy densas.

El *Wet Pluviation* sigue los mismos principios que el *Dry Pluviation* con la excepción que se precipita el suelo seco en el molde lleno de agua para controlar la velocidad de deposición del material. Permite obtener muestras con  $D_r$  menor al 30 %.

El *Moist Tamping* consiste en preparar la muestra por capas con suelo cuya humedad es del orden del 5 %. Debido a la existencia de una interfase entre agua y aire, se desarrollan internamente fuerzas capilares que permiten obtener un rango de densidades muy bajas, imposibles de alcanzar con el suelo seco. La principal ventaja del método es que permite obtener muestra de cualquier densidad dado que se calcula a priori la cantidad de suelo húmedo que se va a colocar y compactar por capa. Como contrapartida, al armar por capas, la homogeneidad de la muestra es menor a la obtenida con los métodos previamente mencionados.

### 2.6.3. Etapas del ensayo triaxial

**Saturación** Consiste en hacer circular agua desaireada de forma ascendente a través de la muestra para desplazar el aire y ocupar los vacíos. Para lograr una completa saturación de la muestra es necesario aplicar una alta presión neutra – *backpressure* – durante un determinado tiempo para reducir el volumen del aire remanente y lograr su disolución en el agua.

El tiempo necesario para lograr un grado de saturación determinado depende del método de armado, del tipo de suelo y de la *backpressure* aplicada.

Para conocer el grado de saturación de una muestra se utiliza el parámetro  $B$  de Skempton — ecuación 2.6 — que determina el aumento de *backpressure*  $\Delta u$  en relación al aumento de presión de confinamiento  $\Delta\sigma_3$  para una muestra impedida de drenar.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} \quad (2.6)$$

Un valor de  $B = 1$  indicaría la saturación total de la muestra mientras que para valores menores indicaría saturaciones parciales. Debido a que la rigidez a compresión del agua no es infinitamente mayor a la de la muestra de suelo, en la práctica para arenas se acepta que existe una saturación total para valores de  $B \geq 0,95$  [1].

**Consolidación isotrópica** Se somete a la muestra saturada e impedida de drenar a un aumento de la presión de confinamiento  $\sigma_3$ . Dado que el volumen de la muestra no puede cambiar, la configuración de las partículas sólidas no se modifica y aumen-

ta la presión neutra  $\Delta u$  hasta alcanzar un nuevo equilibrio.

Luego de alcanzar el equilibrio, se permite el drenaje y el agua abandona la muestra disipándose el exceso de presión neutra por sobre la *backpressure* hasta que el acomodamiento de las partículas sólidas permite desarrollar tensiones efectivas capaces de equilibrar el incremento de confinamiento.

La etapa de consolidación permite obtener distintas relaciones de vacíos y tensiones efectivas iniciales.

**Carga** En esta etapa se imponen deformaciones axiales a la muestra para observar su comportamiento y calcular su resistencia. Al aumentar la deformación axial se cumple que  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ .

Las variables que definen el tipo de comportamiento y la resistencia en un ensayo triaxial son la densidad relativa  $D_r$  y la presión de confinamiento efectivo  $\sigma'_3$ .

### 2.7. Rigidez

Para caracterizar la rigidez de una muestra de suelo se utiliza el módulo de Young  $E$ . Para ensayos triaxiales interesa la rigidez exhibida por la muestra al inicio del ensayo  $E_i$  — ecuación 2.7 —.

$$E_i = \left( \frac{d\sigma_d}{d\varepsilon_1} \right)_{\varepsilon_1=0} \quad (2.7)$$

La rigidez inicial depende de  $D_r$  y de  $\sigma'_3$ . Para una  $\sigma'_3$ , una muestra densa es más rígida que una muestra suelta mientras que para una misma densidad inicial, la muestra más rígida es la que tiene mayor  $\sigma'_3$ .

En la figura 2.7 se observan diferentes definiciones de rigidez.  $E_i$  es la rigidez tangen-

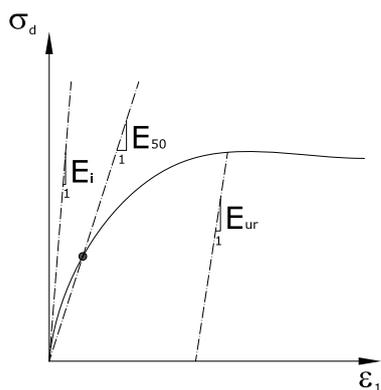


Figura 2.7: Rigidez inicial.

te en el inicio a la curva  $\sigma_d - \varepsilon_1$ ,  $E_{50}$  es la rigidez secante al 50% de la tensión pico y  $E_{ur}$  es la rigidez en descarga y recarga.

## 2.8. Comportamiento de arenas en ensayo triaxial drenado

En ensayos drenados varía la relación de vacíos mientras que  $\sigma'_3$  permanece constante hasta que la muestra alcanza el estado crítico.

Muestras cuya  $\sigma'_3$  y densidad inicial la sitúan por encima de la LEC exhiben un comportamiento netamente contractivo. A medida que se reduce la relación de vacíos, el cociente  $\sigma'_1/\sigma'_3$  aumenta hasta alcanzar el máximo en el estado crítico. El comportamiento descrito se observa esquemáticamente en las muestras 1 y 2 de la figura 2.8.

En caso que la muestra se encuentre por debajo de la LEC — muestras 3 y 4 —, existe una etapa contractiva para luego dilatar hasta alcanzar  $e_c$ . En la etapa dilatante, el cociente  $\sigma'_1/\sigma'_3$  alcanza un valor máximo y luego decrece hasta que se llega al estado crítico. A diferencia del caso anterior, la fa-

lla y el estado crítico no son coincidentes.

Se define al estado de deformación cuasi constante al instante en que el comportamiento deja de ser contractivo para ser dilatante cumpliéndose que  $\dot{\varepsilon}_v = 0$ .

Se observa en la figura 2.8 que independientemente de la densidad inicial, todas las muestras de un mismo suelo y a una determinada  $\sigma'_3$  alcanzan el estado crítico a la misma relación de vacíos.

## 2.9. Comportamiento de arenas en ensayo triaxial no drenado

En un ensayo no drenado la muestra se encuentra impedida de modificar su volumen — la relación de vacíos permanece constante — y varía  $\sigma'_3$  hasta que la muestra alcanza el estado crítico.

Muestras situadas por encima de la LEC, al no poder contraer, reducen  $\sigma'_3$  debido a un aumento en la presión neutra hasta alcanzar el estado crítico — muestra 7 —.

Muestras ubicadas por debajo de la LEC, al no poder contraer inicialmente, aumenta la presión neutra y se reduce  $\sigma'_3$  hasta que se alcanza el estado de deformación cuasi constante. Luego, al no poder dilatar, se reduce la presión neutra y aumenta  $\sigma'_3$  hasta alcanzar el estado crítico.

Dado que siempre  $\dot{\varepsilon}_v = 0$ , en ensayos no drenados se identifica al estado de deformación cuasi constante en el instante en que  $\dot{p} = 0$ .

En ensayos no drenados la falla siempre coincide con el estado crítico puesto que resulta imposible que se desarrolle una resistencia mayor a la crítica sin una dilatancia.

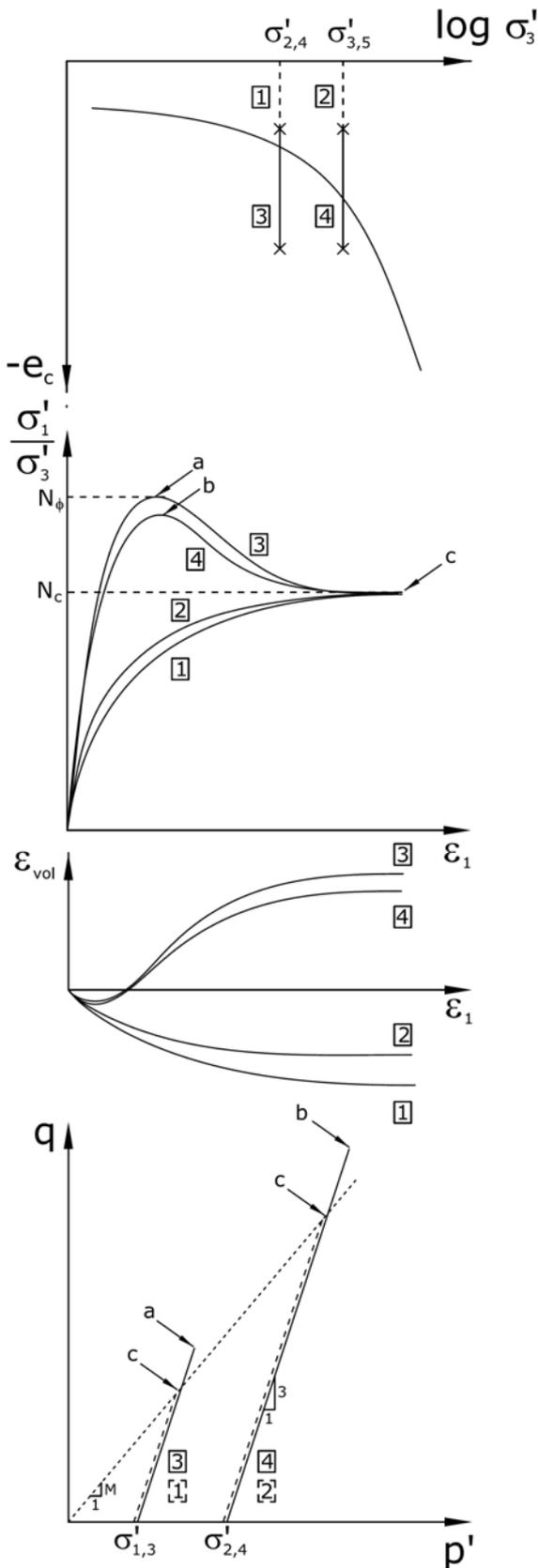


Figura 2.8: Comportamiento de arenas en ensayo triaxial drenado.

Se observa en la figura 2.9 que muestras con igual relación de vacíos inicial alcanzan el estado crítico para las mismas tensiones efectivas cualquiera sea  $\sigma'_3$ .

### 2.9.1. Licuación

Cuando a un suelo saturado se le incrementan las tensiones totales a una velocidad suficiente como para no permitir el drenaje, puede desarrollarse un aumento de las presiones neutras que reduzca las presiones efectivas con la consiguiente disminución de la resistencia al corte no drenada.

Cuando esta caída provoca que  $\sigma'_3$  sea casi nula, la resistencia al corte se reduce a valores tan pequeños que el material se comporta mecánicamente como un líquido. Este fenómeno se denomina licuación [22].

Existen dos comportamientos luego de la falla por licuación, el primero es el colapso total de la muestra mientras que el segundo es el desarrollo de una resistencia al corte no drenada residual para grandes deformaciones debido a la reorganización de las partículas.

En la figura 2.12 se presentan casos de fallas por licuación.

### 2.10. Ablandamiento y localización de deformaciones

Las muestras ubicadas debajo de la LEC desarrollan un pico de tensión diferencia  $\sigma_d$  seguido de un ablandamiento — figura 2.10 — que comienza en un punto de debilidad y se propaga formando una banda donde se localizan las deformaciones — figura 2.11 —. A partir del pico, las deformaciones en la muestra no son uniformes por lo que la

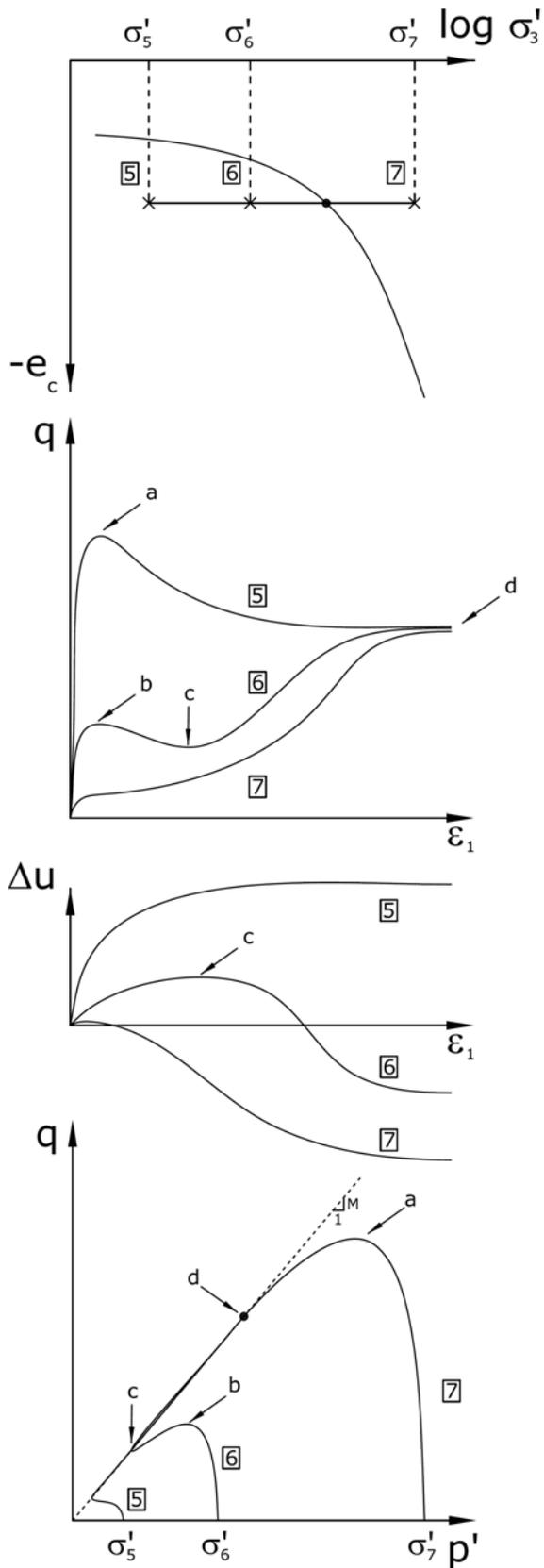


Figura 2.9: Comportamiento de arenas en ensayo triaxial no drenado.

definición de  $\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$  pierde validez. No obstante, es posible determinar un valor de  $\phi_c$  dado que la definición de las tensiones efectivas no se ve afectada por la localización.

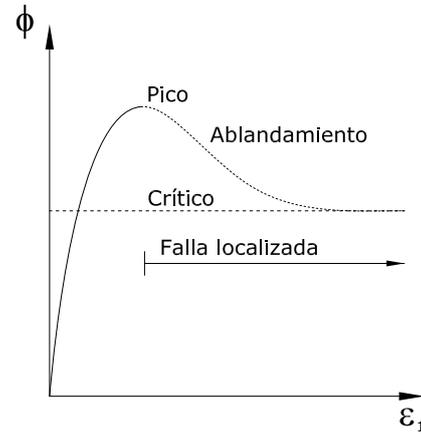


Figura 2.10: Ablandamiento en ensayo triaxial drenado.



Figura 2.11: Banda de localización de deformaciones en ensayo triaxial.



(a) Loma Prieta, 1983.



(b) Niigata, 1964.



(c) Nueva Zelanda, 2012.



(d) Turquía, 1999.



(e) Caracas, 1967.



(f) Loma Prieta, 1983.

Figura 2.12: Consecuencias de la licuación.

## 3. Programa experimental

### 3.1. Equipamiento

Con el fin de realizar ensayos triaxiales drenados y no drenados se mejoró y adaptó la cámara triaxial y otros equipos. Estas adaptaciones permiten almacenar las mediciones de carga, presiones y deformaciones longitudinales en forma automática — en formato digital —, armar muestras con cualquier densidad relativa, saturar muestras y medir el cambio de volumen — analógicamente —. En la figura 3.1 se puede ver la disposición de todos los equipos en el laboratorio.



Figura 3.1: Vista general de todos los equipos

#### 3.1.1. Adquisición de datos

Para la adquisición de la información se trabajó con una placa adquisidora Advantech con posibilidad de registrar 16 lecturas en simultáneo, siendo necesario añadir algunos circuitos electrónicos para el acondicionamiento de señal. En la figura 3.2 se ven los equipos mencionados. Se programó en *Labview* un sistema de captura de da-

tos que digitaliza las lecturas recibidas por la placa adquisidora. Este programa incluye un sistema de filtrado, almacenado y visualización en tiempo real de las mediciones que se realizan durante el ensayo. En la figura 3.3 se muestra la vista general del diagrama de bloques utilizado, que permite ver de modo esquemático el procesamiento de los datos.



Figura 3.2: Circuito de conexiones electrónicas.

#### 3.1.2. Instrumental

La carga axial es medida electrónicamente mediante dos celdas de carga de rango 0 a  $12kN$  y 0 a  $2kN$  — figura 3.4 — respectivamente. Se utilizó alternativamente una u otra según la carga máxima esperada para cada ensayo.

La presión neutra y la presión de confinamiento fueron medidas con dos transductores de presión Winters LE 3150 de rango 0 a  $1034kPa$  — figura 3.5 —.

Para la medición de la deformación local se cuenta con 3 LVDTs Solatron OP6 de rango 0 a  $12mm$ . Para su funcionamiento se cuenta con un circuito que brinda una señal de salida de 0 a  $2,5V$  fabricada por el Ing.

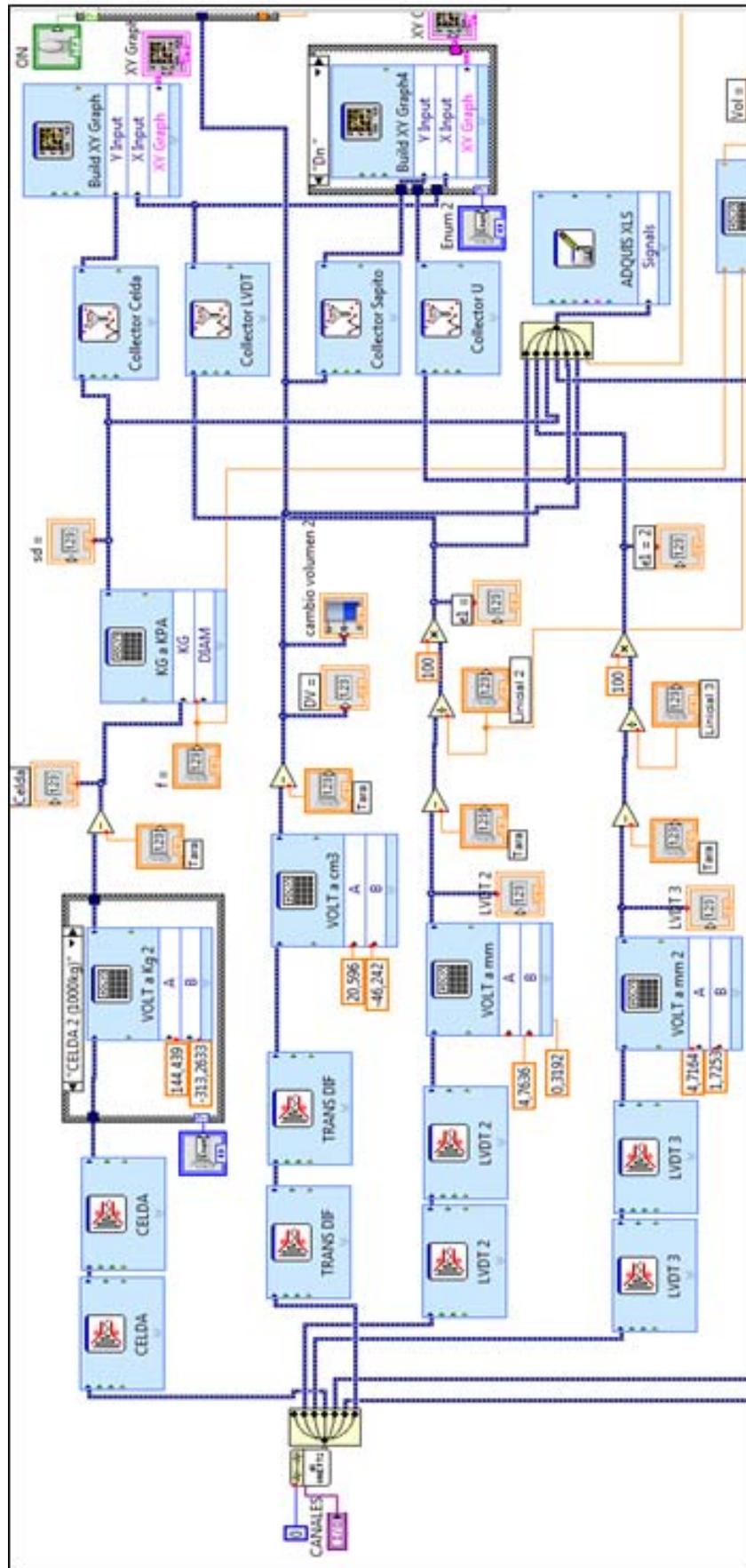


Figura 3.3: Diagrama de bloques en *Labview*.



Figura 3.4: Celdas de carga utilizadas.



Figura 3.5: Transductor absoluto de presión.

Kadener, del Laboratorio de Instrumental y Mediciones de la FIUBA. También se utilizaron 3 manómetros analógicos para una mejor visualización y control del correcto funcionamiento de los equipos electrónicos.

### 3.1.3. Equipos periféricos

Se utilizó un compresor de aire con capacidad de  $800\text{kPa}$  para generar la presión de confinamiento y la *backpressure*, una bomba y una trampa de vacío para las etapas de armado y saturación de la muestra, un reservorio con agua desaireada para saturar muestras y dos buretas para la medición del cambio de volumen durante la etapa de consolidación — tanto en ensayos CIUC como en ensayos CIDC — y en la etapa de aplicación de tensión diferencia en ensayos.

## 3.2. Materiales y métodos

### 3.2.1. Procedimiento

Se detalla el procedimiento de armado de una muestra en un ensayo triaxial, para mayor detalle ver anexo D.

Se comienza por saturar todas las líneas que conectan el reservorio de agua con el cabezal inferior. Se coloca una piedra porosa saturada sobre el cabezal inferior y se utiliza cinta para sellar la interfase entre la piedra porosa y el cabezal inferior, evitándose así una posible pérdida de finos. Se envaselina el cabezal inferior y la piedra porosa, se coloca una membrana de látex fijándola con 5 *O-rings* — figura 3.6.i —.

Luego se coloca el molde bipartido. Nuevamente se sella la interfase entre ambas partes con cinta adhesiva, se ajusta una abrazadera en la parte inferior — figura 3.6.ii — y se estira la membrana hasta recubrir el interior del molde. Se adjuntaron pequeños listones de madera en la cara interior del molde para lograr la adherencia de la membrana en la parte superior al aplicar vacío. Se utiliza el método *Moist Tamping* para el armado de la muestra — figura 3.6.iii —.

Se enhebran en la manguera del cabezal superior 3 *O-rings*, una abrazadera y las bandas elásticas utilizadas para la colocación de los LVDTs. Se une mediante cinta una piedra porosa saturada al cabezal superior, se envaselina y se apoya el conjunto sobre la parte superior de la muestra. Se verifica la horizontalidad del cabezal superior con un nivel de burbuja.

Se posiciona la parte superior de la membrana sobre el cabezal superior fijándola

con *O-rings* ajustados con una abrazadera. Se retira el vacío entre la membrana y el molde, se lo conecta al cabezal superior con un valor menor a  $20kPa$  y se retira el molde — figura 3.6.iv —.

Se apoya el anillo de acrílico sobre la base de la cámara triaxial, se ubican las bandas elásticas sobre la muestra y se colocan los LVDTs midiéndose sus longitudes iniciales con un calibre — figura 3.6.v —.

Se enrosca la celda de carga al vástago y se vincula la cámara triaxial a la base a través del anillo de acrílico. Se pone en contacto el vástago superior con el pórtico de carga — figura 3.6.vi —.

**Moist Tamping** Para el armado de una muestra de  $100mm$  de diámetro por  $222mm$  de altura se mezclan  $4000g$  de suelo con humedad natural con  $200g$  de agua destilada hasta lograr una humedad uniforme en toda la masa de suelo.

Se determina una densidad relativa objetivo, suponiendo una humedad igual al 6% se calcula la cantidad de suelo húmedo a colocar en cada capa. Se introduce dentro del molde el suelo correspondiente a una capa, se lo compacta hasta lograr la altura preestablecida de  $37.0mm$  y se escarifica la cara superior para mejorar la interfase entre capas.

Finalizado el armado se mide la humedad del suelo empleado con la cual luego se calcula la densidad relativa real de la muestra armada.

### 3.3. Caracterización física

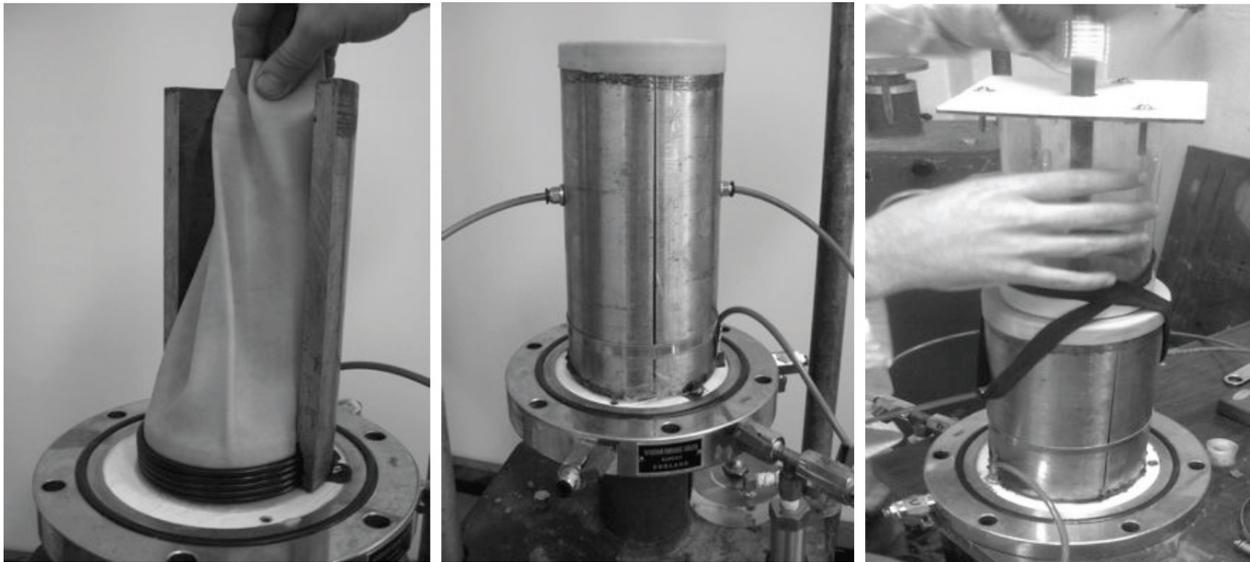
La arena utilizada proviene de un depósito de origen fluvial. De la inspección tacto visual se la identifica como arena fina, subredondeada, de color grisáceo y con escaso contenido de finos.

Se efectuaron los siguientes ensayos: i) análisis granulométrico por tamizado en vía húmeda; ii) límites de Atterberg — límite líquido y límite plástico — ; iii) gravedad específica de las partículas sólidas; iv) inspección microscópica de partículas; v) difracción por rayos X; vi) relación de vacíos máxima y mínima. Todos los ensayos efectuados siguieron los lineamientos de las normas ASTM [39, 40, 33, 34, 35, 38, 41, 37].

En la tabla 1 se presentan las propiedades físicas determinadas para la arena.

La arena presenta un escaso contenido de finos no plásticos, por lo tanto no se pudieron determinar los límites de Atterberg. El análisis por sedimentación no se realizó ya que presenta un contenido de finos menor al 5%. En las figuras 3.7, 3.8, y 3.9 se presentan imágenes microscópicas de granos, la curva granulométrica y el difractograma obtenido.

Para la realización de los estudios mineralógicos de difracción por rayos X se contó con la colaboración del Laboratorio de Sólidos Amorfos de la FIUBA, lugar donde se ejecutaron los ensayos y se obtuvo asesoramiento para el posterior análisis de los resultados. Se aclara que el análisis por difracción es semi-cuantitativo [17], aunque en general y para los objetivos de este trabajo se acepta que la cantidad presente de cada material es proporcional a la relación



Secuencia i) a iii).



Secuencia iv) a vi).

Figura 3.6: Secuencia de armado: i) molde bipartido sobre base de cámara triaxial, ii) molde con membrana preparado para carga de arena, iii) compactación manual de arena en capas, iv) retiro de molde y aplicación de vacío en cabezal superior, v) colocación de instrumental, vi) muestra preparada para comienzo de etapa de saturación.

| USCS | #200<br>[%] | $C_u$ | $C_c$ | $D_{50}$<br>[mm] | $G_s$ | $e_{min}$ | $e_{max}$ | R     | S     |
|------|-------------|-------|-------|------------------|-------|-----------|-----------|-------|-------|
| SP   | 3           | 2.3   | 1.0   | 0.357            | 2.71  | 0.585     | 0.811     | 0.510 | 0.603 |

Tabla 1: Parámetros físicos.

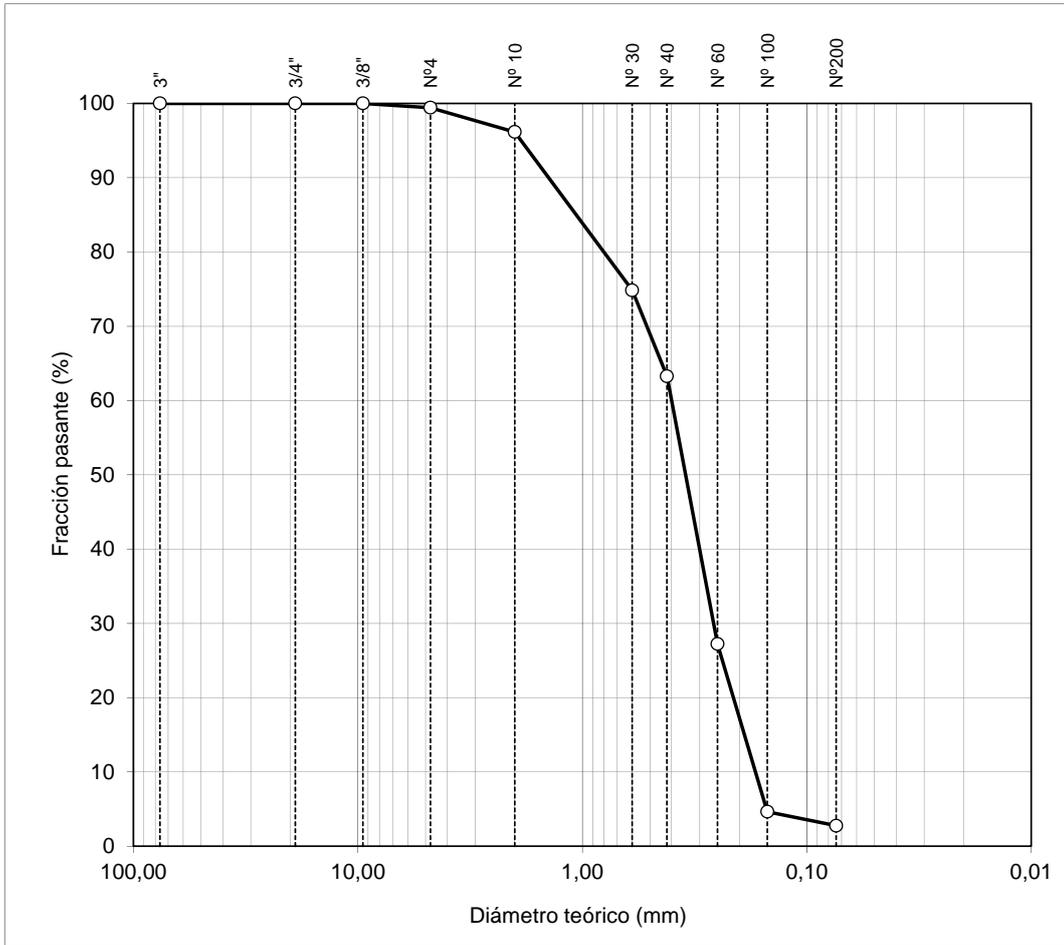


Figura 3.8: Curva granulométrica.

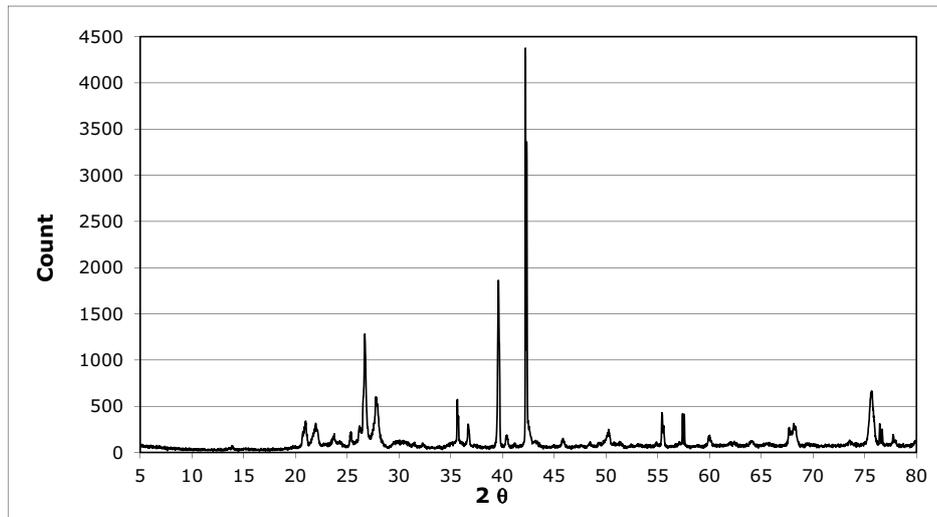


Figura 3.9: Difractograma.



Figura 3.7: Vista con microscopio de diferentes granos.

entre el número de picos que tiene asociados y el total [4]. Se detectó el predominio de los siguientes minerales: Anhidrita, Albita, Calcita, Cuarzo, Goethita, Magnetita y Olivino.

Se determinó el ángulo de fricción interna crítico mediante el método expeditivo de la probeta inclinada [26] como se indica en la figura 3.10. Se obtuvo un  $\phi_c = 32,6^\circ$ .

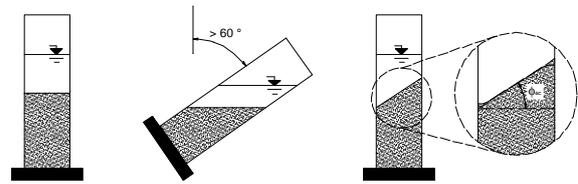


Figura 3.10: Método de la bureta [26].

### 3.4. Ensayos triaxiales CIDC

Se realizaron tres ensayos triaxiales de compresión a deformación controlada, consolidación isotrópica y drenados — CIDC —. Se prepararon muestras con densidades relativas en condición suelta  $D_r \leq 1/3$ , media  $1/3 < D_r < 2/3$  y densa  $D_r \geq 2/3$ . La presión de confinamiento efectivo nominal utilizada fue de  $100kPa$ . En la tabla 2 se presenta el conjunto de ensayos realizados.

Los resultados de los ensayos triaxiales CIDC sobre las muestras de arena Carena se presentan en la figura 3.11 en los planos  $\sigma_d - \varepsilon_1$ ,  $\Delta u - \varepsilon_1$  y  $q - p'$ . En la tabla 4 se informan los  $\phi_c$  y  $\phi$  obtenidos. No se informan los  $\phi_c$  de las muestras que no llegaron al estado crítico.

### 3.5. Ensayos triaxiales CIUC

Se realizaron nueve ensayos triaxiales de compresión a deformación controlada,

| $\sigma'_3$<br>[kPa] | Densidad relativa   |                    |                    |
|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
|                      | Suelta<br>$D_r$ [%] | Media<br>$D_r$ [%] | Densa<br>$D_r$ [%] |
| 100                  | 4.5                 | 46.2               | 88.2               |

Tabla 2: Ensayos triaxiales CIDC realizados.

| $\sigma'_3$<br>[kPa] | Densidad relativa   |                    |                    |
|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
|                      | Suelta<br>$D_r$ [%] | Media<br>$D_r$ [%] | Densa<br>$D_r$ [%] |
| 50                   | 8.7                 | 52.5               | 92.5               |
| 100                  | 13.6                | 51.2               | 92.5               |
| 200                  | 10.8                | 54.4               | 88.2               |

Tabla 3: Ensayos triaxiales CIUC realizados.

| $\sigma'_3$<br>kPa | $D_r$<br>% | $\phi_c$<br>° | $\phi$<br>° |
|--------------------|------------|---------------|-------------|
| 100                | 4.5        | 31.4          | 31.4        |
| 101                | 46.2       | -             | 34.8        |
| 100                | 88.2       | -             | 39.5        |

Tabla 4: Resultados CIDC Carena.

| $\sigma'_3$<br>kPa | $D_r$<br>% | $\phi_c$<br>° | $s_u$<br>kPa |
|--------------------|------------|---------------|--------------|
| 53                 | 8.7        | -             | 19           |
| 49                 | 52.5       | 33.4          | 207          |
| 49                 | 92.5       | -             | 383          |
| 89                 | 13.6       | -             | 36           |
| 102                | 51.2       | 33.7          | 267          |
| 93                 | 92.5       | -             | 451          |
| 200                | 10.8       | 30.1          | 93           |
| 205                | 54.4       | 33.3          | 431          |
| 201                | 88.2       | -             | 698          |

Tabla 5: Resultados CIUC Carena.

consolidación isotrópica y no drenados — CIUC —. Se prepararon muestras con densidades relativas en condición suelta  $D_r \leq 1/3$ , media  $1/3 < D_r < 2/3$  y densa  $D_r \geq 2/3$ . Las presiones de confinamiento efectivo nominales utilizadas fueron de 50, 100 y 200 kPa. En la tabla 3 se presenta el conjunto de ensayos realizados.

Los resultados de los ensayos triaxiales CIUC sobre las muestras de arena Carena se presentan en las figuras 3.12, 3.13 y 3.14 en los planos  $\sigma_d - \varepsilon_1$ ,  $\Delta u - \varepsilon_1$  y  $q - p'$ . En la tabla 5 se informan los  $\phi_c$  y  $s_u$  obtenidos. No se informan los  $\phi_c$  de las muestras que licuaron o no llegaron al estado crítico por alguna otra razón.

### 3.6. Línea de estado crítico

A partir de los ensayos considerados válidos se grafican los puntos en el plano  $e_c - p'$  para cada material en la figura 3.15.

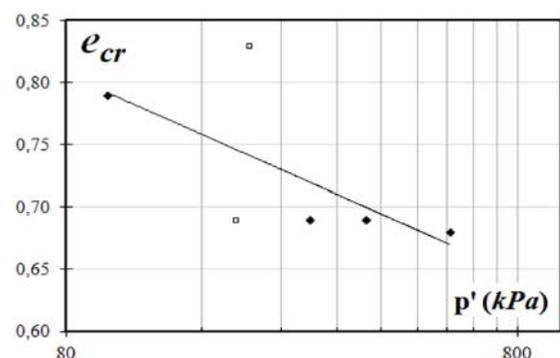
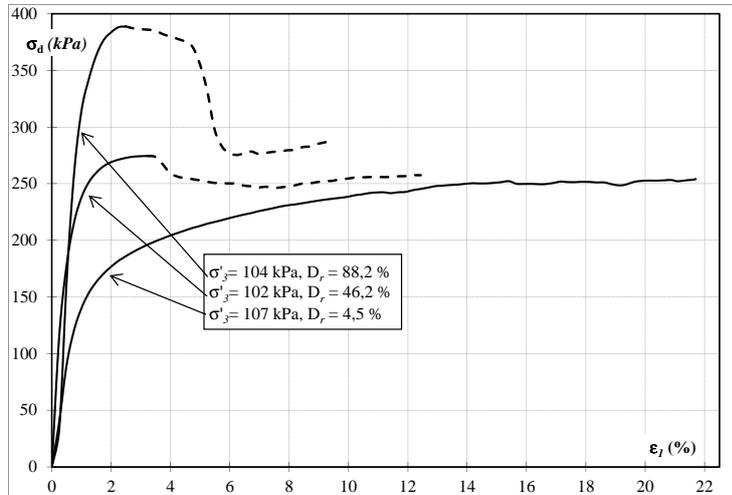
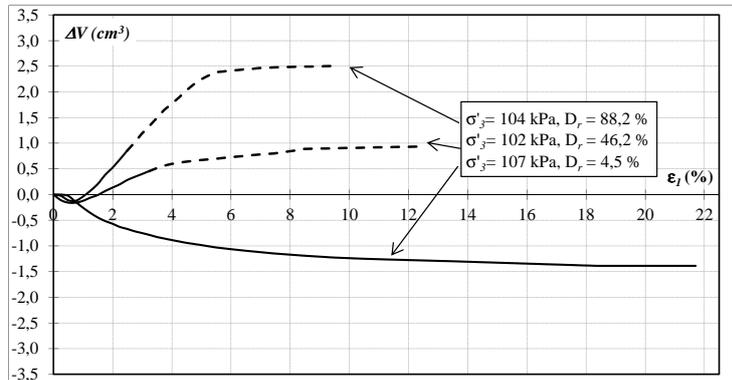


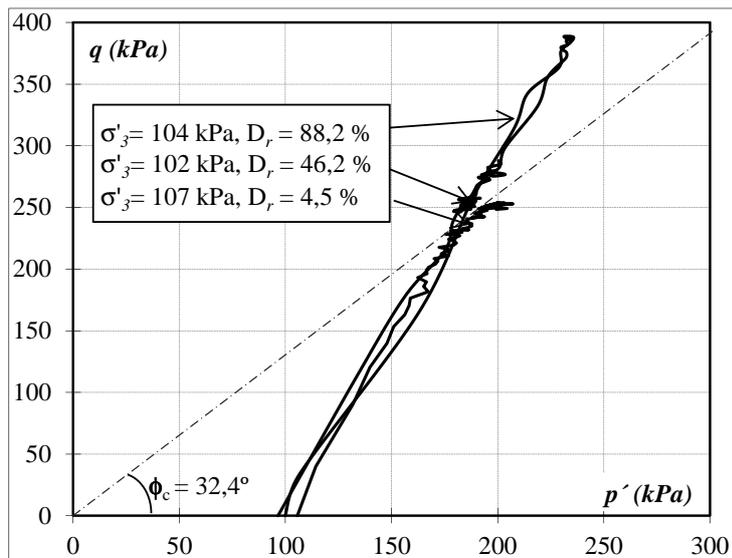
Figura 3.15: Línea de estado crítico.



(a) Curva tensión - deformación.

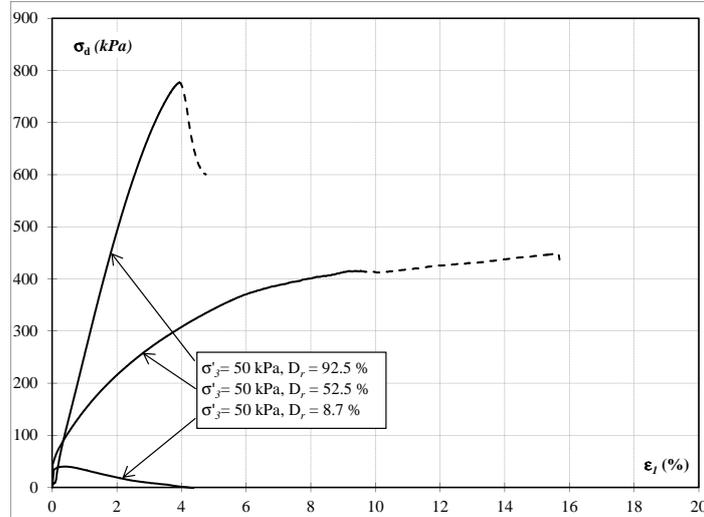


(b) Curva variación de volumen vs deformación.

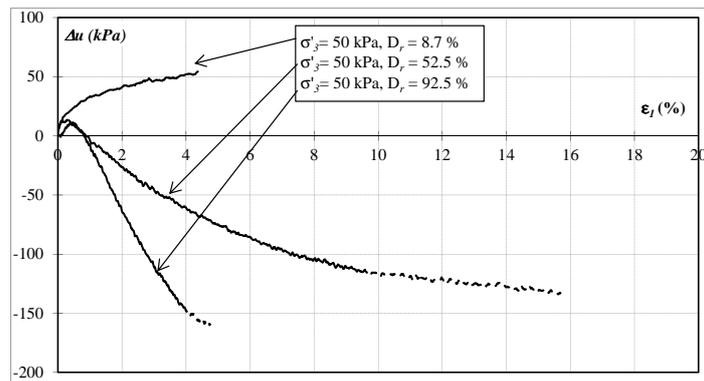


(c) Curva tensión desviadora vs presión media efectiva.

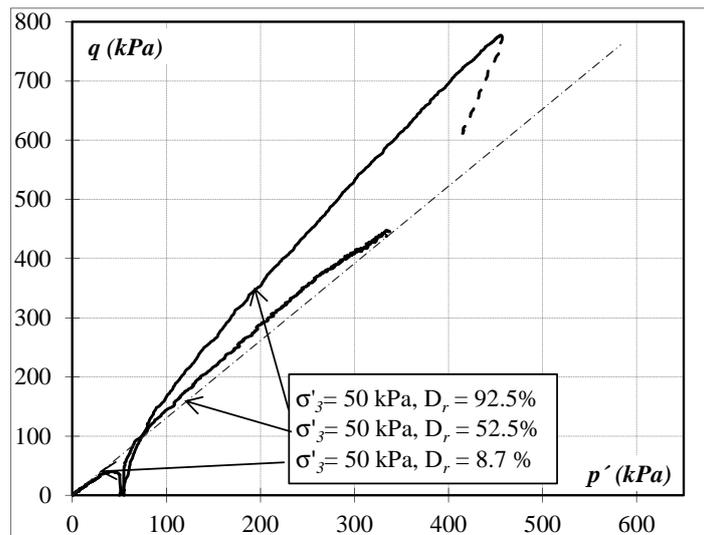
Figura 3.11: Ensayos triaxiales CIDC para  $\sigma'_3 \simeq 100 \text{ kPa}$  en arena Carena.



(a) Curva tensión - deformación.

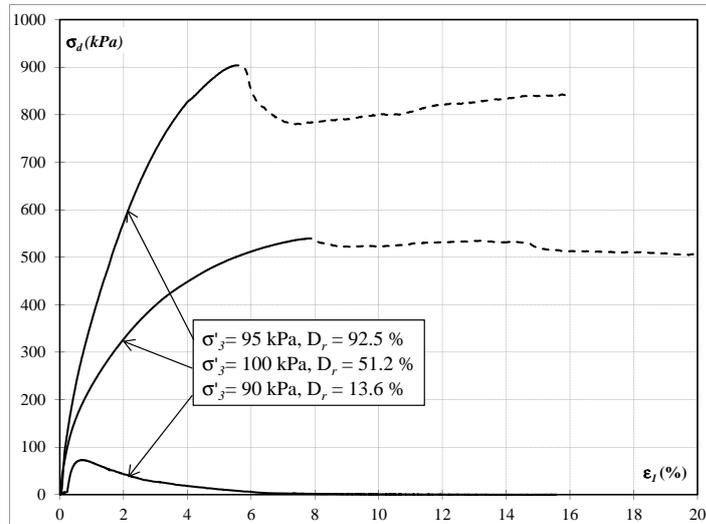


(b) Curva variación de presión neutra vs deformación.

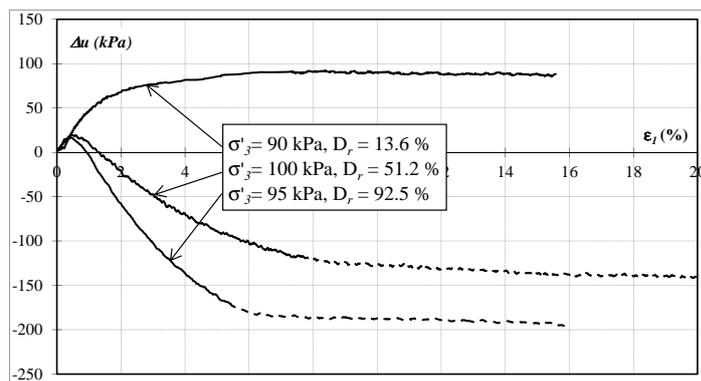


(c) Curva tensión desviadora vs presión media efectiva.

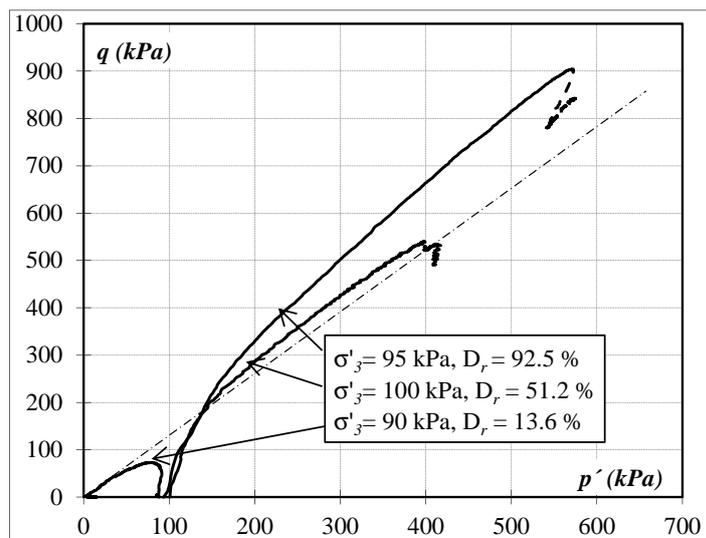
Figura 3.12: Ensayos triaxiales no drenados para  $\sigma'_3 \simeq 50$  kPa en arena Carena.



(a) Curva tensión - deformación.

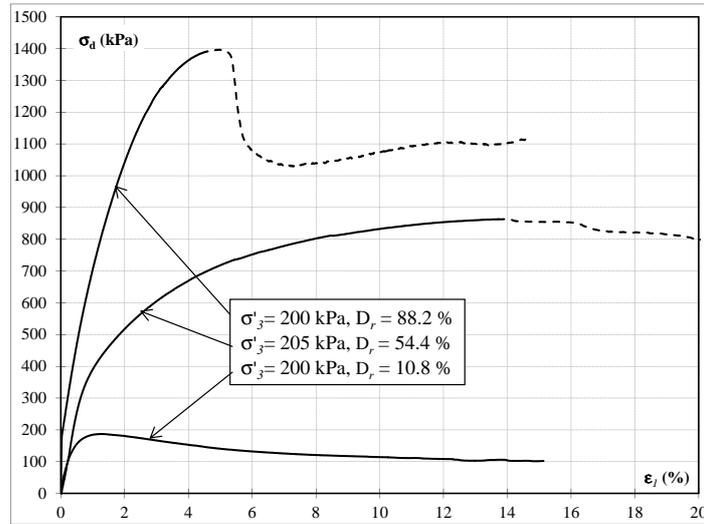


(b) Curva variación de presión neutra vs deformación.

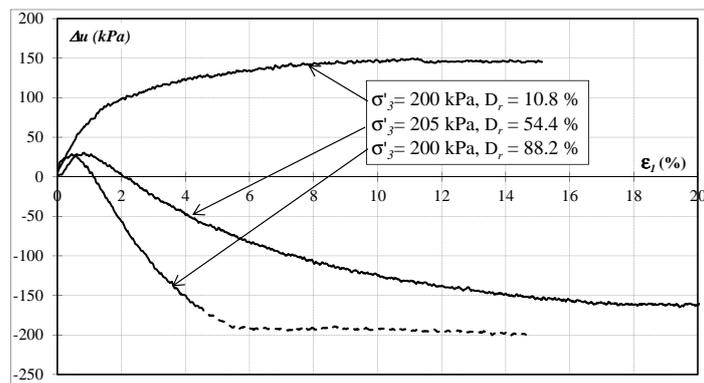


(c) Curva tensión desviadora vs presión media efectiva.

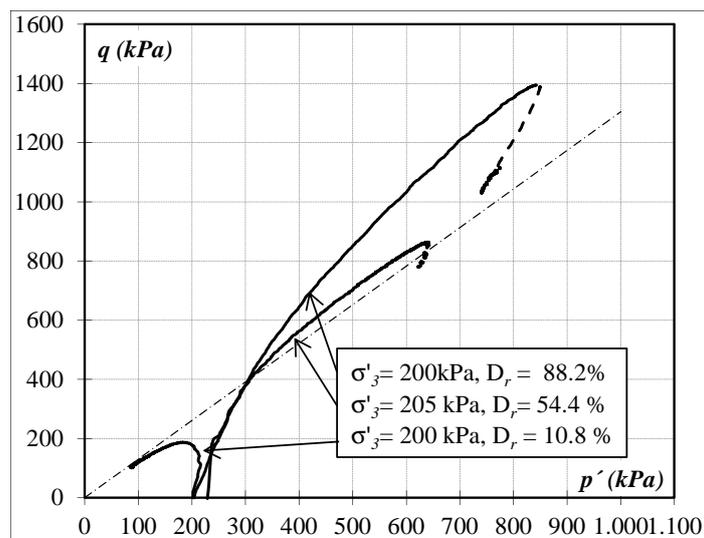
Figura 3.13: Ensayos triaxiales no drenados para  $\sigma'_3 \simeq 100 \text{ kPa}$  en arena Carena.



(a) Curva tensión - deformación.



(b) Curva variación de presión neutra vs deformación.



(c) Curva tensión desviadora vs presión media efectiva.

Figura 3.14: Ensayos triaxiales no drenados para  $\sigma'_3 \simeq 200 \text{ kPa}$  en arena Carena.

## 4. Interpretación de resultados

### 4.1. Resumen de resultados obtenidos

Se presentan los resultados de todos los ensayos triaxiales realizados. En todos los casos se obtuvieron valores distintos de  $\phi_c$  y mayores a los esperables [15]. Se induce que tanto las variaciones como los elevados valores se deben a la saturación parcial de las muestras.

La incidencia de la saturación parcial en el comportamiento mecánico se desarrolla en el párrafo 4.3.2.

**CIUC** Las muestras medias y densas exhibieron inicialmente un comportamiento contractivo y luego dilatante, manifestándose el estado de deformación cuasi constante antes del 1 % de  $\varepsilon_1$ . En ambos casos se observó la falla por localización de deformaciones. Esta se manifestó en el rango del 8-14 % de  $\varepsilon_1$  para muestras medias y en el rango del y 4-6 % de  $\varepsilon_1$  para muestras densas.

Las muestras sueltas desarrollaron un comportamiento netamente contractivo y licuaron antes del 1 % de  $\varepsilon_1$ . En los ensayos con  $\sigma'_3 = 50 \text{ kPa}$  y  $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$  se observó el colapso total de la muestra mientras que en el ensayo con  $\sigma'_3 = 200 \text{ kPa}$  se desarrolló la resistencia al corte no drenado residual.

Para un mismo confinamiento y distintas densidades no se manifiestan cambios significativos en  $E_i$  mientras que para un mismo rango de densidad se observa un aumento de  $E_i$  con el incremento de  $\sigma'_3$ .

En todos los ensayos se evidencia la incidencia del confinamiento efectivo y la densidad relativa en la resistencia exhibida por el material.

**CIDC** Las muestras media y densa fallaron por localización de deformaciones en  $\varepsilon_1 = 4\%$  y  $\varepsilon_1 = 2\%$  respectivamente. Al igual que en los ensayos no drenados, se observó el estado de deformación cuasi constante antes del 1 % de  $\varepsilon_1$ .

La muestra suelta tuvo un comportamiento netamente contractivo hasta alcanzar el estado crítico en  $\varepsilon_1 = 18\%$  y una deformación volumétrica del 1,5 %; se obtuvo  $\phi_c = 31,4^\circ$ .

Se observa en la muestra media y densa el aporte del ángulo de dilatancia  $\psi = 0,8^\circ$  y  $\psi = 5,6^\circ$  respectivamente.

No se aprecian diferencias en las rigidices iniciales de los 3 ensayos realizados.

**Método Santamarina y ensayos triaxiales** Se observa una gran similitud en los valores de  $\phi_c$  obtenidos mediante el método de la bureta —  $\phi_c = 32,6^\circ$  — y los ensayos triaxiales —  $\phi_c = 31,4^\circ$  —.

### 4.2. Errores experimentales previos

#### 4.2.1. Muestreo y transporte

Se deben analizar los métodos de muestreo y transporte para minimizar el grado de alteración entre el material original y el estudiado en laboratorio. Una de las alteraciones posibles es la pérdida de finos por lo que resulta importante realizar una correcta extracción y transporte del material

hasta el laboratorio.

La extracción de la arena estudiada se realizó con herramientas manuales en lugares representativos y, debido a que el contenido de humedad presente permitió un fácil manipuleo, no se observaron pérdidas de finos. El material de estudio se transportó hasta el laboratorio en recipientes plásticos cerrados.

#### 4.2.2. Método de armado

**Humedad en el armado *Moist Tamping*** Para el armado de la muestra se utiliza suelo con humedad ambiente y no suelo seco, simplificándose en gran medida el trabajo en el laboratorio. Al no conocer esta humedad inicial, luego del agregado y mezclado con agua, resulta imposible determinar la humedad del suelo con el cual se arma la muestra. Finalizado el armado, se mide la humedad sobre el suelo excedente y se calcula la densidad relativa real de la muestra ensayada.

Debido a que en este proyecto de investigación interesa conocer el comportamiento en determinados rangos de  $D_r$ , son admisibles las desviaciones de las densidades obtenidas respecto a las inicialmente buscadas. La máxima desviación de  $D_r$  obtenida fue de 7%.

**Homogeneidad de la muestra** Durante el armado de la muestra se observó que la energía entregada durante la compactación disminuye gradualmente para cada capa. Se deduce que parte de la energía entregada para compactar las capas superiores es absorbida por las inferiores por lo que se obtiene una muestra no homogénea de mayor

densidad en las capas inferiores que en las superiores.

Para analizar en detalle y cuantificar los efectos del *Moist Tamping* en la densidad se propone congelar la muestra, seccionarla y medir la densidad de cada capa obteniéndose como resultado la variación de la densidad de la muestra en la altura.

### 4.3. Saturación y consolidación

#### 4.3.1. Saturación

Se midió un parámetro  $B$  entre 0.34 y 0.77. Estos valores son menores al 0.95 requerido en arenas [42] para asegurar la total saturación evidenciándose así la saturación parcial de las muestras.

Con el objetivo de lograr la total saturación y corregir la metodología utilizada se proponen tres cambios:

1. Aumentar la *backpressure* final utilizada a 600 kPa para asegurar la total disolución del aire en el agua.
2. Aumentar la duración de cada escalón de *backpressure*, en especial la del último, lográndose una duración total del proceso de saturación del orden de los 5 días.
3. Se recomienda la circulación de dióxido de carbono  $CO_2$  a través de la muestra previo a la aplicación de *backpressure*, en especial cuando la *backpressure* máxima sea menor a  $600kPa$ . Las ventajas de reemplazar el aire con  $CO_2$  son una mayor solubilidad en agua a presiones inferiores y reduce los tiempos

necesarios para lograr la saturación requerida [9].

#### 4.3.2. Incidencia de la saturación parcial

Debido a que se ensayaron muestras parcialmente saturadas no pueden definirse las tensiones efectivas  $\sigma'$  a partir de las tensiones totales  $\sigma$  y de la presión neutra  $u$  y debe utilizarse la teoría de suelos no saturados [8].

El objetivo del siguiente desarrollo es introducir brevemente la problemática existente en suelos parcialmente saturados.

**Tensiones efectivas en condición seca y saturada** En un suelo seco, existen dos fases: aire y suelo. Todo cambio en el estado tensional total incide directamente en el estado tensional efectivo y se pueden calcular las tensiones efectivas a partir de:

$$\sigma' = \sigma \quad (4.1)$$

En suelos saturados, las dos fases existentes son agua y suelo. Vale:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (4.2)$$

**Tensiones efectivas en suelos parcialmente saturados** En un suelo parcialmente saturado existen 3 fases: aire, agua y suelo. Debido a las diferentes presiones a las que se encuentran sometidas las fases, existen meniscos en las interfases aire-agua que dan lugar al desarrollo de tensiones capilares — figura 4.1 —. La magnitud de la fuerza capilar es función del radio de curvatura del menisco y por consiguiente del

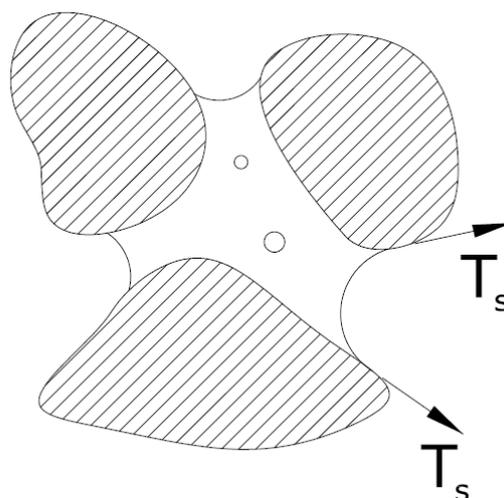


Figura 4.1: Interfase aire-agua y tensión capilar.

volumen de la burbuja de aire. Las fuerzas capilares constituyen una componente adicional que aporta a la resistencia del suelo.

En un ensayo triaxial no drenado la variación de las presiones neutras genera un cambio del volumen de las burbujas de aire. Debido a que los volúmenes de suelo y agua se pueden considerar constantes, la variación del volumen de aire presente genera un cambio en la relación de vacíos y en el grado de saturación de la muestra.

En el caso de suelos parcialmente saturados, se definen las tensiones efectivas a partir de las tensiones netas  $\sigma - u_a$  y la succión mátrica  $u_a - u_w$ . Una de las expresiones utilizadas para calcular las tensiones efectivas es [2]:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (4.3)$$

donde  $u_a$  es la presión del aire,  $u_w$  es la presión neutra y  $\chi$  es un parámetro relacionado con el grado de saturación  $S_r$  del suelo que varía entre 0 y 1 — figura 4.2 —.

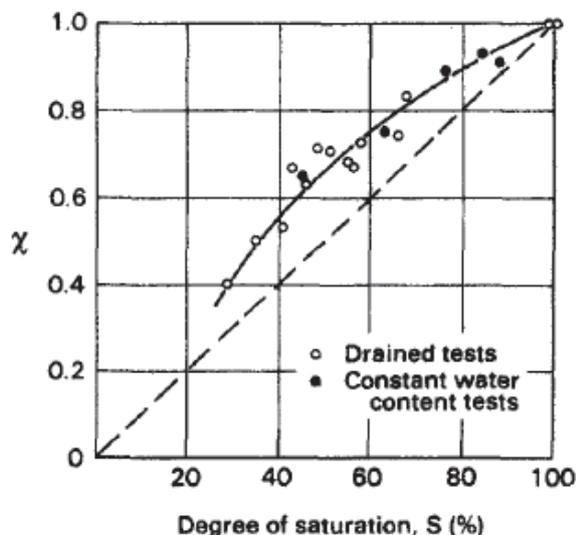


Figura 4.2: Relación  $\chi - S_r$  [8].

Cuando  $\chi = 0$  y  $u_a = 0$ , la expresión obtenida coincide con la ecuación 4.1 de los suelos secos mientras que para  $\chi = 1$ , la expresión se corresponde con la ecuación 4.2 de los suelos saturados. De esta forma es posible enmarcar el suelo seco y saturado como casos particulares de un suelo parcialmente saturado.

#### 4.3.3. Consolidación

En la etapa de consolidación, se obtuvieron valores de  $t_{50}$  menores a 10 segundos. Se decidió descartar los valores medidos dado que el orden de magnitud de los  $t_{50}$  calculados es igual al de la incertidumbre del método de medición.

### 4.4. Carga

#### 4.4.1. Medición de deformación axial global

En todos los ensayos se calculó la deformación axial  $\varepsilon_1$  a partir de la velocidad de avance de la máquina, el tiempo de ensayo transcurrido y la altura de la muestra.

La velocidad de avance se midió a través de un flexímetro colocado en el exterior de la cámara.

Para una mayor precisión en la determinación de las deformaciones axiales se propone la utilización de un instrumento de medición digital para medir el avance total de la máquina. El instrumento debe presentar un recorrido mayor que 6cm y una precisión mínima de 0.5mm, aproximadamente 0.25 % de la altura inicial de la muestra [42].

#### 4.4.2. Medición de deformación axial local

Se montaron LVDTs sobre la muestra para medir deformaciones locales y calcular la rigidez inicial. Como sistema de soporte se utilizaron bandas elásticas para acompañar las deformaciones de la muestra.

La medición de las deformaciones locales no resultó ser exitosa pudiéndose atribuir esto a la calidad del sistema de soporte, al desplazamiento relativo membrana - banda elástica y a la no homogeneidad de la muestra causada por el *Moist Tamping*.

Para obtener valores confiables de rigidez inicial es necesario mejorar el sistema de soporte de forma que sea posible medir con precisión deformaciones axiales del orden de  $1 \times 10^{-6}$ .

#### 4.4.3. Velocidad de deformación y tiempo estimado para la rotura

La velocidad de deformación debe ser seleccionada para que las presiones neutras dentro de la muestra sean uniformes. En ensayos drenados con *backpressure* no debe

existir variación de presión neutra mientras que en ensayos no drenados la presión neutra medida en el cabezal inferior sea representativa de la existente en toda la muestra [1].

Si bien la velocidad utilizada cumple lo especificado por la norma ASTM [42], se observó en los ensayos drenados una pequeña variación de la presión neutra, por lo que se recomienda reducir la velocidad de avance de la máquina. La determinación de un valor óptimo depende directamente de la permeabilidad del material en estudio y debe ser estudiado para cada caso en particular.

#### **4.4.4. Sistema de adquisición de datos**

A lo largo de cada ensayo se observa una variación de  $\pm 5kPa$  en las lecturas de los instrumentos de medición. Dado que la precisión de los instrumentos utilizados es del orden de  $2kPa$ , se puede asumir que dicha variación se debe principalmente a la insuficiente calidad de las conexiones y a inestabilidades registradas en la tensión brindada por la fuente.

Para mejorar la calidad de las mediciones es necesaria la fabricación de un sistema de conexiones que permita el correcto acondicionamiento y estabilización de las señales con el consiguiente aumento de precisión en las mediciones realizadas.

## 5. Modelación constitutiva

### 5.1. Introducción

Un modelo constitutivo es un conjunto de ecuaciones que relacionan a las tensiones con las deformaciones. Las principales fuentes de consulta para la redacción del capítulo son [32, 29, 23, 20, 28].

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó el modelo *Hardening Soil Model*, un modelo elastoplástico de simulación del comportamiento de suelos.

### 5.2. Nomenclatura

Se definen los parámetros que serán utilizados en el desarrollo de este capítulo.

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\alpha$        | $\alpha = \frac{3+\sin\phi}{3-\sin\phi}$  |
| $\psi_c$        | Ángulo de dilatancia en estado crítico  |
| $\psi_m$        | Ángulo de dilatancia movilizado   |
| $\phi_m$        | Ángulo de fricción movilizado   |
| $q_a$           | Asíntota de la hipérbola que es gráfico de la relación entre tensión desviadora y deformaciones principales |
| $\nu$           | Coefficiente de Poisson   |
| $c$             | Cohesión  |
| $\varepsilon^e$ | Deformación elástica  |
| $\varepsilon^p$ | Deformación plástica  |
| $\gamma^p$      | Deformación por corte plástica, parámetro de endurecimiento   |

|                   |   |
|-------------------|---|
| $\varepsilon$     | Deformación total   |
| $\varepsilon_v^c$ | Deformación volumétrica por consolidación   |
| $m$               | Dirección de la normal a la curva de potencial plástico   |
| $\lambda$         | Factor de crecimiento de las deformaciones plásticas  |
| $D$               | Matriz de rigidez   |
| $K_c$             | Módulo de compresión elastoplástica   |
| $H$               | Módulo de endurecimiento  |
| $K_s$             | Módulo de hinchamiento elástico   |
| $\tilde{q}$       | Parametrización especial de la tensión desviadora   |
| $M$               | Parámetro auxiliar, función de $K_0^{NC}$ y de $E_{oed}^{ref}$                                  |
| $p_c$             | Presión de preconsolidación   |
| $K_0^{NC}$        | Relación entre tensión de reposo horizontal y vertical para un material normalmente consolidado |
| $E_{oed}^{ref}$   | Rigidez a la deformación edométrica   |
| $q_f$             | Tensión desviadora de fluencia, en el modelo hiperbólico.                                       |
| $\sigma^{ref}$    | Tensión de referencia para módulos elásticos  |

## 5.3. Modelos de Elastoplasticidad

### 5.3.1. Deformaciones en el rango elástico

En el rango elástico los incrementos de deformaciones están unívocamente relacionados con los incrementos de tensiones.

Las deformaciones elásticas son conservativas por lo que no existe disipación de energía. Todo el trabajo realizado por tensiones externas durante la deformación es almacenado y puede ser recuperado en una eventual descarga. La configuración final de un material elástico es independiente de los estados de tensiones y deformaciones previos.

El comportamiento elástico está limitado por la *superficie de fluencia* que engloba todos los estados tensionales a los que puede estar sometido el material sin experimentar deformaciones plásticas.

### 5.3.2. Deformaciones fuera del rango elástico

Al someter a un material a un estado tensional que alcanza la superficie de fluencia, el comportamiento del material deja de ser conservativo y se producen deformaciones plásticas. Se pierde la relación unívoca entre tensiones y deformaciones por lo que es necesario conocer la historia de cargas para poder determinar el estado de deformación asociado al estado de tensión.

Superado el rango elástico se desarrollan deformaciones elásticas y plásticas. A diferencia de las deformaciones elásticas, las deformaciones plásticas dependen del estado

tensional y no de los incrementos de tensión. Por ello, el vector de deformación plástica está asociado al estado tensional con que alcanza la superficie de fluencia. La *superficie de potencial plástico* define esta relación de flujo en el modelo constitutivo a través de su vector normal — denominado *ley de flujo* —.

Para simular el crecimiento del rango elástico de un material luego de experimentar deformaciones plásticas se introduce una *ley de endurecimiento*, que relaciona la expansión o contracción de la superficie de fluencia con la tasa de deformación plástica. En el caso de un modelo elastoplástico perfecto las deformaciones plásticas coinciden con las tensiones máximas y la superficie de fluencia no sufre variaciones.

## 5.4. Hardening Soil Model

El HSM tiene las siguientes características:

- Utiliza el modelo hiperbólico de hipoeelástico de Duncan y Chang como función de endurecimiento para deformaciones por corte.
- Utilización de una rigidez dependiente del confinamiento para la estimación de las deformaciones totales.
- Diferenciación de las rigideces de carga virgen y de descarga y recarga.
- Utilización de superficies de fluencia múltiples.
- Inclusión del fenómeno de dilatancia.
- Incorporación de una doble ley de endurecimiento, por corte y por deformación volumétrica.

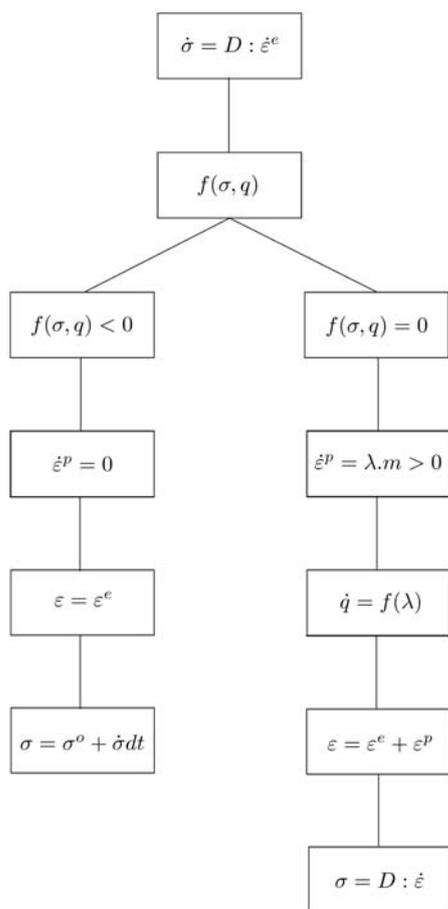


Figura 5.1: Diagrama de flujo del funcionamiento de un modelo constitutivo.

El HSM presenta un doble conjunto de definiciones, uno para las deformaciones por corte y otro para las deformaciones por consolidación:

- Propiedades elásticas — relación  $\sigma - \varepsilon^e$  —.
- Superficie de fluencia  $f$ .
- Superficie de potencial plástico  $g$ .
- Ley de endurecimiento  $q$ .

En ambos casos su operatoria funcional sigue un flujo como el que se muestra en la figura 5.1.

- Supone que las deformaciones totales son la suma algebraica de las deformaciones elásticas y plásticas:  $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$ .

- Para una dada deformación, considera la variación de la deformación como elástica —  $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e$  —. Se calcula el incremento de tensión  $\dot{\sigma}$  como  $\dot{\sigma} = D : \dot{\varepsilon}$ , siendo  $D$  una matriz de rigidez.
- En función del incremento de tensión  $\dot{\sigma}$  y un parámetro de endurecimiento  $q$  se determina si se alcanza la superficie de fluencia  $f(\sigma, q)$ .
- Si no fue alcanzada, el incremento de tensión no produjo deformaciones plásticas:  $\dot{\varepsilon}^p = 0$ .
- Si fue alcanzada, la función de fluencia se expande hasta que  $f(\sigma, q) = 0$  y se producen deformaciones plásticas  $\dot{\varepsilon}^p > 0$ .
- El incremento de las deformaciones plásticas se obtiene como el producto de un factor de crecimiento  $\lambda$  y la dirección de la normal a la curva de potencial plástico  $m$ :  $\dot{\varepsilon}^p = \lambda \cdot m$ .
- Se obtiene el incremento del parámetro de endurecimiento como  $\dot{q} = f(\lambda)$ .

#### 5.4.1. Deformaciones por corte

El HSM utiliza el modelo hiperbólico para la descripción de las deformaciones totales por corte [23, 28, 10]. La relación hiperbólica entre la tensión diferencia y las deformaciones principales establece una disminución de la rigidez del material a medida que crece la deformación hasta alcanzar la tensión de fluencia — figura 5.2 —.

La ecuación que rige las deformaciones

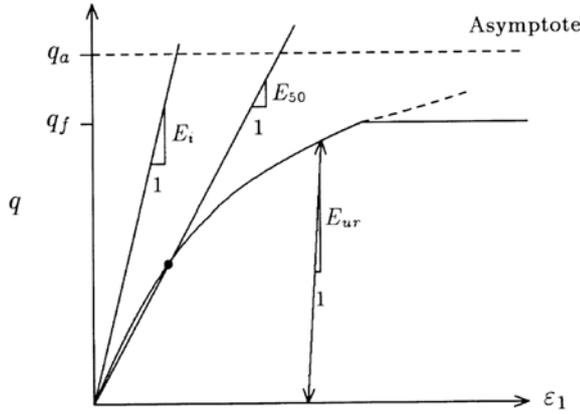


Figura 5.2: Relación hiperbólica entre tensiones y deformaciones para un ensayo drenado.

totales en el modelo hiperbólico es:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e + \varepsilon_1^p = \frac{q_a}{2E_{50}} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} \quad \text{para } \sigma_1 < q_f, \quad (5.1)$$

con:

$$q_f = \frac{6 \cdot \sin\phi_p}{3 - \sin\phi_p} \cdot (p_c + c \cdot \cos\phi). \quad (5.2)$$

El HSM utiliza un módulo de elasticidad  $E_{ur}$  para descarga y recarga para poder definir las deformaciones plásticas como la diferencia entre las totales descritas por el modelo hiperbólico y las deformaciones elásticas:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e + \varepsilon_1^p \Rightarrow \varepsilon_1^p = \varepsilon_1 - \varepsilon_1^e \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_1^e = \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E_{ur}} \quad (5.4)$$

A partir de esta definición, es posible determinar la superficie de fluencia por corte — superficie que delimita el recinto tensional de comportamiento elástico a corte — como:

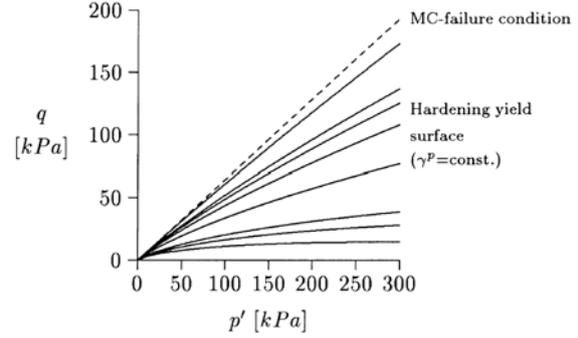


Figura 5.3: Variación de la superficie de fluencia en función de  $\gamma^p$ .

$$f_{12} = \frac{q_a}{E_{50}} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_2)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{E_{ur}} - \gamma^p, \quad (5.5)$$

$$f_{13} = \frac{q_a}{E_{50}} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_{ur}} - \gamma^p, \quad (5.6)$$

donde:

$$\gamma^p = \varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p = 2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p \approx 2\varepsilon_1^p \quad (5.7)$$

es el parámetro de endurecimiento friccional.

Se puede observar que el primer término de la expresión es  $\varepsilon_1$  — las deformaciones totales del modelo hiperbólico —, el segundo término es  $\varepsilon_1^e$  — deformaciones elásticas — y el tercero  $\gamma^p$  determina la deformaciones plásticas residuales de estados tensionales anteriores. Es decir, presenta una comparación de deformaciones axiales para determinar si se supera el rango elástico — figura 5.3 —.

Si el material alcanza la superficie de fluencia, sigue una ley de flujo no asociado  $g_s$  que determina las distorsiones plásticas a partir de la relación 5.7.

Para la determinación de las deformaciones axiales se desprecian las deformaciones volumétricas por ser sensiblemente meno-

res.

Obtenidas las distorsiones plásticas  $\gamma^p$ , se calculan las deformaciones volumétricas plásticas  $\varepsilon_v^p$  mediante la teoría de tensión-dilatancia de Rowe. Esta teoría supone una relación entre la variación volumétrica plástica y la variación de las distorsiones plásticas según:

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \sin \psi_m \cdot \dot{\gamma}^p \quad (5.8)$$

donde:

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \phi_m - \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_m \cdot \sin \phi_c} \quad (5.9)$$

y el ángulo de fricción movilizado se determina a partir de la expresión:

$$\sin \phi_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot c \cdot \cos \phi}. \quad (5.10)$$

La función determina que para relaciones de tensión bajas —  $\phi_m > \phi_c$  — el material contrae, mientras que para relaciones de tensión elevadas —  $\phi_m < \phi_c$  — el material dilata. Para un estado tensional de falla, se puede determinar una dilatancia crítica:

$$\sin \psi_c = \frac{\sin \phi - \sin \psi}{1 - \sin \phi \cdot \sin \psi}, \quad (5.11)$$

que es equivalente a considerar las funciones de potencial plástico:

$$g_{12} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} - \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \cdot \sin \psi_m \quad (5.12)$$

$$g_{13} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} - \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \cdot \sin \psi_m \quad (5.13)$$

### 5.4.2. Función de endurecimiento por consolidación

Para la definición de las deformaciones volumétricas por consolidación el modelo define la siguiente superficie de fluencia:

$$f_c = \frac{\tilde{q}^2}{M^2} + (p + c \cdot \cos \phi)^2 - (p_c + c \cdot \cos \phi)^2, \quad (5.14)$$

donde

$$\tilde{q} = \sigma_1 + (\alpha - 1) \sigma_2 - \alpha \sigma_3, \text{ con } \quad (5.15)$$

$$\alpha = \frac{3 + \sin \phi}{3 - \sin \phi},$$

es una parametrización de la tensión desviadora,  $p_c$  es la presión de preconsolidación y  $M$  es un parámetro auxiliar del modelo que es función de  $K_0^{NC}$  y  $E_{oed}^{ref}$ . Esta superficie de fluencia se denomina *cap*.

La función  $f_c$  describe en el plano  $q - p$  una elipse, de longitud  $p_c + c \cdot \cos \phi$  en el eje  $p$  y  $M(p_c + c \cdot \cos \phi)$  en el eje  $q$ . En base al valor de  $M$ , el modelo permite generar elipses de relaciones focales variadas. Esto se debe a la incorporación de un parámetro adicional de rigidez que permite independizar las rigideces volumétrica y de corte.

Para determinar el desarrollo de las deformaciones plásticas, una vez que el *cap* es alcanzado, HSM aplica una ley de flujo asociado  $g_c$ . Dado que se trata de una ley de flujo asociado el vector de deformación plástica es perpendicular a la superficie de fluencia, siendo la componente en la dirección  $q$  las deformaciones axiales plásticas  $\varepsilon_1^p$  y la componente en  $p$  las deformaciones volumétricas plásticas  $\varepsilon_v^p$ . Por lo tanto, la curva de potencial plástico coincide con la

superficie de fluencia en el *cap*:

$$g_c = f_c = \frac{\tilde{q}^2}{M^2} + (p + c \cdot \cos\phi)^2 - (p_c + c \cdot \cos\phi)^2. \quad (5.16)$$

Para cuantificar la magnitud de las deformaciones plásticas debidas a la consolidación isotrópica se plantea la relación algebraica entre deformaciones plásticas, elásticas y totales:

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_v^e + \dot{\varepsilon}_v^p, \quad (5.17)$$

$$\Rightarrow \dot{\varepsilon}_v^p = \dot{\varepsilon}_v - \dot{\varepsilon}_v^e = \frac{\dot{p}}{K_c} - \frac{\dot{p}}{K_s} = \frac{1}{H} \cdot \dot{p}, \quad (5.18)$$

donde  $H = \frac{K_c}{K_s - K_c} \cdot K_s$  es el módulo de endurecimiento que expresa la relación entre las rigideces elástica  $K_s$  y plástica  $K_c$  a la compresión isotrópica.

En base a la condición adicional de consistencia de la ley de flujo:

$$\dot{f}_c = \frac{\partial f_c}{\partial \sigma} \cdot \dot{\sigma} + \frac{\partial f_c}{\partial p_c} \cdot \dot{p}_c = 0, \quad (5.19)$$

se llega a la ley de endurecimiento que relaciona las deformaciones volumétricas de *cap*  $\dot{\varepsilon}_v^c$  — no necesariamente isotrópica— con la presión de preconolidación  $p_c$ :

$$\dot{\varepsilon}_v^c = \frac{H}{m+1} \cdot \left( \frac{\dot{p}}{\sigma^{ref}} \right)^{m+1}. \quad (5.20)$$

En el caso particular que  $\dot{p} = \dot{p}_c$  — compresión isotrópica — las deformaciones volumétricas de consolidación  $\dot{\varepsilon}_v^c$  coinciden con las deformaciones volumétricas plásticas  $\dot{\varepsilon}_v^p$ .

## 6. Modelación numérica

### 6.1. Estructura modelada

Se modeló un dique compuesto por celdas circulares de diámetro  $21,77m$  vinculadas mediante dos interceldas de  $4,98m$  de radio y unidas al muelle existente por medio de dos riñones — figuras 6.2 y 6.3 —. Las celdas, interceldas y riñones fueron materializados mediante el hincado de tablestacas y su posterior relleno con la arena Carena estudiada en los capítulos 3 y 4.

El perfil de suelo está dividido en tres estratos, un manto superficial de  $2m$  de espesor conformado principalmente por arenas sueltas, un estrato de limos compactos de  $6.5m$  en la parte media y una capa profunda de arcillas compactas — figura 6.1 —. En la tabla 6 se presentan los parámetros físicos y mecánicos de los materiales y las cotas que delimitan los estratos de suelo.

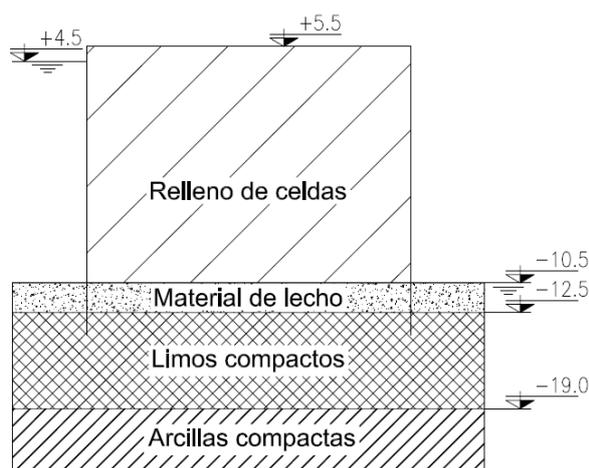


Figura 6.1: Estratigrafía y corte en el plano de simetría.

En la figura 6.3 se muestra la malla de elementos finitos realizada en *Plaxis 3D*. Se optó por simular la estructura en un modelo tridimensional dado que no son aplicables

los casos de simetría de revolución, estado plano de tensiones ni estado plano deformaciones.

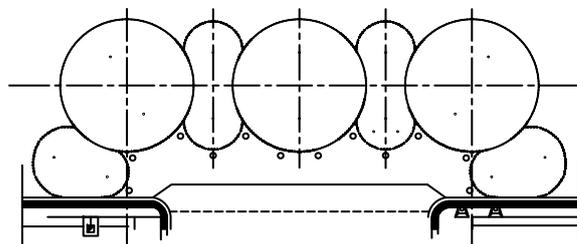


Figura 6.2: Planta de la ataguía celular del dique de carena.

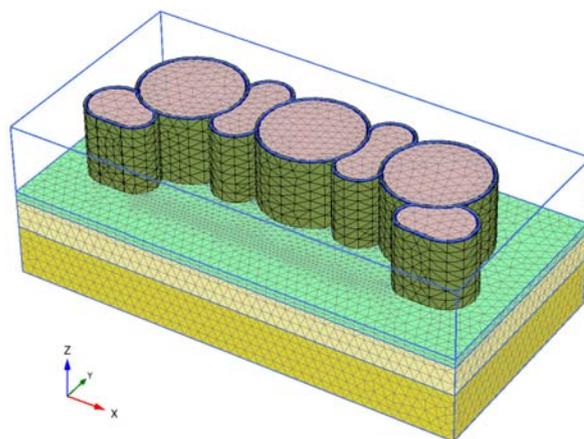


Figura 6.3: Malla de elementos finitos utilizada y sistema de referencia adoptado.

### 6.2. Materiales

El perfil de suelo está dividido en tres estratos arenas sueltas, limos compactos y arcillas compactas. Debido a la escasez de datos disponibles para caracterizar el terreno original se utilizó el modelo constitutivo Mohr-Coulomb. Los valores de los parámetros necesarios se obtuvieron de [19]. En la tabla 8 se presentan los parámetros utilizados para la modelación de los estratos del terreno original.

Para modelar la arena del recinto se utilizó el modelo constitutivo *Hardening Soil*

| Parámetro             | Unidad   | Arcillas comp.     | Limos comp.        | Material de lecho  |
|-----------------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Cota superior         | $m$      | -19                | -12.5              | -10.5              |
| Cota inferior         | $m$      | —                  | -19                | -12.5              |
| $\gamma_{\text{sat}}$ | $kN/m^3$ | 19                 | 18                 | 17                 |
| $c$                   | $kPa$    | 90                 | 30                 | 0                  |
| $\phi$                | $^\circ$ | 25                 | 29                 | 30                 |
| -                     | $cm/s$   | $1 \times 10^{-5}$ | $1 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-3}$ |

Tabla 6: Caracterización de los estratos del suelo natural.

| Parámetro | Unidad   | Tablestaca      |
|-----------|----------|-----------------|
| Modelo    | —        | Elástico lineal |
| Espesor   | $mm$     | 11              |
| $\gamma$  | $kN/m^3$ | 80              |
| $E$       | $GPa$    | 200             |
| $\nu$     | -        | 0.27            |

Tabla 9: Material de las tablestacas metálicas.

*Model.* Con los resultados de los ensayos triaxiales realizados durante la etapa de caracterización mecánica se calibraron los parámetros necesarios del modelo y se generaron tres juegos de parámetros para representar el comportamiento según el rango de  $D_r$ . En la tabla 7 se presentan los parámetros calibrados del HSM para las distintas condiciones de la arena Carena.

El acero utilizado en las tablestacas se modela como un material elástico lineal. En la tabla 9 se informan los parámetros utilizados en la simulación.

El procedimiento de ajuste de los parámetros del HSM consistió en dos etapas:

1. De las mediciones realizadas en laboratorio se obtuvieron los siguientes parámetros: relaciones de vacíos  $e_{\min}$ ,  $e_{\max}$  y  $e_{\text{inicial}}$ , parámetros de resistencia  $c$ ,  $\phi$  y  $\psi$ , permeabilidad  $k$ , el parámetro de rigidez  $E_{50}^{\text{ref}}$  y su presión de referencia  $p^{\text{ref}}$ .

2. A partir de la comparación de los resultados de los ensayos mecánicos con las curvas obtenidas con el módulo *Soil Test* de *Plaxis* se ajustaron los parámetros: rigidez edométrica  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ , rigidez elástica de descarga y recarga  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ , parámetro de control de la variación de la rigidez con el confinamiento  $m$ , módulo de Poisson  $\nu_{\text{ur}}$ , relación de tensiones verticales y horizontales  $K_0^{\text{nc}}$ , relación de falla  $R_f$  y la presión de preconsolidación  $POP$ .

En las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se presenta la comparación de las curvas obtenidas en laboratorio y las modeladas con el *Soil Test*.

En las muestras sueltas se observa un aceptable nivel de ajuste entre las curvas experimentales y las numéricas. En los ensayos con  $\sigma'_3 = 50 \text{ kPa}$  y  $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$  se logra reproducir el colapso de las muestras por licuación. El ensayo modelado con  $\sigma'_3 = 200 \text{ kPa}$  licúa por lo que no se logra replicar la resistencia residual manifestada por la muestra.

Las presiones neutras en los ensayos modelados son mayores a la obtenidas en los ensayos realizados en laboratorio. Se observa un buen ajuste en los cambios de volumen  $\Delta V$  y las trayectorias de tensiones en el plano  $q - p'$ .

| Parámetro         | Unidad   | Suelta         | Media          | Densa          |
|-------------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| Modelo            |          | HSM            | HSM            | HSM            |
| Tipo              |          | No drenado (A) | No drenado (A) | No drenado (A) |
| $\gamma_{unsat}$  | $kN/m^3$ | 14.76          | 15.73          | 16.74          |
| $\gamma_{sat}$    | $kN/m^3$ | 19.12          | 19.73          | 20.37          |
| $e_{init}$        | -        | 0.800          | 0.690          | 0.588          |
| Dilatancy cut-off | -        | Sí             | Sí             | Sí             |
| $e_{min}$         | -        | 0.562          | 0.562          | 0.562          |
| $e_{max}$         | -        | 0.822          | 0.822          | 0.822          |
| $E_{50}^{ref}$    | $MN/m^2$ | 15.0           | 30.0           | 55.0           |
| $E_{oed}^{ref}$   | $MN/m^2$ | 13.0           | 17.0           | 65.0           |
| $E_{ur}^{ref}$    | $MN/m^2$ | 160.0          | 100.0          | 180.0          |
| $m$               | -        | 0.5            | 0.5            | 0.5            |
| $c_{ref}$         | $kN/m^2$ | 0.1            | 5              | 5              |
| $\phi$            | °        | 33.7           | 35.3           | 41.3           |
| $\psi$            | °        | -1.0           | 5.0            | 5.0            |
| $\nu_{ur}$        | -        | 0.20           | 0.20           | 0.20           |
| $p_{ref}$         | $kN/m^2$ | 100.0          | 100.0          | 100.0          |
| $K_0^{nc}$        | -        | 0.445          | 0.480          | 0.600          |
| $R_f$             | -        | 0.9            | 0.9            | 0.9            |
| $k_{x,y,z}$       | $m/día$  | 34.56          | 34.56          | 34.56          |
| $K_{0,x}$         | -        | —              | —              | —              |
| $OCR$             | -        | 1.00           | 1.00           | 1.00           |
| $POP$             | $kN/m^2$ | 1.0            | 400.0          | 500.0          |

Tabla 7: Materiales HSM empleados en el modelo de Carena.

| Parámetro        | Unidad   | Arcillas compactas    | Limos compactos | Material de lecho |
|------------------|----------|-----------------------|-----------------|-------------------|
| Modelo           |          | Mohr-Coulomb          | Mohr-Coulomb    | Mohr-Coulomb      |
| Tipo             |          | No drenado (A)        | No drenado (A)  | No drenado (A)    |
| $\gamma_{unsat}$ | $kN/m^3$ | 18.00                 | 18.00           | 17.00             |
| $\gamma_{sat}$   | $kN/m^3$ | 18.00                 | 18.00           | 17.00             |
| $E$              | $MN/m^2$ | 250.0                 | 250.0           | 250.0             |
| $\nu$            | -        | 0.20                  | 0.20            | 0.20              |
| $G$              | $MN/m^2$ | 104.2                 | 104.2           | 104.2             |
| $E_{oed}$        | $MN/m^2$ | 277.8                 | 277.8           | 277.8             |
| $c_{ref}$        | $kN/m^2$ | 90.0                  | 30.0            | 5.0               |
| $\phi$           | °        | 25.0                  | 29.0            | 30.0              |
| $\psi$           | °        | 0.0                   | 0.0             | 0.0               |
| $V_s$            | -        | 238.1                 | 238.1           | 245.0             |
| $V_p$            | -        | 388.9                 | 388.9           | 400.2             |
| $k_{x,y,z}$      | $m/día$  | $8,64 \times 10^{-3}$ | 0.0864          | 0.8640            |
| $K_{0,x}$        | -        | 0.577                 | 0.515           | 0.500             |

Tabla 8: Materiales Mohr-Coulomb empleados en el modelo de Carena.

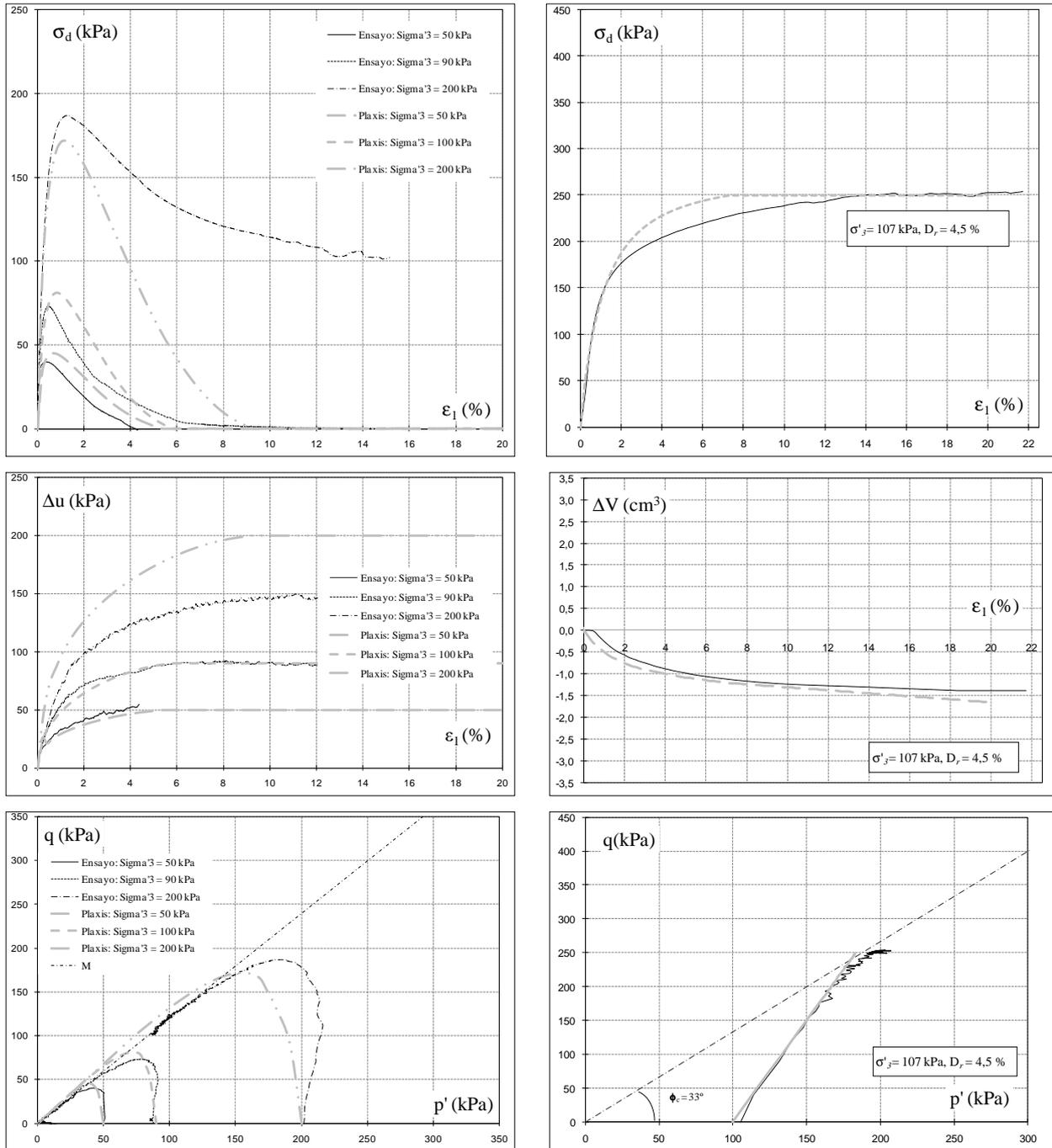


Figura 6.4: Calibración de arena Carena — suelta —.

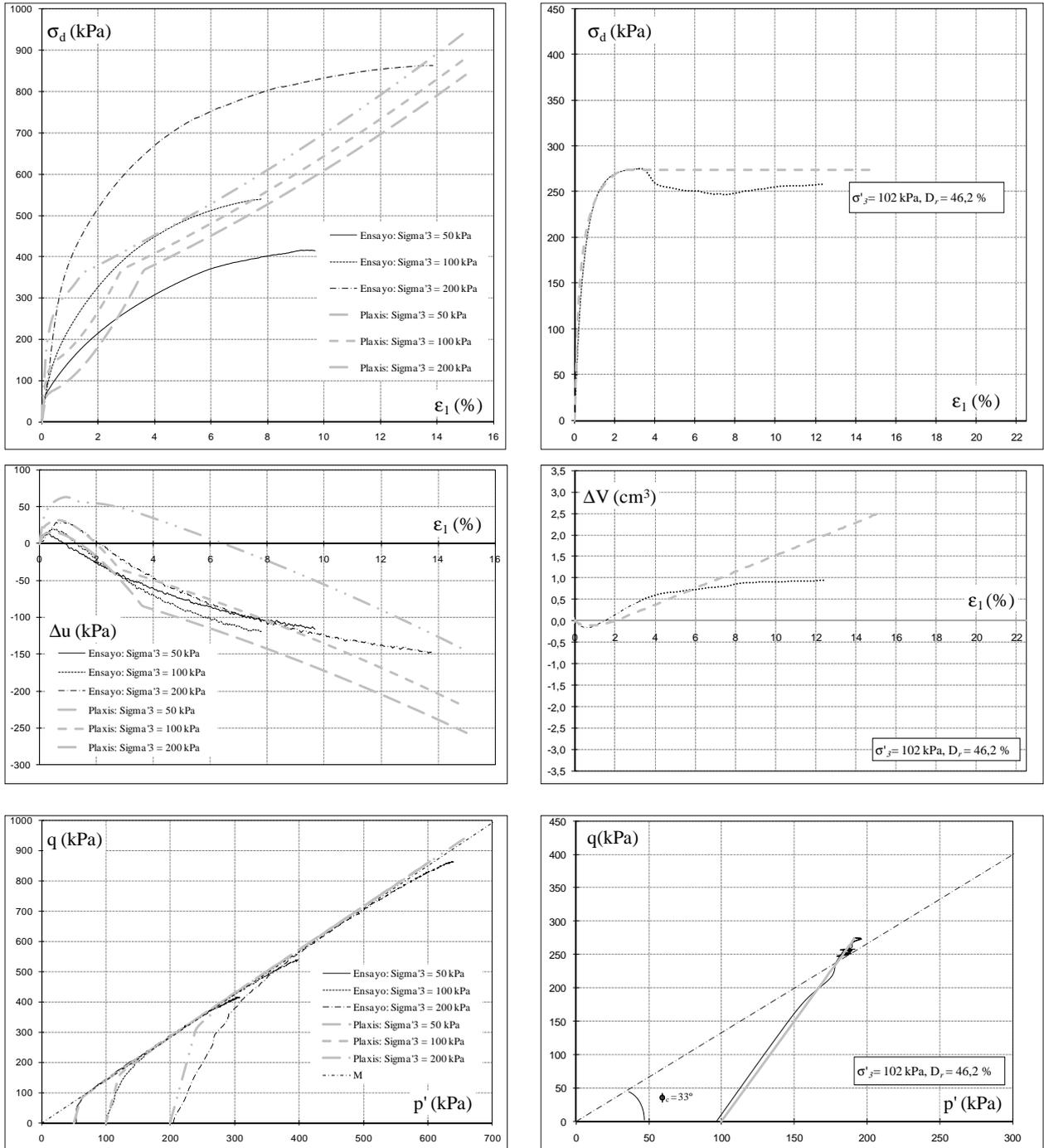


Figura 6.5: Calibración de arena de Carena — media —.

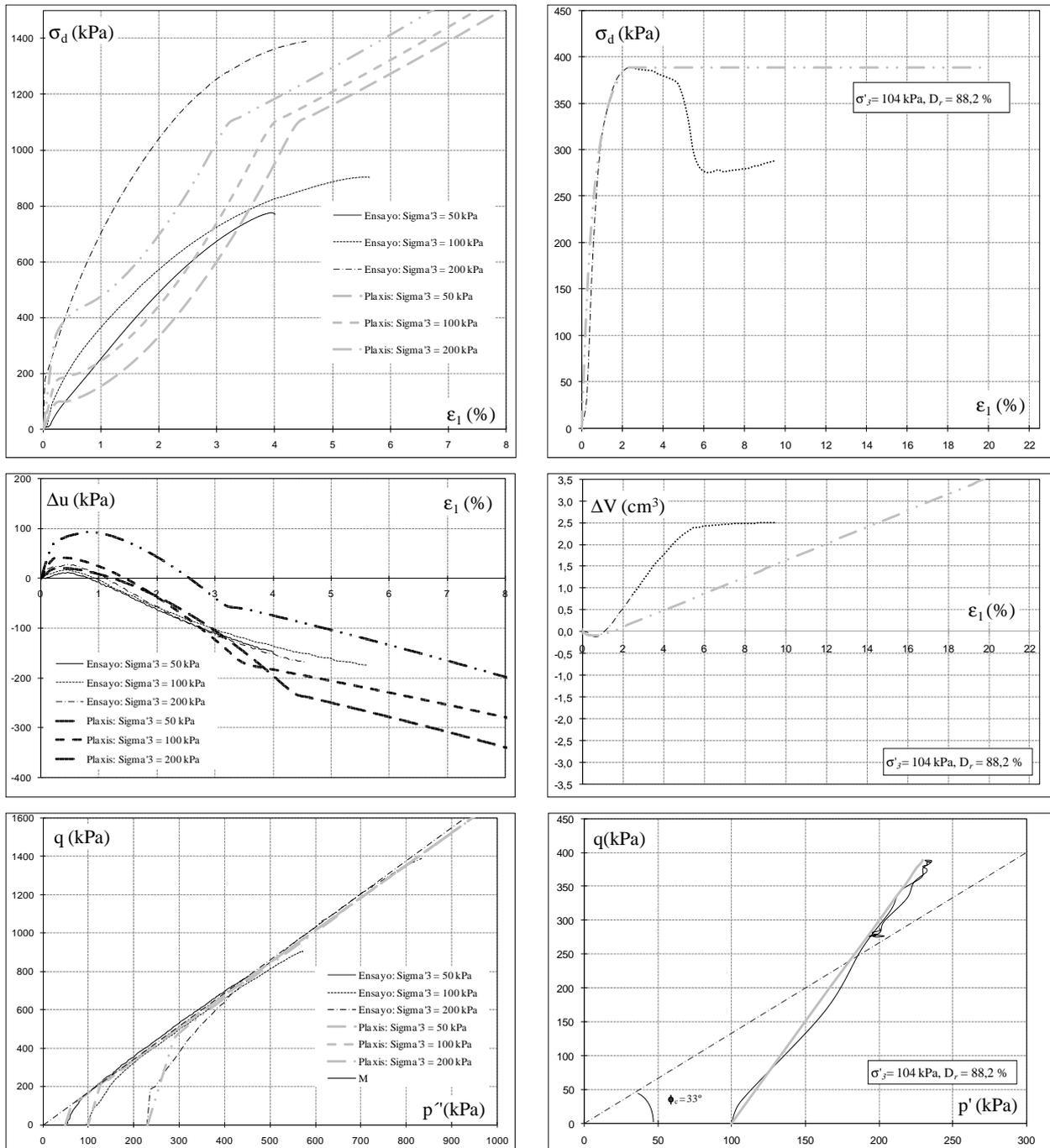


Figura 6.6: Calibración de arena de Carena — densa —.

En condiciones drenadas se obtiene un mejor ajuste a las curvas experimentales aunque se observa que los cambios volumétricos de los ensayos simulados son mayores a los medidos en laboratorio. Las trayectorias de tensiones representadas en el plano  $q - p'$  se aproximan a las medidas, en especial en los ensayos con  $\sigma'_3 = 50 \text{ kPa}$ .

### 6.3. Condiciones de vínculo

Para modelar la vinculación rígida entre los riñones y el muelle se impuso en la cara plana de los riñones desplazamientos nulos en el plano horizontal  $x - y$  — figura 6.7 —.

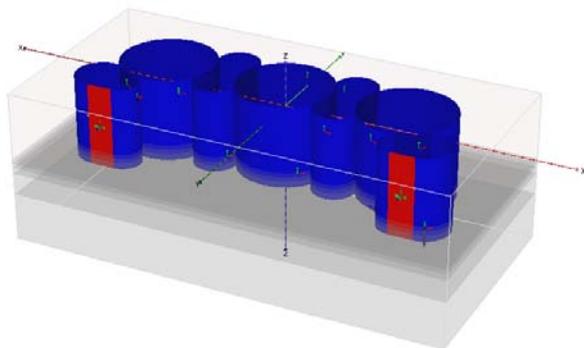


Figura 6.7: Restricción de desplazamientos en las caras planas de los riñones.

### 6.4. Etapas de cálculo

En la figura 6.9 se muestra el proceso constructivo de la obra que consiste en la instalación de las tablestacas seguido por el llenado de las celdas en forma progresiva. Las tres celdas principales, al ser autoportantes, se llenan primero y experimentan una deformación axilsimétrica — figura 6.8 —.

Al llenar y compactar el relleno dentro de los riñones y las interceldas, existe una disminución de las deformaciones existentes en

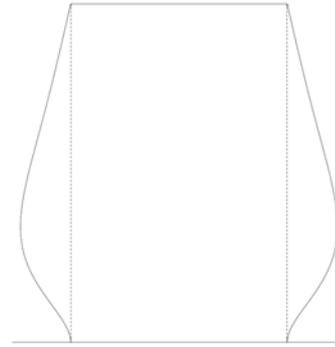


Figura 6.8: Deformación típica de una celda cilíndrica.

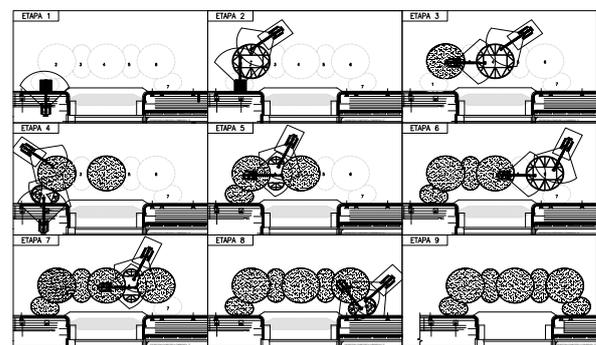


Figura 6.9: Proceso constructivo de la obra de Carena.

las interfaces celda-intercelda y celda-riñón.

El objetivo de esta modelización es determinar los desplazamientos del coronamiento con el sector del dique abatido y no en las etapas de construcción. Por ello se simplificó la modelación del proceso constructivo y se la representó según la siguiente secuencia:

1. Lecho del dique original.
2. Instalación de las tablestacas — figura 6.10 —.
3. Relleno con arena — figura 6.11 —.
4. Abatimiento de napa freática dentro del dique y cálculo del flujo en régimen permanente.
5. Determinación del factor de seguridad.

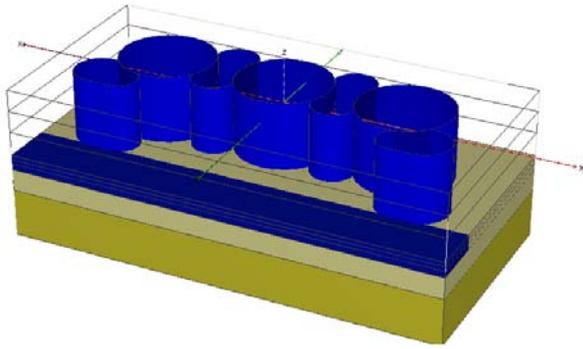


Figura 6.10: Etapa de instalación de las tablestacas.

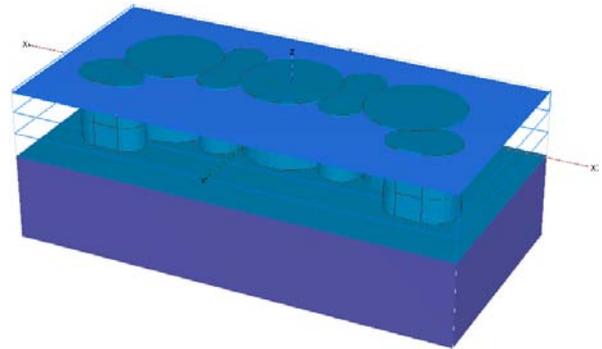


Figura 6.12: Nivel freático inicial.

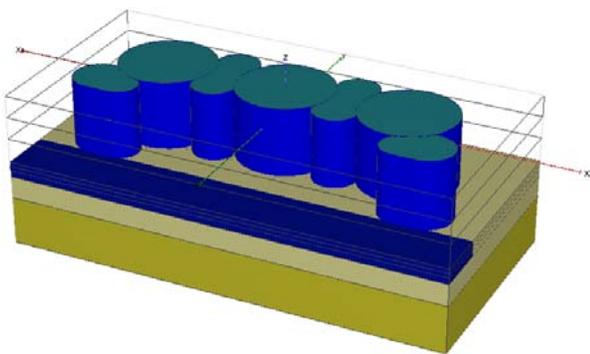


Figura 6.11: Etapa de relleno de las celdas.

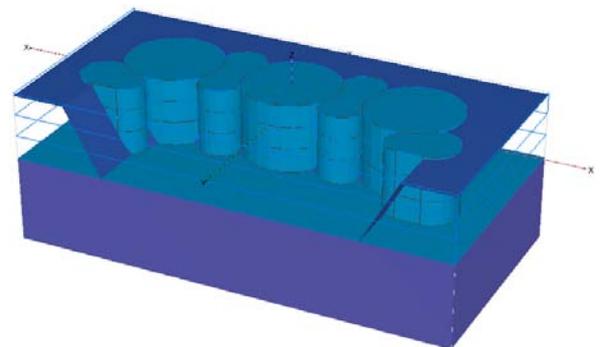


Figura 6.13: Nivel freático utilizado para modelar el abatimiento del dique.

### 6.5. Niveles freáticos y condiciones de borde hidráulicas

Para las etapas 1 a 4 se definió un nivel freático uniforme con cota  $+4.5m$  — figura 6.12 —. Este nivel se corresponde con el nivel de marea de diseño. En las etapas 5 y 6 el nivel de agua dentro del dique se fijó en la cota  $-10.5m$  coincidente con la situación de dique abatido — figura 6.13 —.

De acuerdo con las condiciones de flujo en la obra, se impuso la condición de libre escurrimiento en los bordes del dominio del espacio modelado. Se incluyeron en el modelo las bombas y pozos de alivio debido a la importante incidencia que tienen en la configuración del escurrimiento y en las deformaciones de la estructura — figura 6.14

—. Debido a la acción de las bombas, se abatió el nivel freático dentro de las celdas 3, 4 y 5 hasta la cota  $-7.0m$ , hasta la cota  $-5.0m$  en las celdas 2 y 6 y hasta la cota  $-4.0m$  en los riñones. Dichos niveles se corresponden con los niveles relevados en obra.

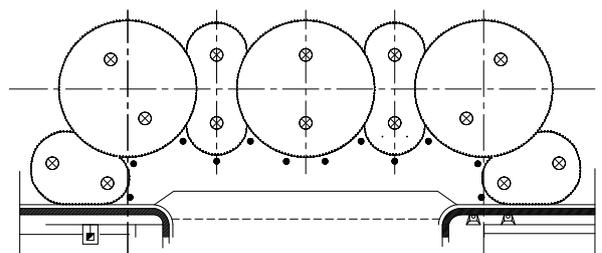


Figura 6.14: Disposición de las bombas y pozos de alivio en el modelo.

## 6.6. Flujo en régimen permanente

En la figura 6.16 se muestra el mapa de presiones neutras en el plano de simetría. Debido a que en el plano de simetría se ubican las bombas, se muestran los vectores de velocidad del escurrimiento en el plano situado a 2.30m del de simetría — figura 6.15 —.

## 6.7. Factor de seguridad numérico

Se efectuó el cálculo del factor de seguridad numérico para la condición de dique abatido y bombas en funcionamiento. Se obtuvo un factor de seguridad numérico igual a 2.34. En las figuras 6.17 y 6.18 se observan los desplazamientos en estado de falla. Se puede observar el mecanismo de falla en las figuras 6.19 y 6.20 en las cuales se muestran el mapa de deformaciones desviadoras y el mapa de desplazamientos incrementales en el plano de simetría.

## 6.8. Desplazamientos horizontales del coronamiento

En la figura 6.21 se muestran en planta los ocho puntos de monitoreo ubicados en el coronamiento de la ataguía. En las tablas 10 y 11 se informan los desplazamientos horizontales obtenidos en la simulación y los relevados en la obra. En promedio, los valores medidos superan en un 70% a los obtenidos del modelo.

A partir de datos relevados en obra se determinó que no se logró una densidad uniforme de la arena de relleno dentro de las

| Celda | Tablestaca | Obra      | Modelo    | $\Delta$ |
|-------|------------|-----------|-----------|----------|
|       |            | <i>mm</i> | <i>mm</i> | %        |
| 2     | 40         | 28.0      | 10.8      | 159      |
| 3     | 15         | 39.0      | 22.1      | 76       |
| 4     | 47         | 35.8      | 22.0      | 63       |
| 5     | 15         | 41.5      | 22.1      | 88       |
| 6     | 56         | 20.3      | 10.3      | 97       |

Tabla 10: Comparación de desplazamientos en tablestacas lado dársena.

| Celda | Tablestaca | Obra      | Modelo    | $\Delta$ |
|-------|------------|-----------|-----------|----------|
|       |            | <i>mm</i> | <i>mm</i> | %        |
| 2     | 106        | 41.8      | 30.0      | 39       |
| 3     | 15         | 42.0      | 28.0      | 50       |
| 4     | 115        | 47.0      | 30.0      | 57       |
| 5     | 15         | 44.0      | 28.0      | 57       |
| 6     | 123        | 46.3      | 30.0      | 54       |

Tabla 11: Comparación de desplazamientos en tablestacas lado dique.

ataguías mientras que en el modelo se utilizó una arena uniformemente densa. Se estima que la diferencia de resultados podría deberse a la variabilidad de la densidad de los rellenos en obra no contemplada por el modelo.

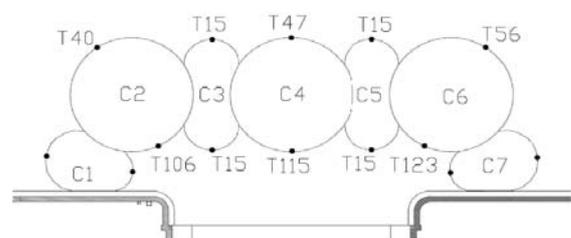


Figura 6.21: Planta de los puntos de monitoreo de desplazamientos.

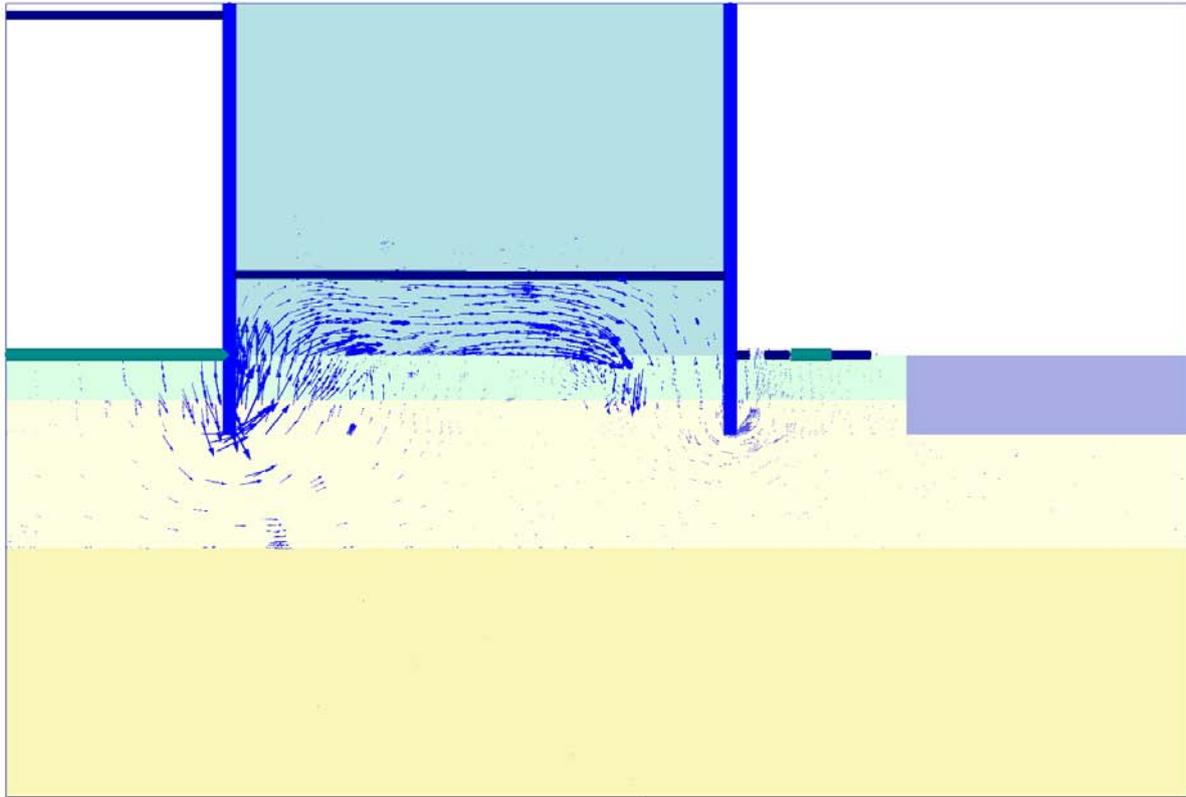


Figura 6.15: Corte: vectores velocidad.

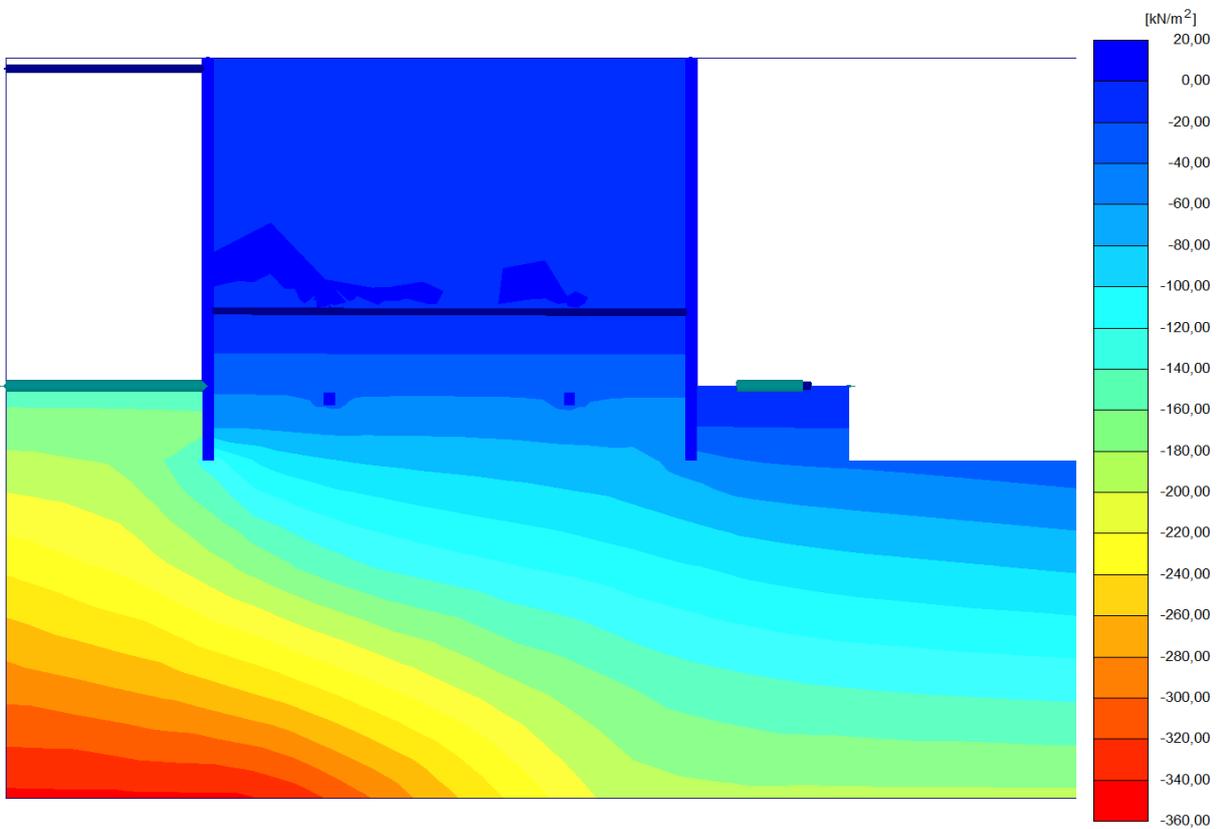


Figura 6.16: Corte en el plano de simetría: mapa de presiones neutras.

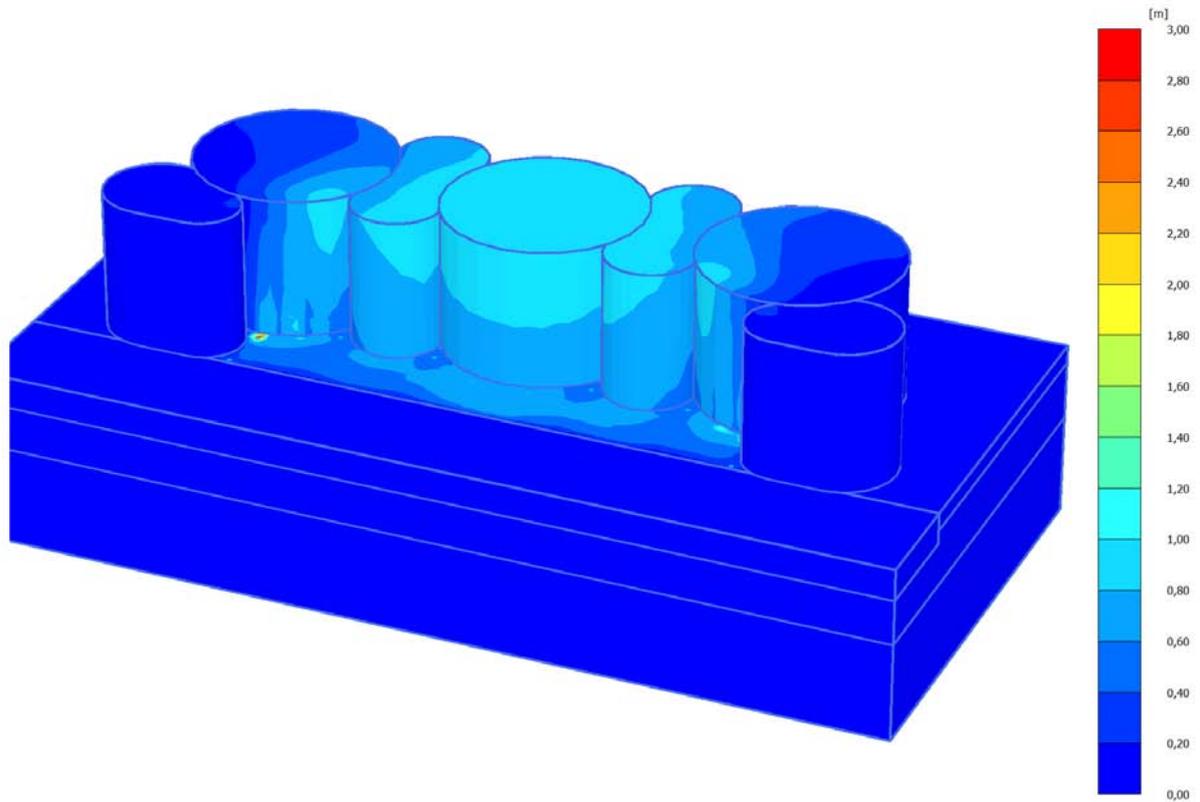


Figura 6.17: Mapa de desplazamientos en estado de falla.

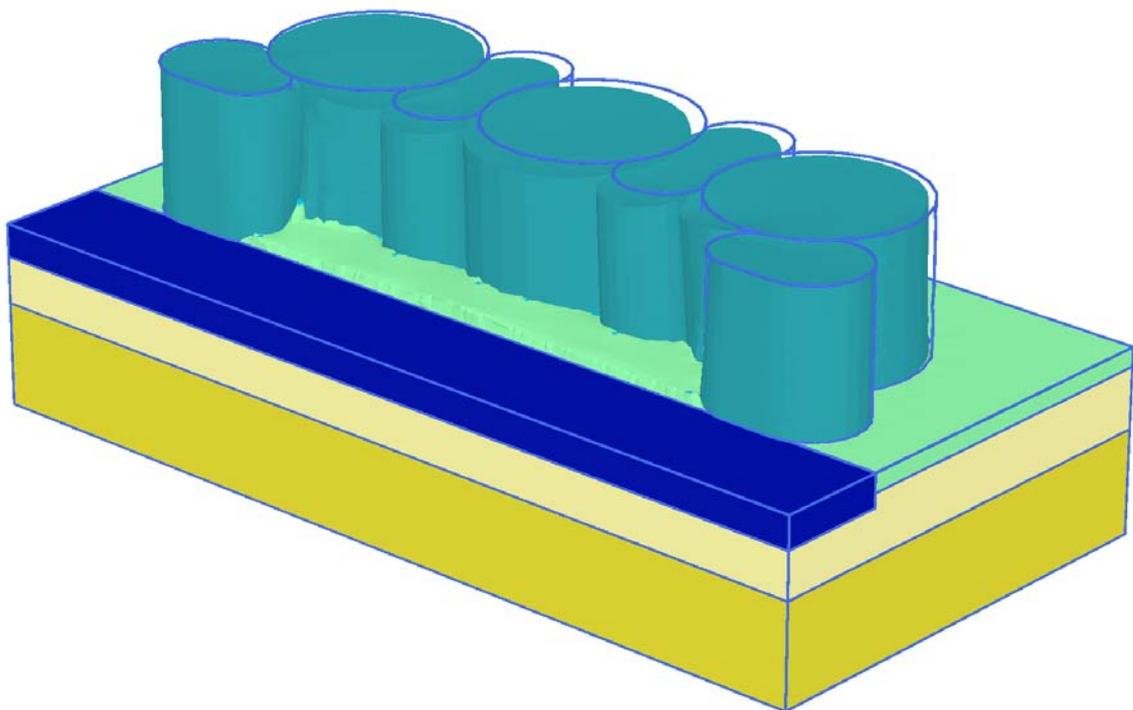


Figura 6.18: Desplazamientos en estado de falla.

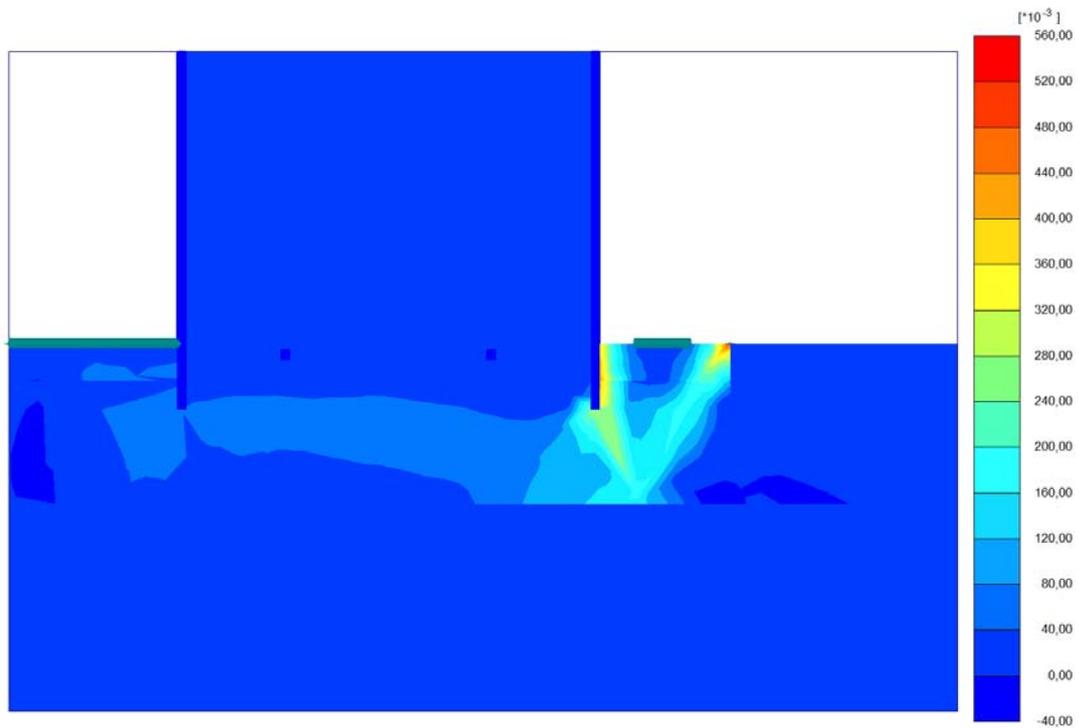


Figura 6.19: Corte en el plano de simetría: deformaciones desviadoras.

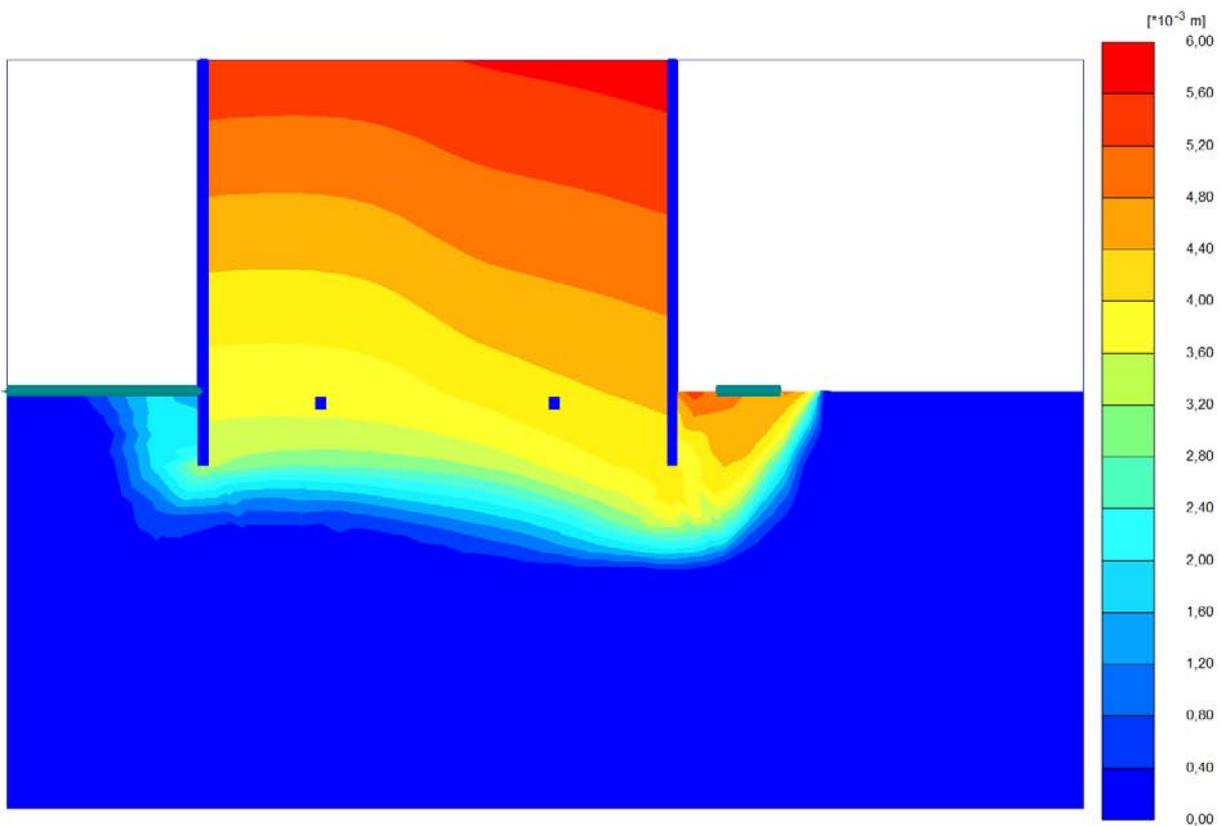


Figura 6.20: Corte en el plano de simetría: desplazamientos incrementales.

## 7. Conclusiones

Se estudiaron las características físicas y mecánicas de la arena de refulado utilizada en la obra de reparación del Dique de Carena en Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires.

### 7.1. Trabajos en laboratorio

Se automatizó la adquisición de datos y se reacondicionó la cámara triaxial del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FIUBA con el fin de realizar ensayos triaxiales drenados y no drenados. Estas adaptaciones permiten almacenar las lecturas del instrumental de forma automática y en formato digital, ensayar muestras de  $100\text{mm} \times 222\text{mm}$  y medir el cambio de volumen.

Se desarrolló una metodología para realizar ensayos triaxiales en el LMS conforme a los lineamientos de las normas ASTM [42, 43]. La metodología detalla los procedimientos a realizar en las etapas de preparación de equipos, armado de muestra, saturación, consolidación, carga y fin de ensayo.

Para el armado de muestras se siguieron los lineamientos del método *Moist Tamping* [13], se fabricaron los elementos necesarios y se lograron muestras con  $D_r$  entre 0 y 1.

Se realizó la caracterización física de la arena en base a los siguientes ensayos: i) análisis granulométrico por tamizado en vía húmeda; ii) análisis granulométrico por sedimentación — hidrometría sobre la fracción fina —; iii) límites de Atterberg; iv) gravedad específica de las partículas sólidas; v) inspección microscópica de partículas; vi) difracción por rayos X; vii) relación

de vacíos máxima y mínima. Todos los ensayos efectuados siguieron los lineamientos de las normas ASTM [39, 40, 33, 34, 35, 38, 41, 37]. Se realizó el método expeditivo de la probeta inclinada [26].

Se realizaron nueve ensayos no drenados CIUC y tres ensayos drenados CIDC. Los ensayos no drenados se realizaron para muestras con densidades relativas en condición suelta, media y densa, con presiones de confinamiento efectivo nominal de 50, 100 y  $200\text{kPa}$ . Los ensayos drenados se realizaron para muestras con las mismas densidades relativas y a una presión de confinamiento efectivo nominal de  $100\text{kPa}$ .

### 7.2. Resultados

Se considera un valor de  $\phi_c = 31,4^\circ$  obtenido a partir de la muestra suelta en condición drenada. Las pendientes observadas en las curvas  $q - p'$  de los ensayos no drenados no son coincidentes con las asociadas al  $\phi_c$  informado. Dados los valores obtenidos del parámetro  $B$ , es posible atribuir estos resultados a la saturación parcial de las muestras.

Se observa una gran similitud en los valores de  $\phi_c$  obtenidos mediante el método de la bureta —  $\phi_c = 32,6^\circ$  — y los ensayos triaxiales —  $\phi_c = 31,4^\circ$  —.

### 7.3. Métodos y errores

**Método de armado** Las desviaciones de las  $D_r$  obtenidas en las muestras respecto a las inicialmente buscadas fueron menores a 7% y resultan ser admisibles considerando los objetivos del trabajo.

Durante el armado de la muestra se observó que la energía necesaria para la compactación disminuye gradualmente para cada capa obteniéndose una muestra no homogénea de mayor densidad en las capas inferiores que en la superiores.

**Saturación** En todos los ensayos realizados se midió un parámetro  $B$  entre 0.34 y 0.77 evidenciándose así la saturación parcial de las muestras.

**Consolidación** En la etapa de consolidación, se obtuvieron valores de  $t_{50}$  menores a 10 segundos. Se decidió descartar los valores medidos dado que el orden de magnitud de los  $t_{50}$  calculados es igual al de la incertidumbre del método de medición.

**Carga** La medición de las deformaciones locales con LVDTs no resultó ser exitosa pudiéndose atribuir esto a la calidad del sistema de soporte, al desplazamiento relativo membrana - banda elástica y a la localización inicial de deformaciones por la no homogeneidad de la muestra causada por el *Moist Tamping*.

A pesar de que la velocidad utilizada fue menor a la máxima especificada en la norma ASTM [42], se observó en los ensayos drenados una pequeña variación de la presión neutra concluyéndose que la distribución de presiones en la muestra no era uniforme.

**Sistema de adquisición de datos** Se observa una variación de  $\pm 5kPa$  en las lecturas de los instrumentos de medición pudiéndose atribuir principalmente a la insuficiente calidad de las conexiones y acondi-

cionamiento de señales para filtrar el ruido eléctrico.

## 7.4. Modelación numérica

Se modeló la ataguía con el programa de elementos finitos *Plaxis 3D* para determinar los desplazamientos del coronamiento con el sector del dique abatido y no en las etapas de construcción por lo que se simplificó la modelación del proceso constructivo.

El perfil de suelo está dividido en tres estratos — arenas sueltas, limos compactos y arcillas compactas — y para su modelización se utilizó el modelo constitutivo Mohr-Coulomb. Los valores de los parámetros necesarios se obtuvieron de [19]. Para modelar la arena del recinto se utilizó el modelo constitutivo *Hardening Soil Model*. Con los resultados de los ensayos triaxiales realizados durante la etapa de caracterización mecánica se calibraron los parámetros necesarios del modelo. Se generaron tres juegos de parámetros para representar el comportamiento según la  $D_r$ .

Se determinaron desplazamientos en el coronamiento y se los contrastó con los relevados en obra. En promedio, los valores medidos *in situ* superan en un 70 % a los obtenidos a partir de la simulación. Se estima que la diferencia de resultados puede deberse a la variabilidad de la densidad de los rellenos en obra no contemplada por el modelo. Se obtuvo un factor de seguridad numérico igual a 2.34.

## Referencias

- [1] Bardet J. (1997) “Experimental Soil Mechanics”. Prentice Hall (1997).
- [2] Bishop A. W., “The Principle of Effective Stress,” lecture delivered in Oslo, Norway, in 1955; published in *Teknisk Ukeblad*, vol. 106, no. 39, pp. 859-863, 1959
- [3] Castro, G. (1969) “Liquefaction of Sand”. Ph.D. Thesis, Harvard Soil Mechanics Series, No.81.
- [4] Chadima, McCormick, Schulz, Haggar. (2003) “X-ray diffraction analysis of post-cretaceous sand and gravel units in southeastern South Dakota”. University of South Dakota, 2003.
- [5] Cho G., Dodds J. & Santamarina J. (2006) “Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands”. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(5): 591–602.
- [6] D’Apolonia, et. al. 1960.
- [7] Finno et al. (1996) “Strain Localization and undrained steady state of sand”. *Journal of Geotechnical Engineering* 122 (6): 462-473.
- [8] Fredlund D. G. & Rahardjo H. (1993) “Soil Mechanics for Unsaturated Soils”. John Wiley & Sons (1993).
- [9] Garga V. & Zhang H. (1997) “Volume changes in undrained triaxial tests on sands”. *Canadian Geotechnical Journal* 34 (6): 762-772.
- [10] Griffiths, D.V. & Prevost, J.H. (1990) “Technical note on practical applications. Stress strain curve generation from simple triaxial parameters”. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* (1990), vol. 14, 587-594.
- [11] Head K. H. (1986) “Manual of Soil Laboratory Testing: Effective Stress Tests”. John Wiley & Sons, New York , pp. 951-956, 1001- 1053.
- [12] Holtz R. D., Kovacs W. D. & Sheahan T. C. (2010) “An Introduction to Geotechnical Engineering”. Prentice Hall.
- [13] Ishihara K. (1993) “The Rankine Lecture: Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes”. *Géotechnique* 43 (3): 349–415.
- [14] Ishihara K. (1996) “Soil behaviour in earthquake geotechnics”. Clarendon Press, Oxford (1996).

- [15] Jefferies M & Been K. (2006) "Soil Liquefaction". Taylor & Francis, New York (2006), 1ra edición.
- [16] Kamata T., Tsukamoto Y. & Ishihara, K. (2009) "Undrained shear strength of partially saturated sand in triaxial tests". New Zealand Society for Earthquake Engineering 42 (1).
- [17] Klug H.P. & Alexander, L.E. (1974) "X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials". Wiley and Sons (1974), 1ra edición.
- [18] Lade P. V. & Yamamuro J. A. (1997) "Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands". Canadian Geotechnical Journal 34 (6): 918-928.
- [19] Laiún et al. (2012) "Ataguías celulares para el cierre del Dique Carena". XXI CAMSIG, Rosario, Argentina, 1-6.
- [20] Ledesma O. N. (2008) "Calibración del *Cam clay* para suelos del Postpampeano". <http://materias.fi.uba.ar/6408/> - FIUBA (2008), 3-28.
- [21] Mc Manus K. & Davis R. (1997) "Dilation-induced pore fluid cavitation in sands". Geotechnique 47 (1): 173-177.
- [22] Núñez E. (2010) "Resistencia no drenada y licuación en arenas". XX CAMSIG, Mendoza, Argentina, 1-5.
- [23] *Plaxis* (2010) "Material Models Manual". *Plaxis Manual* (2010), 49-60.
- [24] Poulos S. (1981) "The steady state of deformation". ASCE J Geot Eng Div 107 (5): 553-562.
- [25] Powrie W. (1997) "Soil Mechanics, Concepts and applications". E & FN Spon, London (1997).
- [26] Santamarina J. & Cho, G. (2001) "Determination of Critical State". Geotechnical Testing Journal GTJODJ 24(2): 185-192.
- [27] Schanz T. & Vermeer P.A. (1998) "On the stiffness of sands". Pre-failure deformation behaviour of geomaterials (1998), 383-387.
- [28] Schanz T., Vermeer P.A. & Bonnier P.G. (1999) "The hardening soil model: Formulation and verification". Beyond 2000 in Computational Geotechnics (1999), 281-296.
- [29] Sfriso A. (2008) "Caracterización mecánica de materiales constituidos por partículas". FIUBA (2010), 7-114.

- [30] Terzaghi K. (1948) "Soil Mechanics in Engineering Practice". Wiley, New York (1996), 3rd Ed.
- [31] Verdugo R. & Ishihara K. (1996) "The steady state of sandy soils". Soil Found, 36 (2): 81-91.
- [32] Wood D. M. (1990) "Soil behaviour and critical state soil mechanics". Cambridge University Press, USA (1990), 1ra edición, 1-251.
- [33] D422 - 63 (2007) "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils".
- [34] D854 - 10 "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer".
- [35] D1140 - 00 (2006) "Standard Test Method for Amount of Material in Soils Finer Than the No. 200 (0.075mm)".
- [36] D2216 - 10 "Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass".
- [37] D2487 - 11 "Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)".
- [38] D2488 - 09a "Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)".
- [39] D4253 - 00 (2006) "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table".
- [40] D4254 - 00(2006)e1 "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density".
- [41] D4318 - 10 "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils".
- [42] D4767 - 11 "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils".
- [43] D2850 - 03a(2007) "Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils".

## Anexos

## Anexo A

# Informe de avance I: Puesta en marcha de equipos

# Trabajo Profesional de Construcciones

## Arenas de refulado

Informe de avance I

Puesta en marcha de equipos

Ezama, Ignacio

García Mendive, Iñaki

Paz Walther, Federico

Rellán, Gonzalo

Vernengo Lezica, Ignacio

Laboratorio de Mecánica de Suelos

Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires

## 1. Introducción

El Laboratorio de Mecánica de Suelos encaró un proyecto de investigación sobre el comportamiento de materiales granulares para su aplicación a presas de materiales sueltos. El proyecto incluye la realización de una serie de ensayos triaxiales -drenados y no drenados- a distintas densidades relativas y niveles de confinamiento. Se podrá particular énfasis en el estudio del comportamientos de las arenas a bajas densidades relativas y comportamiento no drenado -buscando replicar el fenómeno de licuación estática- que es determinante en el diseño y modelación de presas de materiales sueltos -ya sean diques de cola o rellenos de refulado-.

La primera etapa del proyecto tuvo por objetivo completar la instrumentación de la cámara triaxial. Esto incluyó la modernización de los instrumentos de adquisición de datos, para automatizar el proceso de medición y el desarrollo de nuevos accesorios necesarios para la fabricación de las muestras y el desarrollo de las distintas etapas del ensayo.

En este informe se describen las tareas realizadas y los resultados de las calibraciones realizadas sobre los instrumentos necesarios para la realización de los ensayos de caracterización mecánica del material.

## 2. Descripción

Se instrumentó a la cámara triaxial para:

- Almacenar datos de mediciones de modo automatizado mediante un software y una placa adquisidora.
- Capturar mediciones del esfuerzo desviador electrónicamente.
- Capturar mediciones de presión de poros electrónicamente.
- Capturar mediciones de presión de confinamiento electrónicamente.
- Capturar mediciones de deformaciones locales verticales electrónicamente.
- Medir cambio de volumen con tablero autónomo -esto no pudo asociarse a la placa adquisidora-.
- Saturar muestras.

Para esto se implementaron los siguientes instrumentos de manera de poder obtener sus lecturas a través de la placa adquisidora:

- 2 celdas de carga (Rango: 0 a 10 kN y 0 a 25 kN, clase 0.5)
- 2 transductores de presión (Winters. Rango: 0 a 400 kPa, clase 0.5)
- 3 LVDTs (Solartron. Rango: 0 a 12 mm. Clase 0,5)
- 2 Columnas de agua (Diametros internos: 6 mm y 12 mm. Altura: 1 m )
- Generación de una normativa procedimental para ensayos triaxiales de la cámara del L.M.S.

Fue necesario adaptar los instrumentos para obtener lecturas en un rango admisible

para la placa de adquisición. Cada instrumento se calibró para obtener la conversión de las lecturas de voltaje en la unidad correspondiente. Se programó un sistema de adquisición de lecturas que permitiera el almacenamiento de los datos y el descarte de los ruidos eléctricos.

## 2.1. Instrumentos de adquisición de datos

### 2.1.1. Placa adquisidora

**Caracterización del equipo** Para la captura de los datos de los distintos instrumentos se dispone de una placa adquisidora Advantech con posibilidad de registrar 16 lecturas en simultáneo (fig. 2.1). El rango de trabajo de esta es 0 y 10 V. Por ello, todos aquellos instrumentos debieron ser adaptados, mediante la introducción de circuitos resistivos acordes, para que las señales salientes estuvieran dentro del rango visible de la placa.

**Adaptación** Se armó una caja de conexiones por enchufe para reducir los problemas de contacto debidos al escaso espacio en el sistema de bornes de la placa. Para esto se utilizaron conectores tipo RD-SI<sup>1</sup> y XLR<sup>2</sup> y sistemas de cableado en serie. De este modo se simplificó la conexión y desconexión de instrumentos y se aumentó el espacio para las conexiones a tierra - originalmente las conexiones a tierra debían compartir el borne en la placa-, garantizando su correcto funcionamiento. En la fig. 2.2 se ve el circuito realizado.

<sup>1</sup>Conexión tipo telefónica.

<sup>2</sup>Conectores típicos de audio.

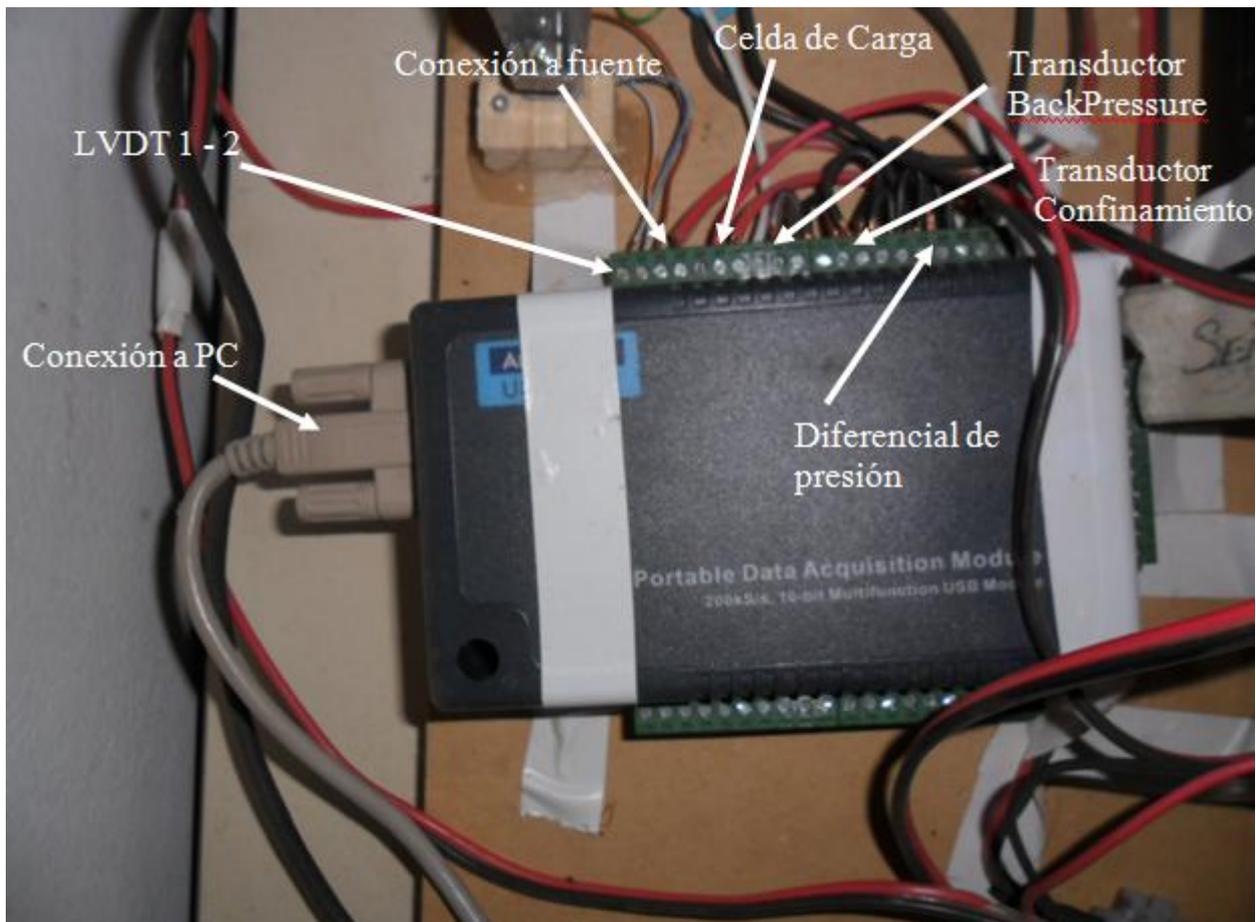


Figura 2.1: Placa adquisidora Advantech.



Figura 2.2: Circuito de conexiones electrónicas.

Los instrumentos electrónicos funcionan mediante sistema de resistencia variables -puente de Weastone-. Cada uno de ellos es variable en cuanto a su codificación de salida -diferencia de potencial o intensidad de corriente- y su amplitud o rango. La placa de adquisición de lecturas captura únicamente diferencias de potencial en un rango de 0 V a 10 V . Se realizaron adaptaciones para que las señales emitidas por los instrumentos cayeran en el rango de la placa.

Para hacerlo, se introdujeron circuitos resistivos que modificasen la señal de salida original por una nueva salida proporcional a la primera pero dentro del rango visible de la placa. Luego, se calibraron los instrumentos y se introdujeron las curvas de conversión de la señal a magnitud real en el software de adquisición de datos.

### 2.1.2. Software de adquisición de datos

**Características y funcionamiento** Se programó -utilizando LabVIEW- un sistema de captura de lecturas de la placa según una frecuencia definible. El programa

incluyó:

- Un sistema de filtrado de datos.
- Un sistema de conversión de magnitudes eléctricas a magnitudes reales.
- Un sistema de almacenamiento de datos
- Un sistema de visualización en tiempo real de curvas de comportamiento y lecturas.

El sistema de filtrado de datos se componía de dos barreras que surgieron de observaciones previamente analizadas de las capturas sin filtrar:

1. Se toma la mediana de 7 (siete) datos consecutivos.
2. Se calcula el promedio de 5 (cinco) medianas consecutivas.

El primer filtrado elimina los datos distorsionados por el ruido eléctrico. De observaciones se identificó que los datos distorsionados por ruido eléctrico no superaban 3 casos consecutivos, tratándose en todos los casos de valores inferiores en magnitud a los sin distorsionar.

Antes de descartar las mediciones alejadas de la media, se descartó la posibilidad de que las distorsiones a otras causas, como problemas en el sistema de toma de datos -ya sea de la placa adquisidora o del software utilizado- o de funcionamiento de los distintos equipos. Para ello se tomaron registros para distintas frecuencias de muestreo -observando la incidencia de la resonancia eléctrica- y con diversos tiempos de actividad -para ver posibles afectaciones por calor-.

Se concluyó que las mediciones alejadas de la media eran despreciables pues eran consecuencia de ruido eléctrico. Se observó que para reducir la cantidad de valores distorsionados, se debía cuidar que la frecuencia de adquisición de datos se alejara de la del suministro eléctrico (50 Hz) y sus armónicos<sup>3</sup>.

El segundo filtro reduce la cantidad de datos de muestreo, que por los tiempos de ensayo y las frecuencias de muestreo utilizadas implicarían, de otro modo, un costo computacional exagerado.

En su última etapa, el sistema de captura de datos almacena la salida en un archivo y genera una interface gráfica para el seguimiento del ensayo.

En la fig. 2.3 se muestra la vista general del diagrama de bloques utilizado. Se observa esquemáticamente el procesamiento de los datos antes explicado.

### 2.1.3. Celda de carga

**Características de los equipos** Para la medición del esfuerzo diferencia se cuenta con dos celdas de carga (fig. 2.4) con rangos de medición de 12 kN y 25 kN. La sensibilidad de los instrumentos es de  $2 \text{ mV/V}$ , y requieren para su funcionamiento una diferencia de potencial de 24 V.

**Adaptación** Dado que en el laboratorio sólo se cuenta con una fuente de voltaje continua de 24 V y son tres los instrumentos que requieren alimentación externa para su funcionamiento -la celda de carga y ambos



Figura 2.4: Celdas de carga utilizadas.

transductores de presión-, se generó una trifurcación del flujo eléctrico de la fuente que permitiese la alimentación en simultáneo de los tres instrumentos.

Como la señal de salida original de la celda de carga era de diferencias de potencial potencial del orden de los mV - muy por debajo del rango de trabajo de la placa adquisidora - se conectó a un acondicionador de señal que multiplicara el potencial de salida hasta 15 V -excediendo el rango visible de la placa-. Mediante el agregado de una resistencia de  $560 \Omega$  en paralelo al circuito de salida del acondicionador se redujo el rango recibido al admitido por la placa -0-10V-.

**Calibración** Para la calibración de estos instrumentos se utilizaron métodos distintos, dado que su diferenciencia de rangos de trabajo impedía proceder de igual manera con las celdas de 12 kN y la de 25 kN.

Para la primera se utilizó un edómetro (Wykeham Farrance C0078) del L.M.S. del que previamente se obtuvo la constante ( $k = 0,1088 \text{ kN lectura/kg carga}$ ) utilizando una celda de carga calibrada<sup>4</sup>.

<sup>3</sup>En todo este proceso se recibió asesoramiento del Ing. Kadener, del Laboratorio de Instrumental y Mediciones de la F.I.U.B.A.

<sup>4</sup>El valor de constante obtenido difiere en

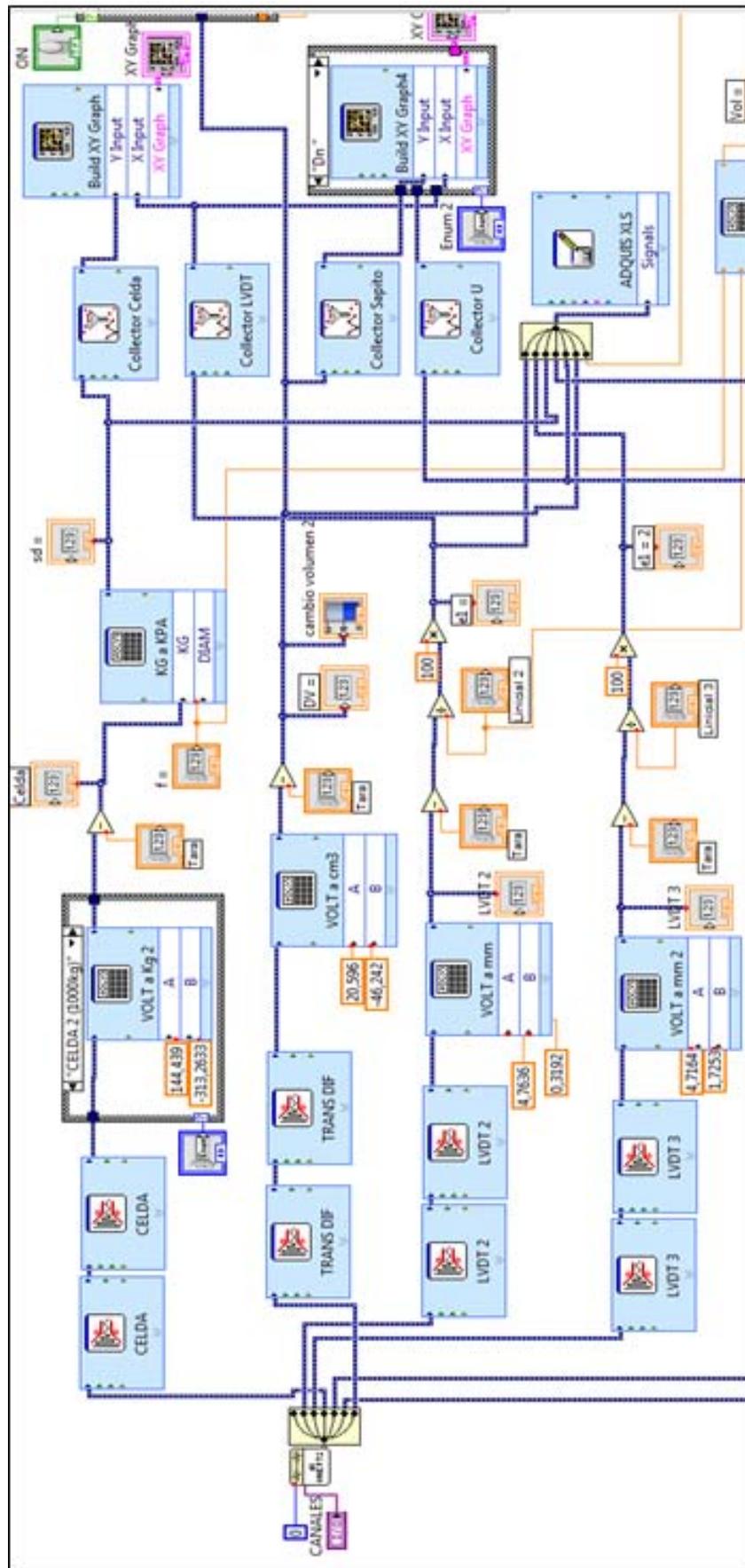
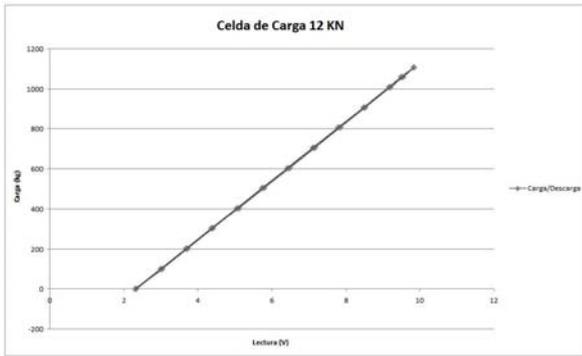


Figura 2.3: Diagrama de bloques en LabVIEW.



$$R^2 = 0,9999$$

$$k = 1444,42 \text{ N/V}$$

$$b = -3372,09 \text{ N}$$

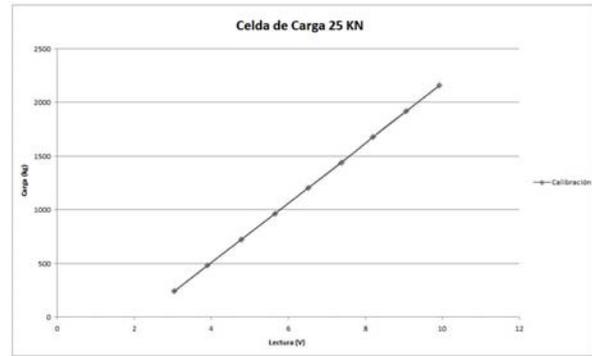
Figura 2.5: Curva de calibración de la celda de carga de 12 kN

Se obtuvo una serie de puntos utilizando escalones de carga y descarga de 101,4 N, en un rango de 0 a 1108,2 N. Por aproximación mediante cuadrados mínimos de los valores de carga en función del voltaje leído por la placa se obtuvo la pendiente de la curva de calibración (fig. 2.5).

La ordenada al origen se calculó a partir de la pendiente obtenida en la calibración y las lecturas para la celda en vacío. Esto fue necesario pues al introducir la celda en el edómetro se producía sobre esta una carga de magnitud desconocida.

Para la calibración de la celda de 25 kN se utilizó un aro dinamométrico perteneciente al Laboratorio de Materiales y Estructuras. Se tomaron series de valores para distintos intervalos de carga -aplicada mediante la prensa del laboratorio). Con estos, mediante una aproximación por cuadrados mínimos, se obtuvieron los parámetros de la curva de calibración -fig. 2.6-.

un 5,5 % respecto del obtenido en una calibración anterior por el Ing. Mauro Codevilla (0,1147 kN lectura/kg carga). Valor que se considera aceptable



$$R^2 = 0,9999$$

$$k = 2741,61 \text{ N/V}$$

$$b = -6027,46 \text{ N}$$

Figura 2.6: Curva de calibración de la celda de carga de 25 kN

#### 2.1.4. Transductores de presión absoluta

**Características de los equipos** Para la medición de la presión intersticial y de confinamiento se utilizarán dos transductores de presión Winters LE3150 de rango 0 a 1034.2 kPa. Estos equipos requieren alimentación externa de una fuente de 24 V y tienen salida en intensidad de corriente para el rango 0 a 20 mA. En la fig. 2.7 se observa el transductor utilizado para medir la presión de confinamiento, posicionado en el tablero de control.

**Adaptación** Para poder obtener datos de estos equipos con la placa adquisidora -es decir, valores de entre 0 y 10 V- se introdujo en el circuito una resistencia de 470 Ω. De este modo, la intensidad de corriente de salida del instrumento genera un rango de caídas de potencial perceptible al sistema de lectura.

**Calibración** Para la calibración de los instrumentos se utilizó un manómetro de

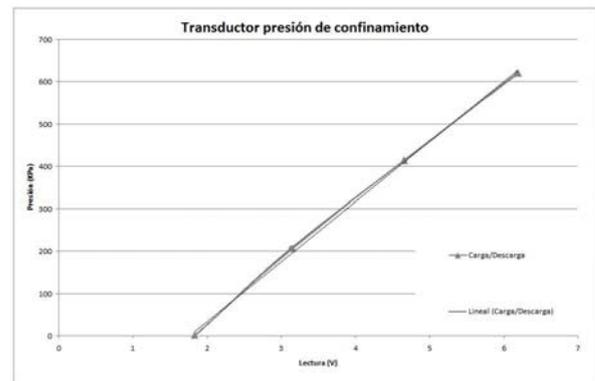


Figura 2.7: Transductor absoluto de presión.

aguja Barnet, de la serie 0805, previamente calibrado por un calibrador certificado. Se aplicaron escalones de carga de 206,8 kPa en un rango de 0 a 620,5 kPa. Mediante el procedimiento de cuadrados mínimos para los puntos de la serie de escalones se obtuvieron los parámetros de las rectas que mejor ajustaban a los instrumentos -fig. 2.8 y fig. 2.9-.

### 2.1.5. LVDT

**Características de los equipos** Para la medición de la deformación local se cuenta con 3 (tres) LVDT Solatron OP6. Para su funcionamiento se cuenta con un circuito que brinda una señal de salida de 0 a 2,5 V fabricada por el Ing. Kadener, del Laboratorio de Instrumental y Mediciones de la F.I.U.B.A. -fig. 2.10-.

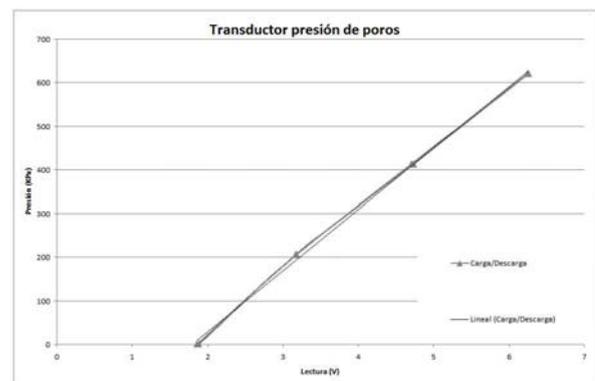


$$R^2 = 0,9986$$

$$k = 141,8 \text{ kPa/V}$$

$$b = -250,45 \text{ kPa}$$

Figura 2.8: Calibración del transductor de presión.



$$R^2 = 0,9985$$

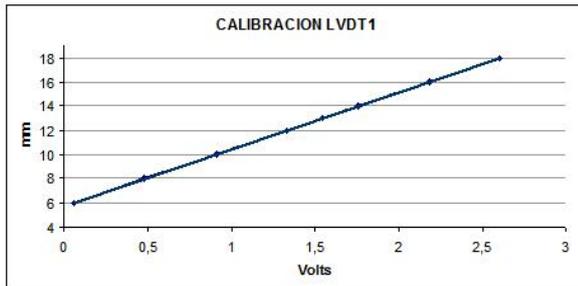
$$k = 140,71 \text{ kPa/V}$$

$$b = -253,52 \text{ kPa}$$

Figura 2.9: Calibración del transductor de presión.



Figura 2.10: Caja que contiene el circuito y conexión de LVDT.

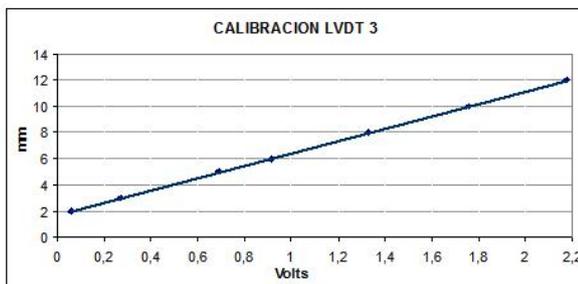


$$R^2 = 1$$

$$k = 4,7105 \text{ mm/v}$$

$$b = 5,7244 \text{ mm}$$

Figura 2.11: Calibración del LVDT 1.



$$R^2 = 1$$

$$k = 4,7164 \text{ mm/v}$$

$$b = 1,7253 \text{ mm}$$

Figura 2.12: Calibración del LVDT 3.

**Calibración** En el presente proyecto se utilizaron solamente dos de los tres LVDT disponibles. De la calibración de estos instrumentos se obtuvieron las siguientes pendientes para su recta de ajuste: 4,7105 mm/v y 4,7164 mm/v -figs. 2.11 y 2.12-.

**Características y funcionamiento** Los LVDT se utilizarán para la medición de la deformación local en los primeros instantes del ensayo, cuando los desplazamientos no son completamente uniformes. Para deformaciones mayores, la uniformización del comportamiento de la muestra permite reemplazar estas lecturas por las obtenidas mediante el producto de la velocidad de avance del vástago y tiempo transcurrido.



Figura 2.13: Elementos de montaje de los LVDT.

La correcta fijación de estos elementos a la muestra implica la materialización de dos puntos fijos perfectamente verticales, entre los cuales el instrumento medirá el cambio de longitud.

Se evaluaron diversos métodos de fijación. Se decidió diseñar un sistema de fijación mediante bandas elásticas de 5 mm de ancho y 2 mm de espesor. Se colocó en la banda superior una chapa metálica de 10x50x1 mm con dos ojales, donde se coloca el cuerpo del LVDT. A la banda elástica inferior se adhirió una chapa en L donde se apoya y fija el extremo del vástago del LVDT -fig. 2.13-.

La chapa superior y sus accesorios tienen como objetivo mantener el instrumento vertical y hacer que se mueva solidariamente con la muestra a la altura colocada,



Figura 2.14: Montaje del LVDT.

y la inferior hace que la punta del vástago del LDVT acompañe el movimiento de la muestra en la altura fijada. De esta forma el LVDT se mantiene vertical y fijo a la muestra dentro de las tolerancias admisibles -fig. 2.14-.

Aunque el sistema permite tomar mediciones razonables, la gran precisión del instrumento (0.001 mm) se ve devaluada por una serie de incertidumbres que atañen al sistema seleccionado:

- Al estar el instrumento sujeto por bandas elásticas que rodean la muestra, la fijación se moverá solidariamente con una sección completa. Si la banda no queda perfectamente horizontal, se producen distorsiones en las mediciones de los LVDT que se encuentran diametralmente opuestos.

- Para la medición de la longitud inicial se utiliza un calibre (precisión 0.1 mm). Sin embargo, el sistema de fijación tienen un espesor en vertical de 5 mm en cada banda. Esto perjudica las mediciones de separación inicial dotándolas de gran incertidumbre.
- La salida de los instrumentos es de 0 a 2,5 V, por lo que para la totalidad de la carrera, no se aprovecha el total del rango de trabajo de la placa, dando lugar a mayores errores por el sistema eléctrico.

Mejorando estas cuestiones se podría aprovechar mejor la precisión del LVDT, obteniendo datos más representativos de las etapas iniciales.

## 2.2. Equipos nuevos para el desarrollo de los ensayos

### 2.2.1. Columnas de agua

Para la medición de cambios volumétrico de las muestras -tanto durante la consolidación isotrópica, en ensayos CD y CU como del desarrollo de la rotura en ensayos CD- se fabricaron dos tubos de acrílico: uno de 6 mm de diámetro y el otro de 12 mm -como se muestra esquemáticamente en la fig. 2.15-.

Estos tubos se conectan en su extremo inferior con los drenajes de los cabezales de la muestra. El extremo superior recibe una presión equivalente a la del agua del reservorio -generador de la presión neutra durante el ensayo-. De este modo quedan equiparadas *a priori* las presiones en ambos extremos. Un sistema de llaves en el

extremo inferior de las buretas permite alternar el diámetro a utilizar en función de las deformaciones volumétricas esperables.

Al realizar la etapa de consolidación isotrópica se espera que la muestra disminuya en parte su volumen. Esta variación de volumen es perfectamente cuantificable a partir del agua expulsada del interior de la muestra, si esta está completamente saturada.

Luego, durante el desarrollo de la rotura, para ensayos drenados, la muestra sufrirá cambios volumétricos de dilatación o contracción en función de la densidad inicial y el confinamiento. Al producirse la dilatación de la muestra, se da un fenómeno de succión (ya que el agua es prácticamente incompresible y por estar la muestra saturada, no hay aire que pueda llenar los vacíos) que hará circular el agua de las buretas a la muestra. Por el contrario, para los casos de contracción la presión exterior de la cámara genera sobre el agua, a través de la membrana, un gradiente de presiones que induce al agua a circular hacia las buretas. De este modo, registrando las variaciones temporales de altura de agua en la bureta (y conocido su diámetro), se puede obtener la variación volumétrica de la muestra.

### **2.2.2. Equipo de saturación de muestra**

En el armado del circuito presurizador de la cámara, se incluyó un desvío que permitiese presurizar el reservorio de agua desaireada. Mediante el flujo del agua del reservorio, se logra la saturación de la muestra y del circuito. Existe un método alternativo de saturación de la muestra durante la eta-

pa de armado de la cámara, mediante vacío, con el que se logran mejores resultados.

La completa saturación de la muestra y el circuito es un requerimiento de gran importancia. Falencias en este paso acarrearán problemas en la medición de volúmenes durante los ensayos drenados (CD) y de presiones neutras en ensayos no drenados (CU) que llevan a una mala caracterización del material.

### **2.2.3. Tablero de control**

Para facilitar la operación de equipos durante el ensayo, se construyó un tablero de comandos en que se agruparon todas las válvulas y llaves (fig. 2.15). Cada desvío en el circuito de presiones cuenta con un manómetro de aguja propio, de modo de tener un control visual de las presiones y evitar incidentes en caso de fallas en el equipamiento electrónico.

Se colocaron, además, interruptores en los equipos de bombeo (compresor y bomba de vacío) de modo de simplificar las tareas de preparación de la muestra y desarrollo del ensayo.

### **2.2.4. Aumento del volumen del compresor**

Debido a las pérdidas de aire en el sistema y la larga duración de los ensayos, se producía una caída de presión tal en el compresor que este se veía obligado a recargar durante la etapa de rotura. Esta situación generaba una caída en la presión de confinamiento y un posterior pico al comenzar la recarga, que hacía que la curva obtenida dejase de ser representativa.

Habiendo reducido al mínimo las pérdidas y persistiendo el problema, se decidió asociar al sistema de almacenaje de aire a presión del compresor, una garrafa (previamente vaciada y limpiada), de forma que, al aumentar el volumen de aire, se pudiese sostener durante más tiempo la presión requerida (figura 2.16). Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios, logrando cuadruplicar los tiempos entre recargas del compresor.

## 2.3. Fabricación de muestra

### 2.3.1. Molde metálico para armar la muestra

Para la realización de ensayos con mediciones de cambio de volumen y deformaciones locales se requiere la generación de muestras de mayor tamaño que las hasta ahora realizadas en el L.M.S. Dado que, a diferencia de suelos más finos, donde las fuerzas intersticiales de cohesión son suficientes para mantener la forma de una muestra, las arenas no tienen capacidad de mantener su forma, se requiere para la presión de estas un molde que les brinde la forma. Por esta razón, se encargó, un molde de acero tubular, que permitiese la generación de muestra de 4" de diámetro por 8" de altura (fig. 2.17). El mismo se encuentra dividido transversalmente de modo de poder retirarlo al montar la muestra.

En el interior del molde (como se observa en la figura antedicha) se colocó un sistema de nervaduras que permitiese mantener a la membrana adherida por vacío hasta el tope del molde.

Las características de este son:

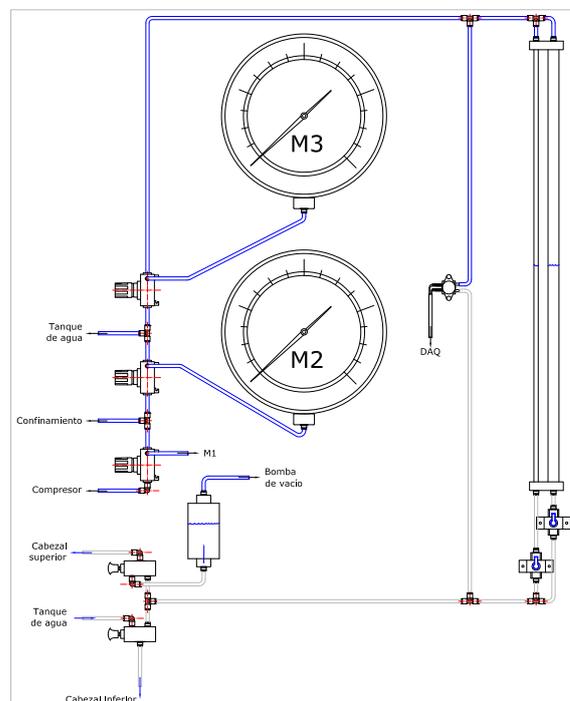


Figura 2.15: Tablero de instrumentos.



Figura 2.16: Garrafa utilizada para controlar pérdidas.

- Altura total: 259.2 mm
- Diámetro interno: 102.4 mm

Resultando en muestras de las siguientes características (luego de calibrar parámetros de armado):

- Altura: 222,0 mm
- Diámetro: 99,95 mm
- Volúmen: 1741 cm<sup>3</sup>

### 2.3.2. Membranas impermeables

Tanto para lograr aislar la presión intersticial de la muestra de la presión de confinamiento durante los ensayos triaxiales como para, durante el armado, mediante vacío en el interior generar una presión efectiva entre granos que sostenga la muestra, es necesaria la interposición de una membrana impermeable al aire.

Esta membrana, a su vez, debe ser suficientemente flexible como para que no afecte el comportamiento de la arena incorporando rigideces excesivas. Por esto, la norma ASTM limita la rigidez permitida a 1400 kPa, y aplica una corrección a los resultados en base a esta.

Los trabajos se comenzaron con 2 (dos) membranas que se encontraban en el L.M.S., con las que se realizaron prácticas de armado de muestra. Dado que las membranas habían perdido flexibilidad por el contacto prolongado con el aire, se encontraban ampliamente deterioradas y daban lugar a pérdidas durante las tareas de armado. Debieron, por ello, encargarse nuevas membranas que se hicieron según los estándares de la norma ASTM. Sus dimensiones eran:

- Diámetro: 100 mm
- Altura: 355 mm
- Espesor: 0.3 a 0.4 mm.

Con estas membranas no se obtuvieron los resultados esperados, ya que se pinchaban fácilmente, por el roce con la arena en los cabezales.

Se decidió por eso encargar nuevas membranas a otro proveedor, pero de un espesor mayor (0.9 mm, valor límite permitido por norma) para contrarrestar el problema de las pinchaduras. El resultado fue altamente satisfactorios. Dado el espesor de estas, se dudaba que la rigidez cumpliera con los límites de la norma. Mediante un ensayo de alargamiento, se midió la rigidez de las membranas que arrojaron un valor promedio de 1292 kPa,

En la fig. 2.18 se pueden ver las últimas dos membranas mencionadas, siendo la de la izquierda la más gruesa y la de la derecha la más fina.



Figura 2.17: Molde metálico para armado de muestra.



Figura 2.18: Membranas impermeables.

## Anexo B

### Informe de avance II: Ensayos físicos

# Trabajo Profesional de Construcciones

## Arenas de refulado

### Informe de avance II

#### Resultados de ensayos de caracterización física

Ezama, Ignacio

García Mendive, Iñaki

Paz Walther, Federico

Rellán, Gonzalo

Vernengo Lezica, Ignacio

Laboratorio de Mecánica de Suelos

Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires

## 1. Objeto

El presente informe contiene los resultados de los ensayos de caracterización física realizados sobre las muestras procedentes de las obras Dique de Carena y Terminal de contenedores Tecplata. Se incluye una breve descripción de las obras y luego se informan los resultados obtenidos a partir de todos los ensayos y trabajos realizados. Anexadas se encuentran las planillas de laboratorio con el total de los ensayos realizados.

## 2. Descripción de las obras

A continuación se describen brevemente las características principales de cada obra.

### 2.1. Proyecto Dique Carena

Consiste en la reparación de una compuerta radial del Dique Carena N° II sito en la base naval de Puerto Belgrano, ubicado en la localidad de Punta Alta, provincia de Buenos Aires. Parte de la obra será la construcción de tres ataguías celulares circulares de 21,77m de diámetro, unidas por interceldas de 4,98m de diámetro y dos riñones extremos, asimétricos, que conforman el cierre de las ataguías con el muelle existen-

te. Las ataguías celulares están conformadas por un tablestacado perimetral que sirve de recinto para la contención de la arena de relleno utilizada, la cual ha sido seleccionada para el estudio de sus propiedades.

En las figura 2.1 y 2.2 se muestran fotografías de la obra.



Figura 2.1: Dique Carena. Vista general.



Figura 2.2: Dique Carena. Vista general.

Actualmente la obra se encuentra en ejecución.

## 2.2. Proyecto Tecplata

Consiste en la construcción de una terminal de operación y acopio de contenedores situada en la ciudad de La Plata, provincia

de Buenos Aires. Dentro de las estructuras a construir se incluyen edificios operativos, caminos, playas de almacenamiento de contenedores, y un muelle de 600 m de largo para el atraque y descarga de los buques porta-contenedores.

El perfil geotécnico está formado por un estrato superior de 8 a 9 metros de espesor de suelos aluviales característicos de la formación Postpampeano, compuesto por limos y arcillas de mediana a alta plasticidad intercalados con lentes de arenas limosas erráticamente distribuidas. A partir de esa profundidad se encuentra un horizonte de limos compactos pertenecientes a la formación Pampeano.

A los efectos del proyecto de investigación, los suelos de interés son los estratos arenosos presentes en los 9 m superiores.

En la figura 2.3 se muestra una fotografía general de la obra.



Figura 2.3: Tecplata. Vista general.

Actualmente la obra se encuentra en ejecución.

### 3. Trabajos realizados en campo

Para ambos proyectos, se tomaron muestras representativas en cantidad suficiente para la ejecución de los ensayos. Se identificaron debidamente y posteriormente fueron trasladadas al laboratorio.

Estos trabajos fueron realizados en forma conjunta con personal operativo de ambas obras.

### 4. Trabajos realizados en laboratorio

Se efectuaron los siguientes ensayos de caracterización física:

- Inspección macroscópica y microscópica de partículas.
- Estudios mineralógicos de las partículas.
- Gravedad específica de las partículas.
- Análisis granulométrico.
- Límites de plasticidad.
- Clasificación USCS.
- Relación de vacíos máxima y mínima.

Todos los ensayos se efectuaron siguiendo los lineamientos de las normas ASTM [7, 9, 1, 2, 3, 4, 6, 5], con excepción de los estudios mineralógicos, ya que no existe una norma ASTM específica para este ensayo.

A continuación se describe la metodología de trabajo empleada para cada ensayo y los resultados obtenidos. En lo que sigue, se

hará referencia a los suelos analizados con el nombre de “arena Carena” y “arena Teplata”.

#### 4.1. Inspección macroscópica y microscópica

##### 4.1.1. Inspección macroscópica

En su descripción tacto - visual, la arena Carena se presenta como una arena fina de plasticidad nula, de color castaño grisácea oscura. La arena Teplata también se presenta como una arena fina de plasticidad nula, de color grisáceo oscura.

##### 4.1.2. Inspección microscópica

Se midieron los parámetros de esfericidad (S), redondez (R) y regularidad ( $\rho$ ). Para los dos primeros parámetros se realizó una comparación visual con la figura 4.1. La regularidad se define como el promedio de los valores de esfericidad y redondez.

$$\rho = \frac{S + R}{2} \quad (4.1)$$

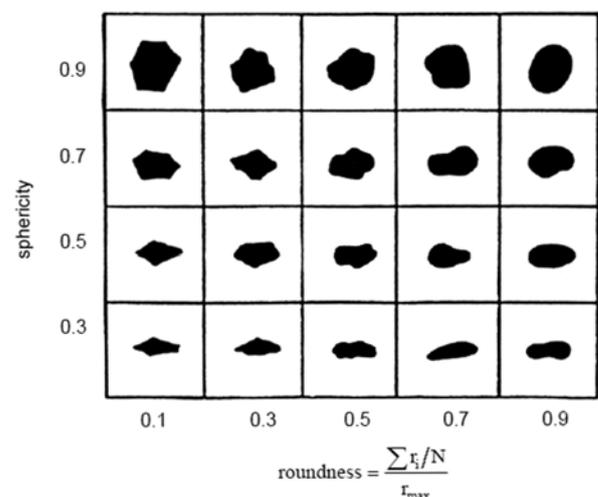


Figura 4.1: Carta de identificación de granos.

Se analizaron diferentes granos de suelo de ambas muestras mediante el uso de un microscopio óptico de resolución 400X . En las figuras 4.2, 4.3, 4.4 se muestra el instrumental utilizado y algunas fotografías de los granos observados.

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para cada muestra.



Figura 4.2: Microscopio Arcano L101 (400x).

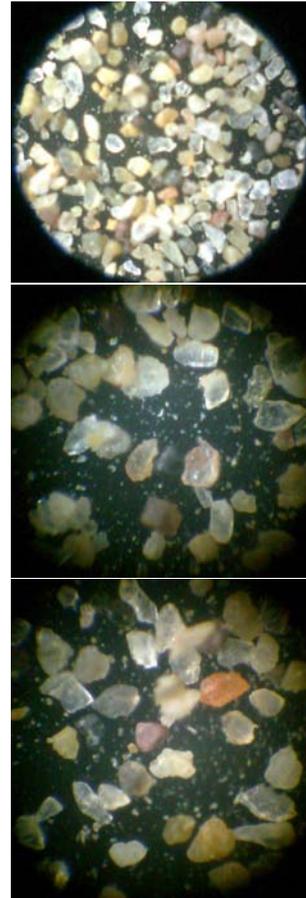


Figura 4.4: Tipos de granos de la arena Tecplata.



Figura 4.3: Tipos de granos de la arena Carena.

|          | S    | R    | $\rho$ |
|----------|------|------|--------|
| Carena   | 0.61 | 0.67 | 0.595  |
| Tecplata | 0.60 | 0.51 | 0.557  |

Tabla 1: Esfericidad, redondez y regularidad para la arena Carena y Tecplata.

## 4.2. Estudios mineralógicos

Se efectuaron estudios mineralógicos mediante la técnica de difracción por rayos X. Este trabajo fue encomendado al Laboratorio de Sólidos Amorfos de la FIUBA.

El difractómetro utilizado para el análisis está compuesto por un Goniómetro vertical  $\theta-\theta$  Rigaku, con una radiación de  $Cu-K\alpha$ , con  $\lambda \simeq 1,54$ . En la figura 4.5 se muestra una fotografía del equipo.



Figura 4.5: Goniómetro vertical  $\theta - \theta$  Rigaku.

#### 4.2.1. Preparación de muestras y descripción de ensayo

Se tomaron 5,0 g de cada muestra en estado natural, previamente secada a horno 24 hs a temperatura no mayor a 80 °C. Se colocó parte de la muestra en un cristal de aprox. 300 mm<sup>2</sup> y luego se lo introdujo en el equipo. Posteriormente se irradió la muestra con un haz de rayos monocromático con un ángulo de ataque ( $\theta$ ) variable entre 2,5 y 40 grados. Como resultado se obtiene el difractograma para todo el espectro de barrido, indicando el número de veces (*count*) que se repite el ángulo de reflexión en función de  $2\theta$ .

#### 4.2.2. Interpretación

Conocido el valor de  $\theta$ , se determina la distancia basal, según la ley de Bragg - figura 4.6 -.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(\theta) \quad (4.2)$$

donde:

- $n$ : número de longitudes de onda (1).

- $\lambda$ : longitud de onda de los rayos X (1,54060 Å).
- $d$ : distancia basal (Å).
- $\theta$ : ángulo de incidencia.

En las figuras ?? y ?? se presentan los difractogramas obtenidos. En la tabla 2 se presentan los minerales predominantes de cada muestra. Se puede notar que la muestra de Tecplata presenta algunos minerales predominantes con mayores picos de intensidad, pero se observa en ambas una gran cantidad de cuarzo presente.

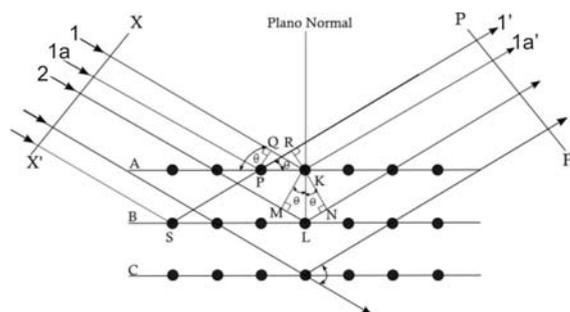


Figura 4.6: Reflexión de rayos X. Ley de Bragg.

| Grupo      | Subgrupo    | Mineral     |
|------------|-------------|-------------|
| Carbonatos |             | Calcita     |
|            |             | Rodocrosita |
|            |             | Corindón    |
| Óxidos     | Limonitas   | Cuarzo      |
|            |             | Goethita    |
|            |             | Hematites   |
|            |             | Magnetita   |
|            | Feldespatos | Anortita    |
| Albita     |             |             |
| Silicatos  | Olivinos    | Fosterita   |
|            |             | Olivino     |
|            | Serpentitas | Antigorita  |
| Sulfatos   |             | Anhidrita   |

Tabla 2: Minerales encontrados en la arena Carena.

| Grupo                       | Mineral      |
|-----------------------------|--------------|
| Fosfatos                    | Berlinita    |
| Óxidos                      | Cuarzo       |
| Silicatos                   | Paranatisita |
| Otros minerales encontrados | Carbono      |
|                             | Hierro       |
|                             | Cobre        |

Tabla 3: Minerales encontrados en la arena Tecplata.

### 4.3. Gravedad específica de las partículas ( $G_s$ )

Se efectuaron ensayos de gravedad específica mediante la técnica del picnómetro. Se realizaron 3 ensayos sobre la arena de Carena y 5 sobre la arena Tecplata.

En base a los ensayos realizados, se obtuvo un valor medio  $G_s = 2,71$  para la muestra de Carena y  $G_s = 2,68$  para la muestra de Tecplata. Los valores presentados están corregidos a la temperatura  $T=20^\circ\text{C}$ . El peso específico de las partículas se obtiene mediante el empleo de la siguiente expresión:

$$\gamma_s = G_s \cdot \gamma_w \quad (4.3)$$

Los resultados fueron  $\gamma_s = 26,50 \frac{kN}{m^3}$  para Carena y  $\gamma_s = 26,19 \frac{kN}{m^3}$  para Tecplata.

## 4.4. Análisis granulométrico

### 4.4.1. Fracción gruesa

Se efectuaron estudios granulométricos por vía húmeda utilizando los tamices de la serie normalizada ASTM (tamices #4, #10, #30, #40, #60, #100 y #200). Previo a cada ensayo, se dejaron las muestras 24 hs en reposo en una solución de hexametafosfato de sodio al 4% en agua destilada

capaz de actuar como agente dispersante.

Las curvas granulométricas obtenidas se pueden ver en la figura ???. En las tablas 4 y 5 se presentan diámetros teóricos y coeficientes de uniformidad y curvatura resultantes.

| $D_{60}$ | $D_{30}$ | $D_{10}$ | $C_u$ | $C_c$ |
|----------|----------|----------|-------|-------|
| 0.40     | 0.26     | 0.17     | 2.3   | 1.0   |

Tabla 4: Diámetros teóricos y coeficientes de uniformidad y curvatura de la arena Carena.

| $D_{60}$ | $D_{30}$ | $D_{10}$ | $C_u$ | $C_c$ |
|----------|----------|----------|-------|-------|
| 0.15     | 0.07     | 0.02     | 7.2   | 1.7   |

Tabla 5: Diámetros teóricos y coeficientes de uniformidad y curvatura de la arena Tecplata.

### 4.4.2. Fracción fina (%C, %M)

Se efectuaron pruebas de hidrometría para determinar el contenido de arcillas y limos presentes en la fracción fina de la muestra de la arena Tecplata. En la arena Carena no se realizaron ya que su pasa tamiz N<sup>o</sup> 200 es menor al 5%. Se utilizó un hidrómetro ASTM 152-H para tomar las mediciones de densidad.

Se prepararon dos muestras de 100 g aproximadamente, previamente reposadas en dispersante durante 24hs. La curva granulométrica obtenida se puede ver en la figura 4.10.

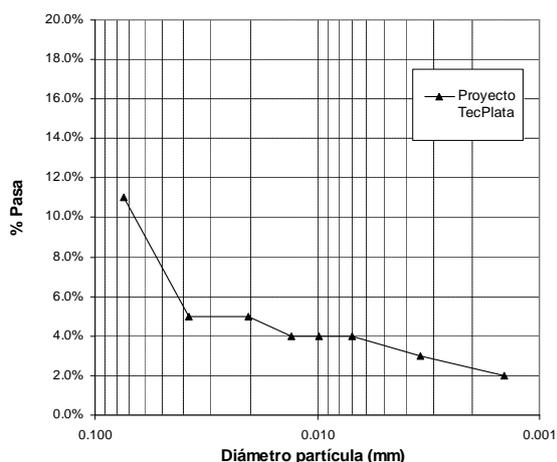


Figura 4.10: Hidrometría arena Carena.

En la tabla 6 se presentan las fracciones de arcillas y limos determinadas para cada muestra.

| Fracciones | Muestra 1 | Muestra 2 |
|------------|-----------|-----------|
| Arcilla    | 2.0 %     | 7.0 %     |
| Limo       | 2.5 %     | 8.5 %     |

Tabla 6: Fracciones de arcilla y limo en muestras ensayadas de arena Tecplata.

#### 4.5. Límites de plasticidad ( $LL$ , $LP$ )

Ambas muestras presentaron un contenido de finos menor o apenas superior al 5% en peso. Ambas muestras presentan un comportamiento no plástico. No es posible determinar los parámetros  $LL$  y  $LP$ .

#### 4.6. Clasificación según Sistema Unificado de Clasificación (USCS)

La muestra de Carena clasifica como SP (arena mal graduada). La muestra de Tecplata clasifica como SP-SM (arena mal graduada limosa).

### 4.7. Relación de vacíos máxima y mínima ( $e_{máx}$ , $e_{mín}$ )

#### 4.7.1. Relación de vacíos máxima

El proceso de medición de  $e_{máx}$  se realizó de la siguiente manera: sobre una probeta de 1000 ml inclinada un ángulo de  $30^\circ$ , se fue colocando suavemente la muestra de arena seca. Se leyó el volumen y el peso de arena para obtener  $\gamma_{d_{mín}}$ . La relación de vacíos máxima se obtiene mediante el empleo de la siguiente expresión:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (4.4)$$

Esta metodología es la propuesta por la norma ASTM [7] y otros autores [8].

Se obtuvo un valor de  $e_{máx} = 0,822$  para Carena y  $e_{máx} = 1,092$  para Tecplata. En las planillas de laboratorio se informan los valores de todos los ensayos realizados.

#### 4.7.2. Relación de vacíos mínima

El proceso de medición de  $e_{mín}$  se realizó de la siguiente manera: sobre un molde de acero de 152,4 mm (6 in) de diámetro y 3100 cm<sup>3</sup> de capacidad, se colocó una muestra de 4500 g de arena seca con un lastre de 5,8 kPa en su parte superior. El molde se llenó con diferentes capas de arena, cada una compactada por acción mecánica y vibratoria. Una vez colocada toda la muestra de arena en el molde, se midió la diferencia de altura entre la arena y el borde superior del molde para calcular el volumen ocupado por la misma.

Se obtuvo un valor de  $e_{mín} = 0,562$  para Carena y  $e_{mín} = 0,705$  para Tecplata.

## 5. Próximos trabajos

Se realizarán ensayos triaxiales drenados y no drenados para determinar los parámetros de comportamiento mecánico de ambas arenas. Estos resultados se utilizarán para calibrar un modelo constitutivo y luego modelar las estructuras de ambas obras. Los resultados de las modelaciones se compararán con las mediciones reales de presiones neutras y deformaciones en las obras.

## Referencias

- [1] D422 - 63 (2007) “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”.
- [2] D854 - 10 “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”.
- [3] D1140 - 00 (2006) “Standard Test Method for Amount of Material in Soils Finer Than the No. 200 (0.075mm)”.
- [4] D2216 - 10 “Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass”.
- [5] D2487 - 11 “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”.
- [6] D2488 - 09a “Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)”.
- [7] D4253 - 00 (2006) “Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table”.
- [8] D’Apolonia, et. al. 1960
- [9] D4254 - 00(2006)e1 “Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density”.
- [10] D4318 - 10 “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”.
- [11] Bardet J. (1997) “Experimental Soil Mechanics”. Prentice Hall (1997).
- [12] Chadima, McCormick, Schulz, Hagggar. (2003) “X-ray diffraction analysis of post-cretaceous sand and gravel units in southeastern South Dakota”. University of South Dakota, 2003.
- [13] Cho G., Dodds J. & Santamarina J. (2006) “Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands”. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(5): 591–602.

## Anexo C

### Planillas de ensayos físicos y mecánicos



Fecha: 08/09/2011

Condiciones higrotérmicas:

ARENA CARENA

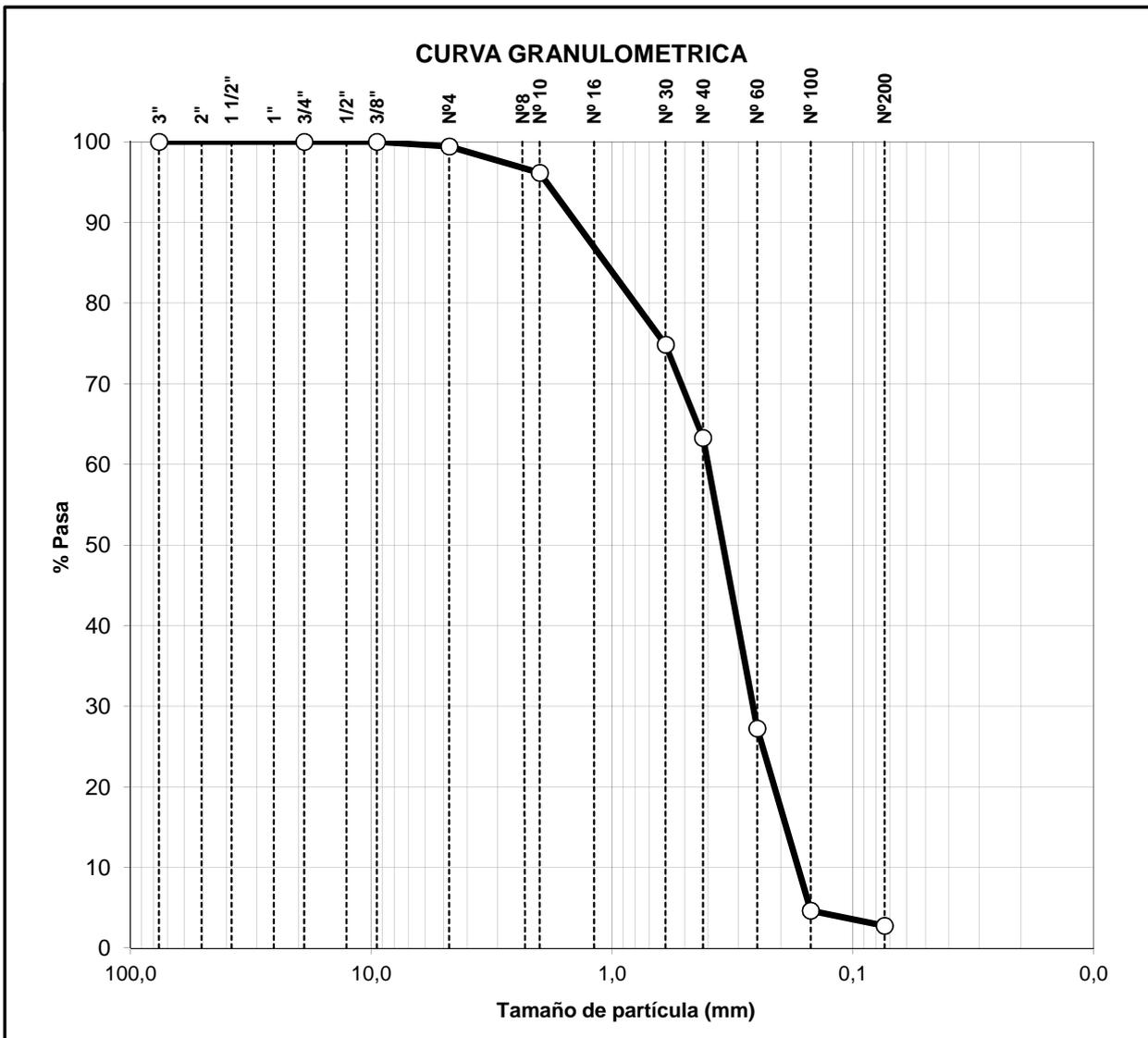
Operador: F. Paz Walther, G. Rellán

Normas de trabajo:

ASTM D422-63R02

| CRIBAS & TAMICES          |                       | RET.                  | PASANTE              |                      |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Nro                       | (mm)                  | (gr)                  | (gr)                 | (%)                  |
| 3"                        | 76,20                 | 0,00                  | 3700,40              | 100                  |
| 3/4"                      | 19,00                 | 0,00                  | 3700,40              | 100                  |
| 3/8"                      | 9,50                  | 0,00                  | 3700,40              | 100                  |
| Nº4                       | 4,75                  | 21,15                 | 3679,25              | 99                   |
| Nº10                      | 2,00                  | 121,00                | 3558,25              | 96                   |
| Nº30                      | 0,60                  | 788,50                | 2769,75              | 75                   |
| Nº40                      | 0,42                  | 428,00                | 2341,75              | 63                   |
| Nº60                      | 0,25                  | 1333,50               | 1008,25              | 27                   |
| Nº100                     | 0,15                  | 836,00                | 172,25               | 5                    |
| Nº200                     | 0,074                 | 69,50                 | 102,75               | 3                    |
| <b>D<sub>60</sub></b>     | <b>D<sub>30</sub></b> | <b>D<sub>10</sub></b> | <b>C<sub>u</sub></b> | <b>C<sub>c</sub></b> |
| 0,40                      | 0,26                  | 0,17                  | 2,3                  | 1,0                  |
| <b>CLASIFICACION USCS</b> |                       |                       | <b>SP</b>            |                      |

Tamaño de muestra: 3700 gr  
 Tamaño máximo: 4,75 mm  
 Forma de las partículas:  
 Preparación: Tamizado por vía húmeda  
 Fracción gruesa : 97,2%  
 Pasa #200 : 2,8%  
 Retenido #4 : 0,6%  
 L. Atterberg : LL: S/D  
 LP: S/D





|  |   |              |
|--|---|--------------|
| Fecha: 20/09/2011                      | Condiciones higrotérmicas:                            | ARENA CARENA |
| Operador: G. Rellán, I. García Mendive | Normas de trabajo: ASTM D 4253 - 00, ASTM D 4254 - 00 |              |

Clasificación visual según ASTM D2487: Arena limpia

$\gamma_{s\ avg}$  26,502 kN/m<sup>3</sup>

**Relación de vacíos máxima**

Molde Proctor grande c/ad  $V\ (cm^3)$  3077,1

| ENSAYO | $M_{tot}$<br>(gr) | $M_s$<br>(gr) | $\gamma_{d\ min}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $e_{máx}$ |
|--------|-------------------|---------------|---|-----------|
| 1      | 4476,5            | 4476,5        | 14,5                                      | 0,822     |
| 2      | 4492,5            | 4492,5        | 14,6                                      | 0,815     |
| 3      | 4484,5            | 4484,5        | 14,6                                      | 0,818     |
| 4      | 4487,0            | 4487,0        | 14,6                                      | 0,817     |
| 5      | 4480,0            | 4480,0        | 14,6                                      | 0,820     |
| 6      | —                 | 4610,5        | 15,0                                      | 0,769     |
| 7      |                   | 4732,0        | 15,4                                      | 0,723     |
| 8      |                   | 4668,0        | 15,2                                      | 0,747     |

0,822

**Relación de vacíos mínima**

Molde Proctor grande s/ad  $V\ (cm^3)$  2137,2 cm<sup>3</sup>

| ENSAYO | $M_s$<br>(g) | $\gamma_{d\ max}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $e_{min}$ |
|--------|--------------|---|-----------|
| 1      | 3565,5       | 16,7                                      | 0,589     |
| 2      | 3567,5       | 16,7                                      | 0,588     |
| 3      | 3597,5       | 16,8                                      | 0,574     |
| 4      | 3579,5       | 16,7                                      | 0,582     |
| 5      | 3625,1       | 17,0                                      | 0,562     |

0,562

- $A_c$  área de la base del molde
- $V_c$  volumen del molde
- $M_s$  peso del suelo secado a horno
- $V$  volumen de la muestra
- $H$  diferencia de altura entre el molde y el suelo
- $\gamma_{d\ max}$  peso específico máximo
- $\gamma_{d\ min}$  peso específico mínimo
- $e_{max}$  relación de vacíos máxima
- $e_{min}$  relación de vacíos mínima



|                                    |  |              |
|------------------------------------|--|--------------|
| Fecha: 26/01/2012                  | Condiciones higrotérmicas:                   | ARENA CARENA |
| Operador: I. Ezama, F. Paz Walther | Normas de trabajo: ASTM D 854 - 02. Método A |              |

Clasificación visual según ASTM D2487: Arena limpia con contenido de conchillas  
 Porcentaje que pasa tamiz #4: 99%  
 Metodología: Baño térmico (30 - 40°C) y vacío (550 - 600 mmHg) durante 2 hs.  
 Preparación: ~60 gr suelo pasante por tamiz #30, secado a horno

| CALIBRACION PICNOMETRO |        |                     |                       |                                      |                                   |
|------------------------|--------|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| NRO.                   | T (°C) | M <sub>p</sub> (gr) | M <sub>p+w</sub> (gr) | γ <sub>w</sub> (gr/cm <sup>3</sup> ) | V <sub>p</sub> (cm <sup>3</sup> ) |
| Picnóm. I              | 27     | 90,33               | 338,75                | 0,99652                              | 249,29                            |
| Picnóm. II             | 28     | 90,33               | 338,75                | 0,99624                              | 249,36                            |
| Picnóm. III            | 28     | 90,31               | 338,85                | 0,99624                              | 249,48                            |

T° temperatura de calibración  
 M<sub>p</sub> peso del picnómetro  
 M<sub>p+w</sub> peso del picnómetro con agua  
 γ<sub>w</sub> densidad del agua  
 V<sub>p</sub> volumen del picnómetro

| GRAVEDAD ESPECIFICA SOLIDOS |         |                        |                     |                         |                                      |                    |
|-----------------------------|---------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| MUESTRA                     | T° (°C) | M <sub>pw,t</sub> (gr) | M <sub>s</sub> (gr) | M <sub>pws,t</sub> (gr) | γ <sub>ω</sub> (gr/cm <sup>3</sup> ) | G <sub>s(T°)</sub> |
| A                           | 26,0    | 338,82                 | 68,17               | 381,67                  | 0,99679                              | 2,69               |
| B                           | 28,0    | 338,75                 | 61,66               | 377,82                  | 0,99624                              | 2,73               |
| C                           | 28,0    | 338,75                 | 60,04               | 376,79                  | 0,99624                              | 2,73               |

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p \cdot \gamma_\omega)$$

$$G_{s(T^\circ)} = \frac{M_s}{(M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s))}$$

M<sub>pw,t</sub> peso del picnómetro y agua a la temperatura de trabajo  
 M<sub>s</sub> peso del suelo secado a horno  
 M<sub>pws,t</sub> peso del picnómetro, suelo seco y agua a la temp. trabajo  
 G<sub>t</sub> gravedad específica de los sólidos a la temp. trabajo

| CORRECCION A 20°C |         |                |                      |                        |                                     |  |
|-------------------|---------|----------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|--|
| MUESTRA           | T° (°C) | K <sub>t</sub> | G <sub>s(20°C)</sub> | G <sub>avg(20°C)</sub> | γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> ) | γ <sub>s prom</sub> (kN/m <sup>3</sup> ) |
| A                 | 26,0    | 0,99858        | 2,69                 | 2,71                   | 26,28                               | 26,50                                    |
| B                 | 28,0    | 0,99803        | 2,72                 |                        | 26,61                               |  |
| C                 | 28,0    | 0,99803        | 2,72                 |                        | 26,61                               |  |

K<sub>t</sub> factor de corrección  
 G<sub>s(20°C)</sub> = G<sub>s(T°)</sub> · K<sub>t</sub> gravedad específica a 20°C  
 γ<sub>s</sub> = G<sub>s(20°C)</sub> · γ<sub>ω</sub> peso específico de las partículas a 20°C



|                                 |                            |              |
|---------------------------------|----------------------------|--------------|
| Fecha: 11/07/2011               | Condiciones higrotérmicas: | ARENA CARENA |
| Operador: G. Chastel, C. Canedo | Normas de trabajo:         |              |

| Arena Carena (Bahia Blanca) |             |          |                    |             |          |                    |             |          |
|-----------------------------|-------------|----------|--------------------|-------------|----------|--------------------|-------------|----------|
| Tipo Blanco                 |             |          | Tipo Naranja       |             |          | Tipo Negro         |             |          |
| N# Grano                    | Esfericidad | Redondez | N# Grano           | Esfericidad | Redondez | N# Grano           | Esfericidad | Redondez |
| 1                           | 0,5         | 0,7      | 1                  | 0,7         | 0,7      | 1                  | 0,3         | 0,7      |
| 2                           | 0,5         | 0,5      | 2                  | 0,7         | 0,7      | 2                  | 0,7         | 0,5      |
| 3                           | 0,7         | 0,7      | 3                  | 0,3         | 0,5      | 3                  | 0,7         | 0,7      |
| 4                           | 0,5         | 0,5      | 4                  | 0,5         | 0,7      | 4                  | 0,7         | 0,3      |
| 5                           | 0,7         | 0,5      | 5                  | 0,9         | 0,9      | 5                  | 0,3         | 0,5      |
| 6                           | 0,9         | 0,7      | 6                  | 0,9         | 0,7      | 6                  | 0,7         | 0,7      |
| 7                           | 0,3         | 0,7      | 7                  | 0,7         | 0,7      | 7                  | 0,5         | 0,7      |
| 8                           | 0,5         | 0,5      | 8                  | 0,9         | 0,7      | 8                  | 0,7         | 0,9      |
| 9                           | 0,5         | 0,7      | 9                  | 0,5         | 0,7      | 9                  | 0,7         | 0,5      |
| 10                          | 0,7         | 0,5      | 10                 | 0,9         | 0,9      | 10                 | 0,7         | 0,9      |
| 11                          | 0,9         | 0,9      | 11                 | 0,7         | 0,7      | 11                 | 0,5         | 0,7      |
| 12                          | 0,3         | 0,7      | 12                 | 0,3         | 0,5      | 12                 | 0,7         | 0,3      |
| 13                          | 0,5         | 0,3      | 13                 | 0,5         | 0,7      | 13                 | 0,5         | 0,1      |
| 14                          | 0,7         | 0,7      | 14                 | 0,7         | 0,5      | 14                 | 0,3         | 0,5      |
| 15                          | 0,7         | 0,9      | 15                 | 0,7         | 0,7      | 15                 | 0,5         | 0,7      |
| 16                          | 0,7         | 0,3      | 16                 | 0,9         | 0,7      | 16                 | 0,7         | 0,5      |
| 17                          | 0,3         | 0,7      | 17                 | 0,7         | 0,5      | 17                 | 0,5         | 0,9      |
| 18                          | 0,7         | 0,9      | 18                 | 0,5         | 0,5      | 18                 | 0,7         | 0,7      |
| 19                          | 0,9         | 0,5      | 19                 | 0,7         | 0,9      | 19                 | 0,7         | 0,5      |
| 20                          | 0,3         | 0,5      | 20                 | 0,5         | 0,5      | 20                 | 0,7         | 0,7      |
| <b>Promedio</b>             | 0,590       | 0,620    | <b>Promedio</b>    | 0,660       | 0,670    | <b>Promedio</b>    | 0,590       | 0,600    |
| <b>Regularidad</b>          | 0,605       |          | <b>Regularidad</b> | 0,665       |          | <b>Regularidad</b> | 0,595       |          |



|  |                            |              |
|--|----------------------------|--------------|
| Fecha: 16/09/2011                        | Condiciones higrotérmicas: | ARENA CARENA |
| Operador: M. Pagnola, I. Vernengo Lezica | Normas de trabajo:         |              |

El ensayo fue realizado en el Laboratorio de Sólidos Amorfos de la FIUBA.

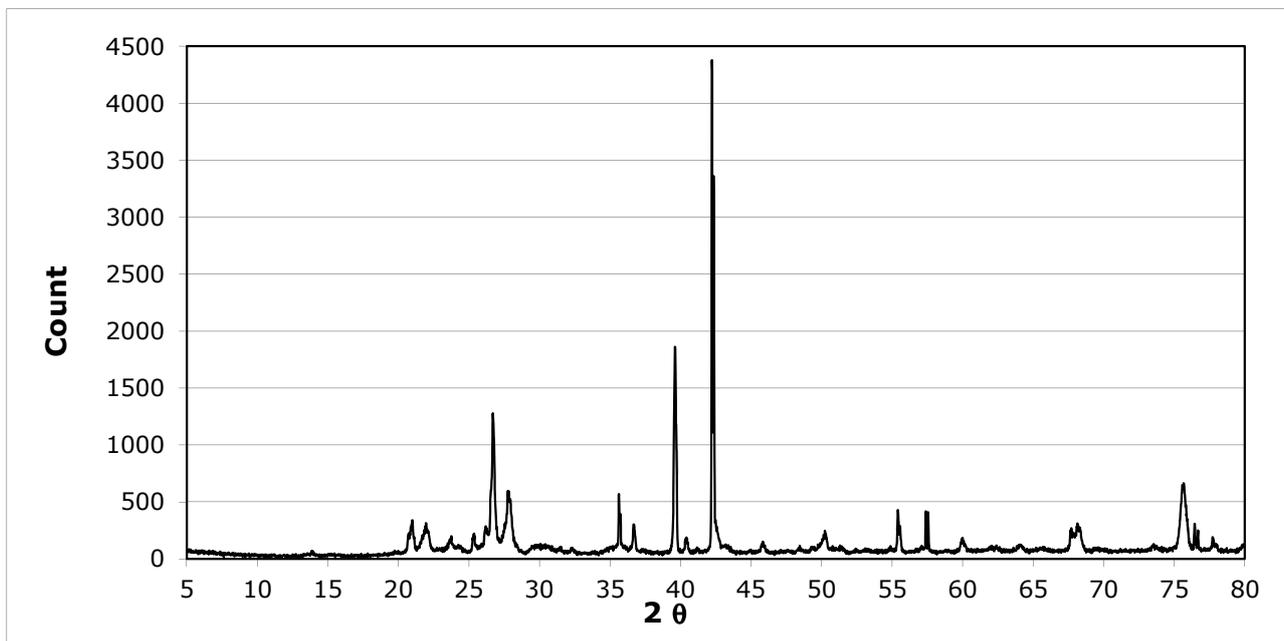
Equipo: Goniómetro vertical  $\theta - \theta$  Rigaku

Radiación: Cu -  $K\alpha$

Longitud de onda ( $\lambda$ ): 1,54  $\text{Å}$

**Procedimiento:**

Se tomaron 5,0 gr de la muestra en estado natural, previamente secada a horno 24 hs a temperatura no mayor a 80 °C. Se colocó parte de la muestra en un cristal de aprox. 300 mm<sup>2</sup> y luego se introdujo en el equipo. Posteriormente se irradió la muestra con un haz de rayos monocromático con un ángulo de ataque ( $\theta$ ) variable entre 2,5 y 40 grados. Se obtiene el difractograma para todo el espectro de barrido, indicando el número de veces (count) que se repite el ángulo de reflexión en función de  $2\theta$ .



**Minerales Encontrados:**

| GRUPO      | SUBGRUPO    | MINERAL     |
|------------|-------------|-------------|
| Carbonatos |             | Calcita     |
|            |             | Rodocrosita |
| Óxidos     |             | Corindón    |
|            |             | Cuarzo      |
|            | Limonita    | Goethita    |
|            |             | Hematites   |
|            | Magnetita   |             |
| Silicatos  | Feldespatos | Anortita    |
|            |             | Albita      |
|            | Olivino     | Forsterita  |
|            |             | Olivino     |
|            | Serpentita  | Antigorita  |
| Sulfatos   |             | Anhidrita   |

**ENSAYO TRIAXIAL CIDC (CONSOLIDADO - DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

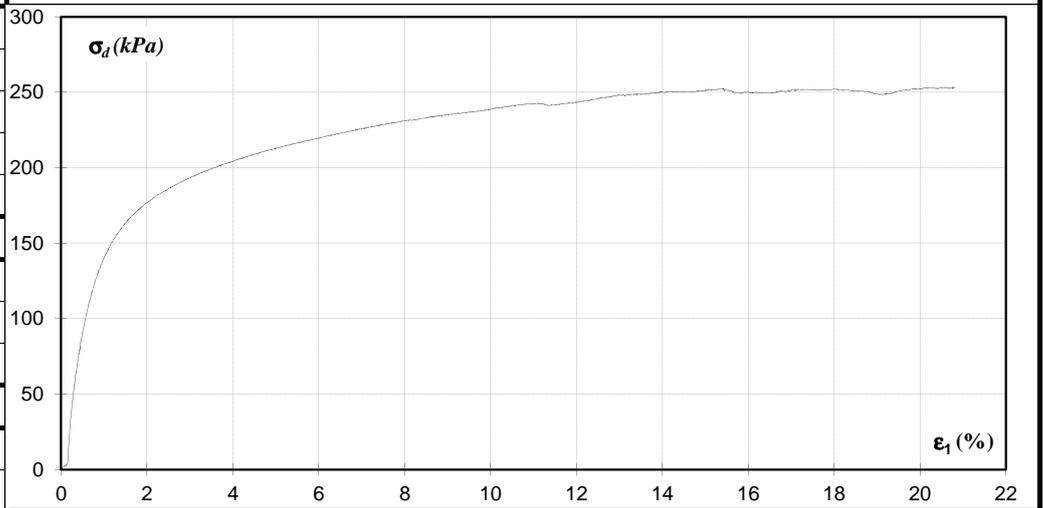


|                   |            |                   |                                    |                       |                   |        |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 02/08/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 | Vel def               | 1,10              | mm/min |       |        |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    | E <sub>membrana</sub> | 243               | kPa    |       |        |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{m\acute{a}x}$     | 0,82              | $C_u$  | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$              | $e_{m\acute{i}n}$ | 0,56   | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 14,6  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,81  | -        |
| $D_{r\,inicial}$ | 4,2   | %        |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



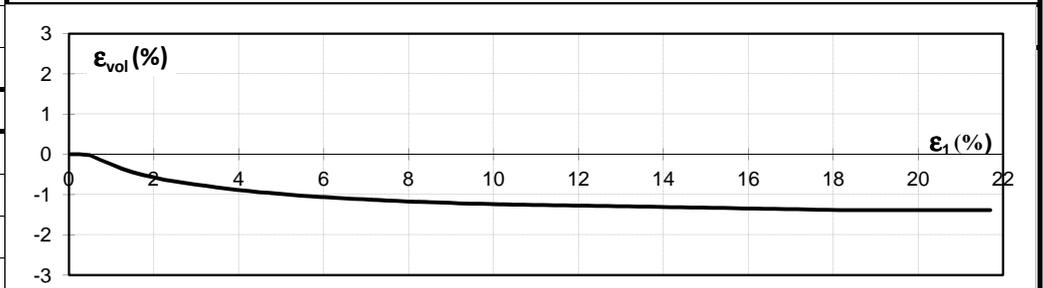
**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 300    | kPa |
| $B_{final}$   | 50,0   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|                |       |     |
|----------------|-------|-----|
| $H_{cons}$     | 222,0 | mm  |
| $\sigma'_{z3}$ | 100   | kPa |
| $t_{50}$       | -     | seg |
| $e_{cons}$     | 0,81  | -   |
| $D_{r\,cons}$  | 4,5   | %   |

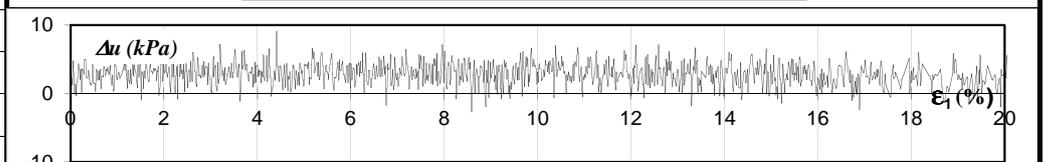
**DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA (%) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



**3- RUPTURA**

|                        |       |     |
|------------------------|-------|-----|
| $\epsilon_{1\,peak}$   | 15,14 | %   |
| $\epsilon_{Vol\,peak}$ | -1,32 | %   |
| $\sigma_{d\,peak}$     | 243   | kPa |
| $\sigma'_{1peak}$      | 355   | kPa |
| $\sigma'_{3peak}$      | 112   | kPa |
| $\phi_{peak}$          | 31,4  | °   |
| $\epsilon_{1crit}$     | 15,14 | %   |
| $\epsilon_{volcrit}$   | -1,32 | %   |
| $\phi_{crit}$          | 31,4  | °   |

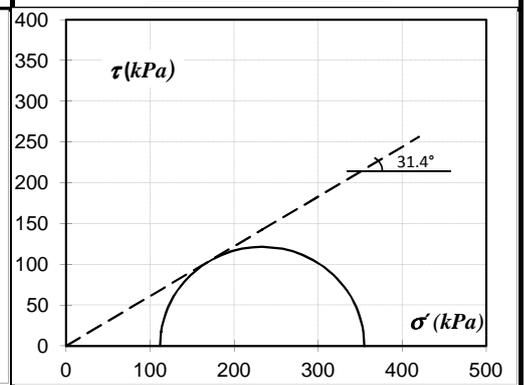
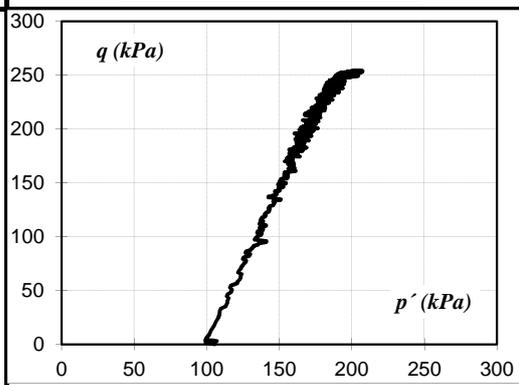
**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



**MUESTRA EN FALLA**

**TRAYECTORIA TENSIONES**

**DIAGRAMA DE MÖHR**



**ENSAYO TRIAXIAL CIDC (CONSOLIDADO - DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

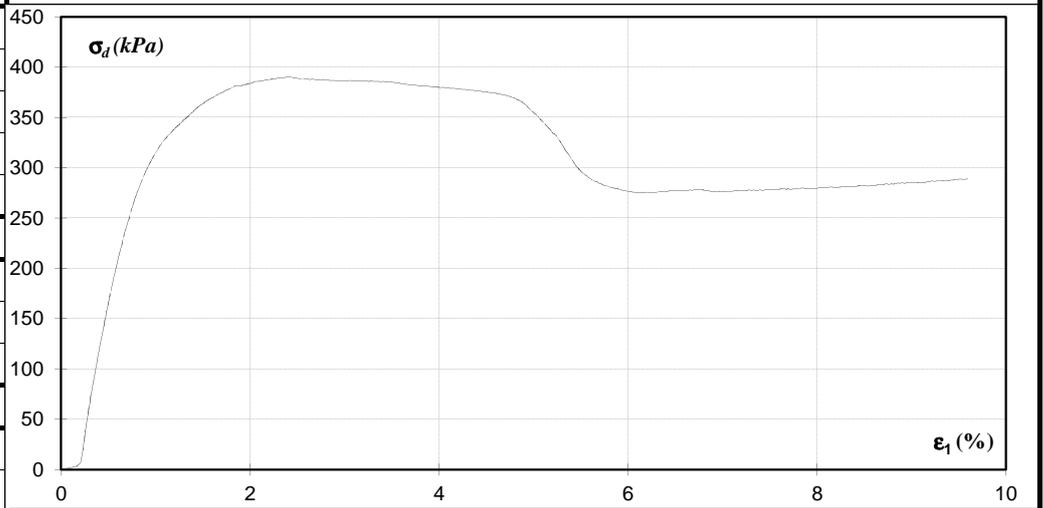


|                   |            |                   |                                    |                   |                   |        |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|--------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 02/08/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 | Vel def           | 1,10              | mm/min |       |        |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    | $E_{membrana}$    | 274               | kPa    |       |        |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{m\acute{a}x}$ | 0,82              | $C_u$  | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$          | $e_{m\acute{i}n}$ | 0,56   | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 16,6  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,60  | -        |
| $D_{r\ initial}$ | 86,7  | %        |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



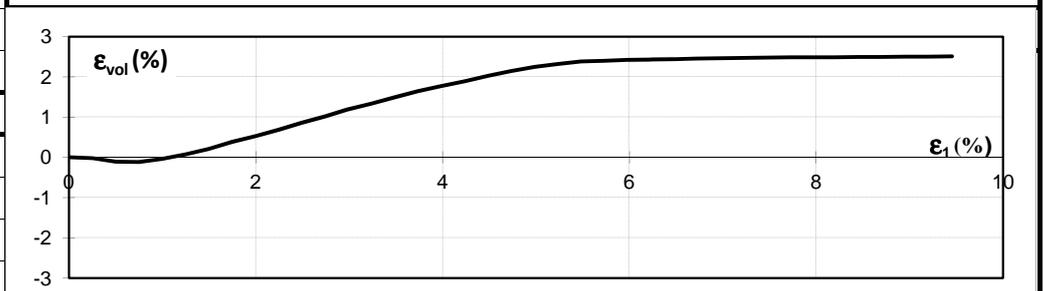
**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 300    | kPa |
| $B_{final}$   | 38,5   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|                |       |     |
|----------------|-------|-----|
| $H_{cons}$     | 221,5 | mm  |
| $\sigma'_{z3}$ | 100   | kPa |
| $t_{50}$       | -     | seg |
| $e_{cons}$     | 0,59  | -   |
| $D_{r\ cons}$  | 88,2  | %   |

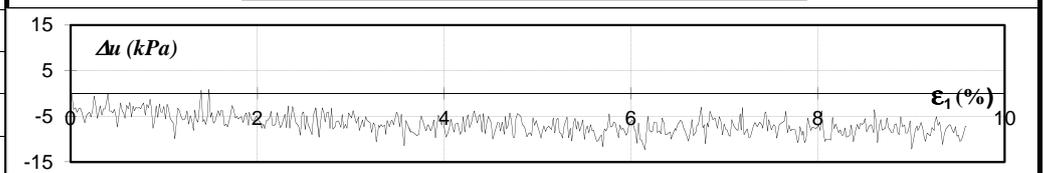
**DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA (%) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



**3- RUPTURA**

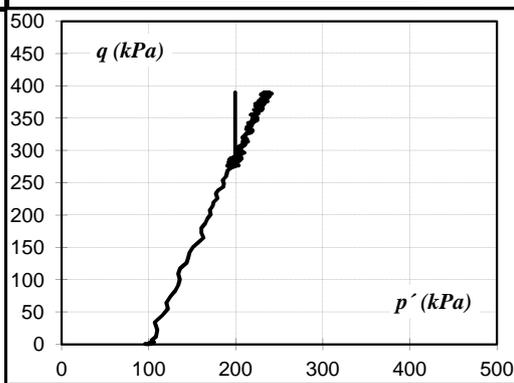
|                        |      |     |
|------------------------|------|-----|
| $\epsilon_{1\ peak}$   | 2,17 | %   |
| $\epsilon_{Vol\ peak}$ | 0,52 | %   |
| $\sigma_{d\ peak}$     | 386  | kPa |
| $\sigma'_{1peak}$      | 495  | kPa |
| $\sigma'_{3peak}$      | 110  | kPa |
| $\phi_{peak}$          | 39,6 | °   |
| $\epsilon_{1crit}$     | 6,11 | %   |
| $\epsilon_{volcrit}$   | 2,42 | %   |
| $\phi_{crit}$          | 34,6 | °   |

**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**

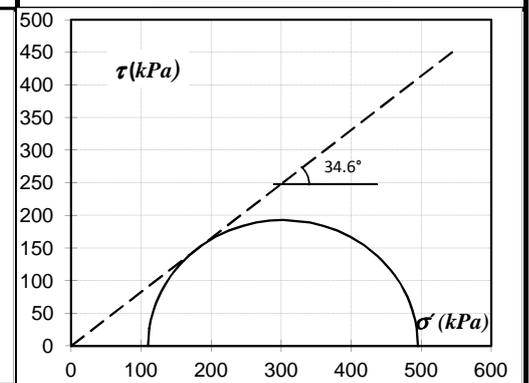


**MUESTRA EN FALLA**

**TRAYECTORIA TENSIONES**



**DIAGRAMA DE MÖHR**



FOTO

**ENSAYO TRIAXIAL CIDC (CONSOLIDADO - DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

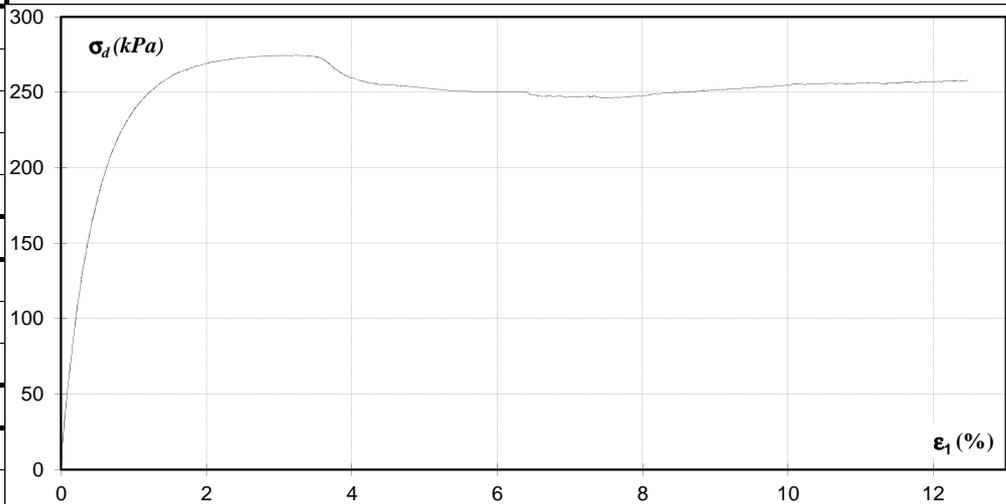


|                   |            |                       |                                    |                         |                         |                       |                       |        |           |
|-------------------|------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--------|-----------|
| Fecha             | 01/08/2012 | Normas de trabajo     | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 | Vel def                 | 1,10                    | mm/min                |                       |        |           |
| Operador          | GR - FP    |                       |                                    | E <sub>membrana</sub>   | 245                     | kPa                   |                       |        |           |
| Material ensayado |            | CARENA                |                                    | <i>e</i> <sub>máx</sub> | 0,82                    | <i>C</i> <sub>u</sub> | 2,33                  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | <i>γ</i> <sub>s</sub> | 26,5                               | kN/m <sup>3</sup>       | <i>e</i> <sub>mín</sub> | 0,56                  | <i>C</i> <sub>c</sub> | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|   |       |                   |
|---|-------|-------------------|
| <i>H</i> <sub>inicial</sub>             | 222,0 | mm                |
| <i>Φ</i> <sub>inicial</sub>             | 100,0 | mm                |
| <i>γ</i> <sub>do</sub>                  | 15,5  | kN/m <sup>3</sup> |
| <i>e</i> <sub>0</sub>                   | 0,71  | -                 |
| <i>D<sub>r</sub></i> <sub>inicial</sub> | 44,6  | %                 |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



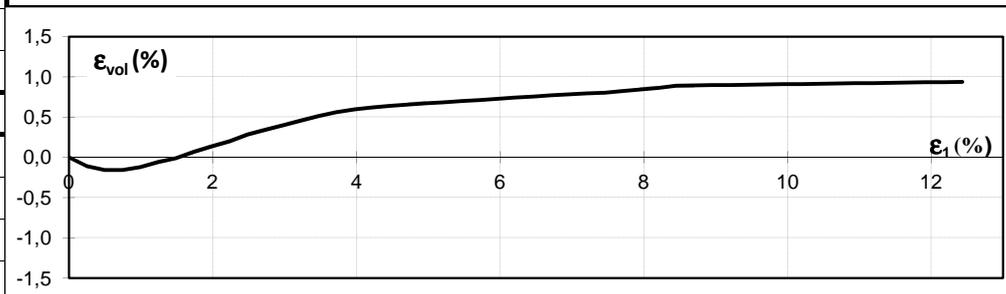
**1- SATURACIÓN**

|                           |        |     |
|---------------------------|--------|-----|
| método                    | húmedo |     |
| <i>μ</i> <sub>final</sub> | 300    | kPa |
| <i>B</i> <sub>final</sub> | 40,0   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|                                      |       |     |
|--------------------------------------|-------|-----|
| <i>H</i> <sub>cons</sub>             | 221,5 | mm  |
| <i>σ</i> ' <sub>3</sub>              | 101   | kPa |
| <i>t</i> <sub>50</sub>               | -     | seg |
| <i>e</i> <sub>cons</sub>             | 0,70  | -   |
| <i>D<sub>r</sub></i> <sub>cons</sub> | 46,2  | %   |

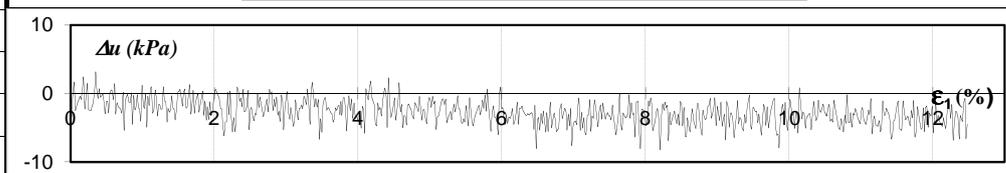
**DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA (%) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



**3- RUPTURA**

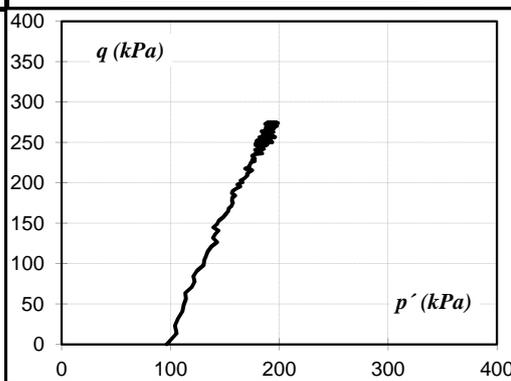
|                              |      |     |
|------------------------------|------|-----|
| <i>ε</i> <sub>1 peak</sub>   | 2,71 | %   |
| <i>ε</i> <sub>Vol peak</sub> | 0,28 | %   |
| <i>σ</i> <sub>d peak</sub>   | 272  | kPa |
| <i>σ</i> ' <sub>1 peak</sub> | 374  | kPa |
| <i>σ</i> ' <sub>3 peak</sub> | 102  | kPa |
| <i>φ</i> <sub>peak</sub>     | 34,8 | °   |
| <i>ε</i> <sub>1 crit</sub>   | 6,96 | %   |
| <i>ε</i> <sub>vol crit</sub> | 0,77 | %   |
| <i>φ</i> <sub>crit</sub>     | 33,4 | °   |

**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**

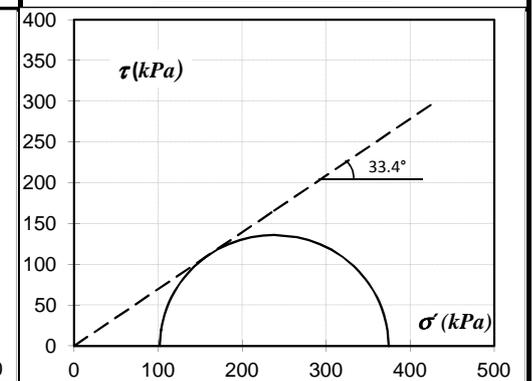


**MUESTRA EN FALLA**

**TRAYECTORIA TENSIONES**



**DIAGRAMA DE MÖHR**



FOTO

**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

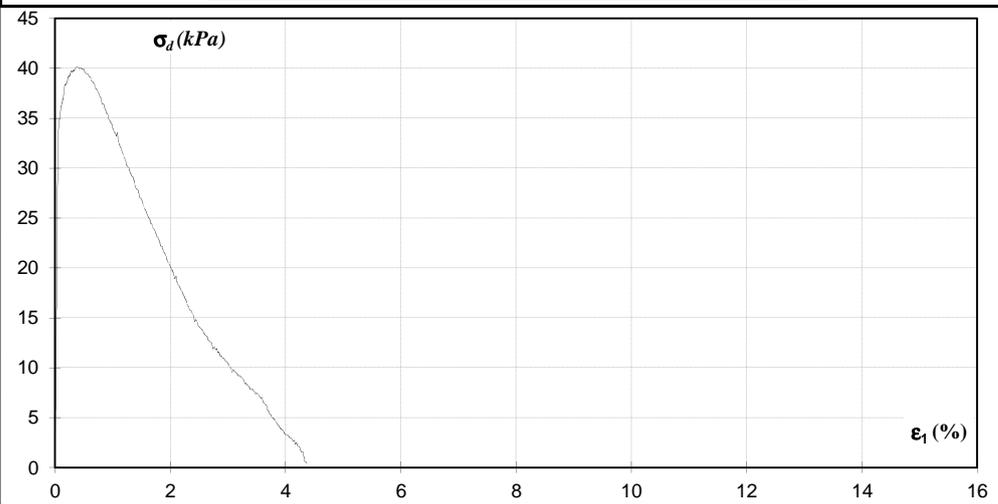


|                   |            |                   |                                    |                       |                   |        |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 22/05/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 | Vel def               | 1,10              | mm/min |       |        |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    | E <sub>membrana</sub> | 1249              | kPa    |       |        |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{m\acute{a}x}$     | 0,82              | $C_u$  | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$              | $e_{m\acute{i}n}$ | 0,56   | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 14,7  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,80  | -        |
| $D_r_{inicial}$  | 7,0   | %        |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



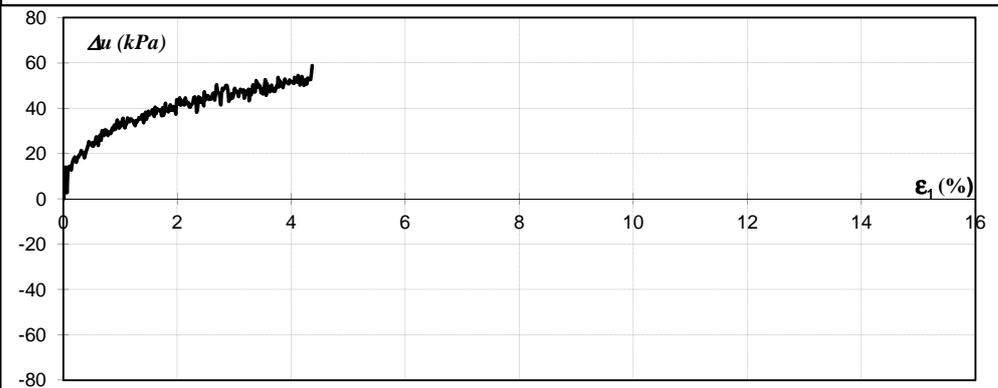
**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 300    | kPa |
| $B_{final}$   | 53,8   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|                |      |     |
|----------------|------|-----|
| $H_{cons}$     | 222  | mm  |
| $\sigma'_{z3}$ | 53   | kPa |
| $t_{50}$       | -    | seg |
| $e_{cons}$     | 0,80 | -   |
| $D_r_{cons}$   | 8,7  | %   |

**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



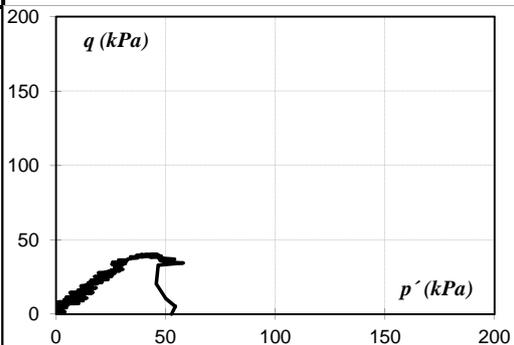
**3- RUPTURA**

|                     |      |     |
|---------------------|------|-----|
| $\epsilon_{1 peak}$ | 0,23 | %   |
| $\sigma_{d peak}$   | 39   | kPa |
| $s_{u máx}$         | 19,4 | kPa |
| $\epsilon_{1 crit}$ | 0,00 | %   |
| $\sigma'_{1 crit}$  | 53   | kPa |
| $\sigma'_{3 crit}$  | 53   | kPa |
| $s_{u res}$         | 0    | kPa |
| $\phi_{crit}$       | 0,0  | °   |

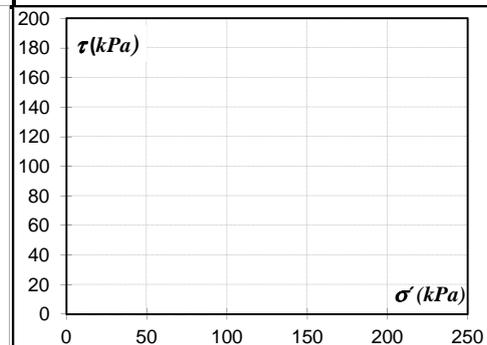
**MUESTRA EN FALLA**

FOTO

**TRAYECTORIA TENSIONES**



**DIAGRAMA DE MÖHR**

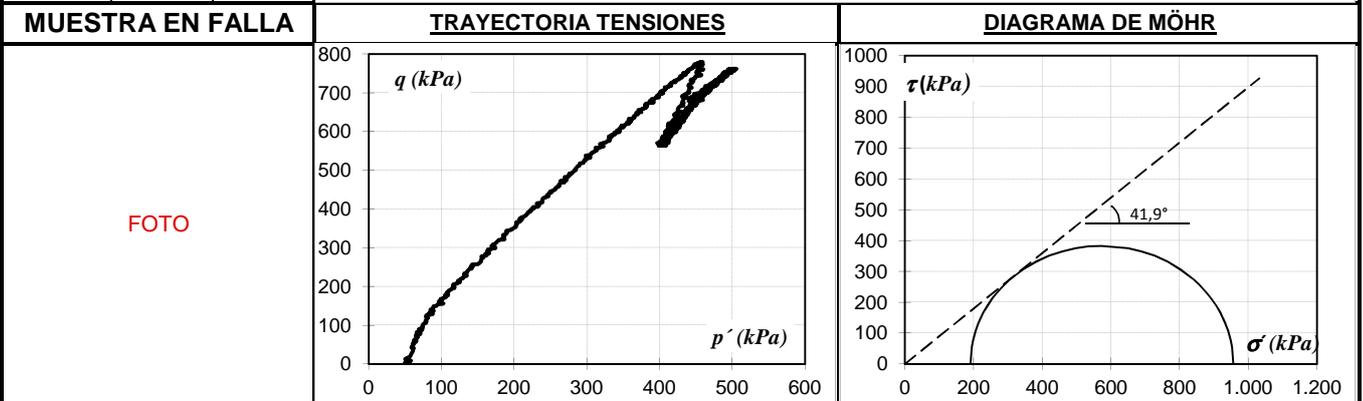
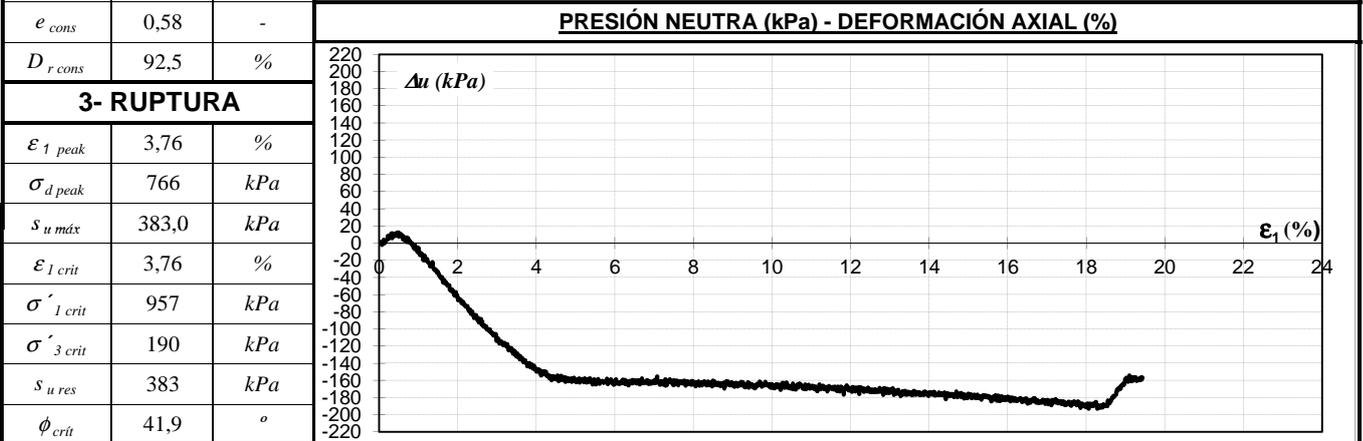
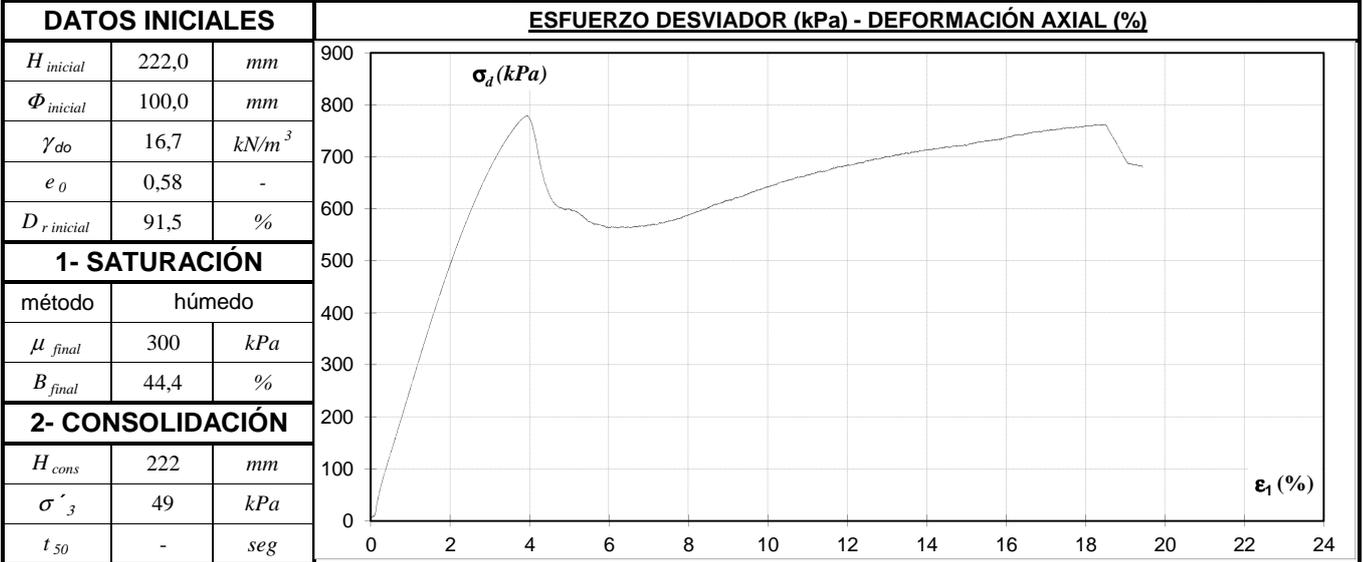


**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos



|                   |            |                   |                                    |           |           |                       |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------------------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 31/05/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 |           |           | Vel def               | 0,73  | mm/min |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    |           |           | E <sub>membrana</sub> | 1249  | kPa    |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{máx}$ | 0,82      | $C_u$                 | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$  | $e_{mín}$ | 0,56                  | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |



**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

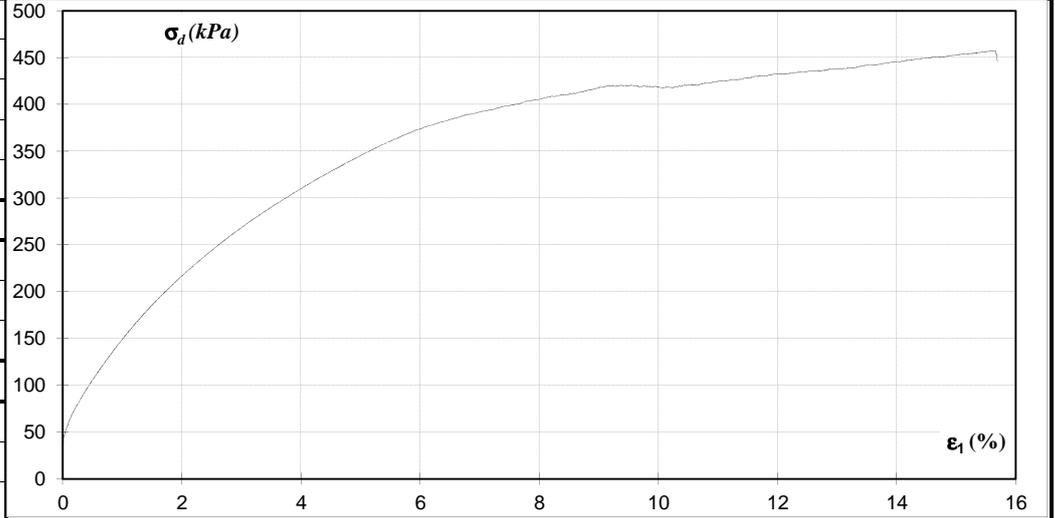


|                   |            |                   |                                    |                   |                   |                       |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 28/05/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 |                   |                   | Vel def               | 1,10  | mm/min |           |
| Operador          | GR - IV    |                   |                                    |                   |                   | E <sub>membrana</sub> | 1249  | kPa    |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{m\acute{a}x}$ | 0,82              | $C_u$                 | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$          | $e_{m\acute{i}n}$ | 0,56                  | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 15,7  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,69  | -        |
| $D_r_{inicial}$  | 51,5  | %        |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



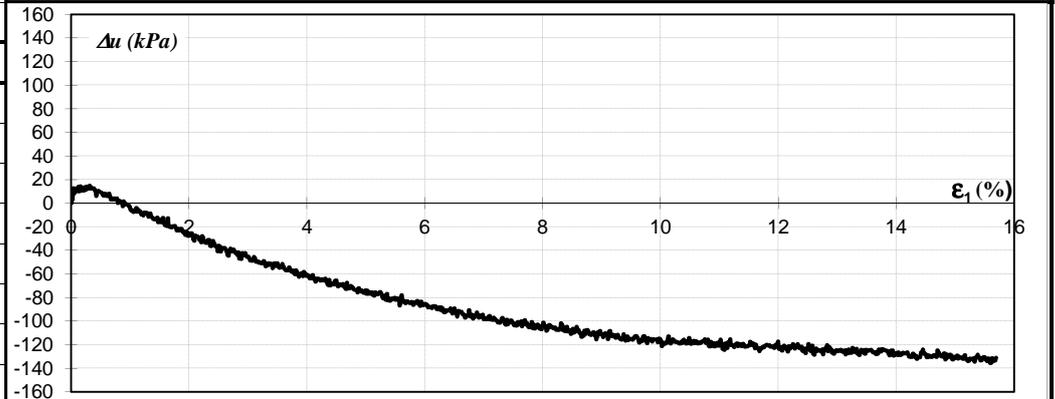
**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 605    | kPa |
| $B_{final}$   | 66,1   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|               |      |     |
|---------------|------|-----|
| $H_{cons}$    | 222  | mm  |
| $\sigma'_{3}$ | 49   | kPa |
| $t_{50}$      | -    | seg |
| $e_{cons}$    | 0,69 | -   |
| $D_{r cons}$  | 52,5 | %   |

**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



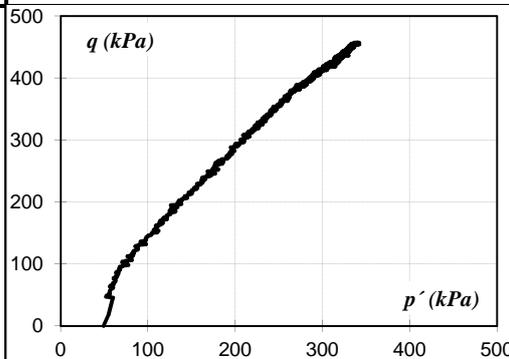
**3- RUPTURA**

|                     |       |     |
|---------------------|-------|-----|
| $\epsilon_{1 peak}$ | 9,50  | %   |
| $\sigma_{d peak}$   | 414   | kPa |
| $s_{u máx}$         | 207,2 | kPa |
| $\epsilon_{1 crit}$ | 9,50  | %   |
| $\sigma'_{1 crit}$  | 584   | kPa |
| $\sigma'_{3 crit}$  | 169   | kPa |
| $s_{u res}$         | 207   | kPa |
| $\phi_{crit}$       | 33,4  | °   |

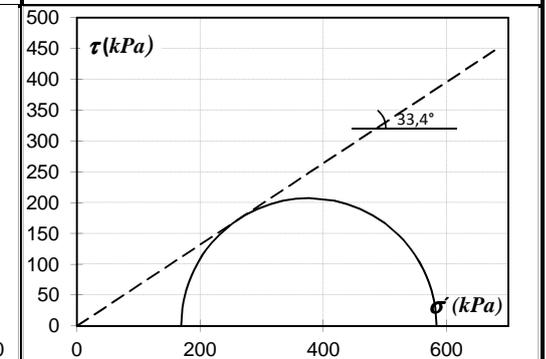
**MUESTRA EN FALLA**

FOTO

**TRAYECTORIA TENSIONES**



**DIAGRAMA DE MÖHR**



**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

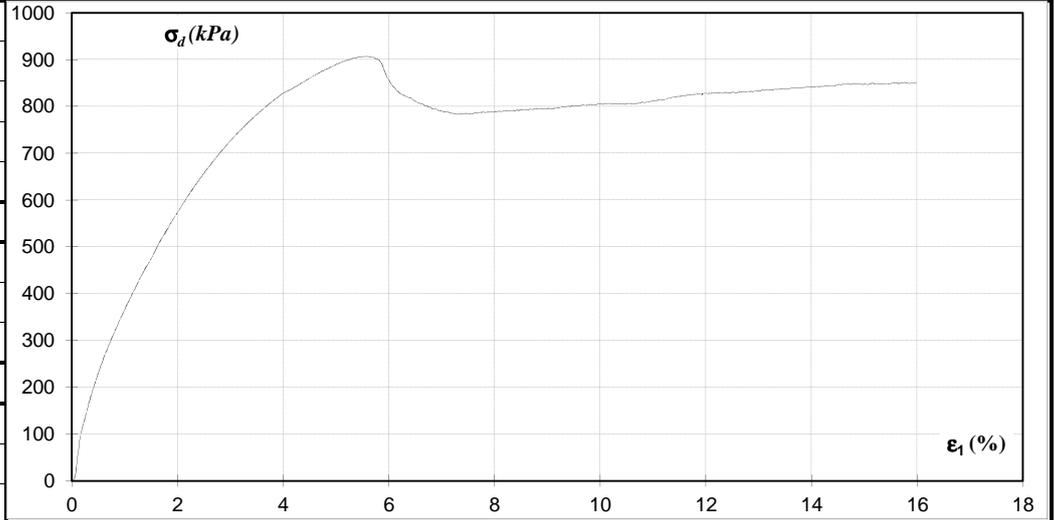


|                   |            |                   |                                    |           |           |                |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------|----------------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 09/05/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 |           |           | Vel def        | 1,10  | mm/min |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    |           |           | $E_{membrana}$ | 1249  | kPa    |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{máx}$ | 0,82      | $C_u$          | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$  | $e_{mín}$ | 0,56           | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 16,7  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,59  | -        |
| $D_r_{inicial}$  | 90,5  | %        |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



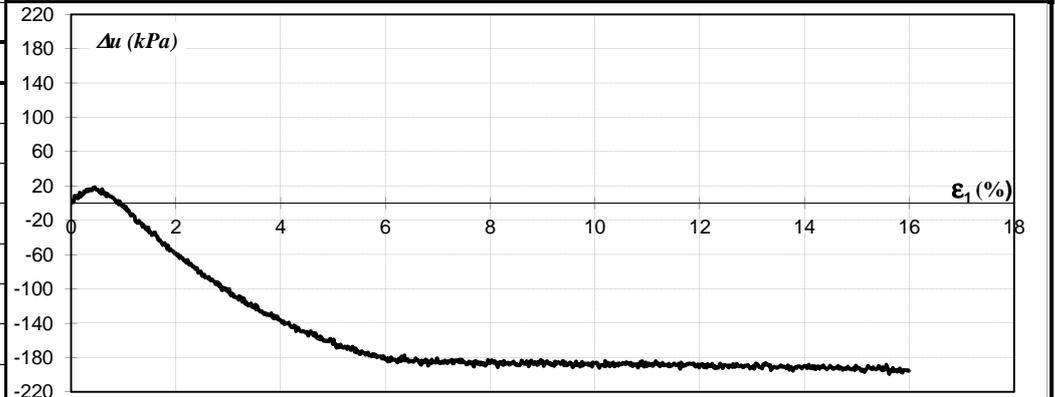
**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 304    | kPa |
| $B_{final}$   | 37,8   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|              |      |     |
|--------------|------|-----|
| $H_{cons}$   | 221  | mm  |
| $\sigma'_3$  | 93   | kPa |
| $t_{50}$     | -    | seg |
| $e_{cons}$   | 0,58 | -   |
| $D_r_{cons}$ | 92,5 | %   |

**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



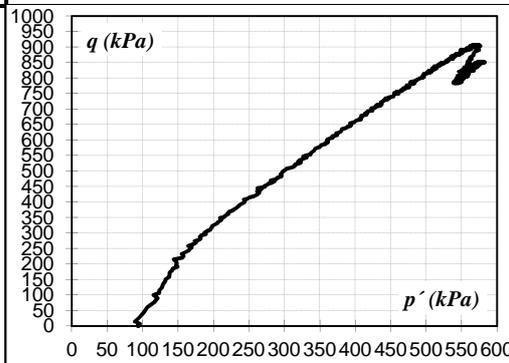
**3- RUPTURA**

|                     |       |     |
|---------------------|-------|-----|
| $\epsilon_{1 peak}$ | 5,48  | %   |
| $\sigma_{d peak}$   | 903   | kPa |
| $s_{u máx}$         | 451,6 | kPa |
| $\epsilon_{1 crit}$ | 5,48  | %   |
| $\sigma'_{1 crit}$  | 1173  | kPa |
| $\sigma'_{3 crit}$  | 270   | kPa |
| $s_{u res}$         | 452   | kPa |
| $\phi_{crit}$       | 38,7  | °   |

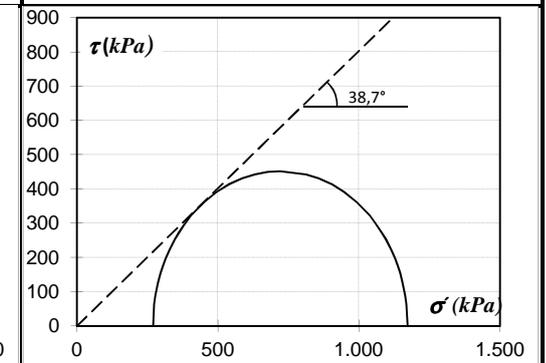
**MUESTRA EN FALLA**



**TRAYECTORIA TENSIONES**



**DIAGRAMA DE MÖHR**



**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

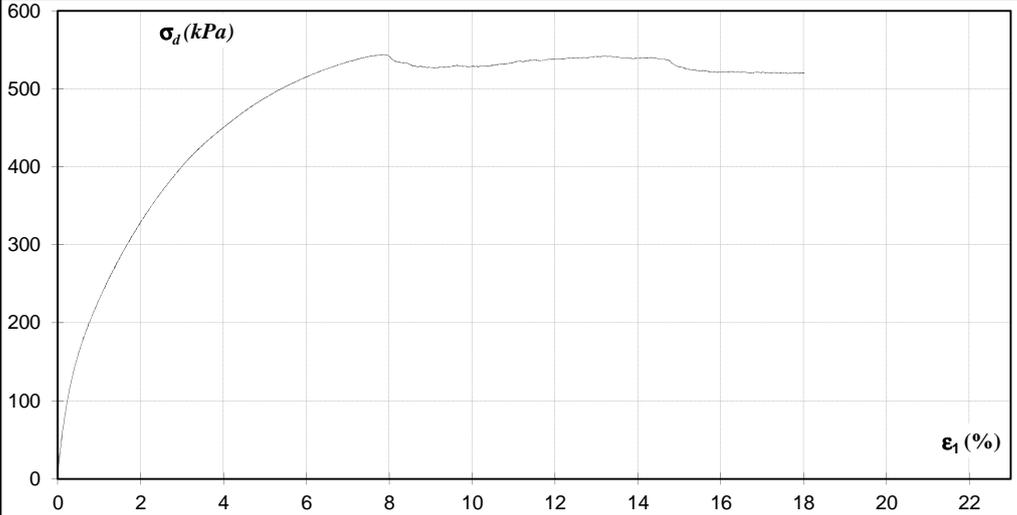


|                   |            |                   |                                    |           |           |                |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------|----------------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 23/05/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 |           |           | Vel def        | 1,10  | mm/min |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    |           |           | $E_{membrana}$ | 1249  | kPa    |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{máx}$ | 0,82      | $C_u$          | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$  | $e_{mín}$ | 0,56           | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 15,6  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,70  | -        |
| $D_r_{inicial}$  | 48,5  | %        |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



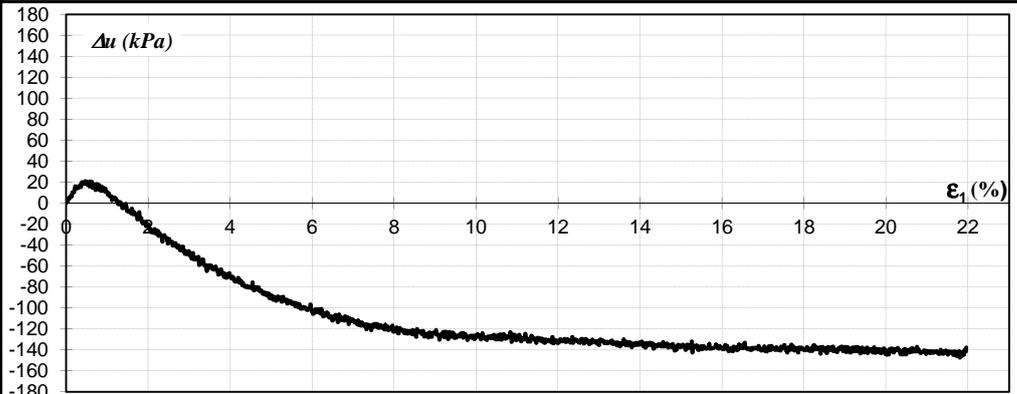
**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 300    | kPa |
| $B_{final}$   | 68,8   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|              |      |     |
|--------------|------|-----|
| $H_{cons}$   | 221  | mm  |
| $\sigma'_3$  | 102  | kPa |
| $t_{50}$     | -    | seg |
| $e_{cons}$   | 0,69 | -   |
| $D_r_{cons}$ | 51,2 | %   |

**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



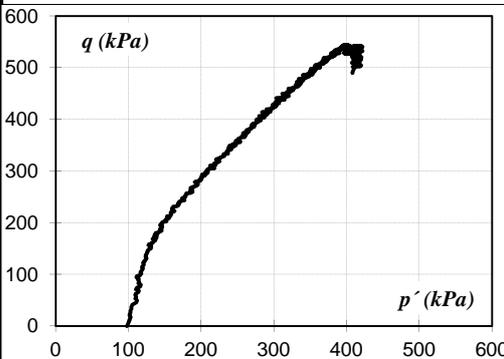
**3- RUPTURA**

|                     |       |     |
|---------------------|-------|-----|
| $\epsilon_{1 peak}$ | 7,31  | %   |
| $\sigma_{d peak}$   | 535   | kPa |
| $s_{u máx}$         | 267,3 | kPa |
| $\epsilon_{1 crit}$ | 7,31  | %   |
| $\sigma'_{1 crit}$  | 749   | kPa |
| $\sigma'_{3 crit}$  | 214   | kPa |
| $s_{u res}$         | 267   | kPa |
| $\phi_{crit}$       | 33,7  | °   |

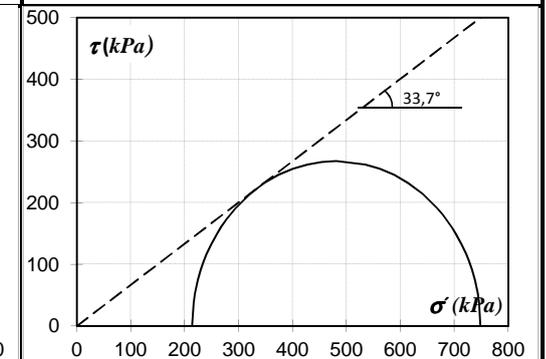
**MUESTRA EN FALLA**

FOTO

**TRAYECTORIA TENSIONES**



**DIAGRAMA DE MÖHR**



**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
 Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos



|                   |            |                   |                                    |           |           |                       |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------------------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 10/04/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 |           |           | Vel def               | 1,10  | mm/min |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    |           |           | E <sub>membrana</sub> | 1249  | kPa    |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{máx}$ | 0,82      | $C_u$                 | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$  | $e_{mín}$ | 0,56                  | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 14,8  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,79  | -        |
| $D_r_{inicial}$  | 13,3  | %        |

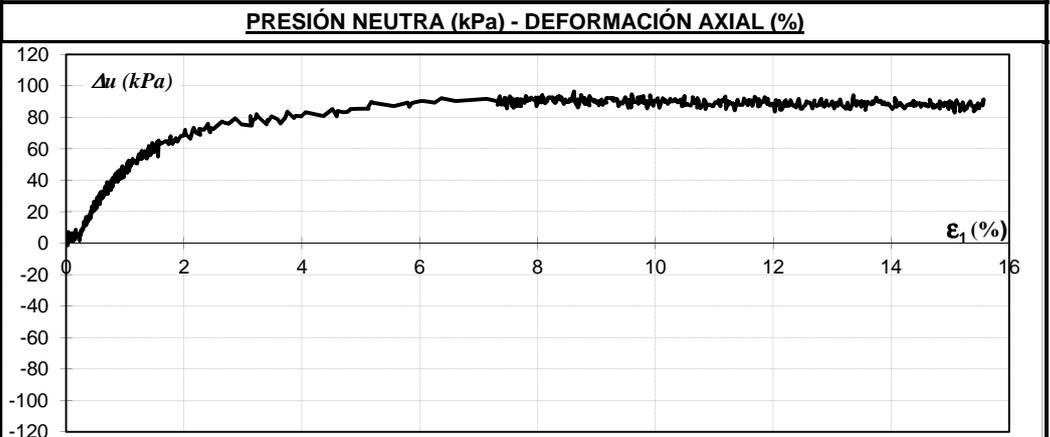


**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 400    | kPa |
| $B_{final}$   | 77,1   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|              |      |     |
|--------------|------|-----|
| $H_{cons}$   | 222  | mm  |
| $\sigma'_3$  | 89   | kPa |
| $t_{50}$     | -    | seg |
| $e_{cons}$   | 0,79 | -   |
| $D_r_{cons}$ | 13,6 | %   |

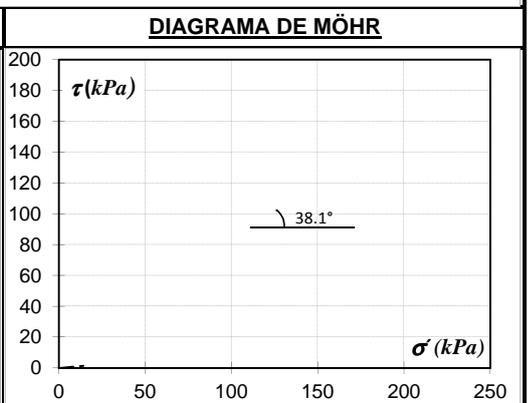
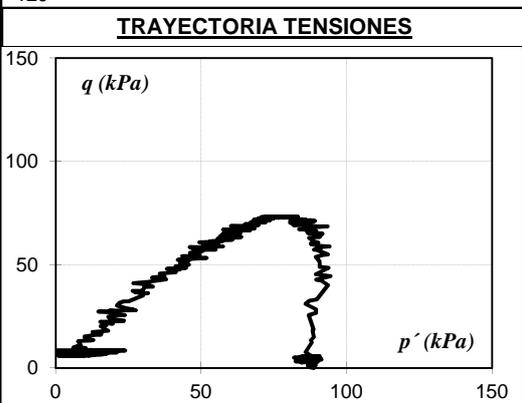


**3- RUPTURA**

|                     |      |     |
|---------------------|------|-----|
| $\epsilon_{1 peak}$ | 0,61 | %   |
| $\sigma_{d peak}$   | 72   | kPa |
| $s_{u máx}$         | 35,9 | kPa |
| $\epsilon_{1 crit}$ | 8,70 | %   |
| $\sigma'_{1 crit}$  | 9    | kPa |
| $\sigma'_{3 crit}$  | 7    | kPa |
| $s_{u res}$         | 1    | kPa |
| $\phi_{crit}$       | 5,1  | °   |

**MUESTRA EN FALLA**

FOTO



**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
 Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

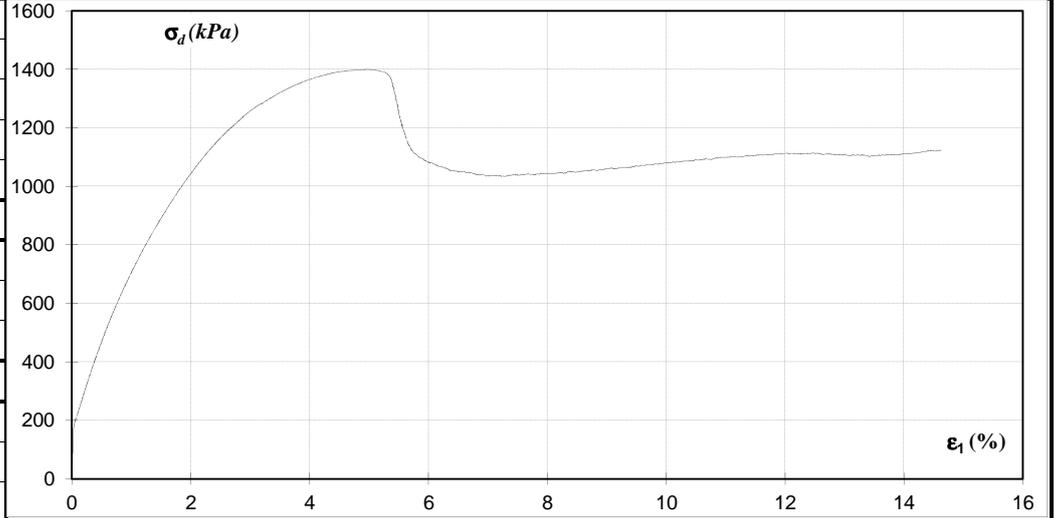


|                   |            |                   |                                    |           |           |                       |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------------------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 01/06/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 |           |           | Vel def               | 1,10  | mm/min |           |
| Operador          | FP - GR    |                   |                                    |           |           | E <sub>membrana</sub> | 1249  | kPa    |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{máx}$ | 0,82      | $C_u$                 | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$  | $e_{mín}$ | 0,56                  | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 16,6  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,60  | -        |
| $D_r_{inicial}$  | 85,5  | %        |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



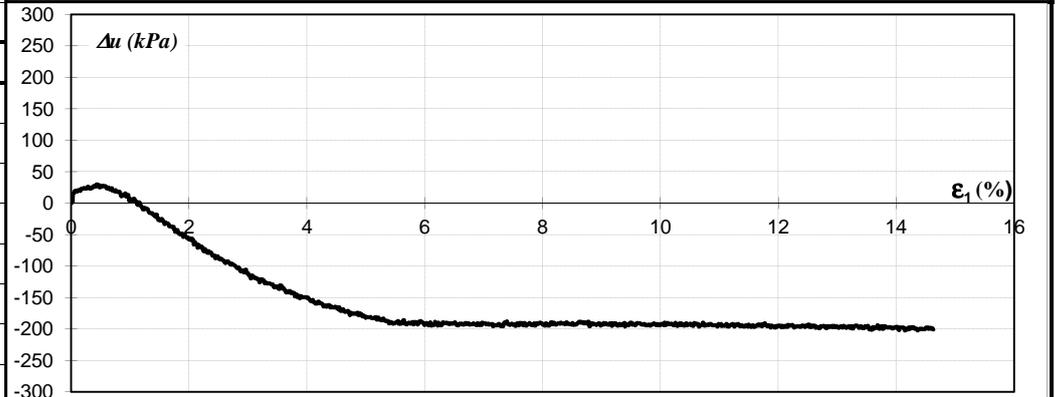
**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 300    | kPa |
| $B_{final}$   | 40,8   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|              |      |     |
|--------------|------|-----|
| $H_{cons}$   | 221  | mm  |
| $\sigma'_3$  | 201  | kPa |
| $t_{50}$     | -    | seg |
| $e_{cons}$   | 0,59 | -   |
| $D_r_{cons}$ | 88,2 | %   |

**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



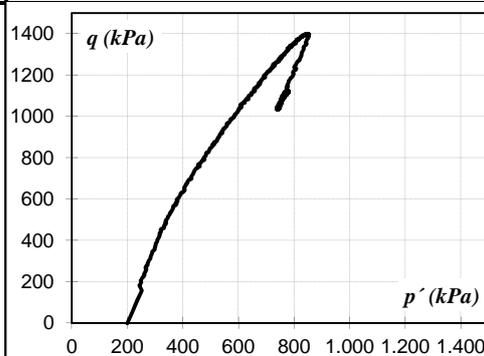
**3- RUPTURA**

|                     |       |     |
|---------------------|-------|-----|
| $\epsilon_{1 peak}$ | 4,90  | %   |
| $\sigma_{d peak}$   | 1396  | kPa |
| $s_{u máx}$         | 698,1 | kPa |
| $\epsilon_{1 crit}$ | 4,90  | %   |
| $\sigma'_{1 crit}$  | 1771  | kPa |
| $\sigma'_{3 crit}$  | 375   | kPa |
| $s_{u res}$         | 698   | kPa |
| $\phi_{crit}$       | 40,6  | °   |

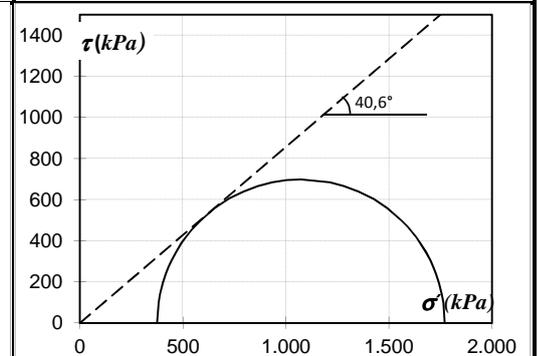
**MUESTRA EN FALLA**

FOTO

**TRAYECTORIA TENSIONES**



**DIAGRAMA DE MÖHR**

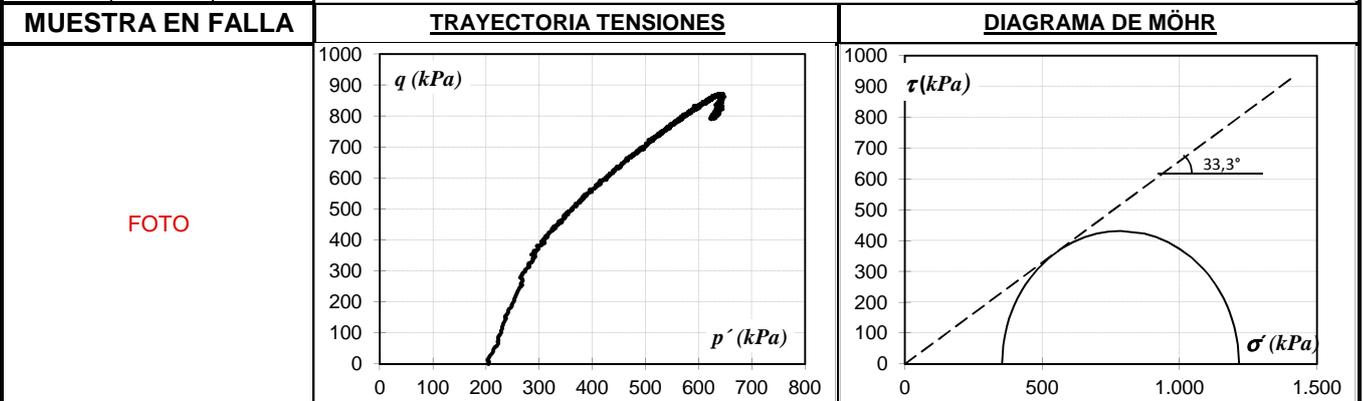
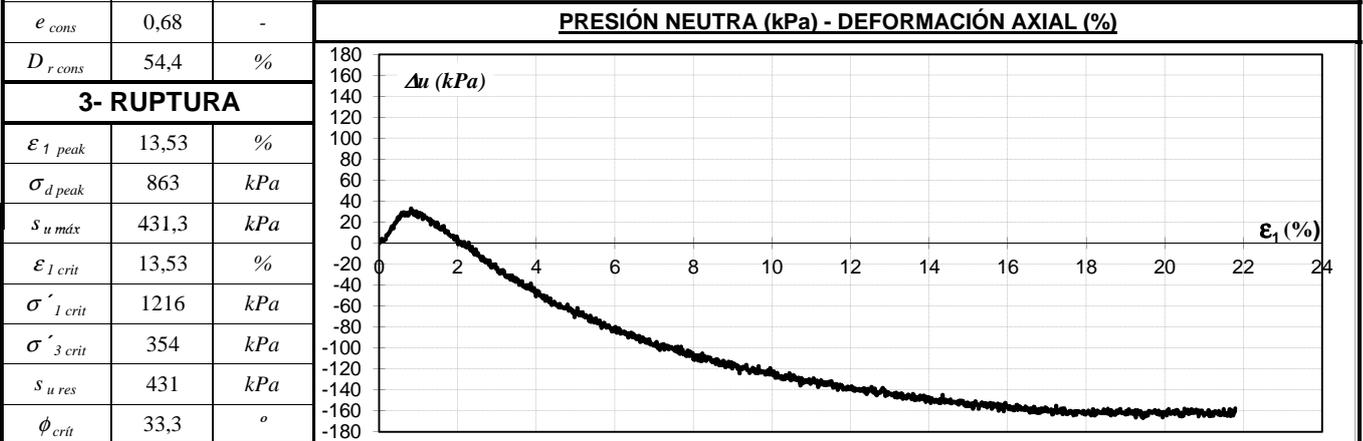
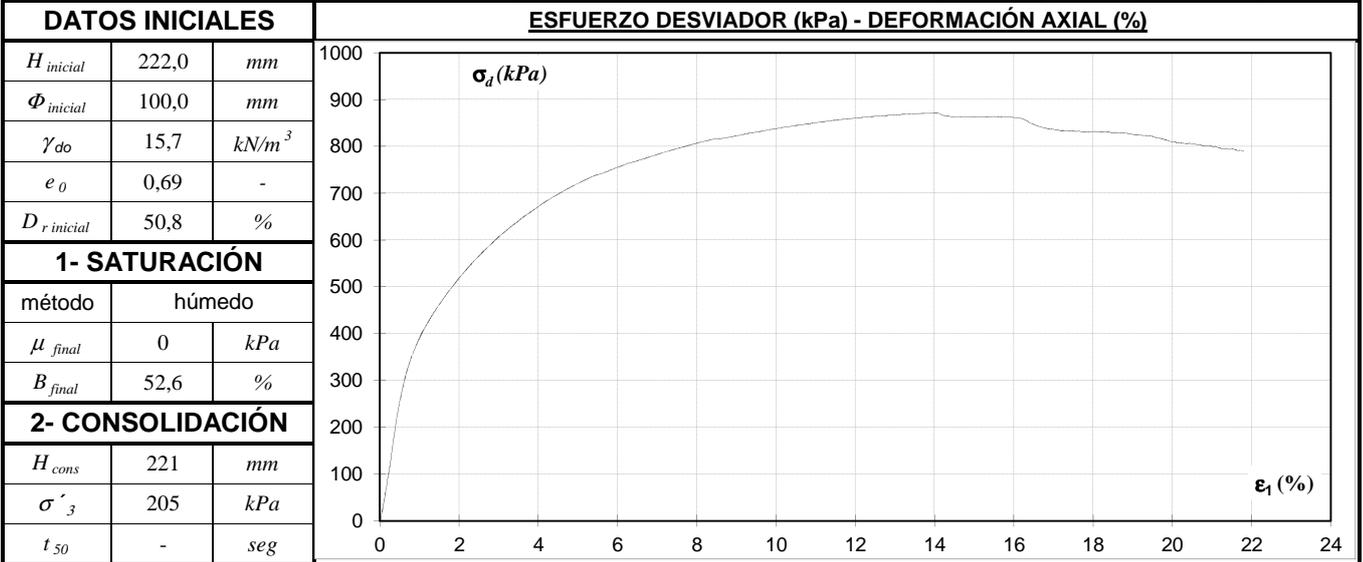


**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos



|                   |            |                   |                                    |           |           |                       |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------------------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 29/05/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 |           |           | Vel def               | 1,10  | mm/min |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    |           |           | E <sub>membrana</sub> | 1249  | kPa    |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{máx}$ | 0,82      | $C_u$                 | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$  | $e_{mín}$ | 0,56                  | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |



**ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)**

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería  
 Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

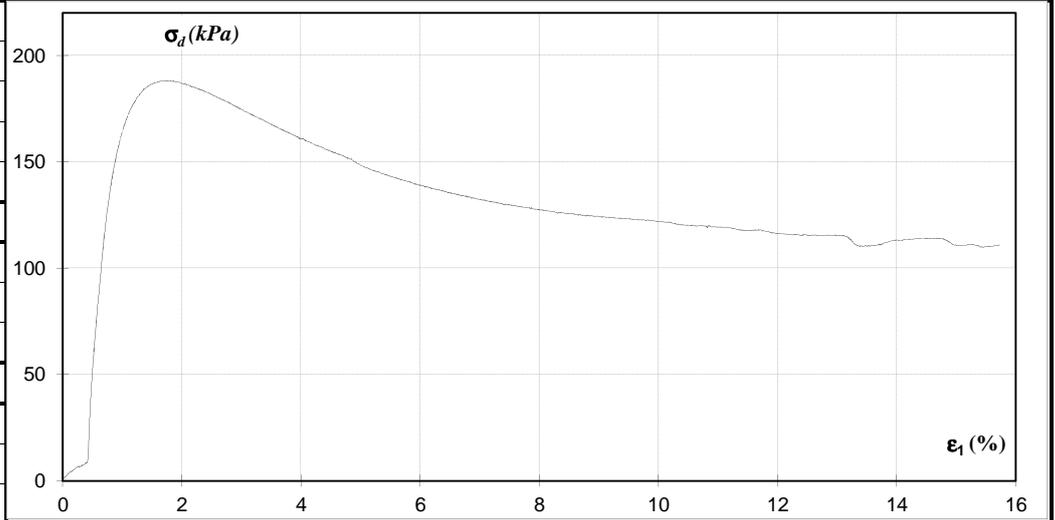


|                   |            |                   |                                    |           |           |                |       |        |           |
|-------------------|------------|-------------------|------------------------------------|-----------|-----------|----------------|-------|--------|-----------|
| Fecha             | 24/05/2012 | Normas de trabajo | ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02 |           |           | Vel def        | 1,10  | mm/min |           |
| Operador          | GR - FP    |                   |                                    |           |           | $E_{membrana}$ | 1249  | kPa    |           |
| Material ensayado |            | CARENA            |                                    | $e_{máx}$ | 0,82      | $C_u$          | 2,33  | Ret #4 | 0,57%     |
|                   |            | $\gamma_s$        | 26,5                               | $kN/m^3$  | $e_{mín}$ | 0,56           | $C_c$ | 0,98   | Pasa #200 |

**DATOS INICIALES**

|                  |       |          |
|------------------|-------|----------|
| $H_{inicial}$    | 222,0 | mm       |
| $\Phi_{inicial}$ | 100,0 | mm       |
| $\gamma_{do}$    | 14,6  | $kN/m^3$ |
| $e_0$            | 0,81  | -        |
| $D_r_{inicial}$  | 4,7   | %        |

**ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



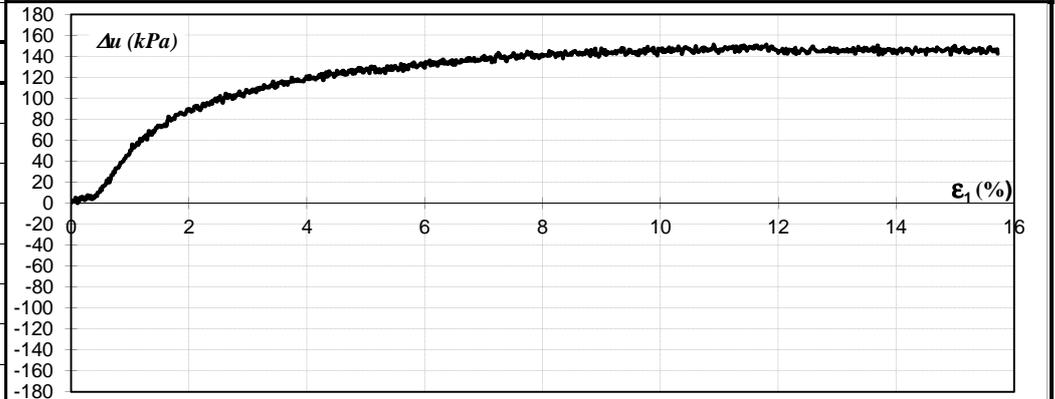
**1- SATURACIÓN**

|               |        |     |
|---------------|--------|-----|
| método        | húmedo |     |
| $\mu_{final}$ | 300    | kPa |
| $B_{final}$   | 60,3   | %   |

**2- CONSOLIDACIÓN**

|              |      |     |
|--------------|------|-----|
| $H_{cons}$   | 220  | mm  |
| $\sigma'_3$  | 200  | kPa |
| $t_{50}$     | -    | seg |
| $e_{cons}$   | 0,79 | -   |
| $D_r_{cons}$ | 10,8 | %   |

**PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)**



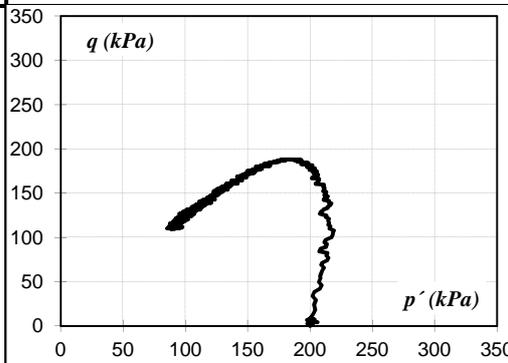
**3- RUPTURA**

|                     |       |     |
|---------------------|-------|-----|
| $\epsilon_{1 peak}$ | 1,60  | %   |
| $\sigma_{d peak}$   | 186   | kPa |
| $s_{u máx}$         | 93,2  | kPa |
| $\epsilon_{1 crit}$ | 12,22 | %   |
| $\sigma'_{1 crit}$  | 164   | kPa |
| $\sigma'_{3 crit}$  | 54    | kPa |
| $s_{u res}$         | 55    | kPa |
| $\phi_{crit}$       | 30,1  | °   |

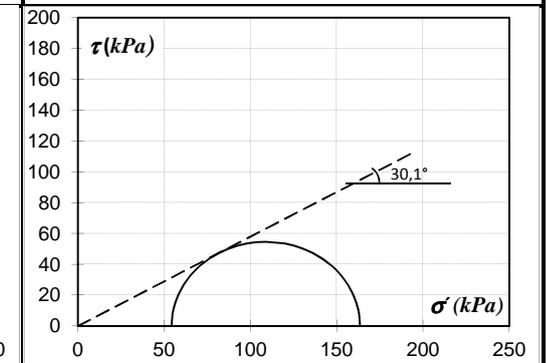
**MUESTRA EN FALLA**



**TRAYECTORIA TENSIONES**



**DIAGRAMA DE MÖHR**



## Anexo D

# Procedimiento de un ensayo triaxial

## Anexo D - Procedimiento de un ensayo triaxial

El objetivo del informe es simplificar y estandarizar la metodología a seguir durante la ejecución de los ensayos. Se detalla el procedimiento que se siguió durante los ensayos triaxiales realizados en el LMS.

### 1. Tareas previas

1. Llenar reservorio con agua desaireada.
2. Abrir archivo LabVIEW de trabajo, mediante las lecturas verificar el correcto funcionamiento de los instrumentos y luego tararlos.
3. Abrir la planilla Excel CIDC/CIUC del material a ensayar, completar la  $D_r$  buscada y la humedad estimada.
4. Saturar las líneas del tablero que conectan el reservorio de agua con el cabezal inferior.
5. Limpiar los anillos de acrílico con las piedras porosas y los cabezales.
6. Pegar con cinta una piedra porosa al cabezal inferior y envaselinar — figura 1.1 —.
7. Colocar la membrana en el cabezal inferior y asegurarla con 5 *O-rings* — figura 1.2 —.
8. Colocar molde metálico y sellar con cinta el espacio entre las partes — figura 1.3 —.
9. Ajustar una abrazadera por debajo de los conectores y colocar la membrana por fuera del molde — figura 1.4 —.
10. Hacer vacío y verificar la correcta adherencia de la membrana al molde — figura 1.4 —.

### 2. Armado de muestra

1. Armar la muestra según el método seleccionado. Se detalla a continuación el método *Moist Tamping* utilizado en los ensayos triaxiales realizados en este proyecto.
  - Colocar el cilindro de acrílico sobre el molde ajustándolo contra los conectores — figura 2.1 —.
  - Colocar el suelo correspondiente a la primera capa en el molde — figura 2.2 —.
  - Compactar el suelo dentro del molde con el martillo — figura 2.2 —.



Figura 1.1: Colocación piedra porosa inferior, fijación con cinta y envaselinado de la base.

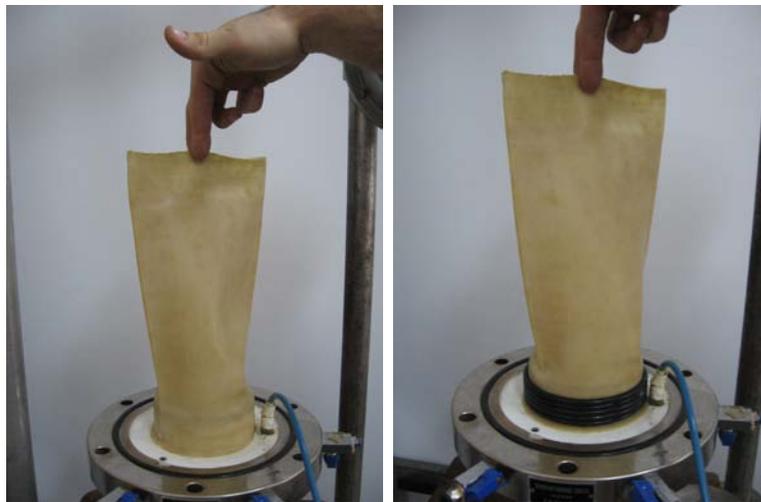


Figura 1.2: Colocación y fijación de membrana.



Figura 1.3: Colocación y sellado del molde.

- Repetir los pasos correspondientes a la primer capa hasta llenar el molde.
2. Horizontalizar la cara superior de la muestra — figura 2.3 —.
  3. Enhebrar en la manguera del cabezal superior dos abrazaderas, 3 *O-rings* y el sistema de soporte para los LVDTs.
  4. Unir con cinta la piedra porosa en el cabezal superior, colocar sobre la muestra, envaselinar y levantar membrana — figura 2.4 —.
  5. Asegurar el contacto membrana-cabezal con los 3 *O-rings* y complementar con el ajuste de una abrazadera sobre los *O-rings* — figura 2.5 —.
  6. Hacer vacío ( $<20\text{kPa}$ ) dentro la muestra y verificar que cese el burbujeo en la trampa de vacío.
  7. Desmontar el molde metálico y ajustar una abrazadera sobre los *O-rings* en el cabezal inferior — figura 2.6 —.
  8. Cerrar válvulas/llaves para aislar la muestra y luego apagar la bomba de vacío.
  9. Ubicar el sistema soporte de los LVDTs sobre la muestra — figura 2.7 —.
  10. Montar el anillo blanco con el *O-ring* hacia arriba y luego colocar los LVDTs en el sistema soporte — figura 2.7 —.
  11. Montar la cámara sobre el anillo. Controlar que el vástago apoye correctamente sobre el cabezal superior — figura 2.8 —.
  12. Asegurar la cámara a la base ajustando las tuercas de a pares enfrentados — figura 2.8 —.
  13. Envaselinar el vástago de la cámara y aproximar al vástago fijado al pórtico — figura 2.8 —.
  14. Conectar la celda de carga a la placa adquisidora de datos.
  15. Conectar el transductor del tablero al anillo blanco.

### 3. Saturación

1. Generar una presión de confinamiento inicial de  $25\text{kPa}$ .
2. Establecer una presión de agua en el sistema de  $10\text{kPa}$  y luego abrir la válvula del cabezal inferior. Esperar que la backpressure se equilibre.



Figura 1.4: Fijación y aplicación de vacío entre la membrana y el molde.



Figura 2.1: Detalle y colocación del cilindro de acrílico.



Figura 2.2: Armado de muestra mediante *Moist Tamping*.



Figura 2.3: Horizontalización de capa superior.



Figura 2.4: Colocación y envaselinado de cabezal superior.



Figura 2.5: Colocación de *O-rings* y abrazadera en cabezal superior.

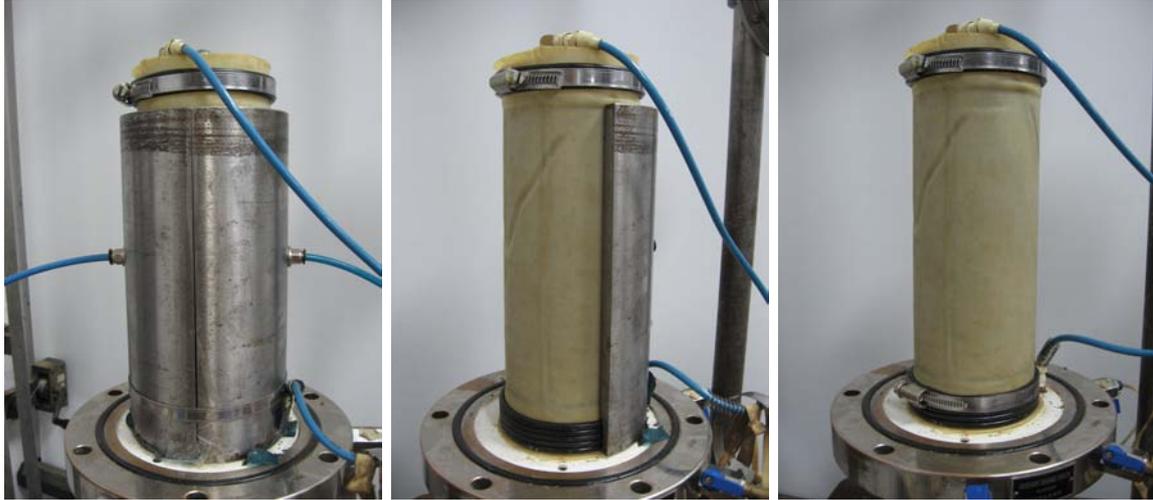


Figura 2.6: Desmonte de molde metálico.



Figura 2.7: Montaje de soporte de LVDTs y anillo blanco. Colocación de LVDTs.



Figura 2.8: Colocación y ajuste de cámara.

3. Abrir la válvula del cabezal superior y verificar que haya un burbujeo en las buretas.
4. Cuando cesa el burbujeo, aumentar la contrapresión para detener el ascenso del agua.
5. Aumentar simultáneamente la presión de confinamiento y la backpressure manteniendo una diferencia entre 10kPa y 20kPa. La máxima diferencia entre escalones sucesivos es 75kPa. Durante este proceso modificar la contrapresión para controlar la altura de agua dentro de las buretas.
6. Medir el parámetro B -según norma ASTM D 4767 – 02-. Se considera saturada la muestra una vez obtenido un B mayor o igual a 0.95. En caso contrario, incrementar un nuevo escalón de backpressure y/o esperar el tiempo correspondiente.

## 4. Consolidación

1. Conectar ambos cabezales a las buretas y registrar el nivel de agua.
2. Cerrar válvulas del cabezal inferior y superior y aumentar la presión de confinamiento hasta que la diferencia con la backpressure inicial sea la presión efectiva de consolidación deseada.
3. Abrir válvulas de los cabezales para consolidar la muestra. Registrar en bureta el nivel del agua en los siguientes intervalos de tiempo: 6 s, 12 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 hr, etc. Finalizar consolidación para un nivel de agua constante.

## 5. Carga

### 5.1. Ensayo CU (consolidado, no drenado)

1. Cerrar las válvulas de los cabezales para impedir el drenaje.
2. Asegurar que la celda de carga este en contacto con el cabezal superior.
3. Completar la carga en el compresor y la garrafa.
4. Tarar los instrumentos de medición en el LabView.
5. Iniciar el LabView y encender la máquina triaxial para comenzar el ensayo.
6. Finalizar el ensayo cuando:
  - La deformación axial total llegue al 30 %.
  - Luego de un pico de tensión desviadora, exista un 5% de deformación axial adicional y la tensión desviadora sea un 20 % menor que la del pico.

### 5.2. Ensayo CD (consolidado, drenado)

1. Abrir las válvulas de los cabezales para permitir el drenaje. Registrar el nivel inicial en las buretas.
2. Asegurar que la celda de carga este en contacto con el cabezal superior.
3. Completar la carga en el compresor y la garrafa.
4. Tarar los instrumentos de medición en el LabView.
5. Iniciar el LabView y encender la máquina triaxial para comenzar el ensayo.
6. Registrar en buretas el cambio volumétrico de la muestra cada 30 s.
7. Finalizar el ensayo cuando:
  - La deformación axial total llegue al 30 %.
  - Luego de un pico de tensión desviadora, exista un 5% de deformación axial adicional y la tensión desviadora sea un 20 % menor que la del pico.

## 6. Desarmado

1. Abrir la válvula de desagote y accionar manualmente la máquina para escurrir la muestra.
2. Quitar el confinamiento de la cámara.
3. Retirar el instrumental de medición localizada.
4. Desarmar la muestra, limpiar cabezales y piedras porosas.
5. Secar el suelo húmedo en el horno.

# Anexo E

## Mejoras a realizar

## Anexo E - Mejoras a realizar

El trabajo de investigación realizado significó un importante cambio y mejoramiento de la infraestructura disponible en el LMS. Se considera que dicho crecimiento amplía el espectro de posibilidades de los futuros proyectos de investigación.

En este capítulo se resumen las recomendaciones a implementar en futuros proyectos para aumentar la calidad de los ensayos y sus resultados:

1. Para analizar en detalle y cuantificar los efectos del “Moist Tamping” en la densidad se propone congelar la muestra, seccionarla y medir la densidad de cada capa obteniéndose como resultado la variación de la densidad de la muestra en la altura.
2. Con el objetivo de lograr la saturación total se propone aumentar la *backpressure* final utilizada a  $600kPa$ , circular  $CO_2$  a través de la muestra previo a la aplicación de *backpressure* y aumentar la duración total de la saturación.
3. Se propone el reacondicionamiento del sistema de control de presiones y adquisición de datos para controlar que el gradiente hidráulico aplicado no supere los  $20kPa$  [42, 1] y provoque alteraciones en la estructura original, especialmente en muestras sueltas.
4. Para conocer la consolidación en el tiempo y automatizar la medición de los cambios volumétricos en ensayos drenados se recomienda la utilización de instrumental cuya precisión sea menor a  $0.7cm^3$ , según norma [42].
5. Para una mayor precisión en la determinación de las deformaciones axiales totales se propone la utilización de un instrumento de medición digital para medir el avance total de la máquina. El instrumento debe presentar un recorrido mayor a  $6cm$  y una precisión mínima de  $0.5mm$ , aproximadamente  $0.25\%$  de la altura inicial de la muestra [42].
6. Para medir valores confiables de rigidez inicial se precisan instrumentos de medición local, un sistema de soporte y una electrónica para la adquisición de datos que permitan medir con precisión deformaciones axiales del orden de  $1 \times 10^{-6}$ .
7. Para lograr una distribución uniforme de presiones neutras en toda la muestra se recomienda disminuir la velocidad de deformación utilizada.
8. Para medir presiones neutras en toda la muestra se propone la implementación de otro transductor de presión en el cabezal superior.

## Anexo F

# Especificaciones técnicas de los instrumentos utilizados

## **BLACK & DECKER COMPRESOR 2 HP**



Marca 870751

Código H11957/CT224

Modelo BLACK & DECKER COMPRESOR 2 HP

Potencia 2 HP

Tipo Energía Monofásico

Presión 120.0 PSI

Rendimiento 240.0 lts/min.

Tanque 25 lts.

Origen BRASIL

Garantía 1 año.

Características: Compresor de aire de transmisión directa Lubricación por aceite Su presión máxima es de 120PSI El caudal de desplazamiento es de 240 litros por minuto Posee tanque de 25 litros de capacidad. El mismo está testeado hidrostáticamente según la norma NR-13 Motor de 2HP de potencia Sus ruedas y mango prolongado en altura permiten un buen balance para que sea muy fácil de transportar.



### Description & Features:

- Developed for use in general industry and OEM applications, where versatility and economy are requirements
- Compact stainless steel construction with ceramic sensor
- Available ranges include in/Hg up to 5,000 psi
- Wide range of mechanical and electrical connections
- $\pm 0.5\%$  accuracy
- NEMA 4X / IP65 and IP67
- CE, CSA and RoHS compliant
- Approved for outdoor use
- Customizable
- 1 year warranty

### Applications:

- Suitable for all process and automation control, hydraulics and pneumatic sensing, pump and compressor monitoring, refrigeration and HVAC

| Specifications              |   |
|-----------------------------|---|
| Output Signal               | Standard 2-wire: 4-20 mA / $V_s = 8-32$ Vdc<br>Optional 3-wire: 0-10 V / $V_s = 14-30$ Vdc<br>Optional 3-wire ratiometric: $V_{sig} = 0.5-4.5$ Vs / $V_s = 5 \pm 0.5$ Vdc   |
| Accuracy                    | $\pm 0.5\%$ FSO   |
| Permissible Load            | 2-wire: $R_{max} = [(V_s - V_{s\ min}) / 0.02]$ Ohm<br>3-wire: $R_{min} = 10$ kOhm  |
| Influence Effects           | Supply: 0.05% FSO / 10 V<br>Load: 0.05% FSO / kOhm  |
| Response Time               | 2-wire: <10 msec<br>3-wire: <3 msec   |
| Measuring Rate              | 1 kHz   |
| Thermal Error               | $< \pm 0.5\%$ FSO / 10K   |
| Permissible Temperatures    | Medium: $-13^\circ\text{F}$ to $257^\circ\text{F}$ ( $-25^\circ\text{C}$ to $125^\circ\text{C}$ )<br>Electronics environment: $-13^\circ\text{F}$ to $185^\circ\text{F}$ ( $-25^\circ\text{C}$ to $85^\circ\text{C}$ )<br>Storage: $-40^\circ\text{F}$ to $185^\circ\text{F}$ ( $-40^\circ\text{C}$ to $85^\circ\text{C}$ ) |
| Short-circuit Protection    | Permanent<br>3-wire ratiometric: None   |
| Reverse Polarity Protection | No damage. No function.   |
| Electromagnetic Protection  | Emission and immunity according to EN 61326   |
| Stability                   | Vibration: 10 g, 25 Hz to 2 kHz according to DIN EN 60068-2-6<br>Shock: 500 g / 1 msec according to DIN EN 60068-2-27   |
| Pollution Degree            | 4, electrical equipment for outdoor use   |
| Pressure Port / Housing     | 304 SS  |
| Wetted Parts                | Seals: FKM (Viton® standard). Others available upon request.<br>Diaphragm: Ceramic $\text{Al}_2\text{O}_3$ 96%  |
| Weight                      | 120 g   |
| Current Consumption         | 2-wire: 25 mA max<br>3-wire ratiometric: 1.5 mA<br>3-wire voltage: 5 mA (short-circuit current 20 mA)   |
| Long-term Stability         | $< \pm 0.3\%$ FSO/yr at reference conditions  |
| Operation Life              | $> 100 \times 10^6$ cycles  |
| CE Conformity               | EMC directive: 2004/108/EC<br>Pressure equipment directive: 97/23/EC (module A). Valid for devices with max permissible overpressure $> 3,000$ psi  |

Viton® is a registered trademark of DuPont Performance Elastomers

# LE3 LE3 Series Transmitter

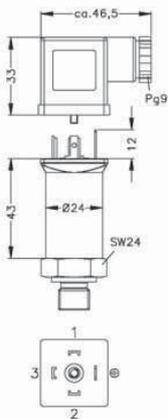
## Order Codes

| Range        | Overpressure | Burst Pressure | Code    |
|--------------|--------------|----------------|---------|
| 0-30" Hg vac | 58 psi       | 102 psi        | LE330VC |
| 0-15 psi     | 58 psi       | 102 psi        | LE315   |
| 0-25 psi     | 58 psi       | 102 psi        | LE325   |
| 0-50 psi     | 58 psi       | 102 psi        | LE350   |
| 0-60 psi     | 145 psi      | 218 psi        | LE360   |
| 0-100 psi    | 145 psi      | 218 psi        | LE3100  |
| 0-150 psi    | 290 psi      | 508 psi        | LE3150  |
| 0-200 psi    | 580 psi      | 1,015 psi      | LE3200  |
| 0-300 psi    | 580 psi      | 1,015 psi      | LE3300  |
| 0-500 psi    | 1,450 psi    | 2,176 psi      | LE3500  |
| 0-1,000 psi  | 1,450 psi    | 2,176 psi      | LE31000 |
| 0-2,000 psi  | 2,901 psi    | 3,626 psi      | LE32000 |
| 0-3,000 psi  | 5,802 psi    | 6,527 psi      | LE33000 |
| 0-5,000 psi  | 5,802 psi    | 6,527 psi      | LE35000 |

Note: Other connections available upon request

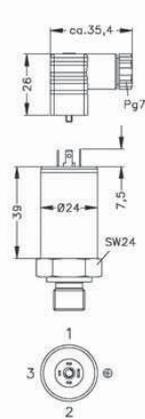
## Electrical Connection

### Standard

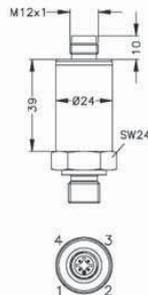


ISO 4400  
(IP 65)

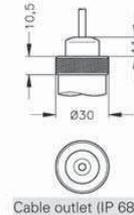
### Optional



Micro, contact  
distance 9.4 mm (IP 65)



M12x1, 4-pin  
(IP 67)

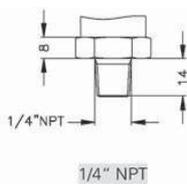


Cable outlet (IP 68)<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Different cable types/lengths available

## Mechanical Connection

### Standard



1/4" NPT

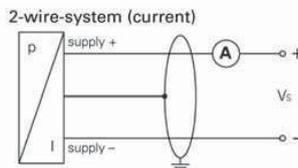
### Optional



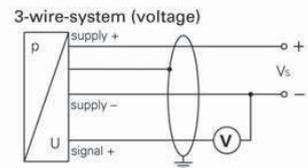
G1/4" DIN 3852

## Wiring Diagram

### Standard



### Optional



Note: Measurements are in mm

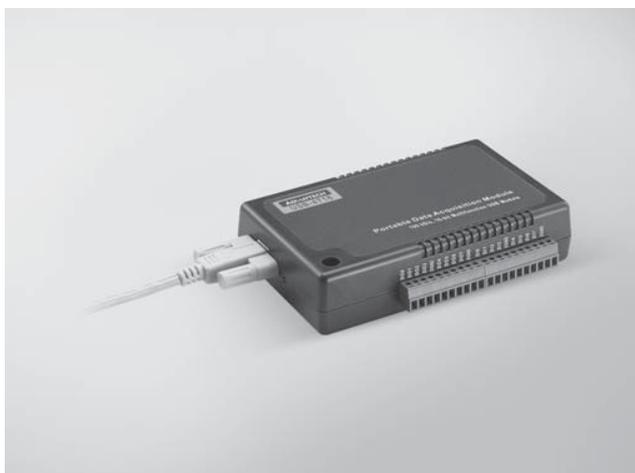
## Pin Configuration

| Electrical Connection | ISO 4400   | Micro (contact distance 9.4mm) | M12x1 (4 pin), plastic | Cable Colours (DIN 47100) |
|-----------------------|------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Supply+               | 1          | 1                              | 1                      | White                     |
| Supply-               | 2          | 2                              | 2                      | Brown                     |
| Signal+ (for 3-wire)  | 3          | 3                              | 3                      | Green                     |
| Shield                | Ground pin | Ground pin                     | 4                      | Green/yellow              |



# USB-4716

## 200 kS/s, 16-bit, 16-ch Multifunction USB Module



CE FCC RoHS

### Features

- Supports USB 2.0
- Portable
- Bus-powered
- 16 analog input channels
- 16-bit resolution AI
- Sampling rate up to 200 kS/s
- 8-ch DI/8-ch DO, 2-ch AO and one 32-bit counter
- Detachable screw terminal on modules
- Suitable for DIN-rail mounting
- One lockable USB cable for secure connection included

### Introduction

The USB-4700 series consists of true Plug & Play data acquisition devices. No more opening up your computer chassis to install boards—just plug in the module, then get the data. It's easy and efficient. USB-4716 offers 16 single-ended/ 8 differential inputs with 16-bit resolution, up to 200 kS/s throughput, 16 digital I/O lines and 1 user counter, add two 16-bit analog outputs. The high performance makes USB-4716 your best choice for test & measurement applications in the production line or in the lab.

Reliable and rugged enough for industrial applications, yet inexpensive enough for home projects, the USB-4716 is the perfect way to add measurement and control capability to any USB capable computer. The USB-4700 series is fully Plug & Play and easy to use. It obtains all required power from the USB port, so no external power connection is ever required.

### Specifications

#### Analog Input

- **Channels** 16 single-ended/ 8 differential (software programmable)
- **Resolution** 16 bits
- **Max. Sampling Rate** 200 kS/s (for USB 2.0)
- **FIFO Size** 1,024 samples
- **Overvoltage Protection** 30 Vp-p
- **Input Impedance** 1 G $\Omega$
- **Sampling Modes** Software, onboard programmable pacer, or external
- **Input Range** (V, software programmable)

| Gain Code   | 4        | 0        | 1       | 2         | 3          |             |
|-------------|----------|----------|---------|-----------|------------|-------------|
| Gain        | 0.5      | 1        | 2       | 4         | 8          |             |
| Input Range | Bipolar  | $\pm 10$ | $\pm 5$ | $\pm 2.5$ | $\pm 1.25$ | $\pm 0.625$ |
|             | Unipolar | N/A      | 0 ~ 10  | 0 ~ 5     | 0 ~ 2.5    | 0 ~ 1.25    |

#### Analog Output

- **Channels** 2
- **Resolution** 16 bits
- **Output Rate** Static update
- **Output Range** (V, software programmable)

| Internal Reference | Unipolar | Bipolar         |
|--------------------|----------|-----------------|
|                    |          | 0 ~ 5, 0 ~ 10   |
|                    |          | $\pm 5, \pm 10$ |

- **Slew Rate** 0.7 V/ $\mu$ s
- **Driving Capability** 5 mA
- **Output Impedance** 0.1  $\Omega$  max.
- **Operation Mode** Single output
- **Accuracy** Relative:  $\pm 1$  LSB

#### Digital Input

- **Channels** 8
- **Compatibility** 3.3 V/5 V/TTL
- **Input Voltage** Logic 0: 1.0 V max.  
Logic 1: 2.0 V min.

#### Digital Output

- **Channels** 8
- **Compatibility** 3.3 V/TTL
- **Output Voltage** Logic 0: 0.4 V max.  
Logic 1: 2.4 V min.  
Sink: 6 mA (sink)  
Source: 6 mA (source)
- **Output Capability**

#### Event Counter

- **Channels** 1
- **Compatibility** 3.3V/TTL
- **Max. Input Frequency** 1 kHz

#### General

- **Bus Type** USB 2.0
- **I/O Connector** Onboard screw terminal
- **Dimensions (L x W x H)** 132 x 80 x 32 mm (5.2" x 3.15" x 1.26")
- **Power Consumption** Typical: 5 V @ 360 mA  
Max.: 5 V @ 450 mA
- **Operating Temperature** 0 ~ 60° C (32 ~ 158° F) (refer to IEC 68-2-1, 2)
- **Storage Temperature** -20 ~ 70° C (-4 ~ 158° F)
- **Operating Humidity** 5 ~ 85% RH non-condensing (refer to IEC 68-1, -2, -3)
- **Storage Humidity** 5 ~ 95% RH non-condensing (refer to IEC 68-1, -2, -3)

### Ordering Information

- **USB-4716-AE** 200 kS/s, 16-bit, 16-ch Multi. USB Module

#### Accessories

- **1960004544** Wallmount Bracket
- **1960005788** VESA Mount Bracket

## Manual de operaciones

### 1. Características- diseño

HEELT S.R.L. le agradece la compra de su bomba de vacío de 2 etapas DVR, la cual ha sido diseñada específicamente para servicios de aire acondicionado y refrigeración. El diseño de la misma, junto con la moderna tecnología empleada en su fabricación, permiten obtener un producto de gran calidad con el cual se consiguen altos niveles de vacío y tiempos de evacuado mas cortos.

Este modelo de bomba presenta características que serán apreciadas por el usuario:

**Válvula de bloqueo:** permite aislar la bomba (DVR 95-DVR 140- DVR 280) del sistema en el cual se está produciendo el vacío, con lo cual se pueden detectar posibles pérdidas en el mismo, evitándose además el retroceso de aceite hacia el equipo al detener la bomba.

**Capacidad para varios refrigerantes:** el modelo DVR es apto para ser utilizado con los sistemas R-12, R-22, R-500 y R-502, como así también con el sistema R-134a, a condición de reemplazar el lubricante antes de cambiar de refrigerante y nunca compartir accesorios o tuberías.

**Doble conexión de entrada:** posee una entrada en T con conexión de ¼" FLARE y ½" ACME, para conectar cualquier tipo de mangueras o manifold. La entrada no utilizada queda protegida mediante una tapa con o ring para evitar fugas y podrá utilizarse para la otra familia de gases.

**Manija anatómica de transporte:** puño de diseño ergonómico para posibilitar el agarre seguro durante el traslado. En los modelos DVR 95 y DVR 140 actúa como escape de gases expulsando los mismos en sentido contrario al operador.

**Gas- ballast:** permite introducir en la bomba una pequeña cantidad de aire atmosférico, previniendo la condensación de la humedad y ayudando a prolongar la vida útil del aceite. A su vez, el empleo del gas-ballast mejora la eficiencia operativa de la bomba.

**Alto vacío final:** por su diseño de 2 etapas se logra obtener una calidad de vacío muy elevadas, asegurando la eliminación de la humedad, mientras que la alta capacidad de bombeo a bajas presiones reduce el tiempo de evacuación.

---

OSVALDO CRUZ Nº2497 – BARRACAS (C1291ACB) C.A.B.A.  
ARGENTINA

TE./FAX: (54-11) 4302-9714/6709

WEB: [WWW.HEELT.COM.AR](http://WWW.HEELT.COM.AR)

MAIL.: [HEELT@HEELT.COM.AR](mailto:HEELT@HEELT.COM.AR)

## 2. Componentes de la bomba

- 1- Manija de transporte
- 2- Gas- ballast
- 3- Carga de aceite- DVR 95 y 140  
Carga de aceite y expulsión- DVR 30 y 280
- 4- Visor de nivel de aceite
- 5- Cáster
- 6- Tapón de drenaje de aceite
- 7- Base de regatones antideslizantes
- 8- Brida acople de motor
- 9- Motor eléctrico con protector térmico incorporado
- 10- Válvula de bloqueo DVR 95, 140 y 280  
Conexión T DVR 30
- 11- Tapas de protección con o´ring

## 3. Procedimiento de puesta en marcha-revisiones previas

En todos los casos los motores están diseñados para voltajes de trabajo con una variación de +/- 10% del valor nominal.

- 1- Antes de conectar a la red verifique la tensión de operación; coloque el selector en el valor requerido (110-220). Coloque el interruptor eléctrico en la posición apagado (0). Retire el tapón del extremo de la manija (DVR 95 y 140).

Para facilitar el arranque abra el gas- ballast, desenroscándolo aproximadamente una vuelta, antes de encender la bomba, y ciérrelo una vez que se regularice el sonido.

- 2- La bomba es enviada sin aceite en el cáster, el cual se suministra en forma separada. Antes de encender la bomba se la debe llenar con aceite. Para ello desenrosque el tapón de carga o el filtro de expulsión (según corresponda) y con ayuda de un embudo llene el cáster con aceite hasta que alcance la mitad del visor. Enrosque nuevamente el tapón o el filtro de expulsión (según corresponda) y luego abrir el gas- ballast, proceda a encender la bomba. En cuanto el sonido se regularice, cierre el gas- ballast y deje funcionar durante aproximadamente un minuto. Un exceso de

---

**OSVALDO CRUZ N°2497 – BARRACAS (C 1 291 ACB) C.A.B.A.  
ARGENTINA**

**TE./FAX: (54-11) 4302-9714/6709**

**WEB: [WWW.HEELT.COM.AR](http://WWW.HEELT.COM.AR)**

**MAIL.: [HEELT@HEELT.COM.AR](mailto:HEELT@HEELT.COM.AR)**

## HERRAMIENTAS EQUIPOS DE ENSAYO PARA LABORATORIOS TÉCNICOS

aceite no es recomendable, puesto que éste puede ser expulsado junto con el aire que está siendo evacuado del sistema. Por otro lado, un déficit de aceite redundará en una calidad de vacío deficiente.

### Precauciones

Antes de conectar la bomba al sistema elimine el gas remanente que se encuentra presurizando el mismo. Nunca comience la evacuación de un sistema que se halle bajo presión, podrían producirse daños en la bomba por mala lubricación.

### 4. Uso de gas- ballast

Al realizar vacío a un sistema, el vapor de agua extraído tiende a condensarse en la bomba mezclándose con el aceite. Esto hace que el rendimiento de la unidad baje, no logrando alcanzar el máximo vacío final para el cual ha sido diseñada.

La finalidad del gas- ballast es permitir el ingreso de una pequeña cantidad de aire en la cámara de escape con el fin de evitar la condensación ya mencionada, y la consiguiente contaminación.

Para la utilización del gas- ballast, y aproximadamente a la mitad del proceso, proceda de la siguiente forma: desenrosque éste 1 vuelta permitiendo el ingreso de aire durante 1 minuto, luego enrosque nuevamente, dejando que la bomba alcance el vacío final.

### 5. Apagado de la bomba

- 1- Cierre la válvula del manifold entre la bomba y el sistema.
- 2- Cierre la válvula de bloqueo y desconecte la manguera entre ellos (excepto DVR 30).
- 3- Abra el gas- ballast y lleve el interruptor a la posición apagado (0); inmediatamente abra la válvula de bloqueo (DVR 95, 140 y 280) o desconecte la manguera (DVR 30) para romper el vacío dentro de la bomba.
- 4- Tape la conexión de entrada para prevenir el ingreso de partículas en la bomba.
- 5- Verifique el nivel de aceite. Complete hasta la marca o drene el excedente, si es necesario.

### 6. Mantenimiento

Es aconsejable cambiar el aceite de la bomba después de haber finalizado la evacuación de un sistema. No obstante. Se recomienda cambiar el aceite como máximo después de 10 (diez) servicios.

OSVALDO CRUZ N°2497 – BARRACAS (C 1 291 ACB) C.A.B.A.  
ARGENTINA

TE./FAX: (54-11) 4302-9714/6709

WEB: [WWW.HEELT.COM.AR](http://WWW.HEELT.COM.AR)

MAIL.: [HEELT@HEELT.COM.AR](mailto:HEELT@HEELT.COM.AR)

El aceite utilizado en una bomba de vacío es de fundamental importancia para la máxima calidad de vacío alcanzable.

Recurra siempre a aceites especialmente formulados para trabajar a alto vacío, manteniendo prestaciones de excelente viscosidad tanto a altas como a bajas temperaturas, lo que facilita el arranque en época invernal.

### Procedimiento para el cambio de aceite:

- A. Asegúrese de que la bomba esté caliente (luego de haber funcionado por un periodo).
- B. Quite el tapón de drenaje y drene el aceite usado en un recipiente apropiado.
- C. En caso necesario incline la bomba hacia adelante para mejorar la evacuación.
- D. Coloque el tapón de drenaje y quite el tapón de carga o filtro de expulsión (según corresponda), en la parte superior.
- E. Llene con ayuda de un embudo el cárter de aceite hasta que el aceite alcance la mitad del visor de nivel de aceite.
- F. Con la válvula de bloqueo cerrada (DVR 95, 140 y 280) o conexiones tapadas (DVR 30) ponga en marcha la bomba por espacio de un minuto, luego revise el nivel, y si ha bajado, complete hasta la mitad del visor.
- G. Coloque el tapón de carga nuevamente en su posición y asegúrese de que el tapón de drenaje este correctamente ajustado.

Nota: si al drenar el aceite éste sale muy contaminado (lodos por mezcla de agua y aceite) será conveniente quitar el cárter de aceite para limpiarlo.

---

**OSVALDO CRUZ Nº2497 – BARRACAS (C 1 291 ACB) C.A.B.A.  
ARGENTINA**

**TE./FAX: (54-11) 4302-9714/6709**

**WEB: [WWW.HEELT.COM.AR](http://WWW.HEELT.COM.AR)**

**MAIL.: [HEELT@HEELT.COM.AR](mailto:HEELT@HEELT.COM.AR)**

## 7. Especificaciones

|                 | DVR 30   | DVR 95   | DVR 140  | DVR 280  |
|-----------------|--|--|--|--|
| Motor           |  |  |  |  |
| Potencia        | 1/8 HP   | ½ HP   | ½ HP   | ½ HP   |
| Frecuencia      | 50/ 60 Hz  | 50/ 60 Hz  | 50/ 60 Hz  | 50/ 60 Hz  |
| RPM             | 2890 @ 50 Hz<br>3470 @ 60 Hz   | 1440 @ 50 Hz<br>1730 @ 60 Hz   | 1440 @ 50 Hz<br>1730 @ 60 Hz   | 1425 @ 50 Hz<br>1715 @ 60 Hz   |
| Tensión         | 115/ 230 V<br>Arranque por<br>capacitor<br>Protector térmico c/<br>react. automat. | 110/ 220 V<br>Arranque por<br>capacitor<br>Protector térmico c/<br>react. automat. | 110/ 220 V<br>Arranque por<br>capacitor<br>Protector térmico c/<br>react. automat. | 110/ 220 V<br>Arranque por<br>capacitor<br>Protector térmico c/<br>react. automat. |
| Desplazamiento  | 30 l/min @ 50 Hz<br>36 l/min @ 60 Hz   | 95 l/min @ 50 Hz<br>114 l/min @ 60 Hz  | 140 l/min @ 50 Hz<br>170 l/min @ 60 Hz   | 280 l/min @ 50 Hz<br>340 l/min @ 60 Hz   |
| Nº etapas       | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Vacio nominal   | 50 um Hg<br>0.065 mbar   | 15 um Hg<br>0.020 mbar   | 15 um Hg<br>0.020 mbar   | 15 um Hg<br>0.020 mbar   |
| Conexiones      | ¼" FLARE-<br>½" ACME   | ¼" FLARE-<br>½" ACME   | ¼" FLARE-<br>½" ACME   | ¼" FLARE-<br>½" ACME   |
| Peso            | 7 Kg   | 15 Kg  | 15,9 Kg  | 21 Kg  |
| Ancho           | 12,5 cm  | 14,5 cm  | 14,5 cm  | 14,5 cm  |
| Altura          | 18 cm  | 26,5 cm  | 26,5 cm  | 30 cm  |
| Longitud        | 27,5 cm  | 43 cm  | 43 cm  | 48 cm  |
| Cont. de aceite | 0,35 litros  | 1 litro  | 1 litro  | 1,5 litros   |

## 8. Garantía

Las bombas de vacio modelo DVR están garantizadas contra defectos de materiales y/o fabricación durante un período de un año desde la fecha de adquisición.

OSVALDO CRUZ Nº2497 – BARRACAS (C1291ACB) C.A.B.A.  
ARGENTINA

TE./FAX: (54-11) 4302-9714/6709

WEB: [WWW.HEELT.COM.AR](http://WWW.HEELT.COM.AR)

MAIL.: [HEELT@HEELT.COM.AR](mailto:HEELT@HEELT.COM.AR)

## HERRAMIENTAS EQUIPOS DE ENSAYO PARA LABORATORIOS TÉCNICOS

Esta garantía no cubre desperfectos que puedan sobrevenir por uso indebido o maltrato de la bomba, y caduca si ésta es tentativamente reparada sin autorización.

La fábrica se obliga a reemplazar o reparar SIN CARGO toda pieza que de acuerdo a nuestro examen demuestre haber sido originariamente deficiente.

La garantía es válida enviado las bombas a nuestra fabrica o al representante autorizado, siendo los gastos del traslado por cuenta del cliente.

Antes de enviar una bomba sin garantía revise todos los procedimientos de mantenimiento para evitar su devolución innecesaria.

### 9. Solucionando problemas

| PROBLEMA                    | CAUSA PROBABLE   | SOLUCION   |
|-----------------------------|--|--|
| Ruido inusual               | Aceite contaminado, inapropiado o bajo nivel<br>Perdidas en conexiones<br>Tornillos del motor flojos<br>Acoplamiento defectuoso(1)<br>Cojinetes del motor gastados(1)      | Reemplace o complete<br><br>Revise conexiones, ajuste<br>Ajuste tornillos<br>Ajuste o reemplace<br>Reemplace |
| Temperatura Elevada         | Bajo voltaje<br>Bajo nivel de aceite<br>Aceite hidratado<br>Cojinetes gastados (1)   | Chequee tensión<br>Complete<br>Reemplace aceite<br>Reemplace   |
| Baja calidad de vacio final | Perdidas en el sistema<br>Entrada de aire por las conexiones<br>Bajo nivel de aceite<br>Aceite contaminado<br>Entrada de aire por el retén<br>Modulo de bombeo gastado (1) | Chequee/ solucione<br>Verifique/ solucione<br><br>Complete<br>Reemplace<br>Reemplace<br><br>Reemplace        |
| Perdidas de aceite          | Salida de aceite por la expulsión  | Nivel de aceite muy elevado,<br>mantener a la mitad del visor<br>Conexión abierta a la atmosfera,            |

OSVALDO CRUZ N°2497 – BARRACAS (C 1 291 ACB) C.A.B.A.  
ARGENTINA

TE./FAX: (54-11) 4302-9714/6709

WEB: [WWW.HEELT.COM.AR](http://WWW.HEELT.COM.AR)

MAIL.: [HEELT@HEELT.COM.AR](mailto:HEELT@HEELT.COM.AR)

## HERRAMIENTAS EQUIPOS DE ENSAYO PARA LABORATORIOS TÉCNICOS

|                     |  |  |
|---------------------|--|--|
|                     | Bomba volcada<br>Perdidas por la junta del cárter<br>Escape de presión del sistema a través de la bomba<br>Salida de aceite por el retén (1) | cierre/ tape.<br>Enderece, complete nivel<br>Ajuste los tornillos/ reemplace la junta<br>Complete nivel<br><br>Reemplace       |
| La bomba no arranca | Falta suministro eléctrico<br>Fuera de servicio por térmico<br><br>Motor dañado (1)  | Revise conexiones<br>El protector térmico se restablece al enfriarse el motor. Espere y determine la causa.<br>Reemplace       |
| Salida por térmico  | Bajo voltaje/ incorrecto<br>Clima muy frío<br><br>Aceite sucio   | Chequee voltaje<br>Abra la válvula de bloqueo y el gas- ballest y encienda la bomba por un minuto para calentarla<br>Reemplace |

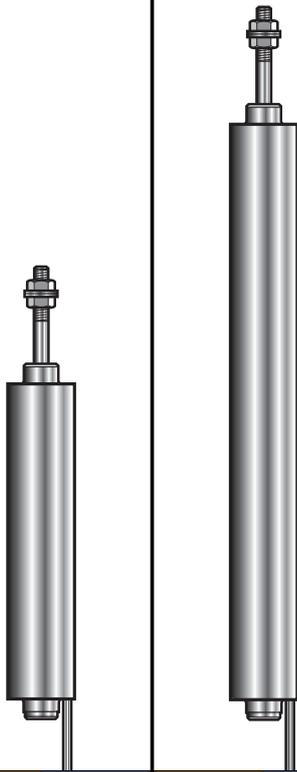
(1) Sólo para modelos DVR 95, DVR 140 y DVR 280.

OSVALDO CRUZ N°2497 – BARRACAS (C1291ACB) C.A.B.A.  
ARGENTINA

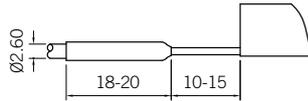
TE./FAX: (54-11) 4302-9714/6709

WEB: [WWW.HEELT.COM.AR](http://WWW.HEELT.COM.AR)

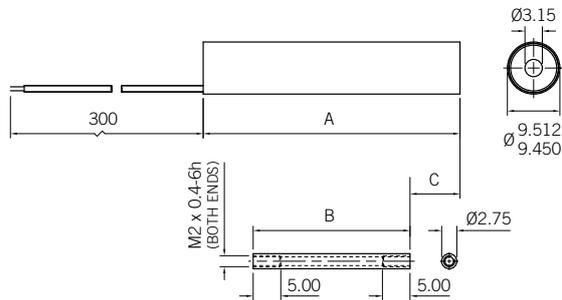
MAIL.: [HEELT@HEELT.COM.AR](mailto:HEELT@HEELT.COM.AR)



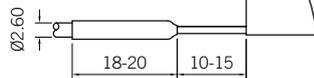
Free Core



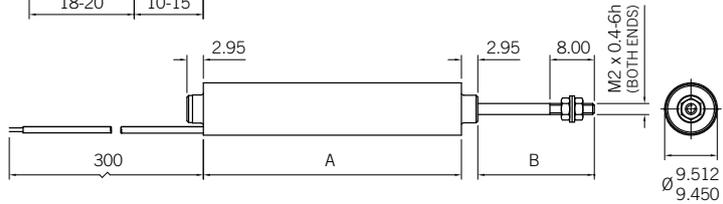
| Type   | 'A' Body Length | 'B' Core Length | 'C' At Null |
|--------|-----------------|-----------------|-------------|
| OP1.5  | 20.60           | 11.00           | 4.80        |
| OP6.0  | 46.50           | 28.40           | 9.05        |
| OP12.5 | 83.50           | 50.80           | 16.35       |



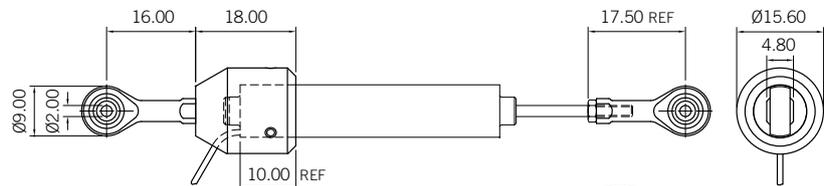
Guided Core



| Type   | 'A' Body Length | 'B' At Null |
|--------|-----------------|-------------|
| OP1.5  | 20.60           | 14.10       |
| OP6.0  | 46.50           | 21.00       |
| OP12.5 | 83.50           | 31.70       |



Universal Joints



| Analogue                   | Digital   | Analogue                   | Digital   |
|----------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| OP6                        | D012      | OP12.5                     | D025      |
| <b>±6.0</b>                | <b>12</b> | <b>±12.5</b>               | <b>25</b> |
| 1.53                       |           | 2.33                       |           |
| 15.22                      |           | 29.82                      |           |
| 0.25                       |           | 0.25                       |           |
| see note 1                 | <0.1      | see note 1                 | <0.2      |
| 82                         |           | 73                         |           |
| 94                         |           | 93                         |           |
| 400 Series stainless steel |           | 400 Series stainless steel |           |
| 0.5 (PTFE)                 |           | 0.5 (PTFE)                 |           |
| 26.77                      |           | 43.97                      |           |
| 12                         |           | 20                         |           |
| 2.5                        |           | 3.5                        |           |
| 6.6                        |           | 5.2                        |           |
| -40 to +150                |           | -40 to +150                |           |
| -40 to +150                |           | -40 to +150                |           |
| IP65                       |           | IP65                       |           |
| LVDT                       |           | LVDT                       |           |
| 1 to 10                    |           | 1 to 10                    |           |
| 78                         | -         | 69                         | -         |
| 4.5                        | -         | 5.7                        | -         |
| 24.1                       | -         | 24.8                       | -         |

# Optimum series

## 58 AC miniature LVDT displacement transducers



- > Good measurement range to length ratio
- > Small body diameter
- > Large radial core to bore clearance
- > Rugged construction
- > High performance

The Optimum Series of LVDT transducers is an ideal choice for process control and research applications. The free core variants are designed for precise linear positioning and measurement of moving parts where zero friction and hysteresis is required within a restricted space.

The free core version is available with an optional light weight core for mounting on to small, rapidly moving structures without affecting their performance and integrity - important in some control applications. The lightweight core has a 1.9mm diameter which improves core to bore clearance, making alignment easier. A light titanium core carrier can be supplied on request.

The Optimum is also available as a guided product and with universal joints either as an LVDT or Digital product for use in applications where it is not possible to mount the core and carrier on the moving part.

*Note: the Optimum can be wired as either differential output or ratiometric*



| Product type  | Analogue                   | Digital  |
|---|----------------------------|----------|
| Guided  | OP1.5                      | DO3      |
| Free  |                            |          |
| Measurement   |                            |          |
| <b>Measurement Range (mm)</b>                             | <b>±1.5</b>                | <b>3</b> |
| Pre-travel (mm)   |                            | 1.78     |
| Total mechanical travel (mm)                              |                            | 6.72     |
| Linearity (%FRO)  |                            | 0.25     |
| Resolution (µm)   | see note 1                 | <0.1     |
| Min Upward force <sup>1</sup> (g)                         |                            | 69       |
| Horizontal Force at mid point (g)                         |                            | 66       |
| Mechanical  |                            |          |
| Material  | 400 Series stainless steel |          |
| Standard cable length (m)                                 | 0.5 (PTFE)                 |          |
| Length of carrier (protruding at 0 position) <sup>2</sup> | 15.42                      |          |
| Transducer weight ±0.5 (g)                                | 7                          |          |
| Mass of moving components ±0.2 (g)                        | 1.5                        |          |
| Spring rate (g/mm)  | 14.2                       |          |
| Environmental   |                            |          |
| Storage Temperature (°C)                                  | -40 to +150                |          |
| Operating Temperature (°C)                                | -40 to +150                |          |
| IP rating   | IP65                       |          |
| Electrical Interface (LVDT)                               |                            |          |
| Wiring configuration                                      | LVDT                       |          |
| Energising Voltage (Vrms)                                 | 1 to 10                    |          |
| Sensitivity at 5 kHz (±5% mV/V/mm)                        | 108                        | -        |
| Energising Current at 5 kHz (mA/V)                        | 6                          | -        |
| Zero Phase Frequency (kHz)                                | 13.1                       | -        |

**1** Dependent on electronics

**2** Only guided with spring

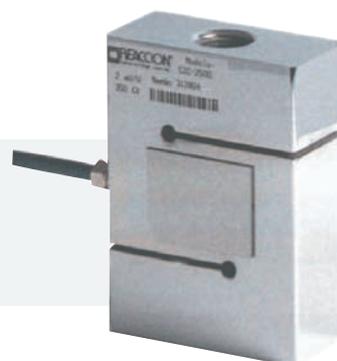
**3** For guided versions only

All analogue LVDT transducers calibrated at 3V, 5kHz frequency into a 100kΩ load.

## CELDA DE CARGA CZC

### DESCRIPCION

Celda tipo S de media y alta en acero para aplicaciones de tracción en la industria. Protegida del medio ambiente.

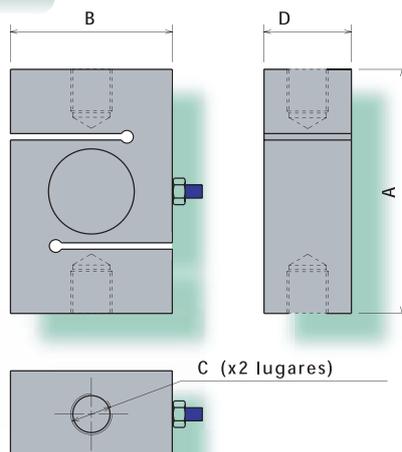


### ESPECIFICACIONES GENERALES

|  |           |
|--|-----------|
| Tensión max V                            | 15        |
| Capacidades Kg. 500,1000,2500,5000,10000 |           |
| Sensibilidad mV/V                        | 2 +/- 10% |
| Resistencia del puente $\Omega$          | 350       |
| Rango comp. de Temp. °C                  | -10 a 40  |
| Balace de cero %CN                       | +/- 1     |
| Alinealidad %CN                          | 0,03      |
| Histéresis %CN                           | 0,02      |
| Repetibilidad %CN                        | 0,02      |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| Creep %CN                 | 0,03       |
| Long de cable Mts         | 3          |
| Sobrecarga %CN            | 150        |
| Corr cero por temp %CN/°C | +/- 0.003  |
| Cor sens por Temp. %CN/°C | +/- 0.0015 |
| Res aislación M $\Omega$  | > 5000     |
| Material Base             | Acero      |
| Grado de protección       | IP67       |

### PLANO DE LA CELDA



| Capacidad (Kg) | A   | B  | C            | D    |
|----------------|-----|----|--------------|------|
| 500/1000       | 76  | 50 | 1/2x20"UNF   | 25,4 |
| 2500           | 101 | 72 | 3/4x16"UNF   | 32   |
| 5000           | 118 | 72 | 1x12"UNF     | 45   |
| 10000          | 160 | 74 | 1 1/4x12"UNF | 72   |

### CODIGO DE COLORES

