

Trabajo Profesional de Construcciones

Arenas refuladas

Aplicación al Proyecto Tecplata

Autores

Ignacio Ezama

Ignacio Vernengo Lezica

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

1. Introducción	3	4. Interpretación de resultados	27
2. Comportamiento de las arenas en el ensayo triaxial	6	4.1. Resumen de resultados obtenidos	27
2.1. Introducción	6	4.2. Errores experimentales previos	28
2.2. Nomenclatura	6	4.2.1. Muestreo y transporte	28
2.3. Definición de resistencia y falla en los materiales friccionales	6	4.2.2. Método de armado	28
2.4. Fricción y dilatancia	7	4.3. Saturación y consolidación	28
2.5. Estado crítico y estado de deformación constante	7	4.3.1. Saturación	28
2.6. El ensayo triaxial	8	4.3.2. Incidencia de la saturación parcial	29
2.6.1. Introducción	8	4.3.3. Consolidación	30
2.6.2. Preparación de muestras	9	4.4. Carga	30
2.6.3. Etapas del ensayo triaxial	10	4.4.1. Medición de deformación axial global	30
2.7. Rigidez	10	4.4.2. Medición de deformación axial local	30
2.8. Comportamiento de arenas en ensayo triaxial drenado	11	4.4.3. Velocidad de deformación y tiempo estimado para la rotura	31
2.9. Comportamiento de arenas en ensayo triaxial no drenado	11	4.4.4. Sistema de adquisición de datos	31
2.9.1. Licuación	12	5. Modelación constitutiva	32
2.10. Ablandamiento y localización de deformaciones	12	5.1. Introducción	32
3. Programa experimental	15	5.2. Nomenclatura	32
3.1. Equipamiento	15	5.3. Modelos de Elastoplasticidad	33
3.1.1. Adquisición de datos	15	5.3.1. Deformaciones en el rango elástico	33
3.1.2. Instrumental	15	5.3.2. Deformaciones fuera del rango elástico	33
3.1.3. Equipos periféricos	17	5.4. Hardening Soil Model	33
3.2. Materiales y métodos	17	5.4.1. Deformaciones por corte	34
3.2.1. Procedimiento	17	5.4.2. Función de endurecimiento por consolidación	36
3.3. Caracterización física	18	6. Modelación numérica	38
3.4. Ensayos triaxiales CIDC	21	6.1. Geometría	38
3.5. Ensayos triaxiales CIUC	21		
3.6. Línea de estado crítico	22		

6.2. Materiales	38
6.3. Etapas de cálculo	39
6.4. Factores de seguridad	40
6.5. Deformaciones	40
7. Conclusiones	55
7.1. Trabajos en laboratorio	55
7.2. Resultados	55
7.3. Métodos y errores	55
7.4. Modelación numérica	56

1. Introducción

La obra de Tecplata consiste en la construcción de un puerto de contenedores para el atraque de buques y carga y descarga de mercaderías mediante grúas — figura 1.2 —. La obra se ubica a orillas del canal de ingreso al Dock Central de Ensenada y el Río Santiago, provincia de Buenos Aires. El predio elegido para el proyecto tiene $36ha$ que serán destinadas mayoritariamente al emplazamiento de edificios administrativos y playas de almacenamiento e intercambio de cargas con el sistema de transporte terrestre.

La obra principal del proyecto contempla la ejecución de una estructura sobre pilotes sobre la línea del canal navegable donde se emplazará el muelle de $600m$ de longitud para el atraque de los buques.

Para la ejecución de la estructura sobre pilotes, la excavación y la colocación del enrocado de protección bajo el muelle se proyectó una estructura temporal de contención de agua que permita el trabajo en seco. En la figura 1.1 se muestra la geometría de excavación de este sector.

Finalizada la etapa constructiva y de colocación del enrocado de protección, se proyecta el retiro de este terraplén de contención — terraplén izquierdo en la figura 1.1 — y la posterior reducción del nivel del lecho hasta cota $-15.56m$ S.H.N. — Servicio de Hidrografía Naval — en la zona adyacente al muelle para permitir el acceso de los buques a la zona de atraque.

El procedimiento estipulado de retiro del terraplén es:

- Retiro de tablestacas metálicas.

- Inundación controlada del recinto interno hasta nivel coincidente con el nivel del río.
- Dragado del material de terraplén y fondo hasta cota $-15.56m$.

El material extraído de la zona será colocado por refulado en un recinto a construir en la zona noreste del predio conformándose así la zona de almacenamiento de cargas. Se estima que el volumen de material a ser depositado es alrededor de $500.000m^3$. En la fotografía satelital de la zona — figura 1.2 — se aprecian las ubicaciones del sector de construcción del muelle y del recinto de refulado.

Los objetivos del proyecto de investigación son caracterizar en laboratorio las propiedades físicas y mecánicas del material utilizado como relleno en la terminal de contenedores y simular el comportamiento de las distintas etapas de construcción de la zona de almacenamiento.

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. No se pudo comparar los resultados de la simulación con mediciones *in situ* debido a que la obra aún no se ha concluido.

La etapa de caracterización del material en laboratorio se desarrolló conjuntamente con los alumnos Iñaki García Mendive, Federico Paz Walther y Gonzalo Rellán, quienes estudiaron el material a colocar en el proyecto Carena, que consiste en un cierre temporario del dique de la base naval Puerto Belgrano, en Bahía Blanca, realizado con

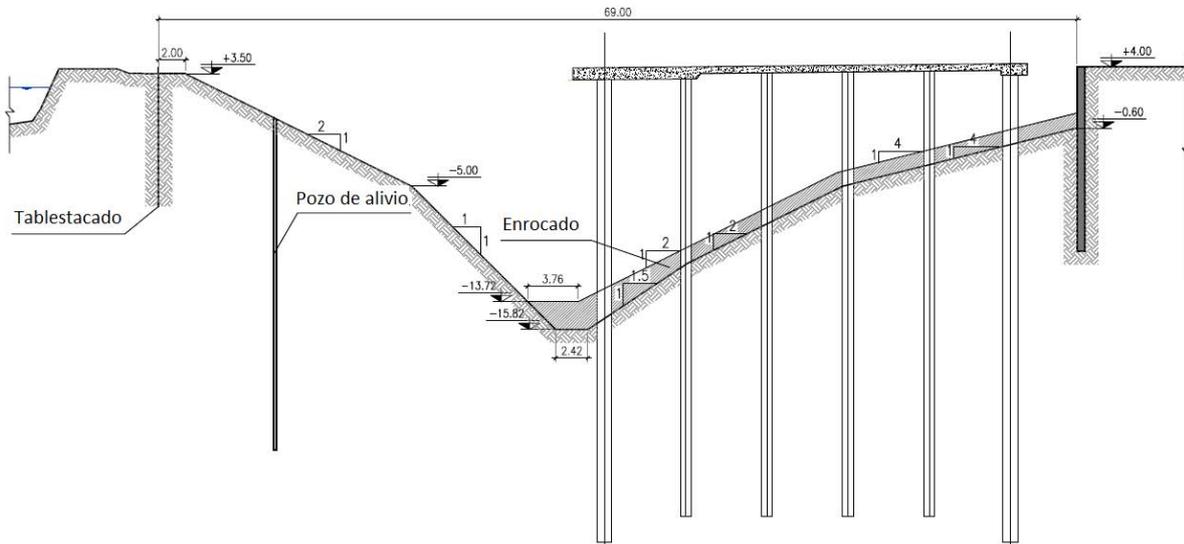


Figura 1.1: Geometría final de excavación.



Figura 1.2: Fotografía satelital de la zona de emplazamiento.

el fin de efectuar tareas de mantenimiento en la compuerta del dique y los sistemas mecánicos.

Organización y presentación El documento está organizado 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. Análisis 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 Ignacio Ezama e Ignacio Vernengo Lezica, 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. Iñaki García Mendive, Federico Paz Walther y Gonzalo Rellán 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 difractometría y difracción. A Guillaume Chastel, estudiante de intercambio del Institut National 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 [24, 12, 21, 28, 13]

2.2. Nomenclatura

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

ψ	Ángulo de dilatancia
ϕ_c	Ángulo de fricción interna crítico
ϕ	Ángulo de fricción interna pico
ε_1	Deformación axial
ε_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

σ_c	Presión de confinamiento
p	Presión media
u	Presión neutra
e_c	Relación de vacíos crítica
τ	Tensión de corte
q	Tensión diferencia
σ_n	Tensión normal
σ_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.

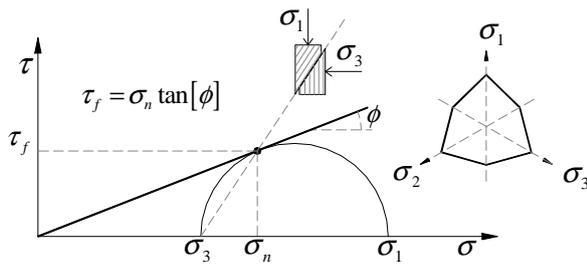


Figura 2.1: Criterio de Mohr-Coulomb.

Se define la falla de un material friccional al instante en que el cociente σ'_1/σ'_3 alcanza su valor máximo. Se caracteriza a este estado a partir del adimensional N_ϕ — 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 τ se considera el criterio de Mohr-Coulomb — ecuación 2.2 —.

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

donde σ_n es la tensión normal al plano de falla, ϕ 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 ϕ y N_ϕ .

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

2.4. Fricción y dilatancia

El ángulo de fricción interna ϕ utilizado en el criterio de falla de Mohr-Coulomb está compuesto por dos componentes, el ángulo de fricción interna crítico ϕ_c y la dilatancia ψ , que se relacionan según la ecuación 2.4.

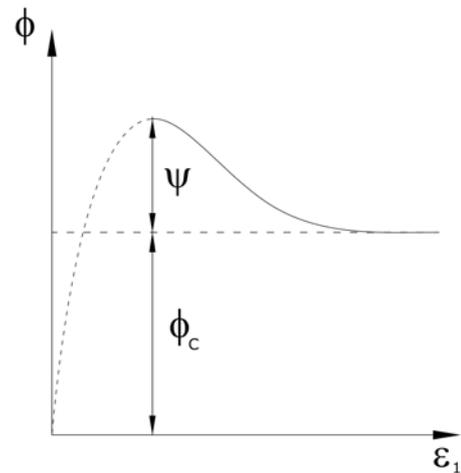


Figura 2.2: Componentes de la resistencia al corte.

ción 2.4.

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

Cada componente de ϕ se asocia a una componente de la resistencia al corte. La primera, ϕ_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, ψ , 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 ϕ_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 ϕ_c .

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

En el caso de un ensayo triaxial, dicha dependencia se puede expresar en función de σ'_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-

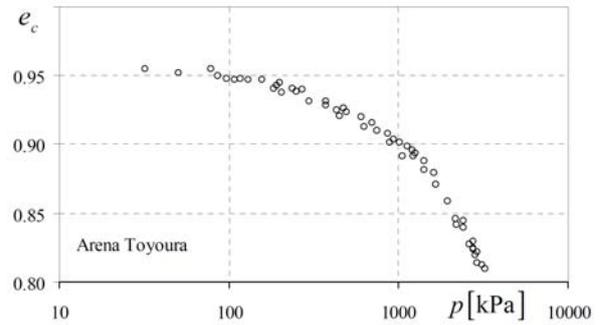


Figura 2.3: Línea de Estado Crítico para arena Toyoura[30].

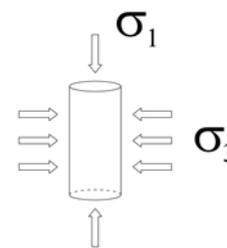


Figura 2.4: Tensiones principales en la cámara triaxial.

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 σ_c de aire o agua en la cámara y se genera la tensión diferencia σ_d con un vástago superior.

Permite desarrollar una presión neutra u distinta de la de confinamiento σ_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-

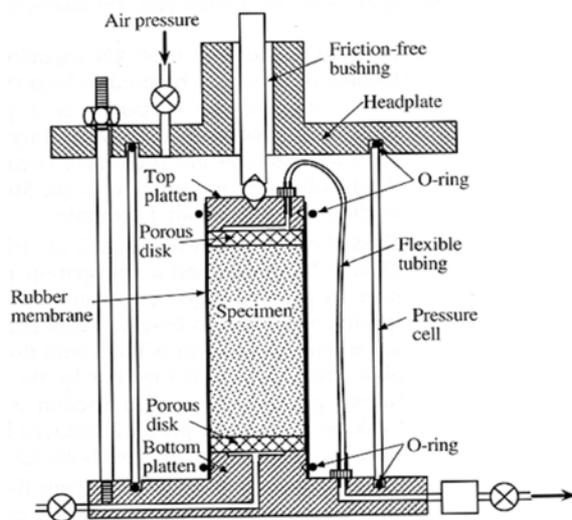


Figura 2.5: Componentes de una cámara triaxial.

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 σ_d y σ_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

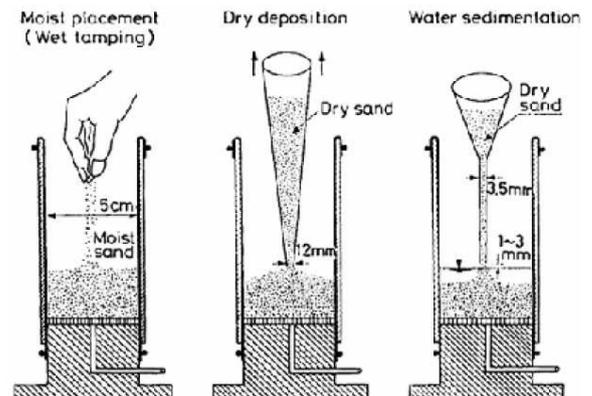


Figura 2.6: Métodos de armado de muestras, extraída de [13].

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* Δu 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 σ_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 Δu 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 readjustamiento 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 σ'_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 σ'_3 . Para una σ'_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 σ'_3 .

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

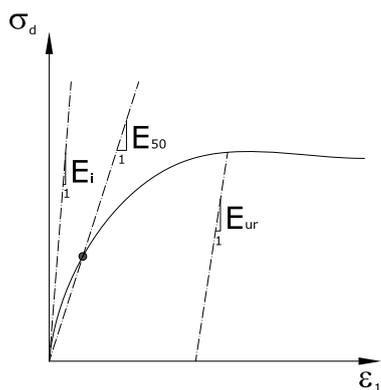


Figura 2.7: Rigidez inicial.

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 σ'_3 permanece constante hasta que la muestra alcanza el estado crítico.

Muestras cuya σ'_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 σ'_1/σ'_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 σ'_1/σ'_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 σ'_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 σ'_3 hasta que la muestra alcanza el estado crítico.

Muestras situadas por encima de la LEC, al no poder contraer, reducen σ'_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 σ'_3 hasta que se alcanza el estado de deformación cuasi constante. Luego, al no poder dilatar, se reduce la presión neutra y aumenta σ'_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.

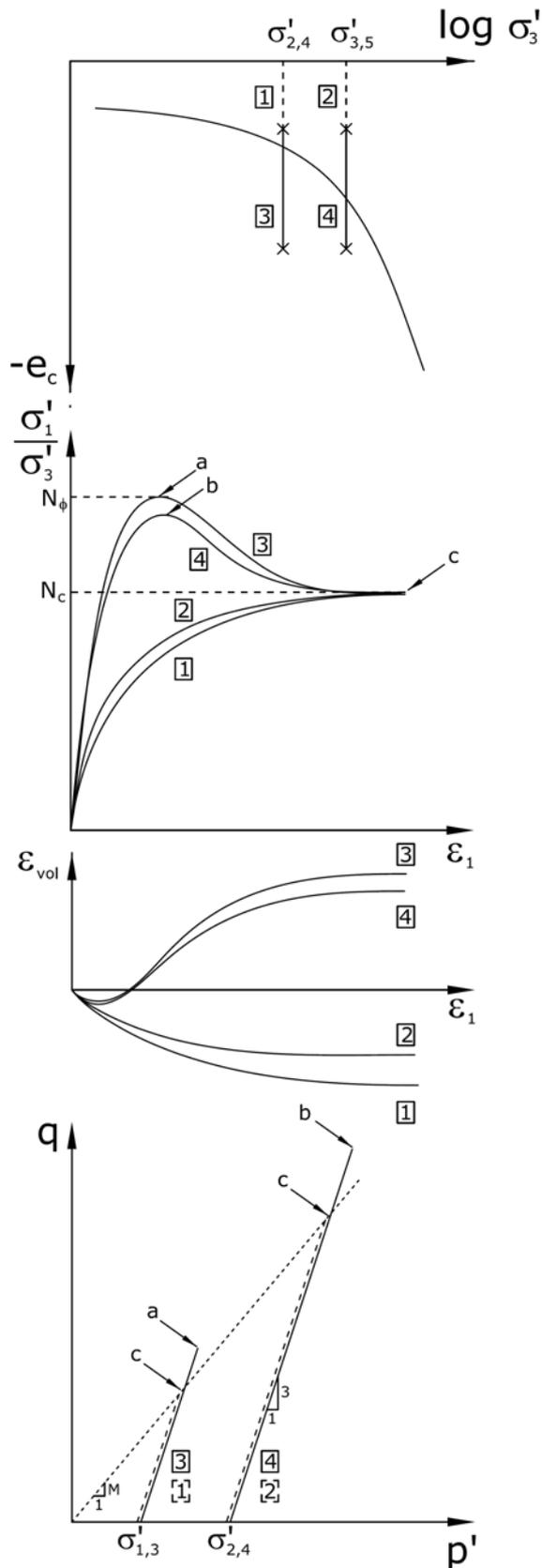


Figura 2.8: Comportamiento de arenas en ensayo triaxial drenado.

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 σ'_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 σ'_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 [21].

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 σ_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

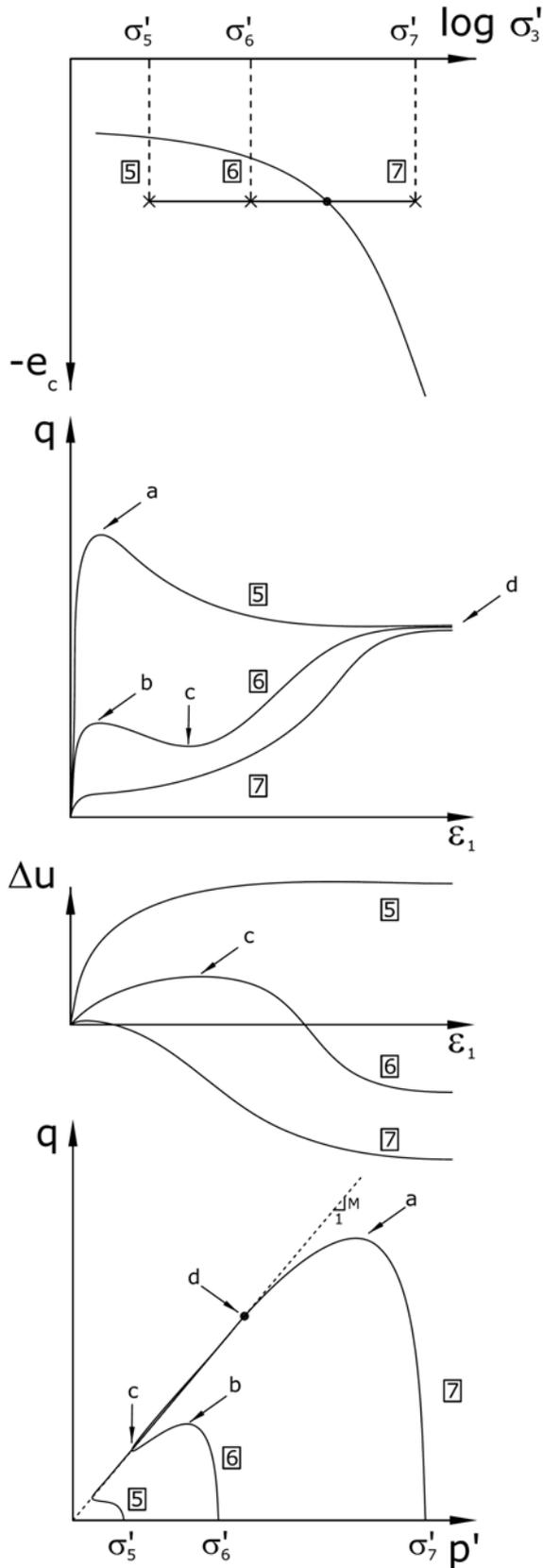


Figura 2.9: Comportamiento de arenas en ensayo triaxial no drenado.

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

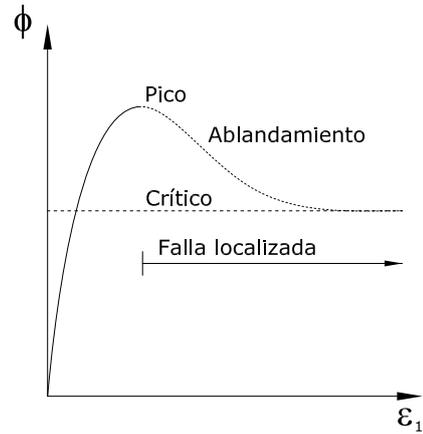


Figura 2.10: Ablandamiento en ensayo triaxial drenado.



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 $25kN$ — 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.

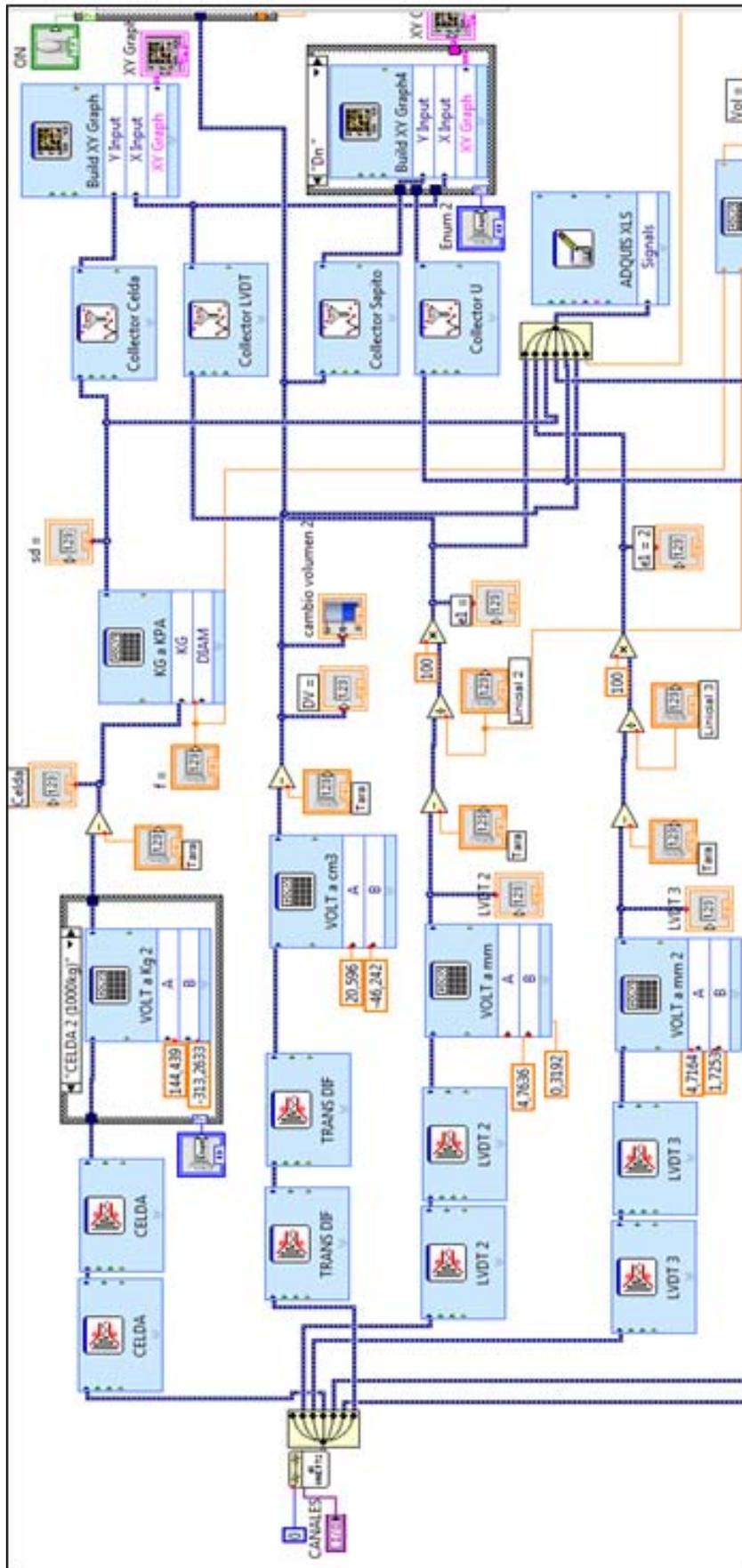


Figura 3.3: Diagrama de bloques en *Labview*.



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 $800kPa$ 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 y 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 — figura 3.6.v —, midiéndose sus longitudes iniciales con un calibre.

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

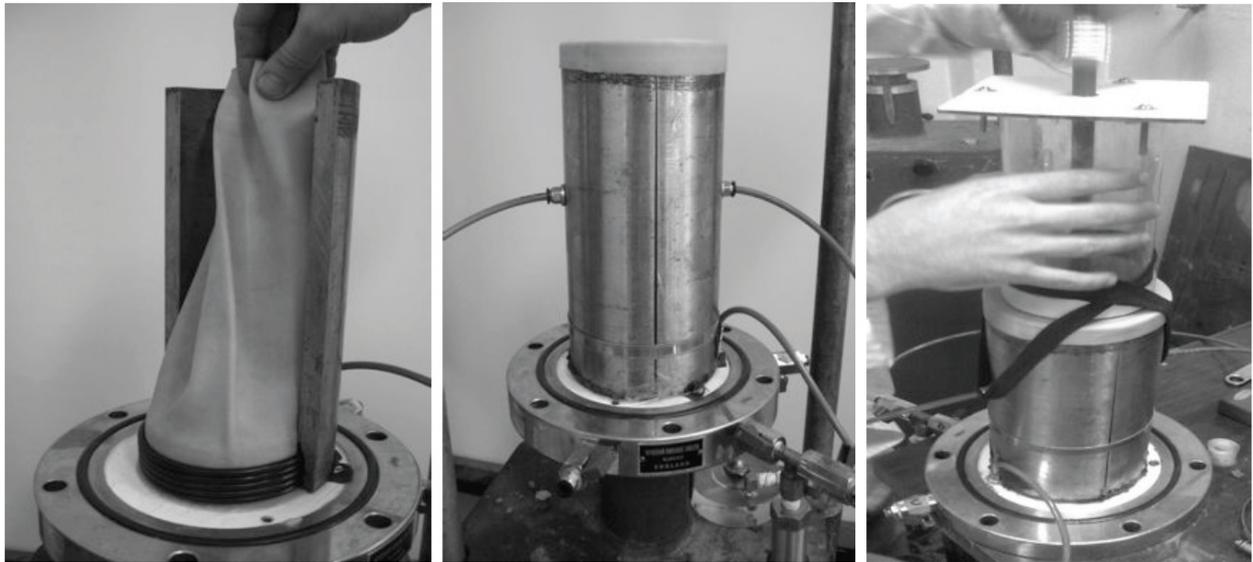
La arena utilizada proviene de un depósito de origen fluvial. De la inspección tacto visual se la identifica como arena fina, subredondeada, de color castaño oscuro y con escaso contenido de finos.

Se efectuaron 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 — límite líquido y límite plástico —; 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 [38, 39, 32, 33, 34, 37, 40, 36].

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. 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 [%]	C_u	C_c	D_{50} [mm]	G_s	e_{min}	e_{max}	R	S
SP-SM	11	1.9	0.8	0.134	2.68	0.695	1.052	0.630	0.613

Tabla 1: Parámetros físicos.

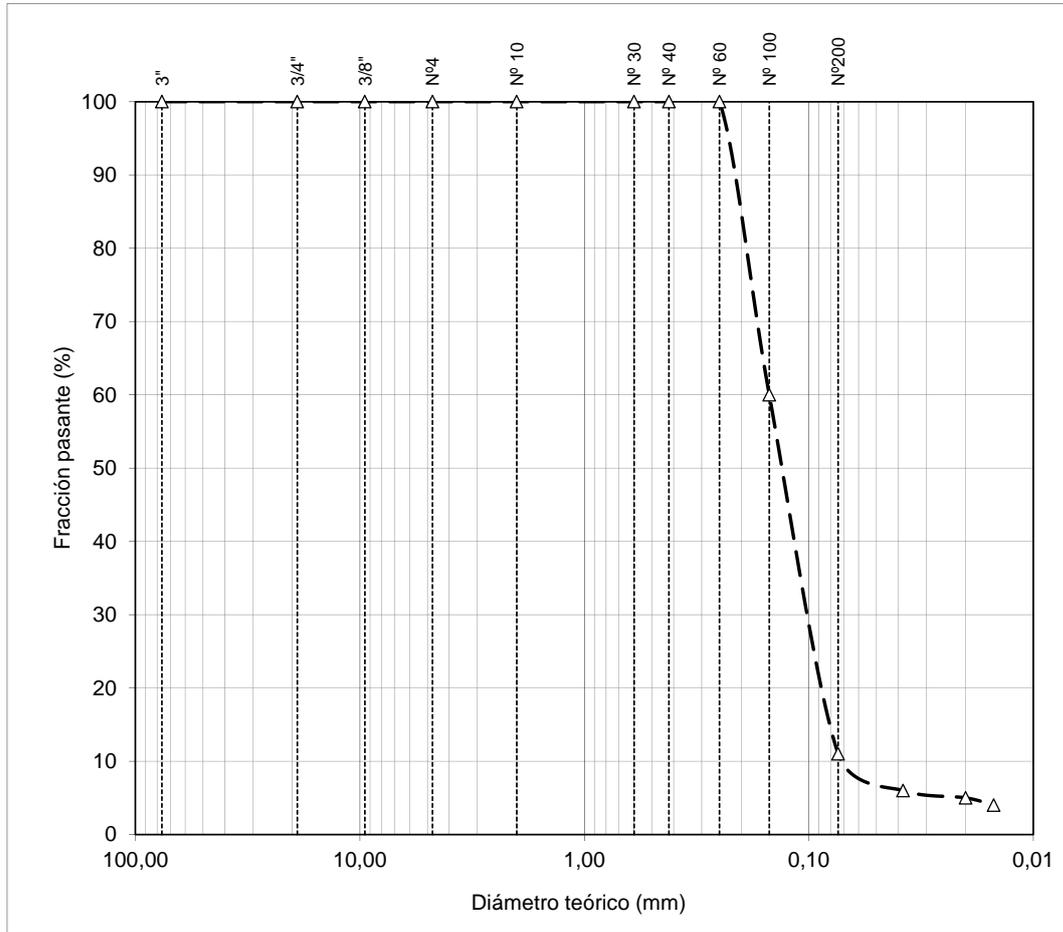


Figura 3.8: Curva granulométrica.

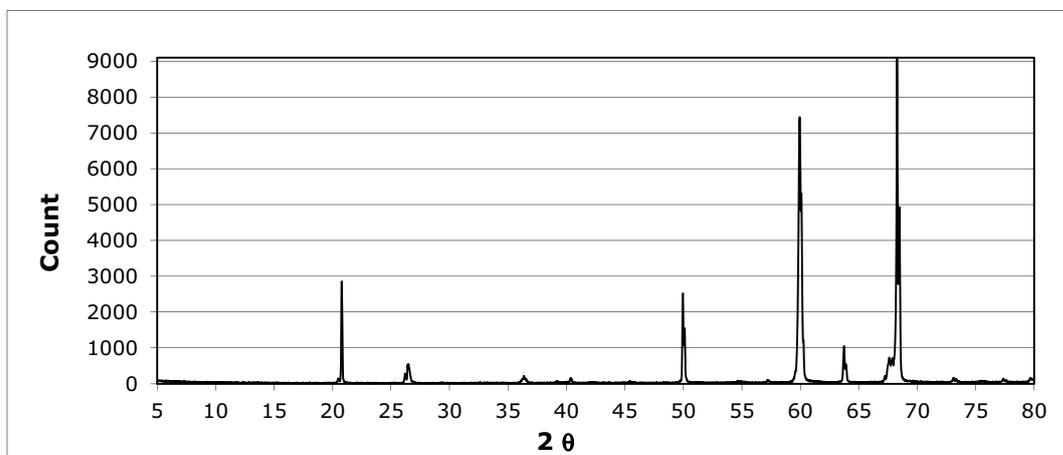


Figura 3.9: Difractograma.

entre el número de picos que tiene asociados y el total [4]. Se detectó el predominio de los siguientes minerales: Berlinita, Cuarzo, Paratistasita, Carbono, Hierro y Cobre.

Se determinó el ángulo de fricción interna crítico mediante el método expeditivo de la probeta inclinada [25] como se indica en la figura 3.10. Se obtuvo un $\phi_c = 30,8^\circ$.



Figura 3.7: Vista con microscopio de diferentes granos.

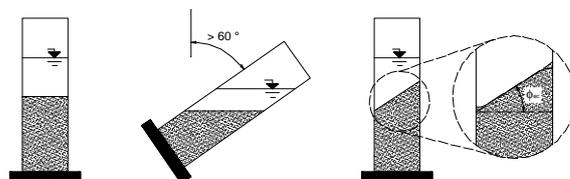


Figura 3.10: Método de la bureta [25].

3.4. Ensayos triaxiales CIDC

Se realizaron 3 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 la muestras de arena Tecplata se presentan en las figuras 3.11 en los planos $\sigma_d - \varepsilon_1$, $\Delta u - \varepsilon_1$ y $q - p'$. En la tabla 4 se informan los ϕ_c y ϕ obtenidos. No se informan los ϕ_c de las muestras que no llegaron al estado crítico.

3.5. Ensayos triaxiales CIUC

Se realizaron 9 ensayos triaxiales de compresión a deformación controlada, consolidación isotrópica y no drenados — CIUC

σ'_3 [kPa]	Densidad relativa		
	Suelta D_r [%]	Media D_r [%]	Densa D_r [%]
100	8.6	44.7	86.7

Tabla 2: Ensayos triaxiales CIDC realizados.

σ'_3 [kPa]	Densidad relativa		
	Suelta D_r [%]	Media D_r [%]	Densa D_r [%]
50	10.2	34.9	75.3
100	2.5	55.7	84.1
200	19.4	60.9	108.0

Tabla 3: Ensayos triaxiales CIUC realizados.

σ'_3 kPa	D_r %	ϕ_c °	ϕ °
102	8.6	33.7	33.7
99	43.6	-	35.8
100	85.1	-	40.1

Tabla 4: Resultados CIDC TecPlata.

σ'_3 kPa	D_r %	ϕ_c °	s_u kPa
51	10.1	-	20
44	34.9	-	8.9
50	75.3	-	221
87	7.7	-	20
105	55.7	34.6	114
121	83.4	-	622
200	19.4	32.6	86
220	60.9	34.8	292
206	107.7	-	677

Tabla 5: Resultados CIUC TecPlata.

— 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 sobre las muestras de la arena de TecPlata 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 ϕ_c y s_u obtenidos. No se informan los ϕ_c de las muestras que licuaron o no llegaron al estado crítico.

3.6. Línea de estado crítico

A partir de los ensayos en que se alcanzó el estado crítico se graficaron los puntos en el plano $e_c - p'$ en la figura 3.15.

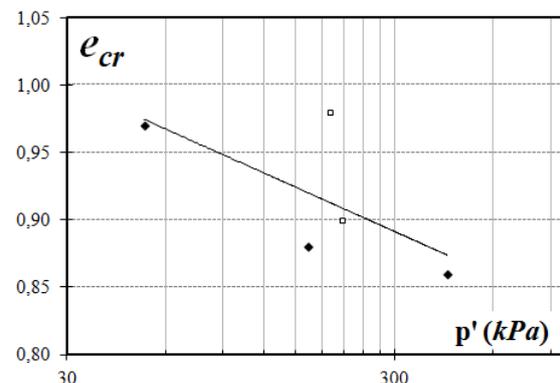
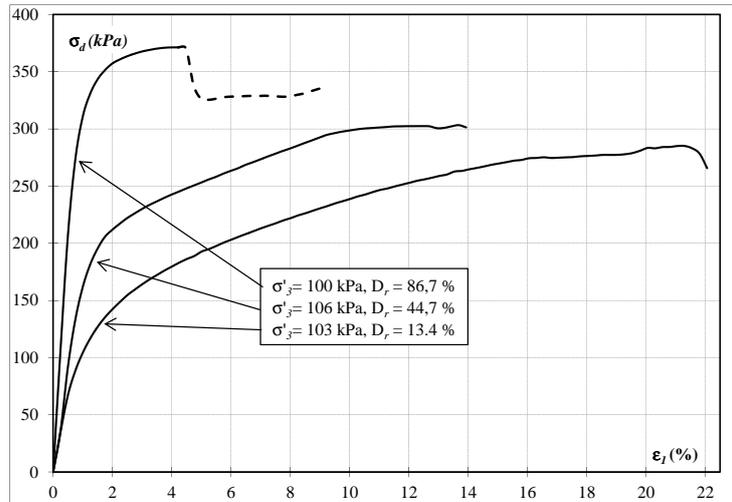
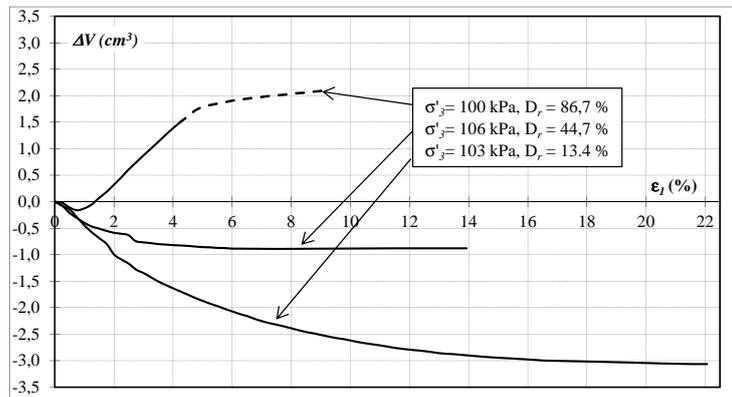


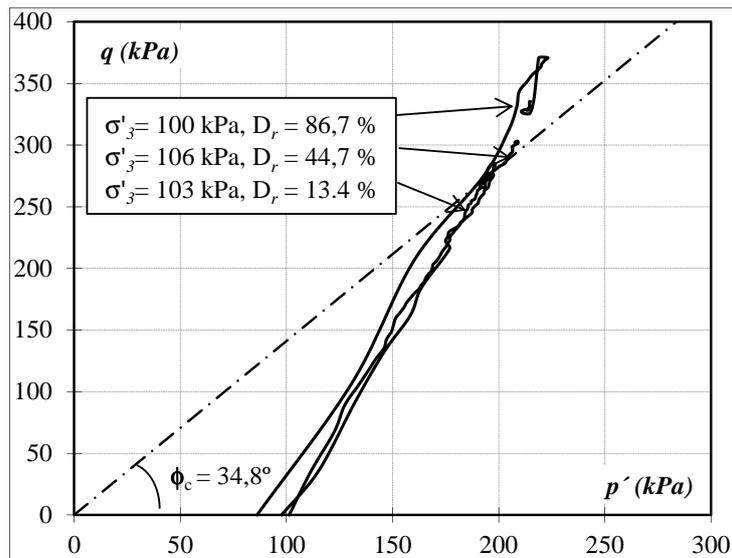
Figura 3.15: Línea de estado crítico de la arena TecPlata.



(a) Curva tensión - deformación.

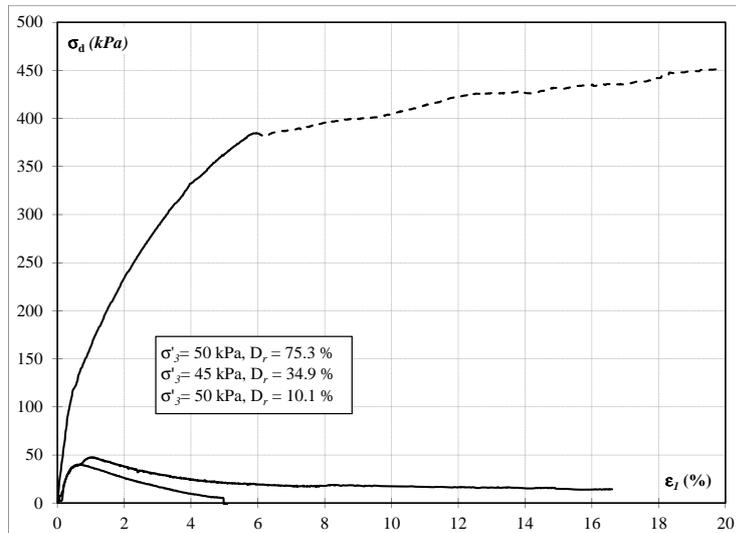


(b) Curva variación de volumen vs deformación.

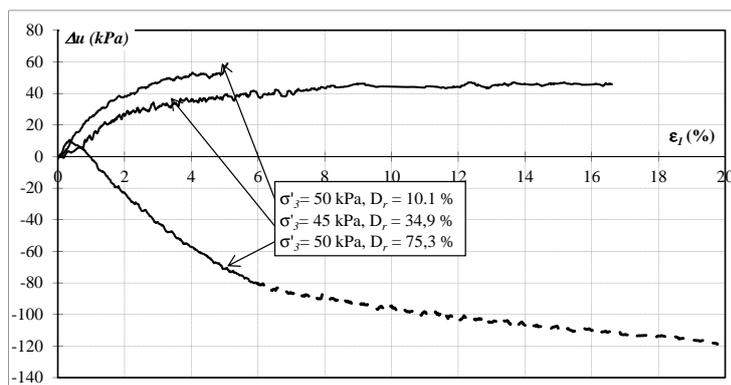


(c) Curva tensión desviadora vs presión media efectiva.

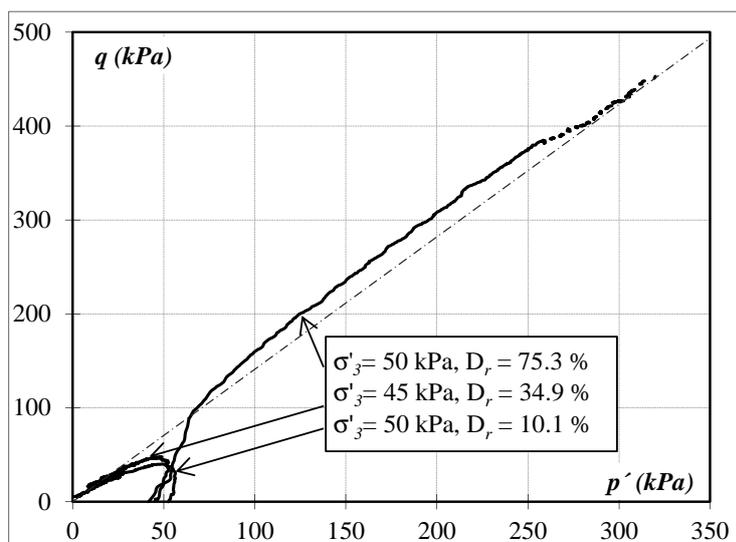
Figura 3.11: Ensayos triaxiales CIDC para $\sigma'_3 \simeq 100 \text{ kPa}$ en arena TecPlata.



(a) Curva tensión - deformación.

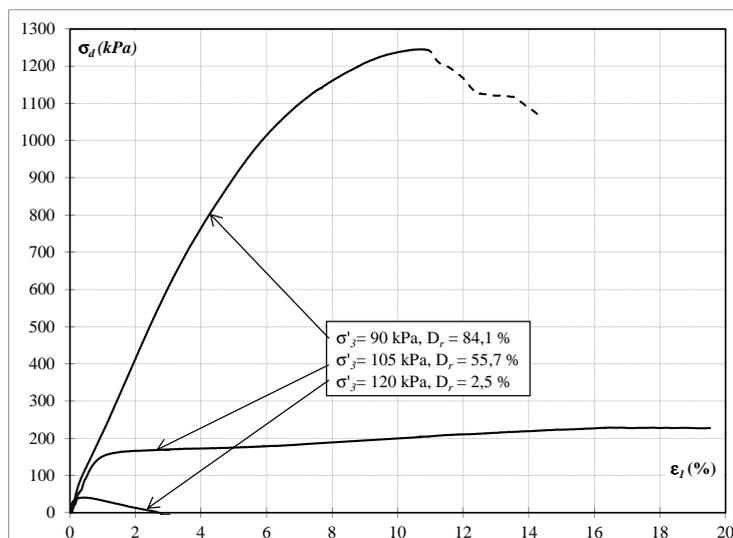


(b) Curva variación de presión neutra vs deformación.

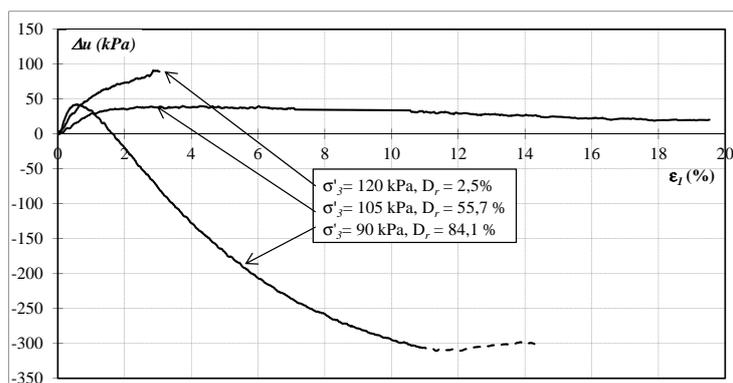


(c) Curva tensión desviadora vs presión media efectiva.

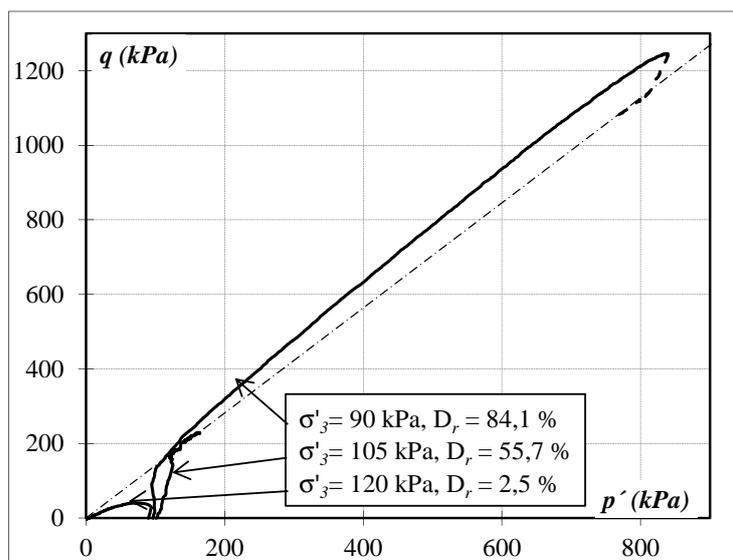
Figura 3.12: Ensayos triaxiales no drenados para $\sigma'_3 \simeq 50 \text{ kPa}$ en arena TecPlata.



(a) Curva tensión - deformación.

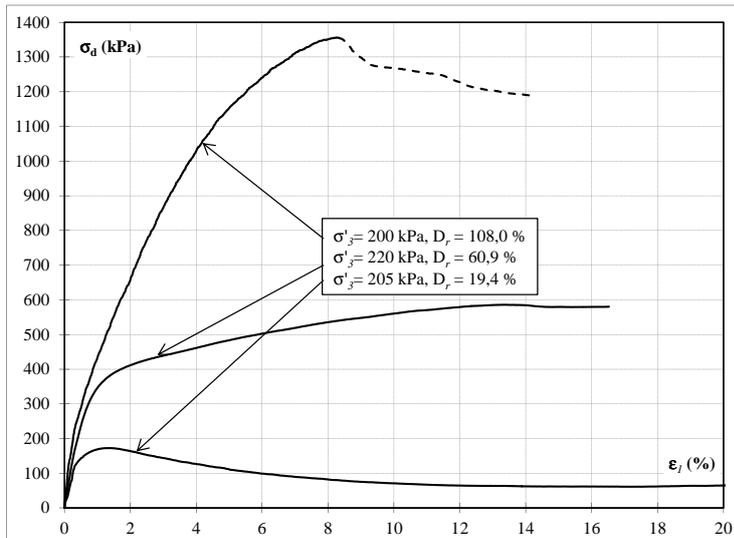


(b) Curva variación de presión neutra vs deformación.

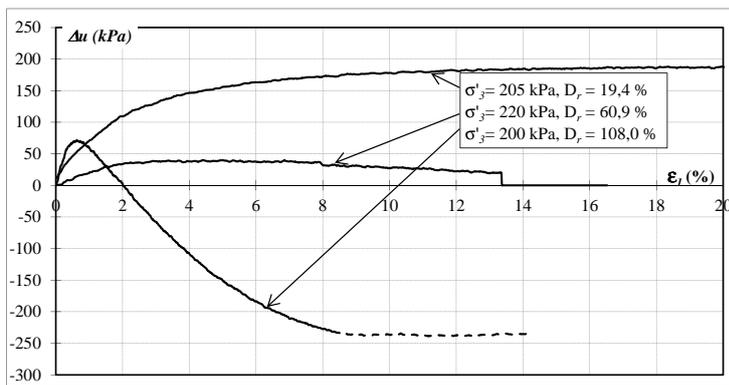


(c) Curva tensión desviadora vs presión media efectiva.

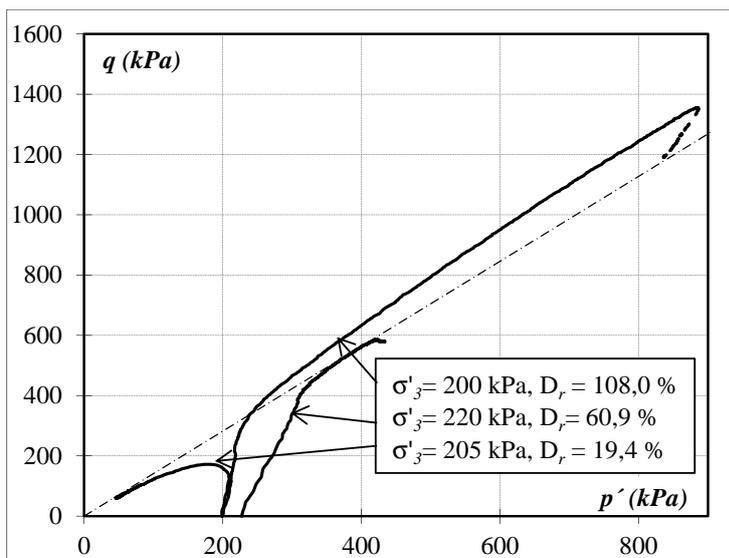
Figura 3.13: Ensayos triaxiales no drenados para $\sigma'_3 \simeq 100$ kPa en arena TecPlata.



(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 TecPlata.

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 ϕ_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 densas exhibieron un comportamiento contractivo hasta $\varepsilon_1 = 0,5\%$ para luego dilatar hasta llegar a la falla por localización entre el 6% y el 11% de ε_1 .

La muestra media de $\sigma'_3 = 50\text{ kPa}$ licuó al 1% de ε_1 y desarrolló una resistencia al corte no drenada residual. Los ensayos con $\sigma'_3 = 100\text{ kPa}$ y $\sigma'_3 = 200\text{ kPa}$, exhibieron

un comportamiento contractivo y luego dilatante, manifestándose el estado de deformación cuasi constante en $\varepsilon_1 = 4\%$. Los tres ensayos de muestras medias alcanzaron el estado crítico entre un 12% y 14% de ε_1 .

Las muestras sueltas desarrollaron su pico de resistencia no drenada antes del 1% de ε_1 . Las muestras con $\sigma'_3 = 50\text{ kPa}$ y $\sigma'_3 = 100\text{ kPa}$ licuaron produciéndose el colapso total de la estructura mientras que la muestra con $\sigma'_3 = 200\text{ kPa}$ licuó y desarrolló la resistencia 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 aumento de σ'_3 .

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

CIDC La muestra densa desarrolló un comportamiento contractivo hasta el 1% de ε_1 y falló por localización de deformaciones en $\varepsilon_1 = 4\%$.

Las muestras suelta y media tuvieron un comportamiento netamente contractivo hasta alcanzar el estado crítico en $\varepsilon_1 = 18\%$ y $\varepsilon_1 = 12\%$ respectivamente. La muestra suelta experimentó un cambio volumétrico del 3% mientras que la media del 1% .

En el ensayo realizado sobre la muestra densa se observa $\psi = 4,1^\circ$. La muestra suelta desarrolló un $\phi_c = 33,7^\circ$.

Se observa un crecimiento de la rigidez inicial conforme aumenta la densidad relativa.

Método Santamarina y ensayos triaxiales Se observa una diferencia de 2.9° en los valores de ϕ_c obtenidos mediante el método de la bureta — $\phi_c = 30.8^\circ$ — y los ensayos triaxiales — $\phi_c = 33,7^\circ$ —.

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 11.6 %.

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 0.31 y 0.79. Estos valores son menores al 0.95 requerido en arenas [41] 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 $600kPa$ 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 σ' a partir de las tensiones totales σ 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

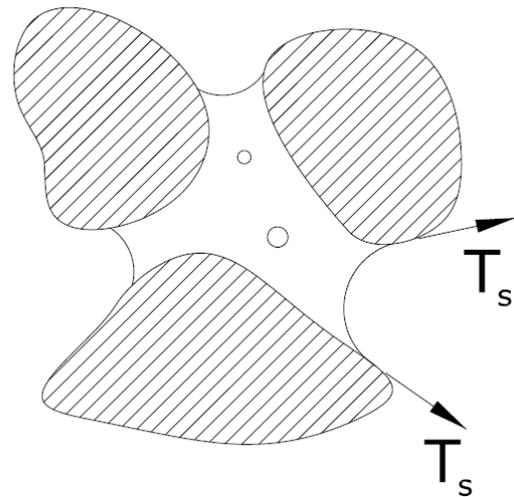


Figura 4.1: Interfase aire-agua y tensión capilar.

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 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 va-

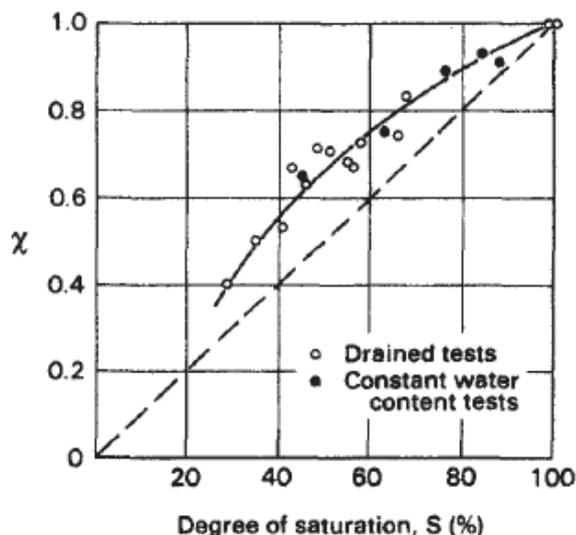


Figura 4.2: Relación $\chi - S_r$ [8].

riación 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 χ es un parámetro relacionado con el grado de saturación S_r del suelo que varía entre 0 y 1 — figura 4.2 —.

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 ε_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 [41].

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 1×10^{-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 [41], 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 [31, 28, 22, 19, 27].

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.

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

ψ_c Ángulo de dilatancia en estado crítico

ψ_m Ángulo de dilatancia movilizado

ϕ_m Ángulo de fricción movilizado

q_a Asíntota de la hipérbola que es gráfico de la relación entre tensión desviadora y deformaciones principales

ν Coeficiente de Poisson

c Cohesión

ε^e Deformación elástica

ε^p Deformación plástica

γ^p Deformación por corte plástica, parámetro de endurecimiento

ε Deformación total

ε_v^c Deformación volumétrica por consolidación

m Dirección de la normal a la curva de potencial plástico

λ Factor de crecimiento de las deformaciones plásticas

D Matriz de rigidez

K_c Módulo de compresión elasto-plástica

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.

σ^{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 dilatación.
- Incorporación de una doble ley de endurecimiento, por corte y por deformación volumétrica.

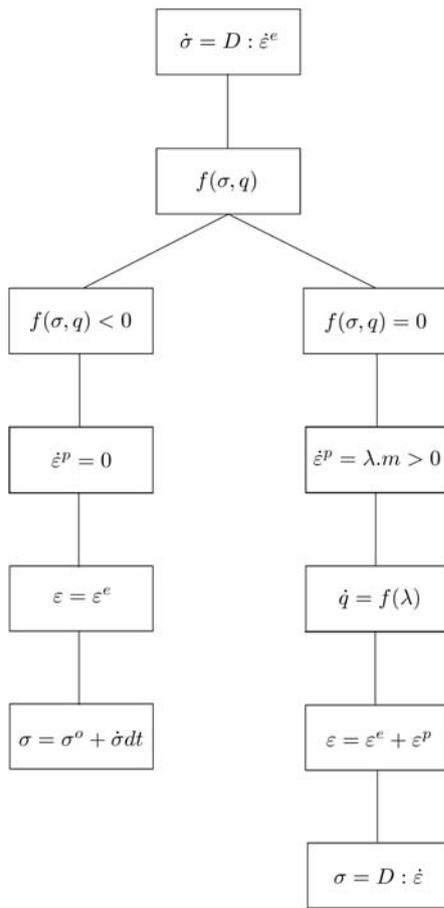


Figura 5.1: Diagrama de flujo del funcionamiento de un modelo constitutivo.

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

- Propiedades elásticas — relación $\sigma - \epsilon^e$ —.
- 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: $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p$.

- Para una dada deformación, considera la variación de la deformación como elástica — $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e$ —. Se calcula el incremento de tensión $\dot{\sigma}$ como $\dot{\sigma} = D : \dot{\epsilon}$, 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: $\dot{\epsilon}^p = 0$.
- Si fue alcanzada, la función de fluencia se expande hasta que $f(\sigma, q) = 0$ y se producen deformaciones plásticas $\dot{\epsilon}^p > 0$.
- El incremento de las deformaciones plásticas se obtiene como el producto de un factor de crecimiento λ y la dirección de la normal a la curva de potencial plástico m : $\dot{\epsilon}^p = \lambda \cdot m$.
- 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 [22, 27, 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

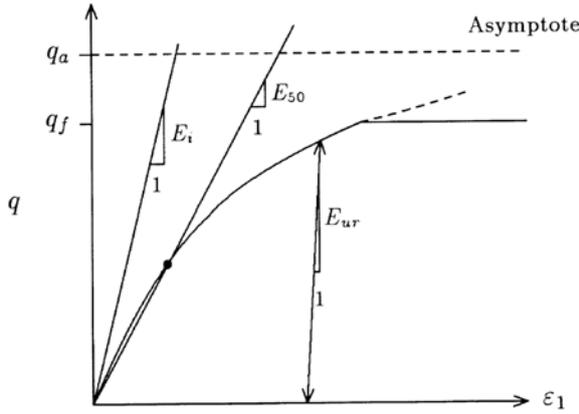


Figura 5.2: Relación hiperbólica entre tensiones y deformaciones para un ensayo drenado.

totales en el modelo hiperbólico es:

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

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:

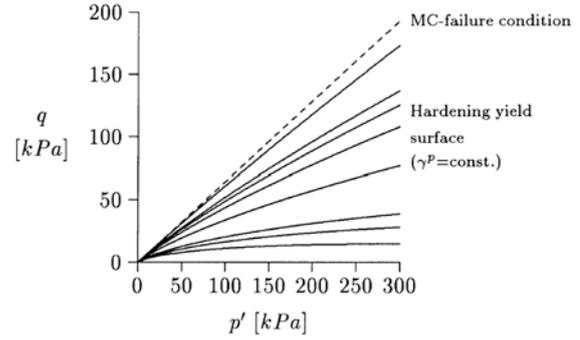


Figura 5.3: Variación de la superficie de fluencia en función de γ^p .

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

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

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 ε_1 — las deformaciones totales del modelo hiperbólico —, el segundo término es ε_1^e — deformaciones elásticas — y el tercero γ^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 γ^p , se calculan las deformaciones volumétricas plásticas ε_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:

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

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 ε_1^p y la componente en p las deformaciones volumétricas plásticas ε_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 preconsolidación 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

Con el objeto de simular en el programa de elementos finitos *Plaxis 2D* la terminal de contenedores se calibró el modelo constitutivo HSM con los parámetros obtenidos de los ensayos triaxiales realizados durante la etapa de caracterización mecánica.

Se generaron tres juegos de parámetros para la arena de Tecplata — un material para cada rango de D_r — para replicar el comportamiento según su estado de densificación.

Con los modelos constitutivos calibrados se realizó la simulación del recinto de refulado. Se compararon los desplazamientos, los mecanismos de falla y los coeficientes de seguridad obtenidos para los dos escenarios modelados:

- Relleno del recinto de refulado con material suelto — sin densificar —.
- Relleno del recimuelle fue modelado como un plano infinitamente de refulado con material medianamente densificado.

No se pudieron comparar los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas con las mediciones *in situ* pues no se ha comenzado la construcción de la obra al momento de la redacción.

6.1. Geometría

El recinto de refulado consiste en un terraplén de arena altamente densificada construido sobre el estrato superior de la formación Postpampeano. Debido a la baja resistencia del Postpampeano se requiere

de un terraplén de grandes dimensiones para lograr la seguridad mínima durante la descarga del relleno de arena refulada. En la figura 6.4 se muestra una sección transversal del recinto de refulado y las mallas de elementos finitos utilizadas.

6.2. Materiales

En las tablas 6 y 7 se informan los parámetros físicos y mecánicos de los materiales considerados.

Los parámetros informados para los materiales Pampeano y Postpampeano se corresponden con los definidos por la inspección de la obra. A partir de los ensayos realizados en el laboratorio se calibraron tres juegos de parámetros — uno para cada rango de D_r —. Para el terraplén se utilizarán los parámetros correspondientes a la arena densa mientras que para los rellenos de arena se utilizarán los correspondientes a las condiciones suelta y media.

El procedimiento de ajuste consistió en dos etapas:

1. De las mediciones realizadas en laboratorio se obtuvieron los siguientes parámetros: relaciones de vacíos e_{min} , e_{max} y $e_{inicial}$, parámetros de resistencia c , ϕ y ψ , permeabilidad k , el parámetro de rigidez E_{50}^{ref} y su presión de referencia p^{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_{oed}^{ref} , rigidez elástica de descarga y recarga E_{ur}^{ref} , parámetro de control de la variación de la

rigidez con el confinamiento m , módulo de Poisson ν_{ur} , relación de tensiones verticales y horizontales K_0^{nc} , relación de falla R_f y la presión de preconsolidación POP .

En las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se presenta la comparación de las curvas obtenidas en laboratorio y las modeladas con el *Soil Test*. Se priorizó lograr un mejor ajuste para pequeñas deformaciones. En los ensayos CIUC y para grandes deformaciones se observa un desvío respecto del comportamiento real. Estas diferencias se puede deber a una sobreestimación de la reducción volumétrica plástica del material. En los casos de arenas densas se observa un cambio de curvatura en el gráfico $q-\varepsilon_1$ por lo que el modelo constitutivo pierde validez.

No se observa un buen ajuste en la curva para el ensayo CIUC sobre la muestra con densidad media y $100kPa$ de confinamiento. Es posible atribuir dicha desviación a la baja D_r de la muestra ensayada.

6.3. Etapas de cálculo

Se analizan dos casos en la modelación del relleno de refulado:

- Relleno refulado sin densificar — modelado como arena suelta —.
- Relleno refulado densificado — modelado como arena media —.

En los dos casos se consideraron las mismas etapas de cálculo y dimensiones del terraplén. A continuación se enumeran las etapas:

Etapas inicial En esta etapa se obtuvo el estado tensional del terreno original sobre el que se construirá posteriormente el terraplén y se depositará el material dragado. Se definió un nivel freático uniforme en cota $+2.50m$ SHN. En la figura 6.5a se muestran la geometría, los materiales y las cargas involucrados en la etapa de cálculo.

Construcción del terraplén Se modeló la colocación del terraplén de arena densificada sobre la línea de costa. Se modeló la etapa de cálculo como plástica drenada suponiéndose que la velocidad de construcción de la obra es suficientemente baja como para que las presiones neutras se disipen y no afecten el cálculo. Se consideró el mismo nivel freático que en la etapa anterior — figura 6.5b —.

Relleno refulado Se modeló la deposición del material dragado. Dado que la relación de peso suelo/agua esperable es aproximadamente del 30% se consideró un incremento del nivel freático dentro del recinto hasta cota $+8.30m$, coincidente con el nivel de los vertederos de alivio. Se modeló esta etapa considerando el flujo de agua en régimen permanente. Se simuló la etapa de cálculo como plástica no drenada suponiéndose que la velocidad de llenado es suficientemente alta como para que las presiones neutras no se disipen e influyan en el cálculo.

En la figura 6.6a se muestran la geometría, los materiales y las cargas involucrados en la etapa de cálculo.

Consolidación del relleno refulado Se simuló un proceso de consolidación en el que se analizó la influencia de la disipación de las presiones neutras en los desplazamientos y los factores de seguridad — figura 6.6b —. Se consideró la misma geometría que en la etapa anterior, se modeló el comportamiento del recinto de refulado para los dos casos propuestos y se compararon los asentamientos y desplazamientos obtenidos .

Sobrecarga parcial instantánea Con el objetivo de analizar el efecto de una carga dinámica en el material refulado se modeló una etapa plástica no drenada con una sobrecarga de $25kPa$. Se consideró la misma geometría y nivel freático que en la etapa anterior. Se modeló a la carga con una variación lineal con el fin de evitar problemas generados por la resolución numérica.

Sobrecarga de uso Con el objetivo de analizar el efecto de los contenedores en condiciones de servicio se modeló una etapa plástica no drenada con una sobrecarga de $41kPa$ sobre toda la superficie del refulado. En correspondencia con el drenaje del recinto, el nivel freático se redujo a la cota original $+2.50m$ SHN.

6.4. Factores de seguridad

Se calculó el factor de seguridad numérico en cada etapa de cálculo. El factor de seguridad numérico es el factor con el cual se reducen los parámetros resistentes de los materiales y se produce la falla de la estructura. En la tabla 8 se informan los resultados obtenidos en los dos casos estudiados.

En el pliego de especificaciones técnicas de la obra se establecen valores mínimos de factores de seguridad, 1.30 para condiciones temporales y mayores a 1.50 para condiciones definitivas. Se observa el colapso — $FS < 1$ — en la etapa de sobrecarga instantánea para el caso de arena suelta. Para el caso de arena densa el factor de seguridad obtenido — 1.09 — no verifica el valor requerido por el pliego de especificación.

En las figuras 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 y 6.12 se muestran los mecanismos de falla asociados a cada etapa de cálculo para cada uno de los casos analizados.

6.5. Deformaciones

Mediante el análisis por elementos finitos se obtuvieron los desplazamientos esperables en el coronamiento del terraplén y los asentamientos del recinto. Se observa que los asentamientos esperables para el depósito de arena suelta son aproximadamente un 15 % mayores que para la arena medianamente densa — tabla 9 —. Por otro lado, los desplazamientos del terraplén son prácticamente idénticos en ambos casos — tabla 10 —.

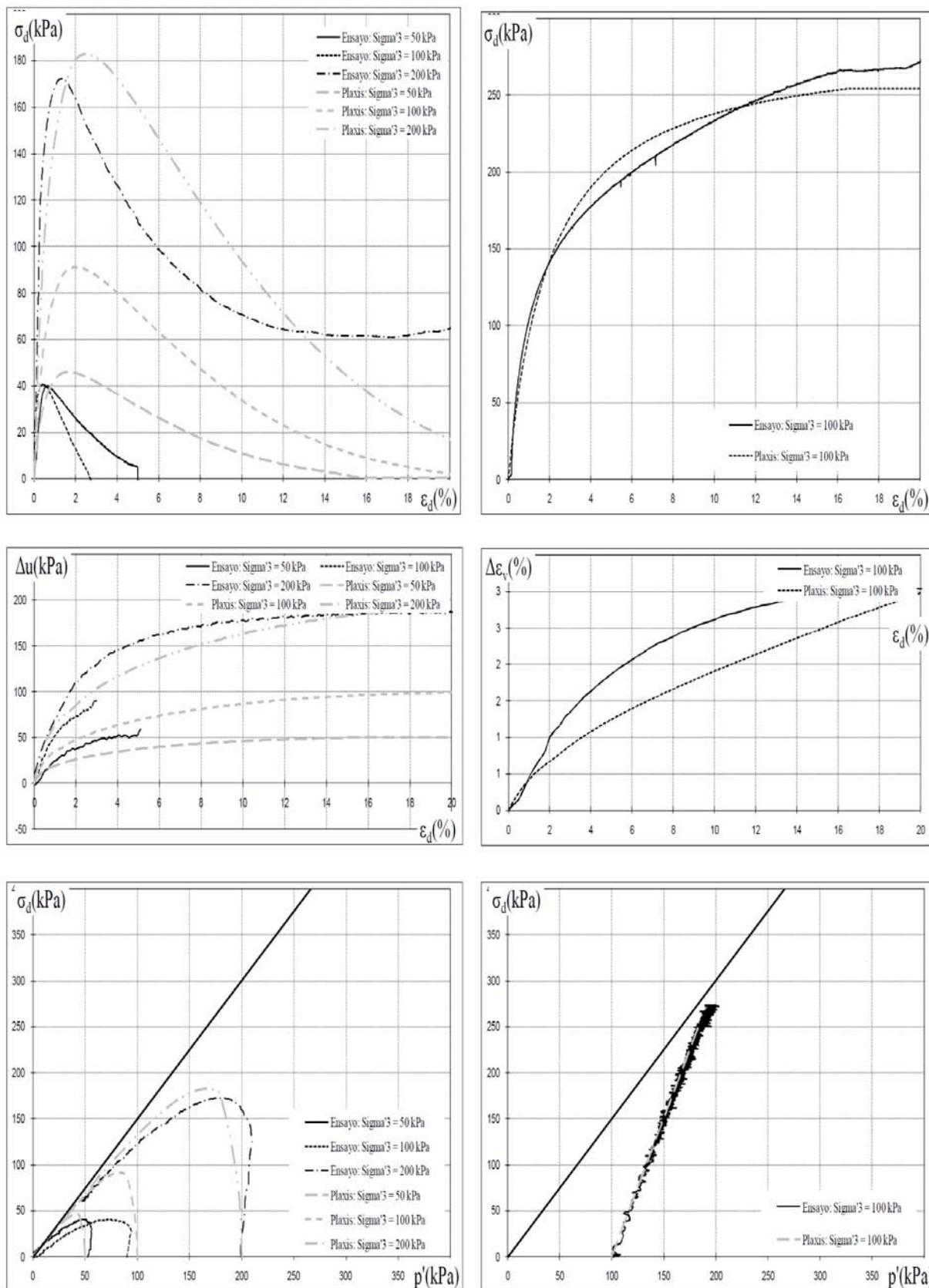


Figura 6.1: Ensayos Tecplata - Arena suelta.

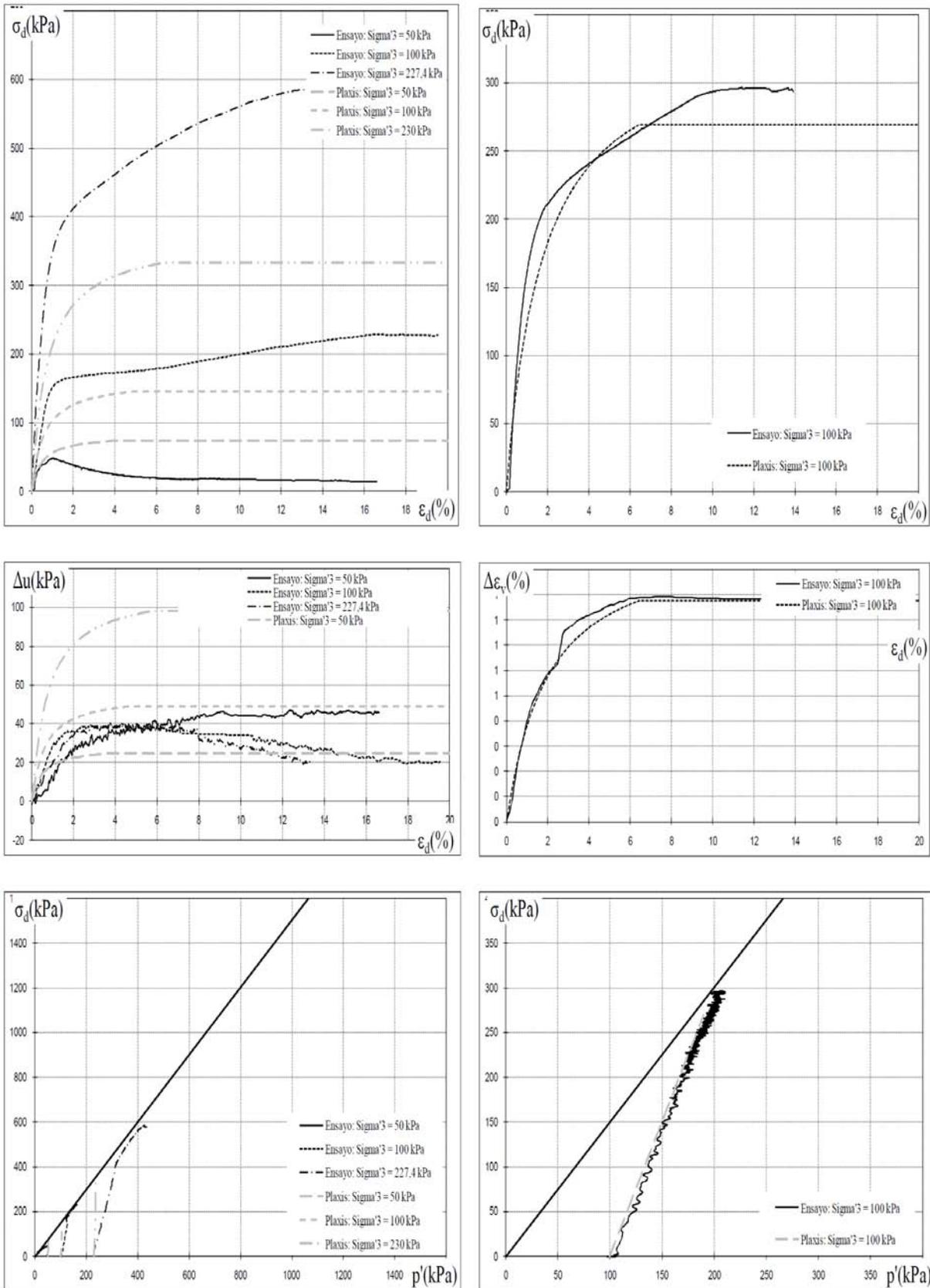


Figura 6.2: Ensayos Tecplata - Arena media.

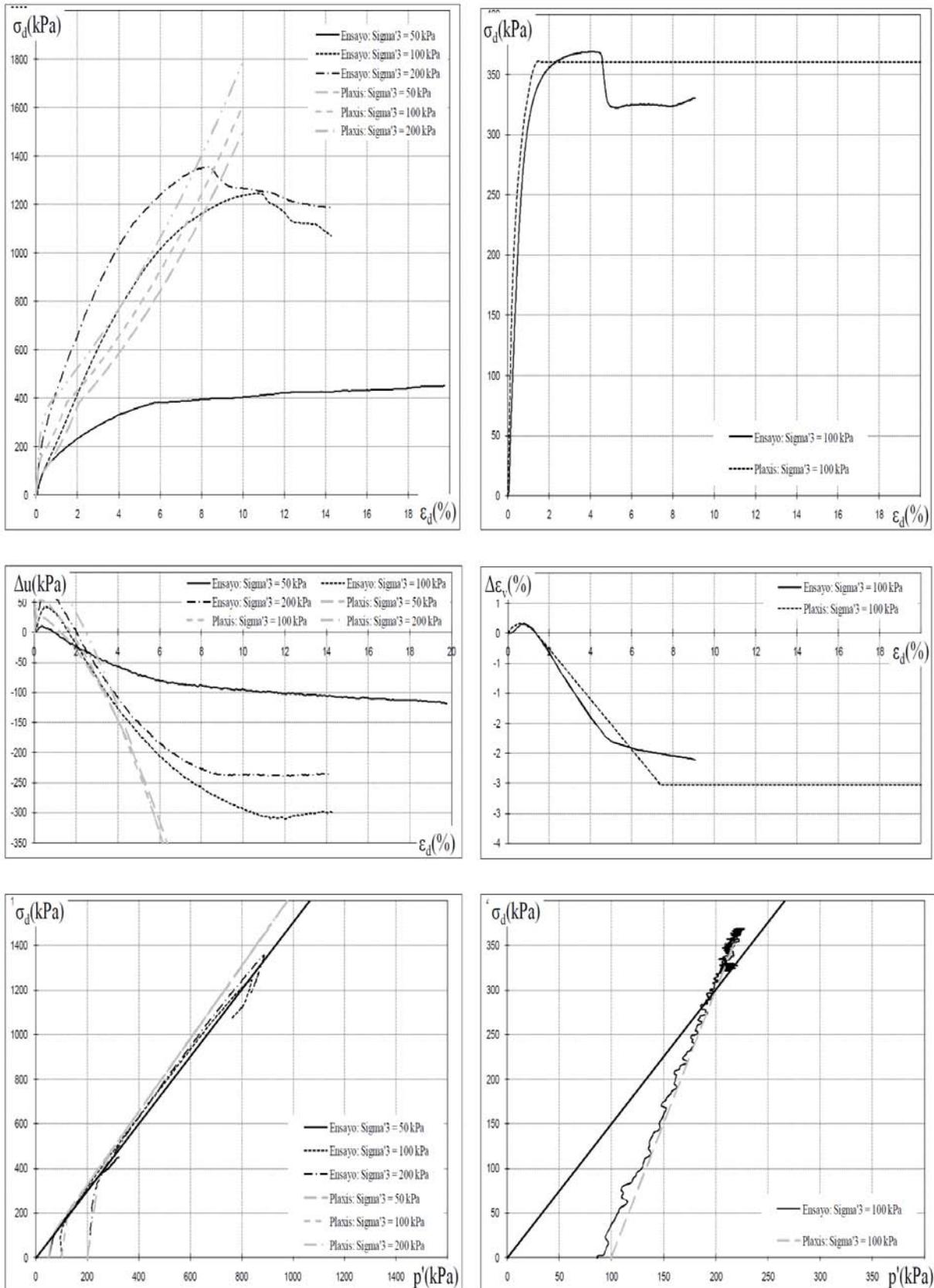


Figura 6.3: Ensayos Tecplata - Arena densa.

Parámetro	Unidad	Suelta	Media	Densa
Modelo	-	HSM	HSM	HSM
Tipo de drenaje	-	No drenado (A)	No drenado (A)	No drenado (A)
γ_{unsat}	kN/m^3	14.70	16.02	17.11
γ_{sat}	kN/m^3	17.90	18.61	19.20
e_{init}	-	1.050	0.880	0.840
Dilatancy cut-off	-	Si	Si	Si
e_{min}	-	0.705	0.705	0.705
e_{max}	-	1.050	0.886	0.886
E_{50}^{ref}	MN/m^2	7.9	12.0	40.5
E_{oed}^{ref}	MN/m^2	7.9	11.0	35.0
E_{ur}^{ref}	MN/m^2	30.0	30.0	85.0
power (m)	-	0.7	0.7	0.5
c_{ref}	kN/m^2	0.1	0.1	0.1
ϕ	$^{\circ}$	34.0	35	40.0
ψ	$^{\circ}$	-3.0	0.0	10.0
ν_{ur}	-	0.20	0.20	0.25
p_{ref}	kN/m^2	100.0	100.0	100.0
K_0^{nc}	-	0.440	0.420	0.500
R_f	-	0.90	0.80	0.80
$k_{x,y,z}$	$m/día$	0.4320	0.4320	0.4320
$K_{0,x}$	-	-	-	-
OCR	-	1.00	1.00	1.00
POP	kN/m^2	0.0	300.0	500.0

Tabla 6: Materiales empleados en el modelo de TecPlata.

Parámetro	Unidad	Fm. Pampeano	Fm. Postpampeano
Modelo		<i>Hardening Soil Model</i>	<i>Hardening Soil Model</i>
Tipo de drenaje	-	Drenado	No drenado
γ_{unsat}	kN/m^3	18.00	17.00
γ_{sat}	kN/m^3	18.00	17.00
e_{init}	-	0.500	0.500
Dilatancy cut-off	-	No	No
e_{min}	-	-	-
e_{max}	-	-	-
E_{50}^{ref}	MN/m^2	90.0	8.0
E_{oed}^{ref}	MN/m^2	110.0	10.0
E_{ur}^{ref}	MN/m^2	200.0	30.0
power (m)	-	0.3	0.8
c_{ref}	kN/m^2	10.0	1.0
ϕ	$^{\circ}$	30.0	25.0
ψ	$^{\circ}$	0.0	0.0
ν_{ur}	-	0.20	0.20
p_{ref}	kN/m^2	100.0	100.0
K_0^{nc}	-	0.500	0.577
R_f	-	0.9	0.9
$k_{x,y,z}$	m/day	0.0432	0.432E-3
$K_{0,x}$	-	0.70	0.57
OCR	-	1.00	1.10
POP	kN/m^2	200.0	0.0

Tabla 7: Materiales empleados en el modelo de TecPlata.

Factores de seguridad		
Etapa	Arena “suelta”	Arena “media”
Construcción del terraplén	1.46	1.46
Relleno refulado	1.38	1.37
Consolidación del relleno	1.36	1.35
Sobrecarga parcial instantanea	<1.00	1.09
Sobrecarga de uso	1.56	1.61

Tabla 8: Factores de seguridad numéricos para las distintas etapas de cálculo.

Asentamientos		
Etapa	Arena “suelta” [m]	Arena “media” [m]
Relleno refulado	0.13	0.12
Consolidación del relleno	0.16	0.14
Sobrecarga parcial instantanea	-	0.22
Sobrecarga de uso	0.26	0.23

Tabla 9: Asentamientos del refulado para arenas sueltas y medias.

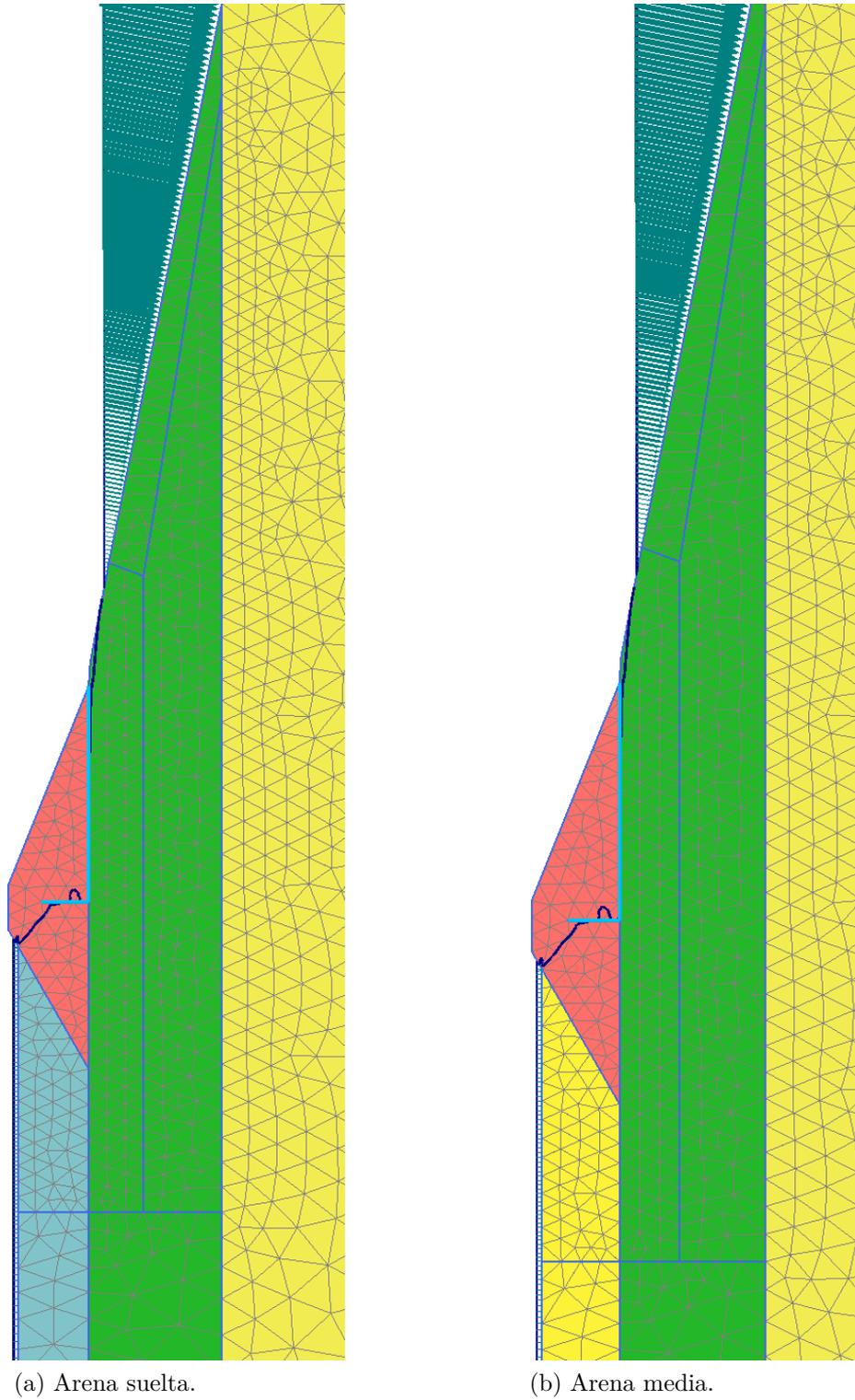


Figura 6.4: Malla de elementos finitos de los rellenos refutados.

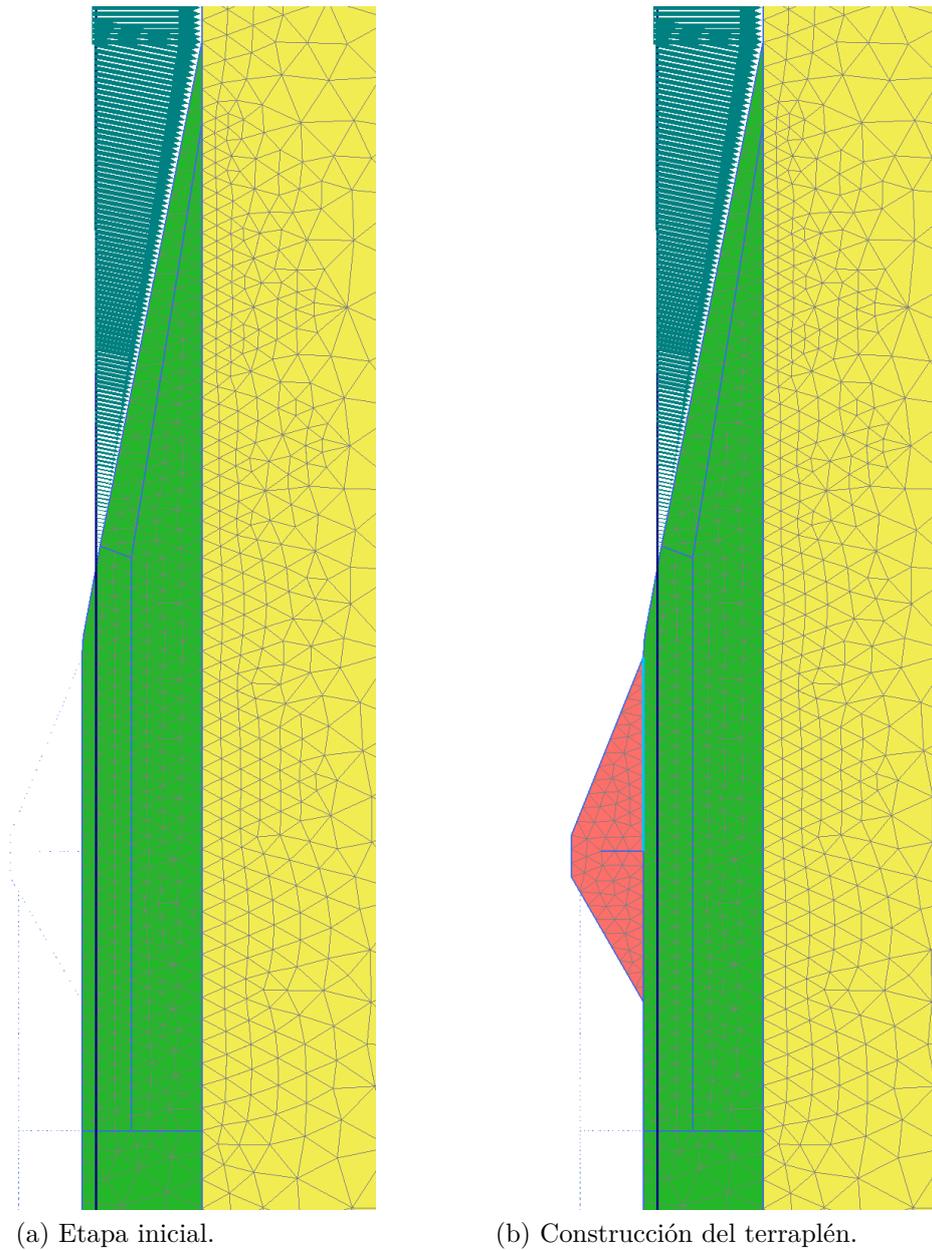


Figura 6.5: Malla de elementos de las primeras dos etapas de construcción.

Desplazamientos del terraplén		
Etapa	Arena "suelta" [m]	Arena "media" [m]
Construcción del terraplén	0.17	0.17
Relleno refulado	0.18	0.18
Consolidación del relleno	0.20	0.20
Sobrecarga parcial instantanea	-	0.24
Sobrecarga de uso	0.22	0.22

Tabla 10: Desplazamientos del terraplén para arenas medias y sueltas.

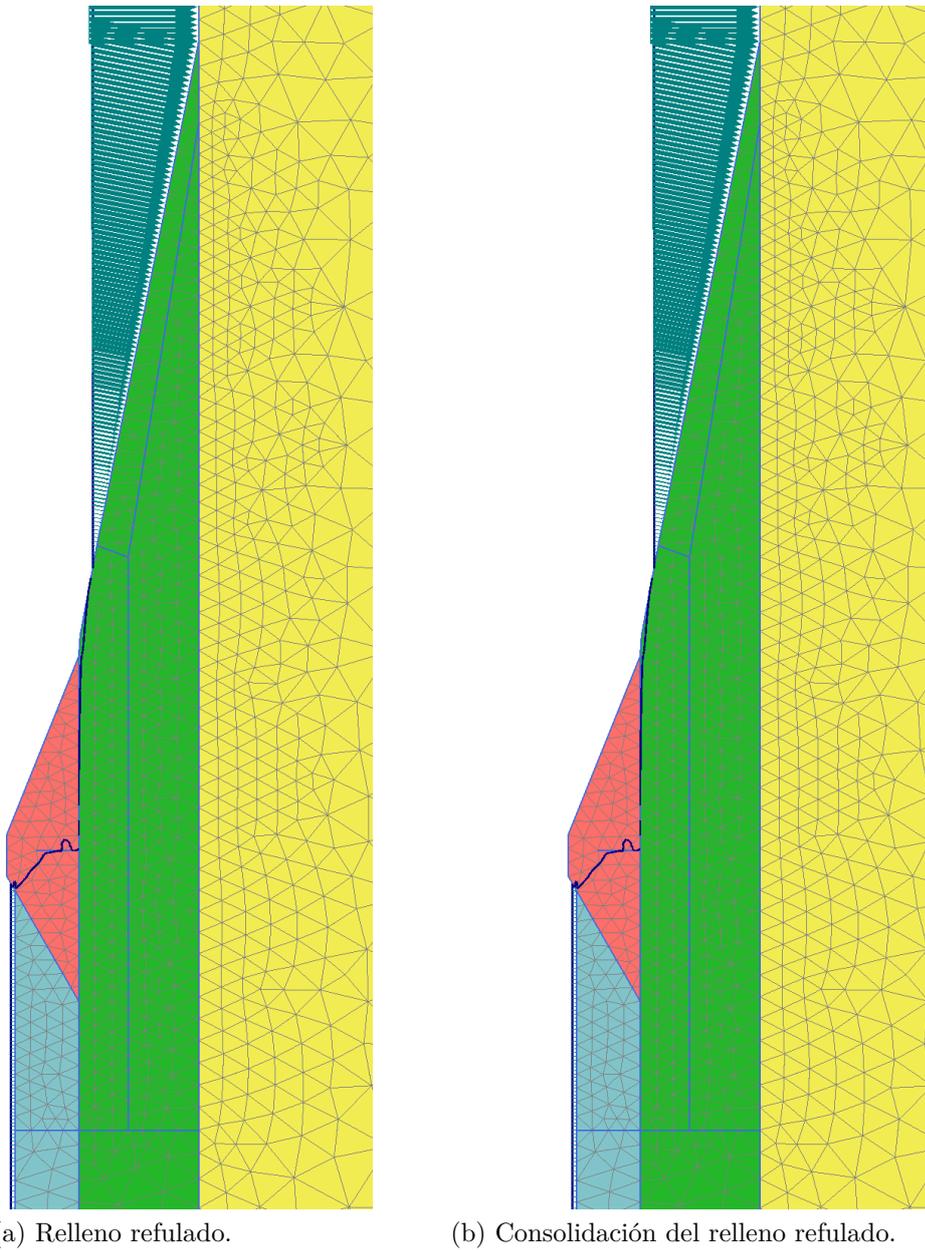


Figura 6.6: Malla de elementos de la tercera y cuarta etapa de construcción.

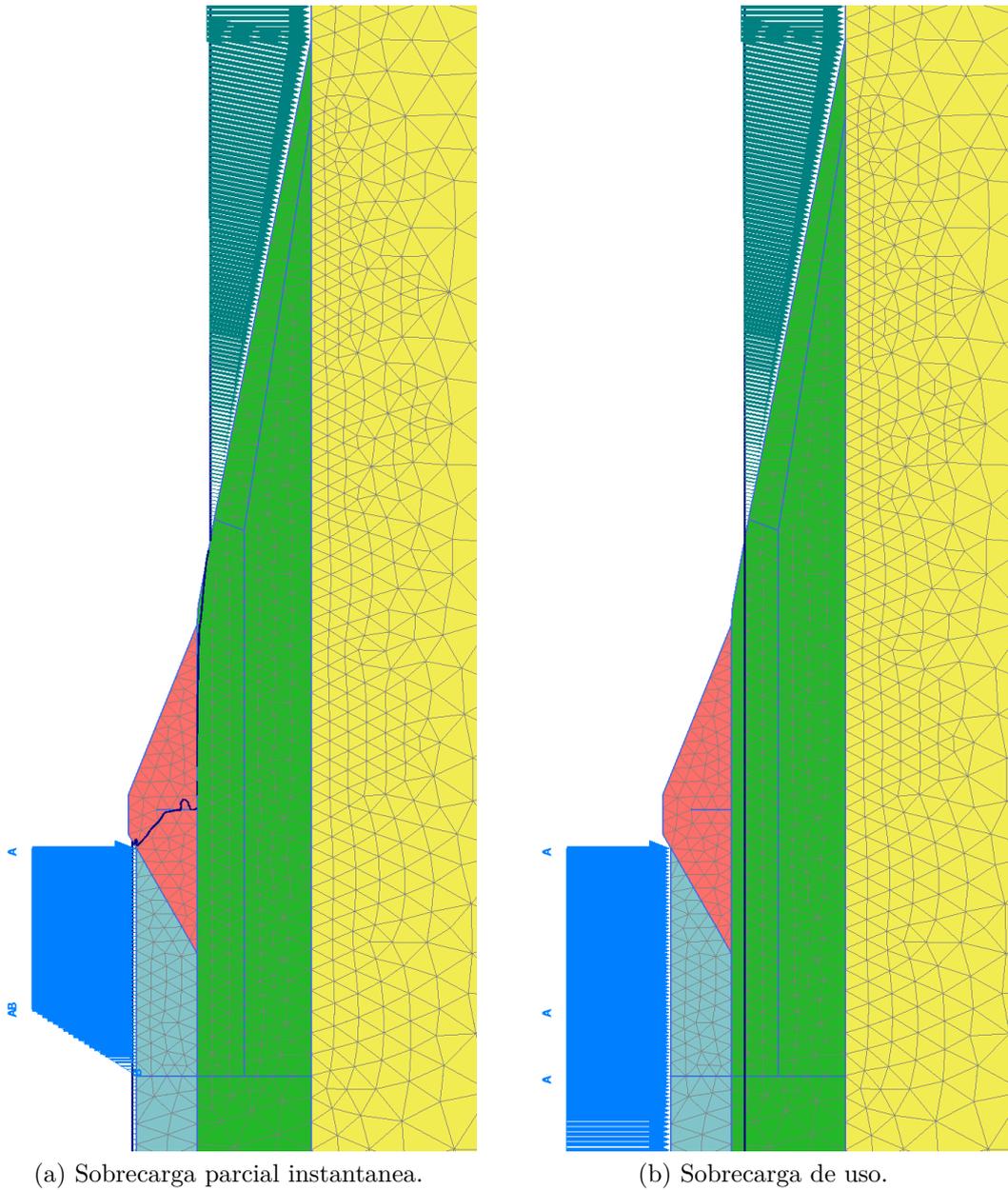


Figura 6.7: Malla de elementos de la quinta y sexta etapa de construcción.

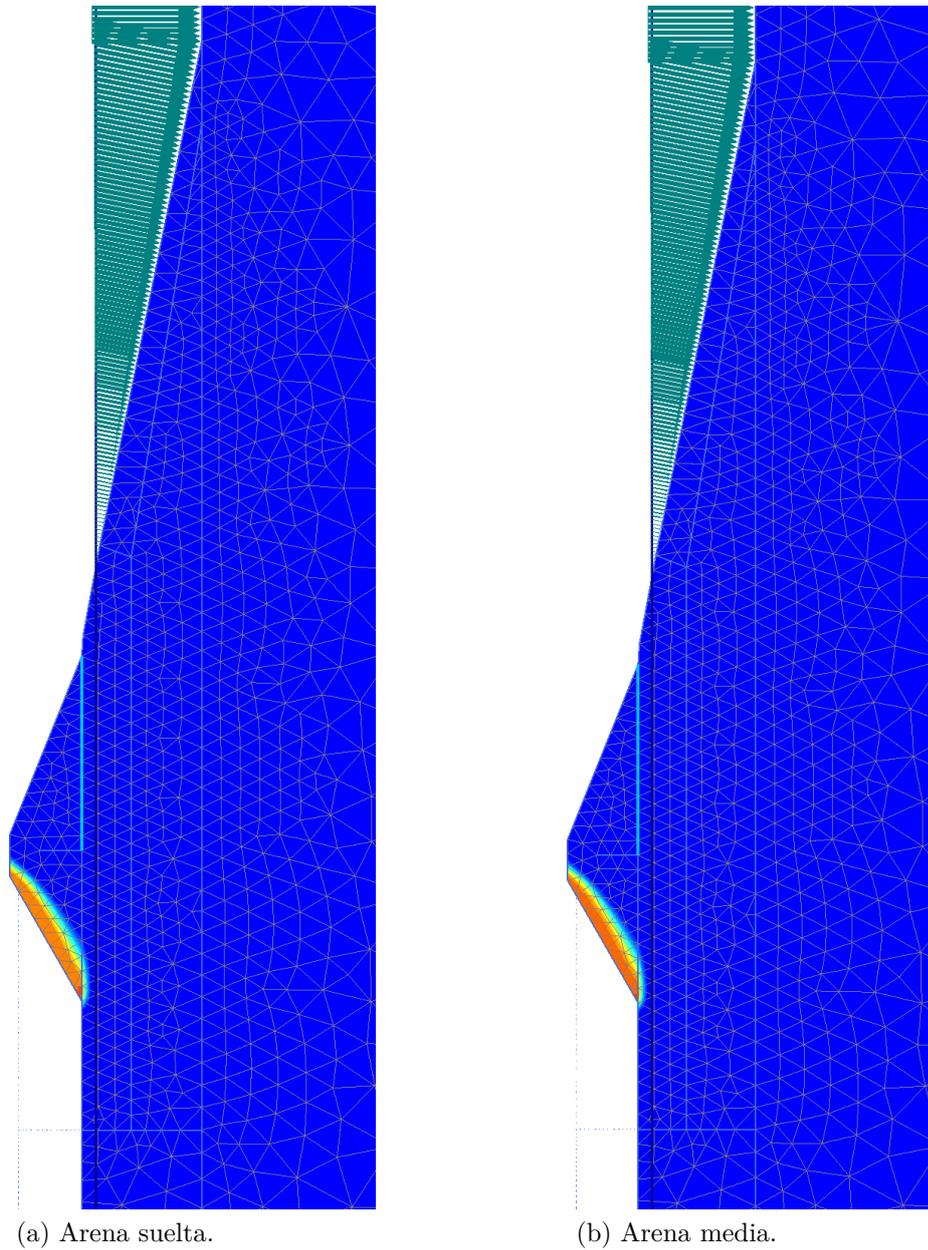


Figura 6.8: Construcción del terraplén.

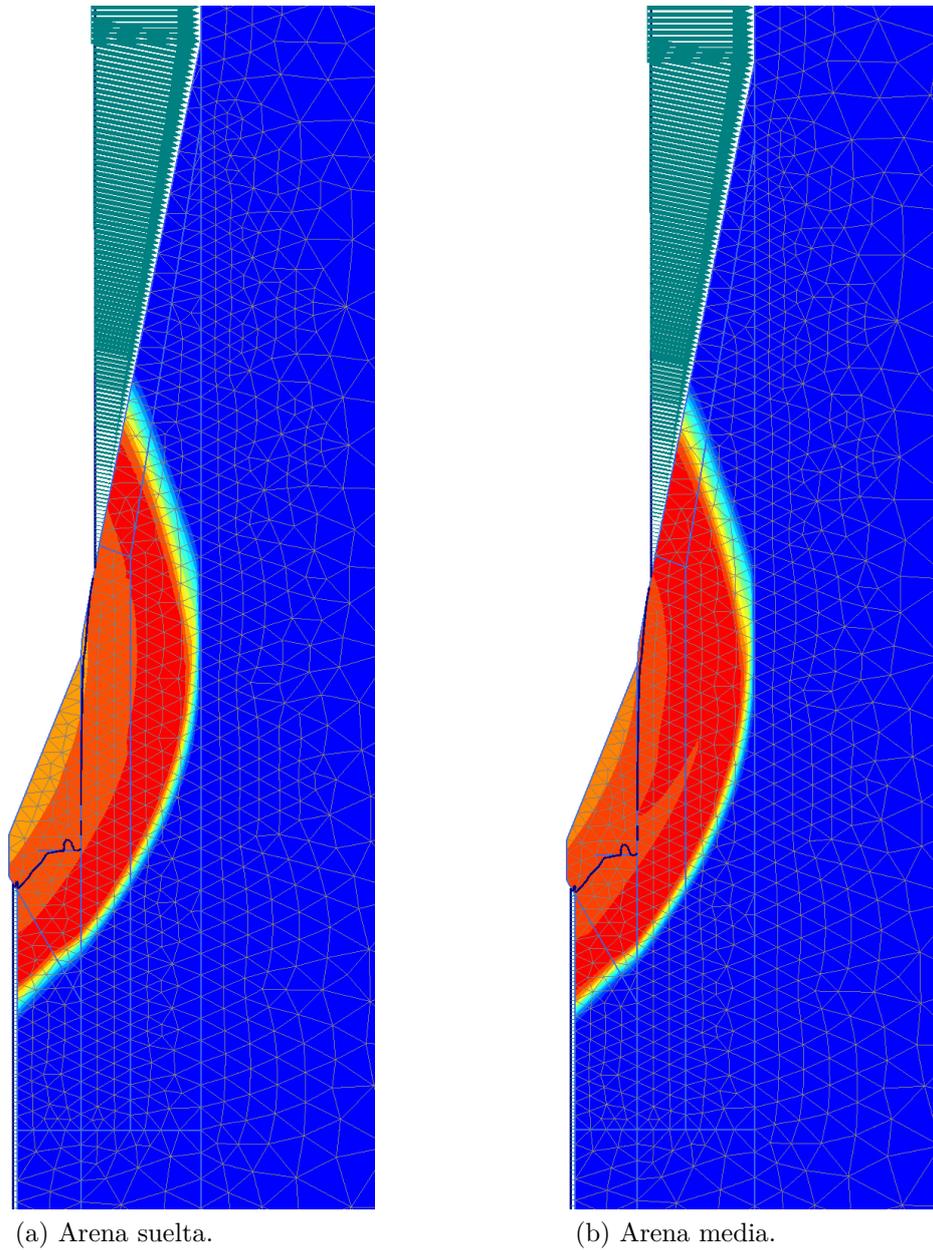


Figura 6.9: Relleno refulado.

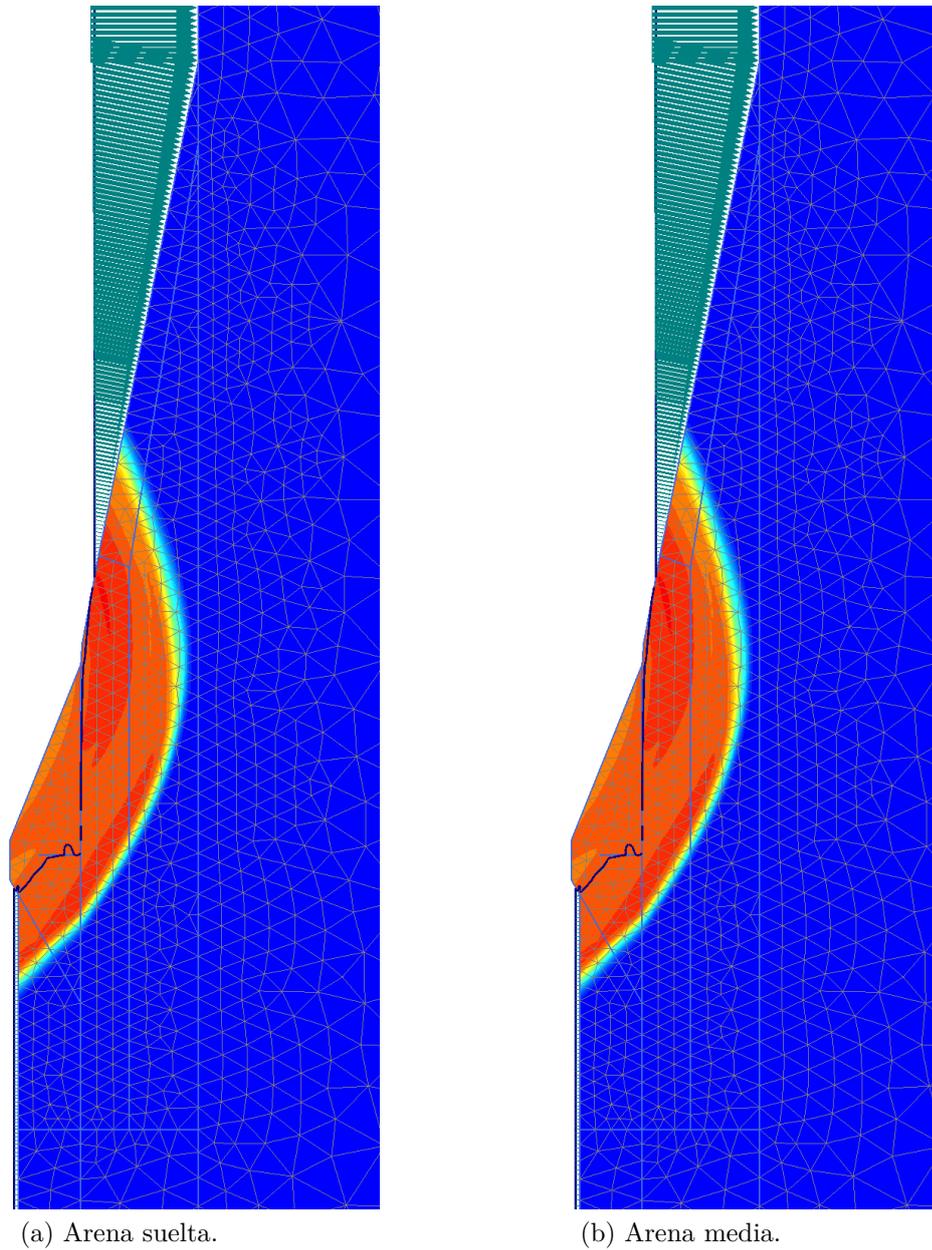


Figura 6.10: Consolidación del relleno refulado.

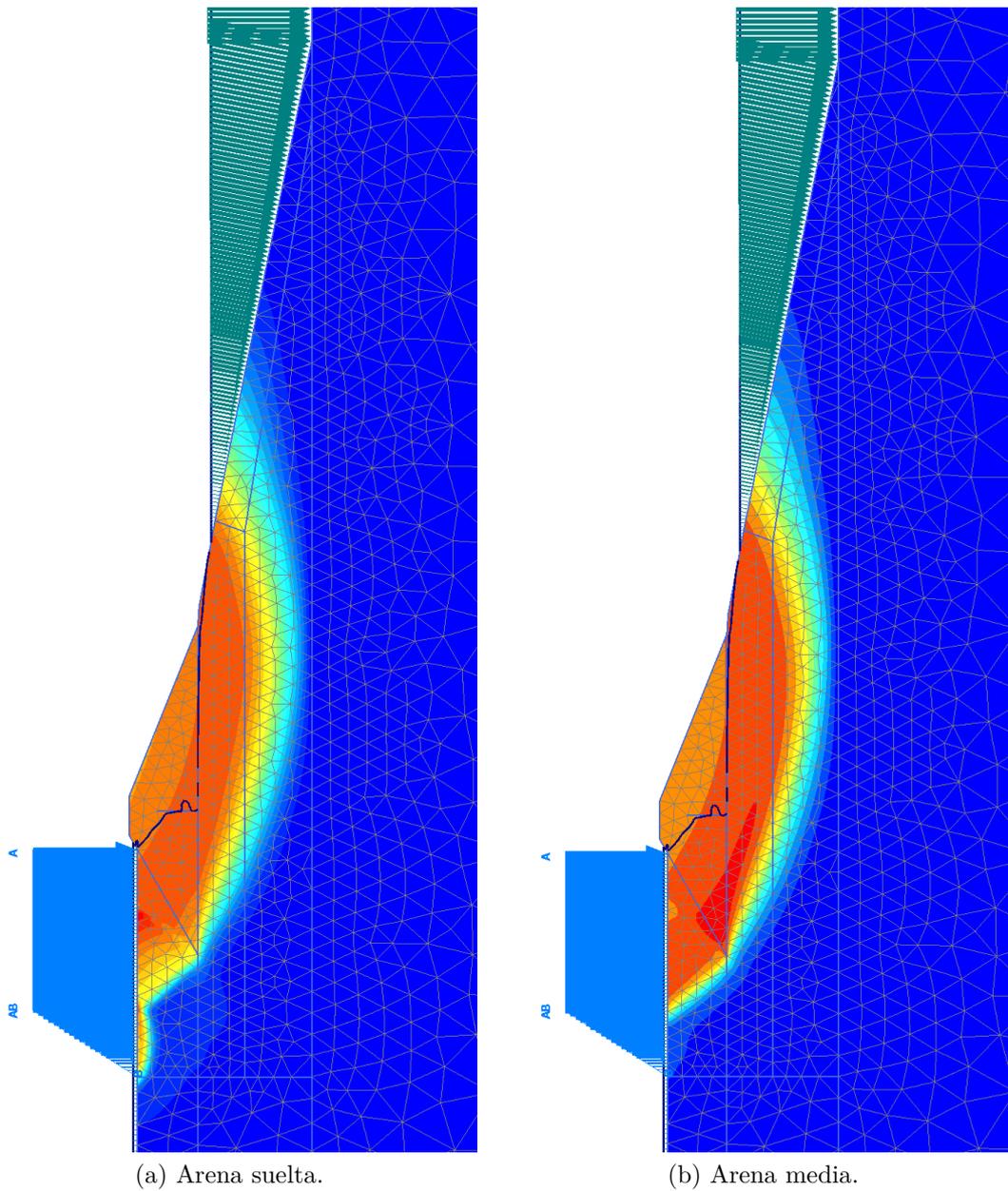


Figura 6.11: Sobrecarga parcial instantanea.

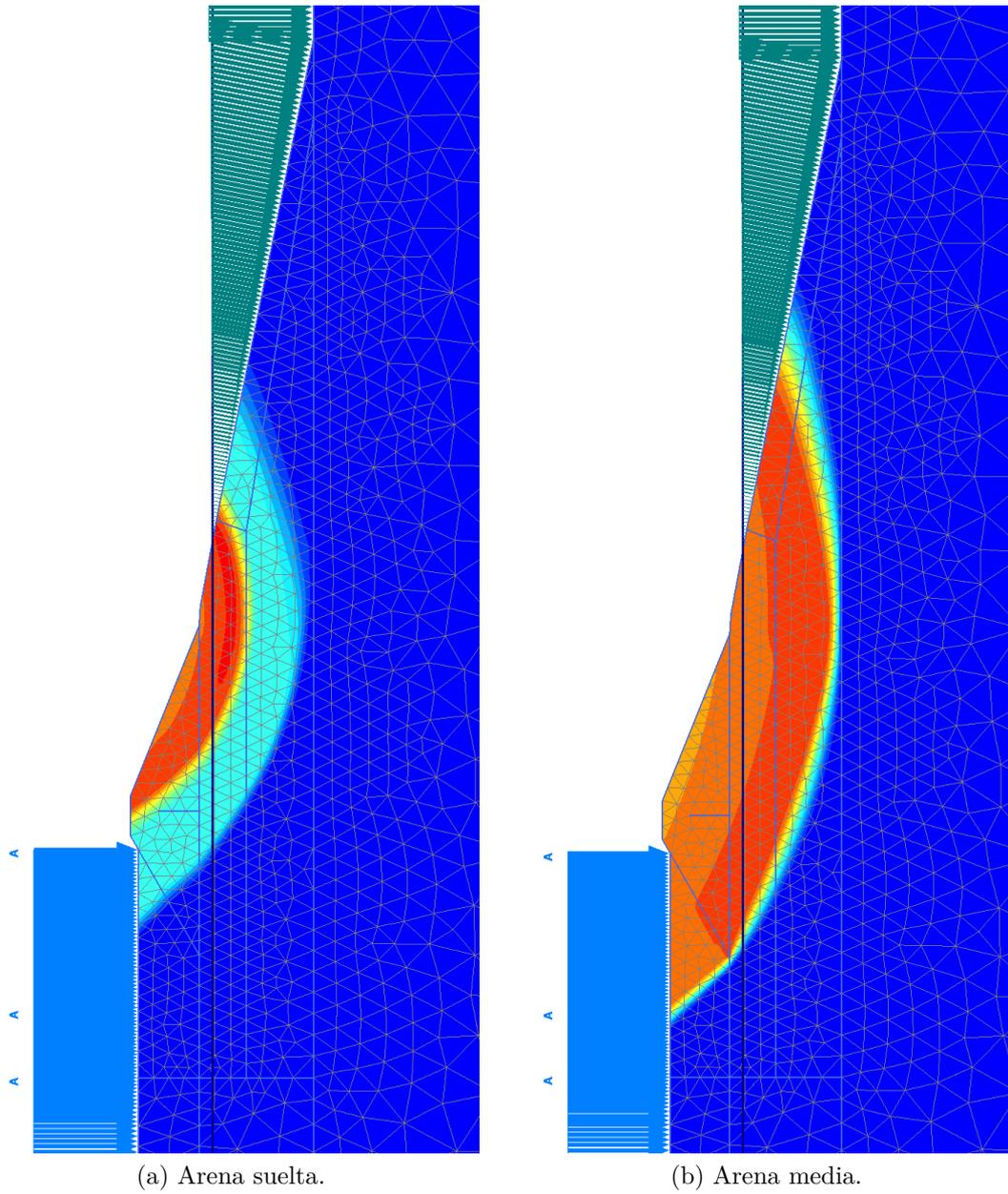


Figura 6.12: Sobrecarga de uso.

7. Conclusiones

Se estudiaron las características físicas y mecánicas de la arena de refulado utilizada en la construcción de la terminal de contenedores TecPlata, 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 [41, 42]. 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 [38, 39, 32, 33, 34, 37, 40, 36]. Se realizó el método expeditivo de la probeta inclinada [25].

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 200kPa . Los ensayos drenados se realizaron para muestras con las mismas densidades relativas y a una presión de confinamiento efectivo nominal de 100kPa .

7.2. Resultados

Se considera un valor de $\phi_c = 33,7^\circ$ 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 ϕ_c informado. Dados los valores obtenidos del parámetro B , es posible atribuir estos resultados a la saturación parcial de las muestras.

Se observa una diferencia de $2,9^\circ$ en los valores de ϕ_c obtenidos mediante el método de la bureta — $\phi_c = 30,8^\circ$ — y los ensayos triaxiales.

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 11.6% 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 0.31 y 0.79 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 [41], 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 simularon las etapas constructivas de la terminal de contenedores del proyecto Tecplata con el programa de elementos finitos *Plaxis 2D*. Se calibró el modelo constitutivo *Hardening Soil Model* — HSM — con los parámetros obtenidos de los ensayos triaxiales realizados durante la etapa de caracterización mecánica. Se generaron tres juegos de parámetros para representar el comportamiento según la D_r .

La simulación consta de las siguientes etapas: construcción del terraplén, relleno con material refulado, consolidación del relleno refulado, sobrecarga parcial instantánea y sobrecarga de uso. En la etapa de relleno se consideraron dos condiciones posibles para el material de refulado — arena suelta y medianamente densa —.

Para la simulación con relleno de refulado medianamente denso, se obtuvieron coeficientes de seguridad mayores a 1.3 para etapas constructivas y 1.5 en etapas definitivas. En el caso suelto, se observa la falla por licuación en el relleno en la etapa de sobrecarga parcial instantánea. En el resto de las etapas constructivas se obtuvieron coeficientes de seguridad satisfactorios para el relleno suelto. No se realizó la comparación de los resultados numéricos con las mediciones *in situ* dado que estas etapas no se han realizado al momento de la redacción.

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, Hagggar. (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] Ledesma O. N. (2008) "Calibración del *Cam clay* para suelos del Postpampeano". <http://materias.fi.uba.ar/6408/> - FIUBA (2008), 3-28.
- [20] Mc Manus K. & Davis R. (1997) "Dilation-induced pore fluid cavitation in sands". Geotechnique 47 (1): 173-177.
- [21] Núñez E. (2010) "Resistencia no drenada y licuación en arenas". XX CAMSIG, Mendoza, Argentina, 1-5.
- [22] *Plaxis* (2010) "Material Models Manual". *Plaxis Manual* (2010), 49-60.
- [23] Poulos S. (1981) "The steady state of deformation". ASCE J Geot Eng Div 107 (5): 553-562.
- [24] Powrie W. (1997) "Soil Mechanics, Concepts and applications". E & FN Spon, London (1997).
- [25] Santamarina J. & Cho, G. (2001) "Determination of Critical State". Geotechnical Testing Journal GTJODJ 24(2): 185-192.
- [26] Schanz T. & Vermeer P.A. (1998) "On the stiffness of sands". Pre-failure deformation behaviour of geomaterials (1998), 383-387.
- [27] Schanz T., Vermeer P.A. & Bonnier P.G. (1999) "The hardening soil model: Formulation and verification". Beyond 2000 in Computational Geotechnics (1999), 281-296.
- [28] Sfriso A. (2008) "Caracterización mecánica de materiales constituidos por partículas". FIUBA (2010), 7-114.
- [29] Terzaghi K. (1948) "Soil Mechanics in Engineering Practice". Wiley, New York (1996), 3rd Ed.

- [30] Verdugo R. & Ishihara K. (1996) “The steady state of sandy soils”. *Soil Found*, 36 (2): 81-91.
- [31] Wood D. M. (1990) “Soil behaviour and critical state soil mechanics”. Cambridge University Press, USA (1990), 1ra edición, 1-251.
- [32] D422 - 63 (2007) “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”.
- [33] D854 - 10 “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”.
- [34] D1140 - 00 (2006) “Standard Test Method for Amount of Material in Soils Finer Than the No. 200 (0.075mm)”.
- [35] D2216 - 10 “Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass”.
- [36] D2487 - 11 “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”.
- [37] D2488 - 09a “Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure)”.
- [38] D4253 - 00 (2006) “Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table”.
- [39] D4254 - 00(2006)e1 “Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density”.
- [40] D4318 - 10 “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”.
- [41] D4767 - 11 “Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils”.
- [42] 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-SI¹ y XLR² 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.

¹Conexión tipo telefónica.

²Conectores típicos de audio.

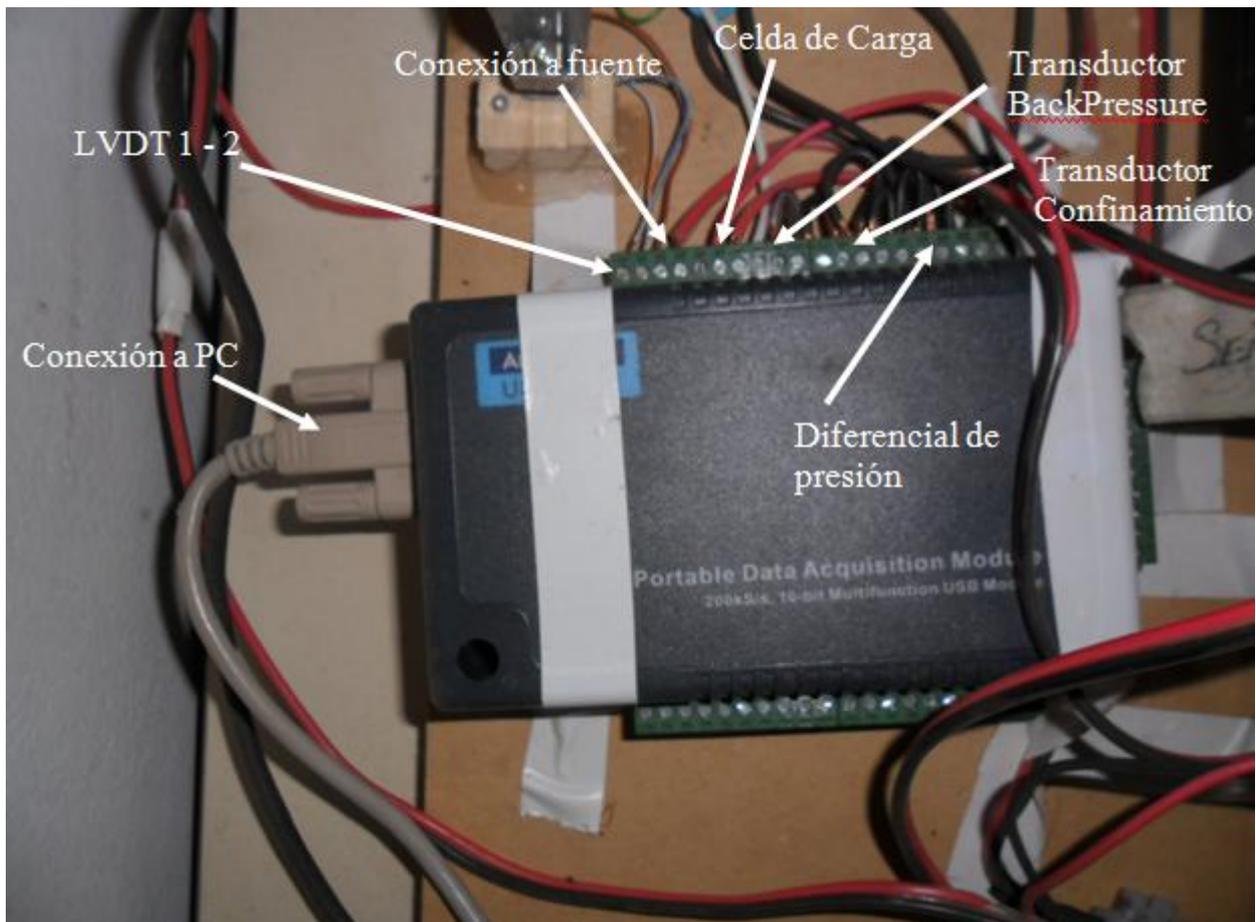


Figura 2.1: Placa adquisidora Advantech.



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 armónicos³.

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 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 560Ω 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 calibrada⁴.

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

⁴El valor de constante obtenido difiere en

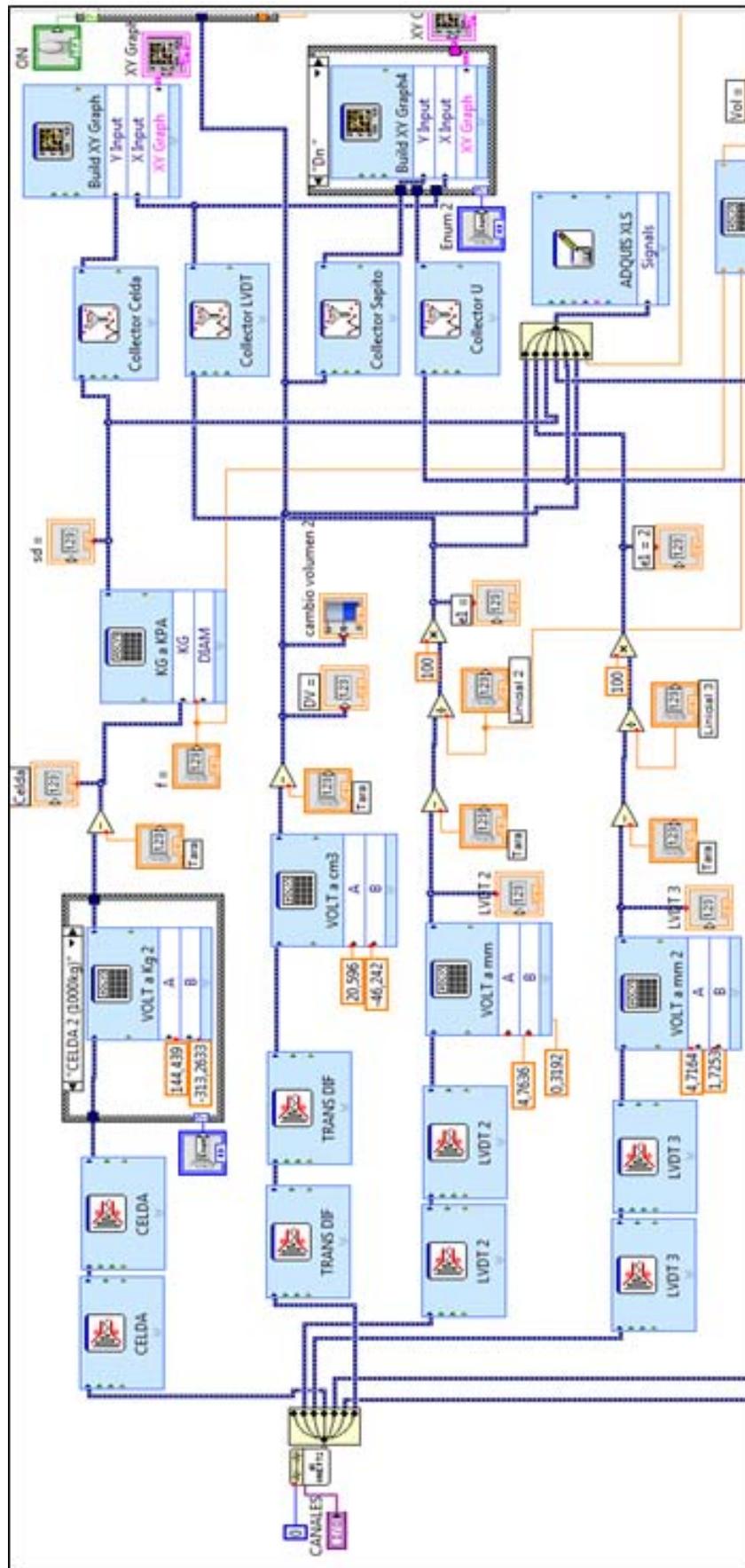
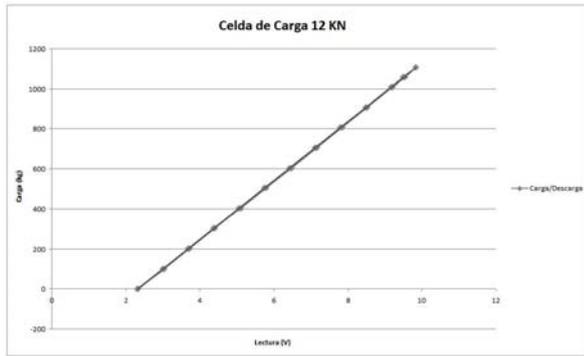


Figura 2.3: Diagrama de bloques en LabVIEW.

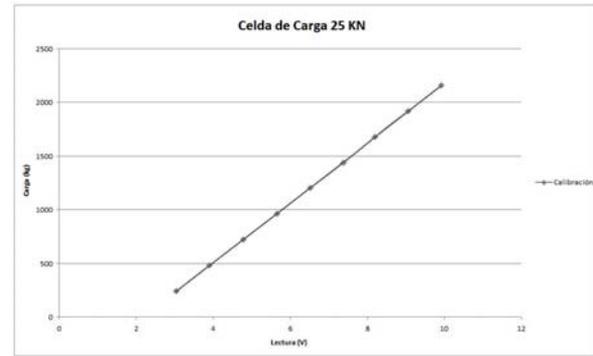


$$R^2 = 0,9999$$

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

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

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



$$R^2 = 0,9999$$

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

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

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

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

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

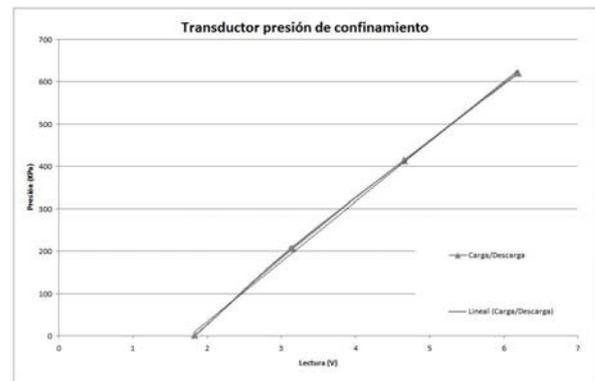


Figura 2.7: Transductor absoluto de presión.

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-.

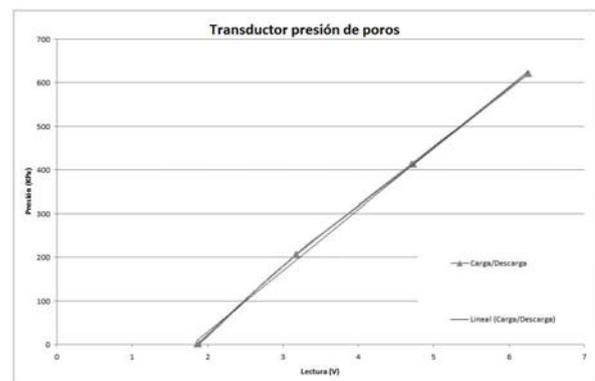


$$R^2 = 0,9986$$

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

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

Figura 2.8: Calibración del transductor de presión.



$$R^2 = 0,9985$$

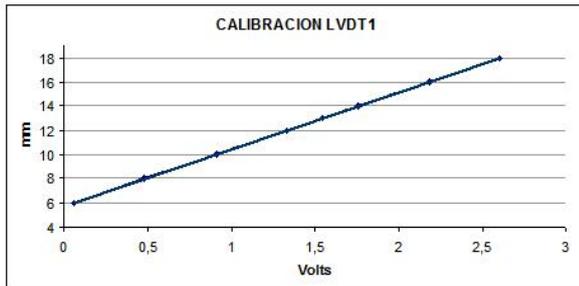
$$k = 140,71 \text{ kPa/V}$$

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

Figura 2.9: Calibración del transductor de presión.



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

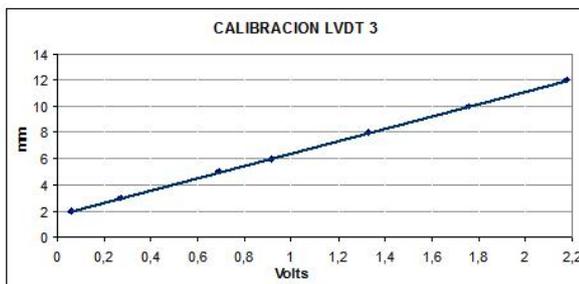


$$R^2 = 1$$

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

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

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:

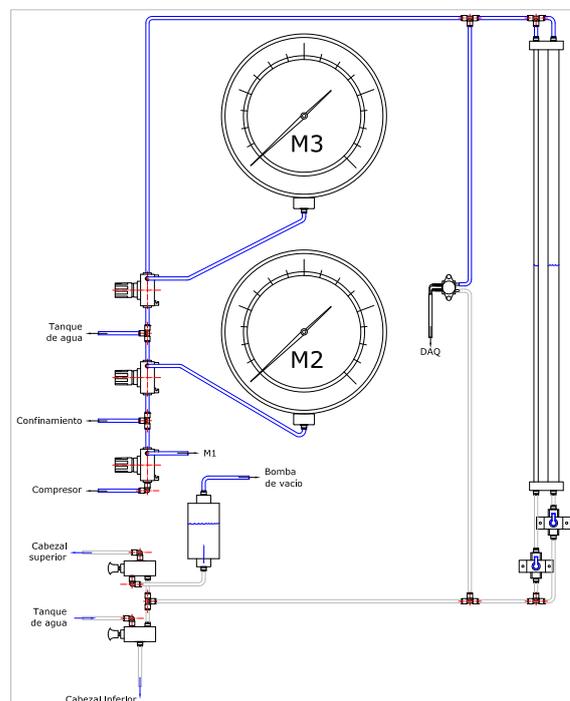


Figura 2.15: Tablero de instrumentos.



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 cm³

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 (ρ). 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.

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

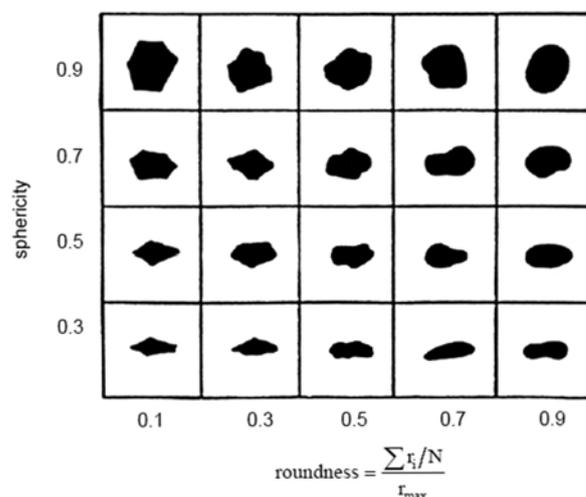


Figura 4.1: Carta de identificación de granos.

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).

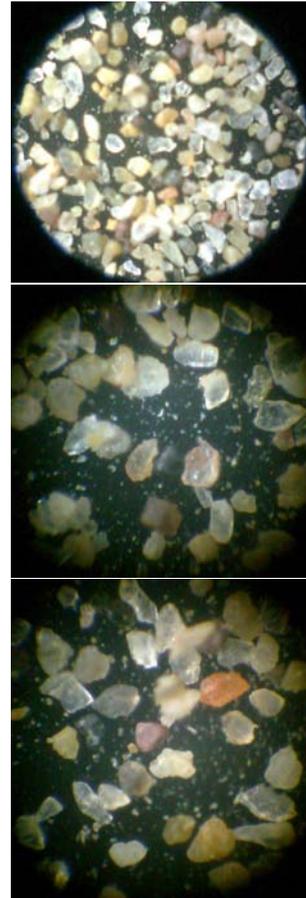


Figura 4.4: Tipos de granos de la arena Tecplata.



Figura 4.3: Tipos de granos de la arena Carena.

	S	R	ρ
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 mm² y luego se lo introdujo en el equipo. Posteriormente se irradió la muestra con un haz de rayos monocromático con un ángulo de ataque (θ) 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 2θ .

4.2.2. Interpretación

Conocido el valor de θ , 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).

- λ : longitud de onda de los rayos X (1,54060 Å).
- d : distancia basal (Å).
- θ : 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.

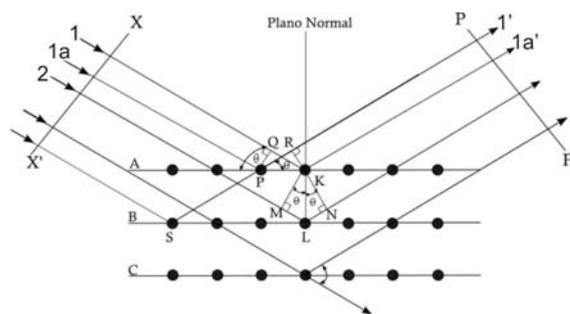


Figura 4.6: Reflexión de rayos X. Ley de Bragg.

Grupo	Subgrupo	Mineral
Carbonatos		Calcita
		Rodocrosita
		Corindón
Óxidos	Limonitas	Cuarzo
		Goethita
		Hematites
		Magnetita
		Anortita
Silicatos	Feldespatos	Albita
	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 $N^\circ 200$ 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.

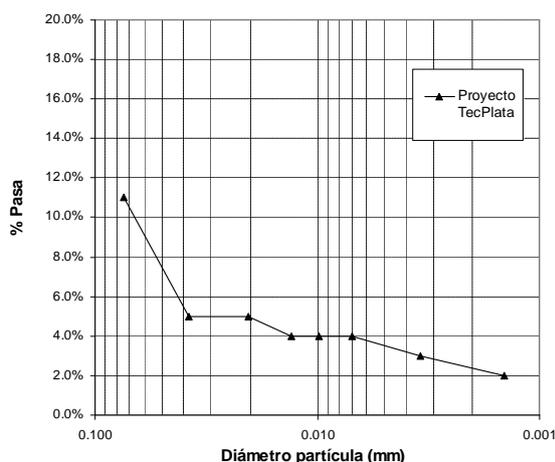


Figura 4.10: Hidrometría arena Carena.

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° , 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 cm³ 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, Haggard. (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

ENSAYO GRANULOMETRÍA

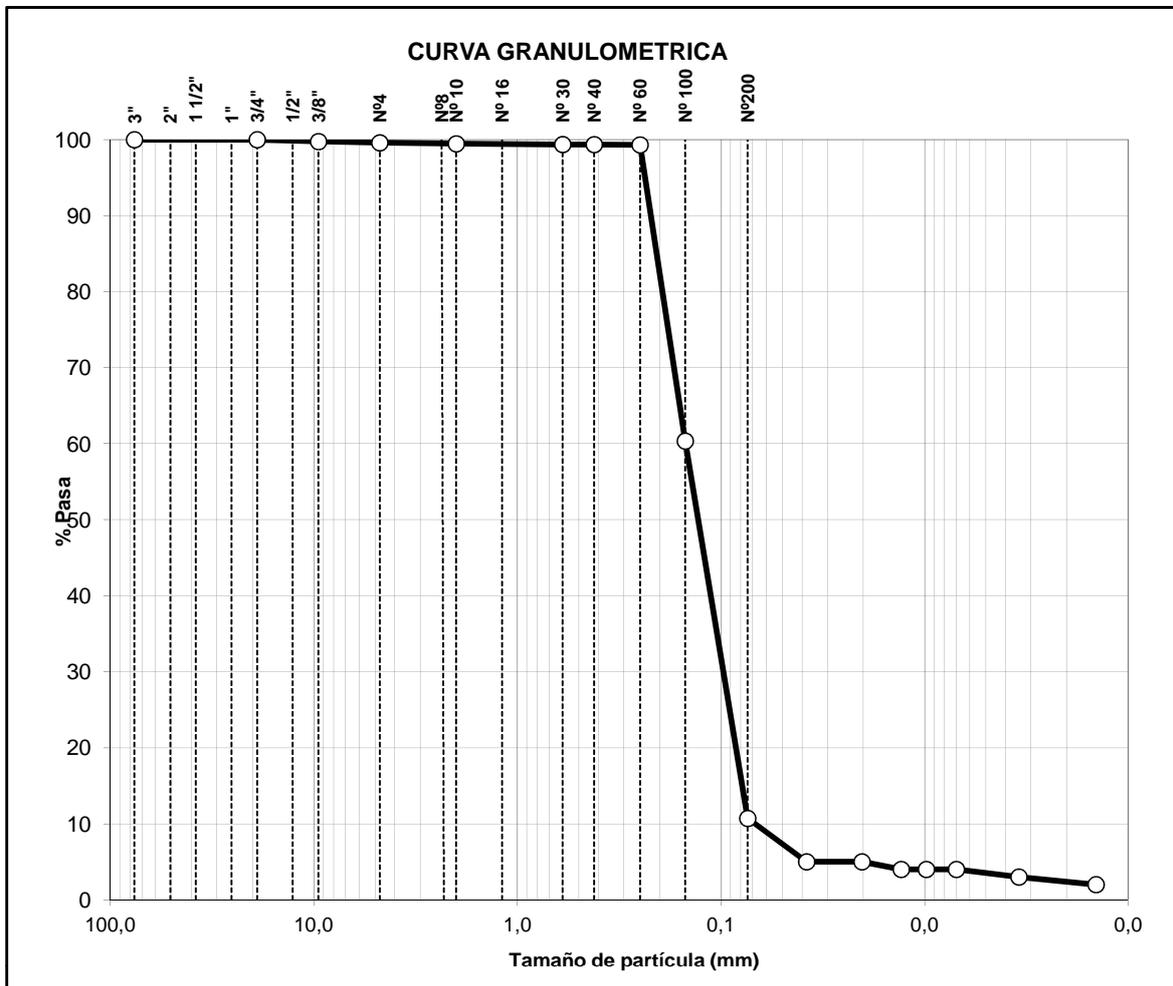
Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ingeniería
 Lab. de Materiales y Estructuras - Área Mecánica de Suelos



Fecha: 07/11/2011 Condiciones higrótérmicas: ARENA TECPLATA
 Operador: I. Ezama, I. Vernengo Lezica Normas de trabajo: ASTM D422-63R02

CRIBAS & TAMICES		RET.	PASANTE	
Nro	(mm)	(gr)	(gr)	(%)
3"	76,20	0,00	3000,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	3000,00	100,00
3/8"	9,50	7,37	2992,63	99,75
Nº4	4,75	4,83	2987,80	99,59
Nº10	2,00	4,02	2983,78	99,46
Nº30	0,60	2,82	2980,96	99,37
Nº40	0,42	0,28	2980,68	99,36
Nº60	0,25	1,13	2979,55	99,32
Nº100	0,15	1169,00	1810,55	60,35
Nº200	0,074	1609,50	321,34	10,71
	0,04	230,81	90,53	5,00
	0,02	0,00	90,53	5,00
	0,01	18,11	72,42	4,00
	0,01	0,00	72,42	4,00
	0,01	0,00	72,42	4,00
	0,00	18,11	54,32	3,00
	0,00	18,11	36,21	2,00
D₆₀	D₃₀	D₁₀	C_u	C_c
0,15	0,07	0,02	7,2	1,68
CLASIFICACION USCS			SP- SM	

Tamaño de muestra: 3000 gr
 Tamaño máximo: 9,50 mm
 Forma de las partículas:
 Preparación: Tamizado por vía húmeda
 Fracción gruesa : 89,3%
 Pasa #200 : 10,7%
 Retenido #200 : 89,3%
 Retenido #4 : 0,41%
 L. Atterberg : LL: S/D
 LP: S/D



ENSAYO HIDROMETRÍA

Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ingeniería
 Lab. de Materiales y Estructuras - Área Mecánica de Suelos

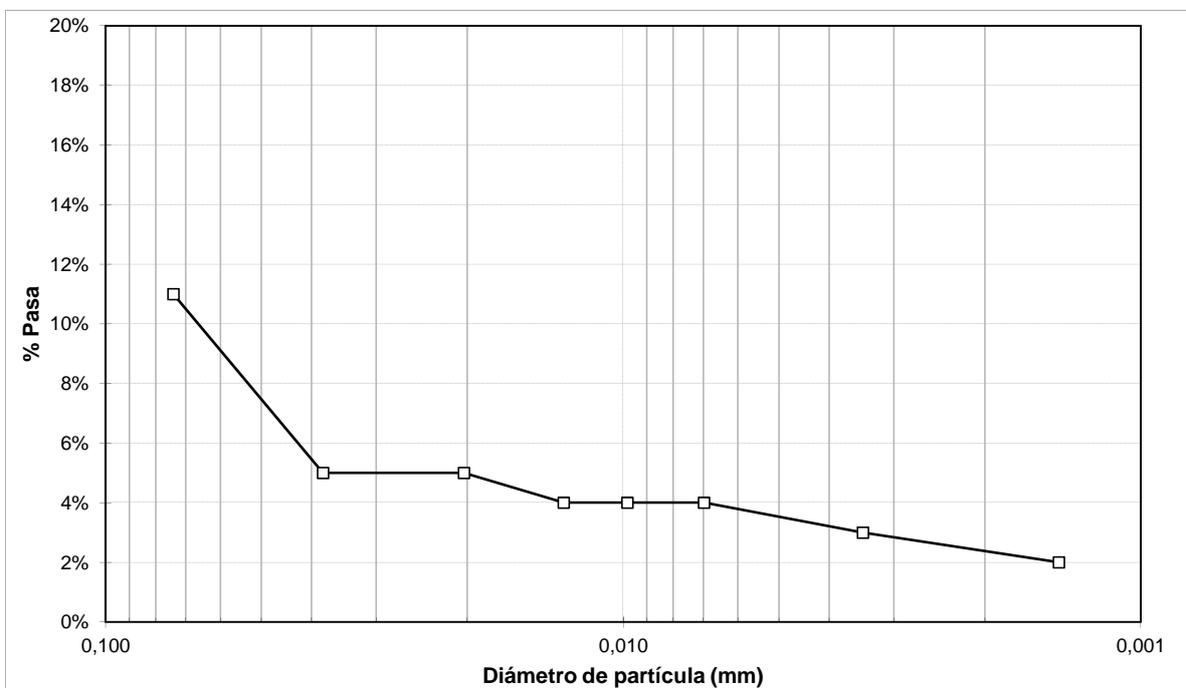


Fecha:	16/11/2011	Condiciones higrotérmicas:	
Operador:	I. García Mendive, G. Rellán	Normas de trabajo:	ASTM D422-63R02

ARENA TECPLATA

LECTURAS HIDROMETRO					DISTRIB. TAMAÑOS		
Muestra	R	R'	L	D			
					menores a	0,074 mm	11,0%
					menores a	0,038 mm	5%
2 min	9	4,9	15,6	0,038	menores a	0,020 mm	5%
					menores a	0,013 mm	4%
5 min	9	4,9	15,6	0,020	menores a	0,010 mm	4%
					menores a	0,007 mm	4%
15 min	8,5	4,4	15,6	0,013	menores a	0,003 mm	3%
					menores a	0,001 mm	2%
30 min	8,5	4,4	15,6	0,010	FRACCION ARCILLA		2,5%
					FRACCION LIMO		8,5%
60 min	8	3,9	15,8	0,007			
250 min	7	2,9	16	0,003			
1440 min	6	1,9	16,1	0,001			

Dispersante: Hexametafosf. Sodio 4%
 Hidrómetro: ASTM 152-H





Fecha: 18/11/2011	Condiciones higrotérmicas:	ARENA TECPLATA
Operador: C. Canedo, I. Vernengo	Normas de trabajo: ASTM D 4253 - 00, ASTM D 4254 - 00	

Clasificación visual según ASTM D2487: Arena limpia con contenido de conchillas

$\gamma_{s\ max}$ 26,190 kN/m³

Relación de vacíos máxima

Método:

Molde Grande c/ad $V\ (cm^3)$ 3077,1 Tara (gr) 155,00

ENSAYO	$T + Mt$ (gr)	Mt (gr)	W (%)	Ma (gr)	Ms (gr)	V_m (cm ³)	$\gamma_{d\ min}$ (kN/m ³)	$e_{\ ensayo}$	$e_{\ max}$
1	4194	4039	1,11%	44,944	3994,056	3077,1	12,729	1,058	1,090
2	4153,5	3998,5	1,11%	44,493	3954,007	3077,1	12,601	1,078	
3	4131	3976	1,11%	44,243	3931,757	3077,1	12,530	1,090	
4	4241	4086	1,11%	45,467	4040,533	3077,1	12,877	1,034	

Relación de vacíos mínima

Método:

Doble amplitud vertical de vibración:

Molde $V\ (cm^3)$ 2137,2 cm2 Tara (gr) 155,00

ENSAYO	M_{tot} (gr)	M_s (gr)	V_m (cm ³)	$\gamma_{d\ max}$ (kN/m ³)	$e_{\ ensayo}$	$e_{\ min}$
1	3404,5	3249,5	2137,2	14,911	0,756	0,705
2	3502,5	3347,5	2137,2	15,360	0,705	
3	3490,5	3335,5	2137,2	15,305	0,711	
4	3436	3281	2137,2	15,055	0,740	

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

ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA

 Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ingeniería
 Lab. de Materiales y Estructuras - Área Mecánica de Suelos


Fecha:	22/11/2011	Condiciones higrotérmicas:		ARENA TECPLATA
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: 100%
 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 _p (gr)	M _{p+w} (gr)	γ _w (gr/cm ³)	V _p (cm ³)
Picnóm. I	20,9	91,23	339,38	0,99802	248,64

T° temperatura de calibración
 M_p peso del picnómetro
 M_{p+w} peso del picnómetro con agua
 γ_w densidad del agua
 V_p volumen del picnómetro

GRAVEDAD ESPECIFICA SOLIDOS						
MUESTRA	T° (°C)	M _{pw,t} (gr)	M _s (gr)	M _{pws,t} (gr)	γ _ω (gr/cm ³)	G _{s(T°)}
A	30,00	338,79	52,73	372,00	0,99565	2,70
A'	24,00	339,20	52,73	372,30	0,99730	2,69
B	28,00	338,94	56,96	374,65	0,99624	2,68
B'	24,00	339,20	56,96	374,85	0,99730	2,67
B''	23,00	339,26	56,96	375,00	0,99754	2,68

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

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

M_{pw,t} peso del picnómetro y agua a la temperatura de trabajo

M_s peso del suelo secado a horno

M_{pws,t} peso del picnómetro, suelo seco y agua a la temp. trabajo

G_t gravedad específica de los sólidos a la temp. trabajo

CORRECCION A 20°C						
MUESTRA	T° (°C)	K _t	G _{s(20°C)}	G _{avg(20°C)}	γ _s (kN/m ³)	γ _{s prom} (kN/m ³)
A	30,00	1,00	2,69	2,68	26,31	26,19
A'	24,00	1,00	2,68			
B	28,00	1,00	2,68			
B'	24,00	1,00	2,67			
B''	23,00	1,00	2,68			

K_t factor de corrección

G_{s(20°C)} = G_{s(T°)} · K_t gravedad específica a 20°C

γ_s = G_{s(20°C)} · γ_ω peso específico de las partículas a 20°C

ENSAYO ESFERICIDAD Y REDONDEZ

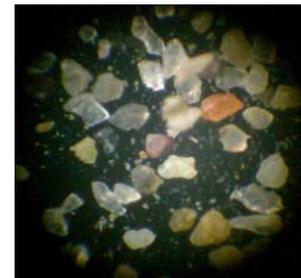
Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ingeniería
 Lab. de Materiales y Estructuras - Área Mecánica de Suelos



Fecha: 24/11/2011	Condiciones higrotérmicas:	ARENA TECPLATA
Operador: I. García Mendive, C. Canedo	Normas de trabajo:	

N# Grano	Esfericidad	Redondez
1	0,3	0,9
2	0,8	0,3
3	0,6	0,1
4	0,7	0,7
5	0,9	0,5
6	0,7	0,5
7	0,7	0,6
8	0,7	0,6
9	0,8	0,2
10	0,9	0,8
11	0,7	0,5
12	0,7	0,3
13	0,9	0,3
14	0,5	0,5
15	0,4	0,7
16	0,4	0,4
17	0,8	0,4
18	0,5	0,9
19	0,7	0,3
20	0,3	0,3
21	0,9	0,8
22	0,3	0,5
23	0,5	0,3
24	0,7	0,3
25	0,4	0,9
26	0,8	0,8
27	0,4	0,7
28	0,5	0,5
29	0,1	0,4
30	0,5	0,3
Promedios	0,6	0,5
Regularidad	0,557	

g



Fecha: 05/12/2011

Condiciones higtotérmicas:

ARENA TECPLATA

Operador: M. Pagnola, I. Vernengo Lezica

Normas de trabajo:

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

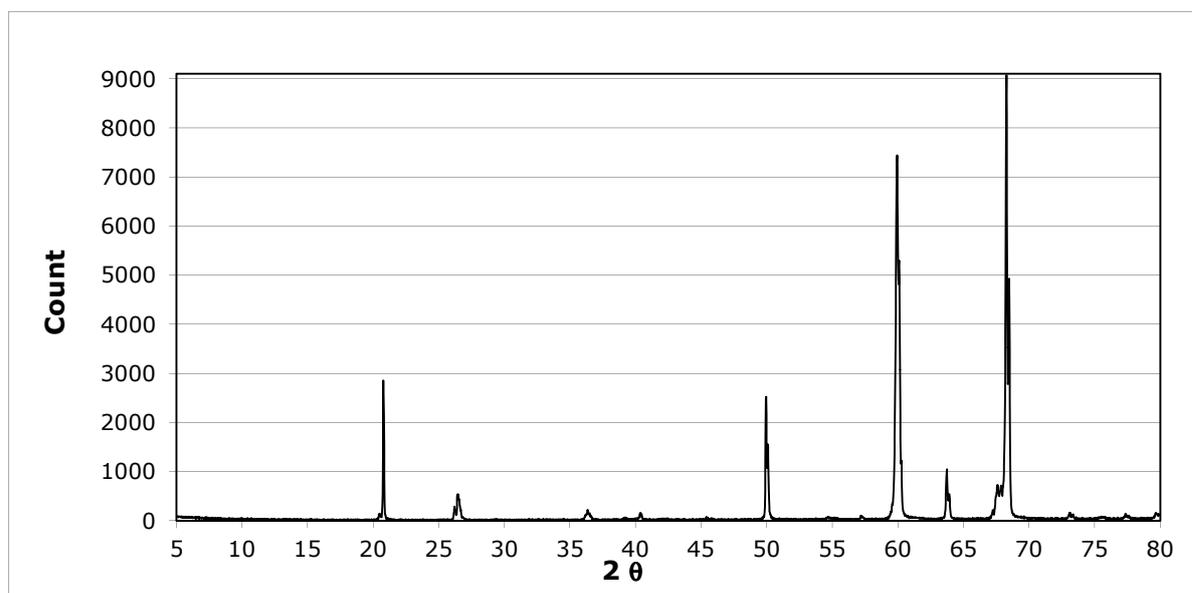
Equipo: Goniómetro vertical $\theta - \theta$ Rigaku

Radiación: Cu - $K\alpha$

Longitud de onda (λ): 1,54 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 mm² y luego se introdujo en el equipo. Posteriormente se irradió la muestra con un haz de rayos monocromático con un ángulo de ataque (θ) 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 2θ .



Minerales Encontrados:

GRUPO	MINERAL
Fosfatos	Berlinita
Óxidos	Cuarzo
Silicatos	Paranatisita
Otros minerales encontrados	Carbono
	Hierro
	Cobre

ENSAYO TRIAXIAL CIDC (CONSOLIDADO - DRENADO)

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

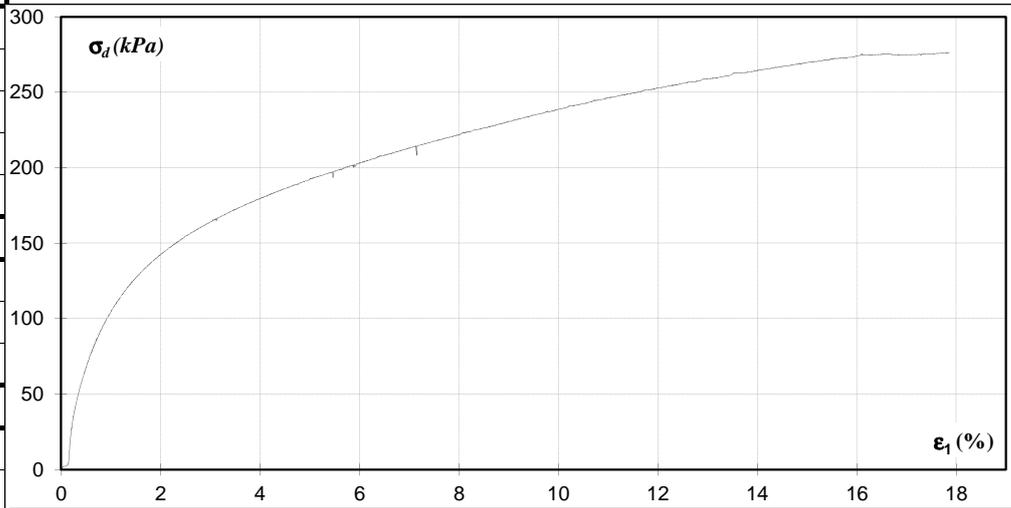


Fecha	01/08/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02	Vel def	1,10	mm/min			
Operador	GR - FP			E _{membrana}	266	kPa			
Material ensayado		TECPLATA		<i>e</i> _{máx}	1,09	<i>C</i> _u	7,17	Ret #4	0,41%
		<i>γ</i> _s	26,2	kN/m ³	<i>e</i> _{mín}	0,71	<i>C</i> _c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

<i>H</i> _{inicial}	222,0	mm
<i>Φ</i> _{inicial}	100,0	mm
<i>γ</i> _{do}	12,7	kN/m ³
<i>e</i> ₀	1,06	-
<i>D</i> _{r inicial}	8,6	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



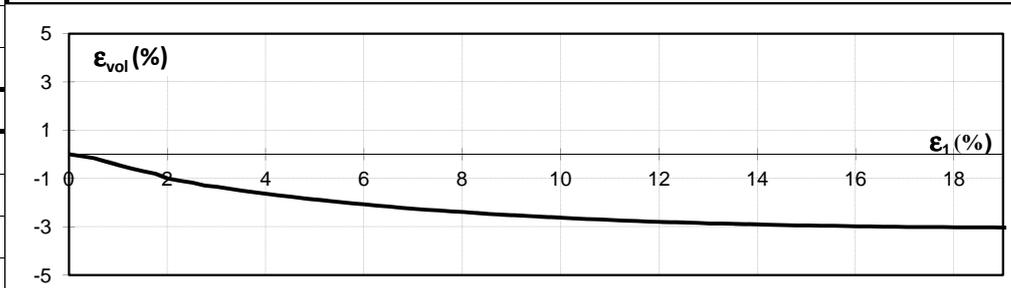
1- SATURACIÓN

método	húmedo	
<i>μ</i> _{final}	0	kPa
<i>B</i> _{final}	60,0	%

2- CONSOLIDACIÓN

<i>H</i> _{cons}	220,1	mm
<i>σ</i> ' ₃	102	kPa
<i>t</i> ₅₀	-	seg
<i>e</i> _{cons}	1,04	-
<i>D</i> _{r cons}	13,4	%

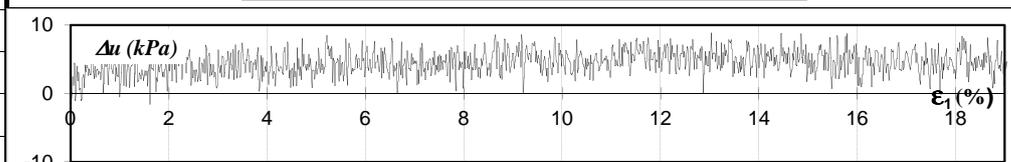
DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA (%) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

<i>ε</i> _{1 peak}	16,33	%
<i>ε</i> _{Vol peak}	-2,99	%
<i>σ</i> _{d peak}	266	kPa
<i>σ</i> ' _{1 peak}	372	kPa
<i>σ</i> ' _{3 peak}	106	kPa
<i>φ</i> _{peak}	33,7	°
<i>ε</i> _{1 crit}	16,33	%
<i>ε</i> _{vol crit}	-2,99	%
<i>φ</i> _{crit}	33,7	°

PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



MUESTRA EN FALLA

TRAYECTORIA TENSIONES

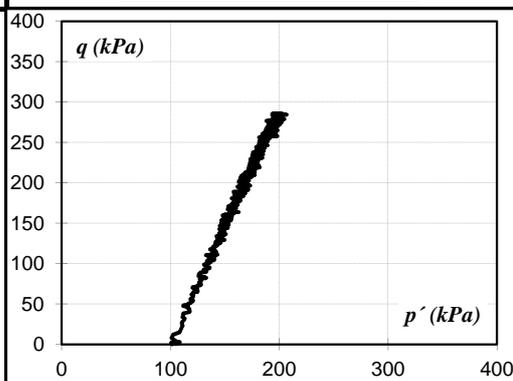
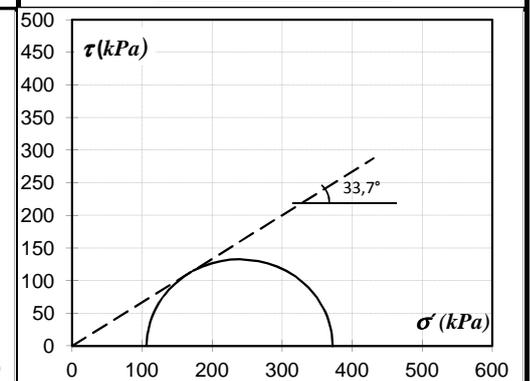


DIAGRAMA DE MÖHR



FOTO

ENSAYO TRIAXIAL CIDC (CONSOLIDADO - DRENADO)

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

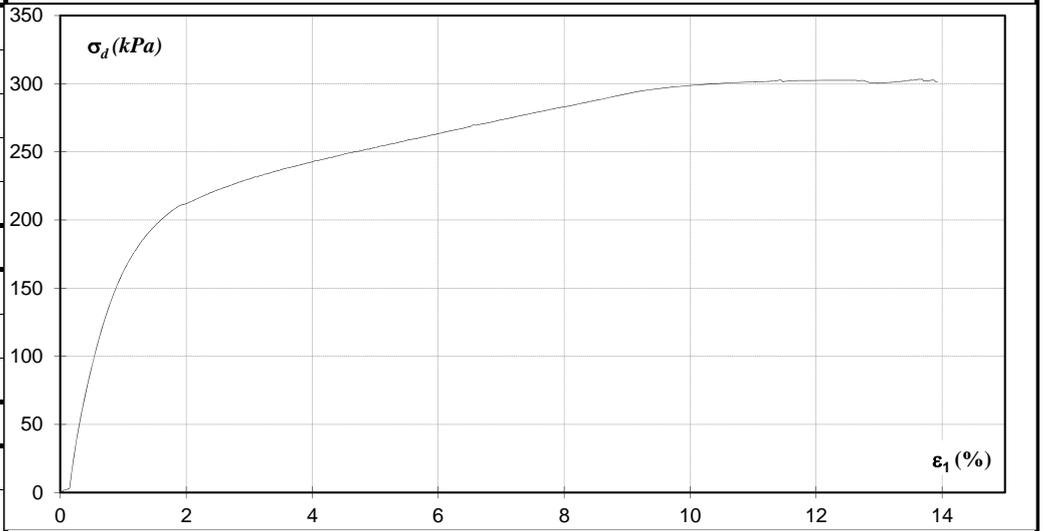


Fecha	31/07/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	1,10	mm/min	
Operador	GR - FP					E _{membrana}	296	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{m\acute{a}x}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{m\acute{i}n}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

$H_{inicial}$	222,0	mm
$\Phi_{inicial}$	100,0	mm
γ_{do}	13,6	kN/m^3
e_0	0,92	-
$D_r_{inicial}$	43,6	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



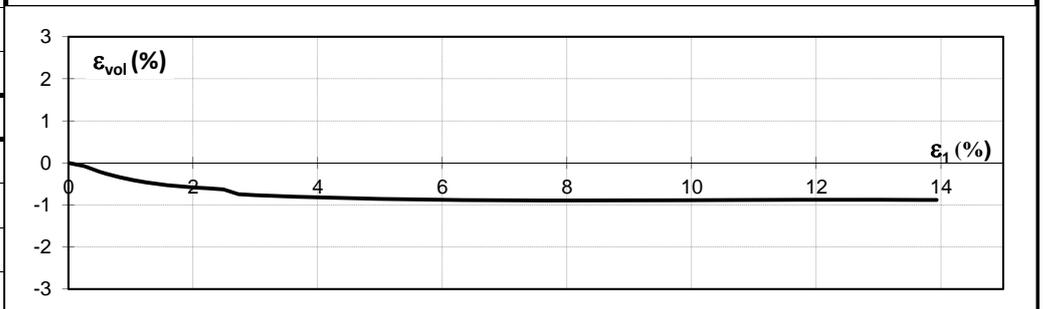
1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ_{final}	314	kPa
B_{final}	59,0	%

2- CONSOLIDACIÓN

H_{cons}	221,6	mm
σ'_3	99	kPa
t_{50}	-	seg
e_{cons}	0,92	-
D_r_{cons}	44,7	%

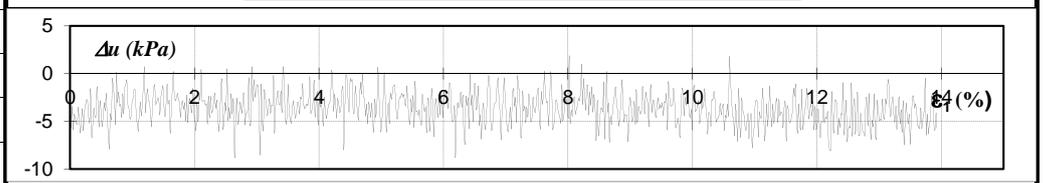
DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA (%) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

$\epsilon_{1\ peak}$	12,00	%
$\epsilon_{Vol\ peak}$	-0,88	%
$\sigma_{d\ peak}$	296	kPa
$\sigma'_{1\ peak}$	401	kPa
$\sigma'_{3\ peak}$	105	kPa
ϕ_{peak}	35,8	°
$\epsilon_{1\ crit}$	12,00	%
$\epsilon_{vol\ crit}$	-0,88	%
ϕ_{crit}	35,8	°

PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



MUESTRA EN FALLA

FOTO

TRAYECTORIA TENSIONES

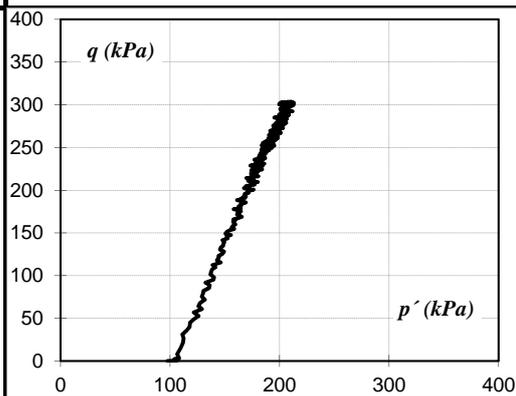
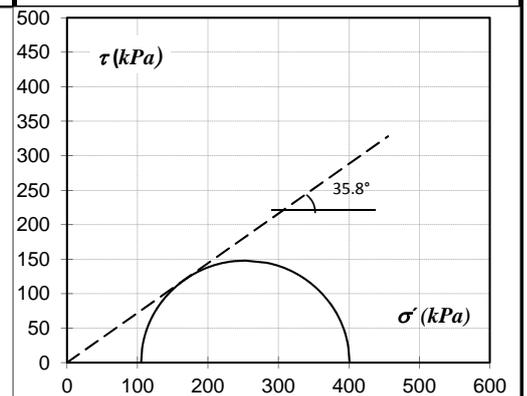


DIAGRAMA DE MÖHR



ENSAYO TRIAXIAL CIDC (CONSOLIDADO - DRENADO)

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

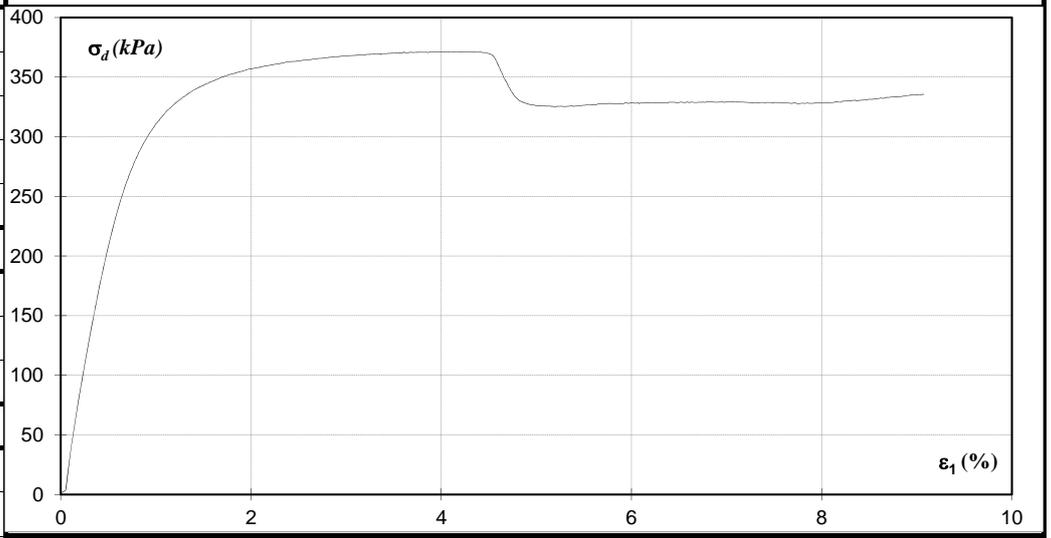


Fecha	31/07/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	1,10	mm/min	
Operador	GR - FP					E _{membrana}	326	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{m\acute{a}x}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{m\acute{i}n}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

$H_{inicial}$	222,0	mm
$\Phi_{inicial}$	100,0	mm
γ_{do}	14,9	kN/m^3
e_0	0,76	-
$D_r_{inicial}$	85,1	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



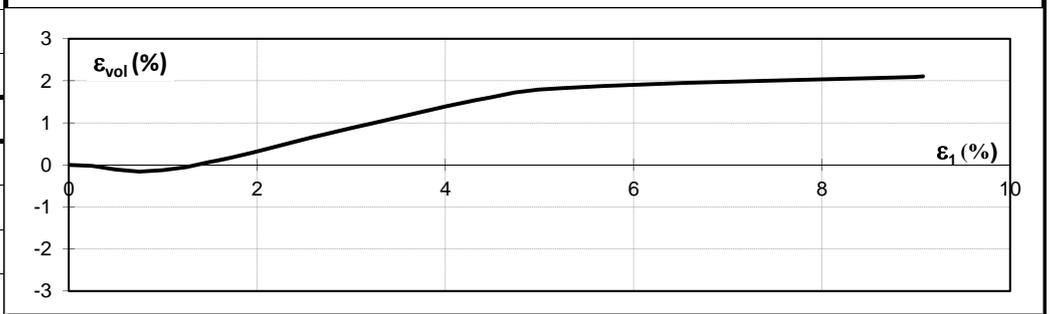
1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ_{final}	300	kPa
B_{final}	31,3	%

2- CONSOLIDACIÓN

H_{cons}	221,3	mm
σ'_{z3}	100	kPa
t_{50}	-	seg
e_{cons}	0,76	-
D_{rcons}	86,7	%

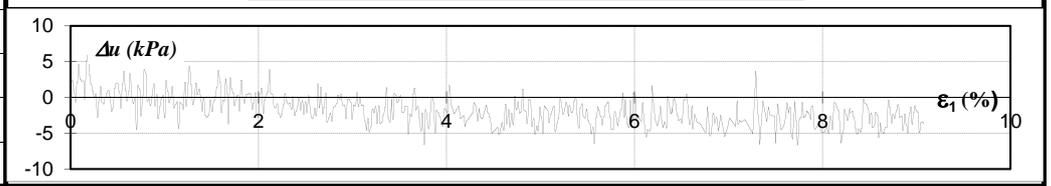
DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA (%) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

$\epsilon_{1 peak}$	4,21	%
$\epsilon_{Vol peak}$	1,38	%
$\sigma_{d peak}$	369	kPa
$\sigma'_{1 peak}$	471	kPa
$\sigma'_{3 peak}$	102	kPa
ϕ_{peak}	40,1	°
ϵ_{1crit}	7,40	%
$\epsilon_{volcrit}$	1,99	%
ϕ_{crit}	38,3	°

PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



MUESTRA EN FALLA

FOTO

TRAYECTORIA TENSIONES

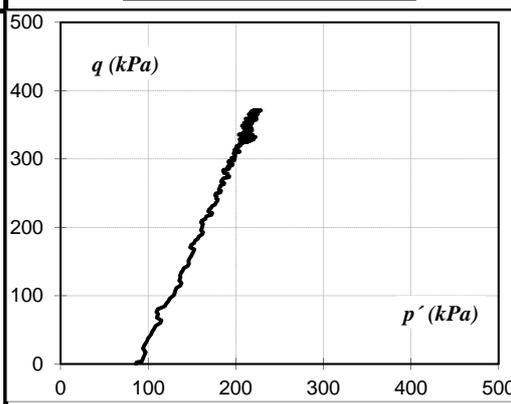
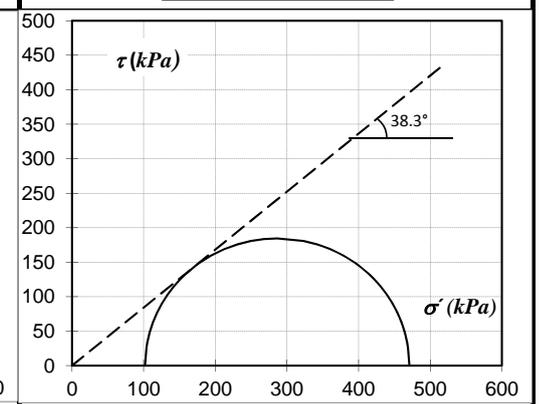


DIAGRAMA DE MÖHR



ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)

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

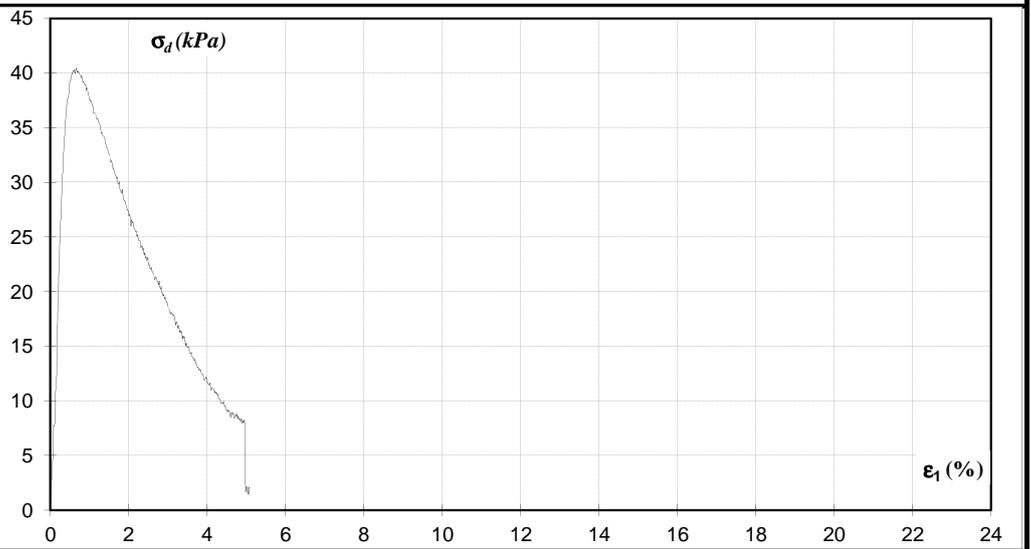


Fecha	04/05/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02	Vel def	1,10	mm/min			
Operador	IE - FP			E _{membrana}	1249	kPa			
Material ensayado		TECPLATA		e _{máx}	1,09	C _u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ _s	26,2	kN/m ³	e _{mín}	0,71	C _c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

H _{inicial}	222,0	mm
Φ _{inicial}	100,0	mm
γ _{do}	12,3	kN/m ³
e ₀	1,13	-
D _r _{inicial}	-10,7	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



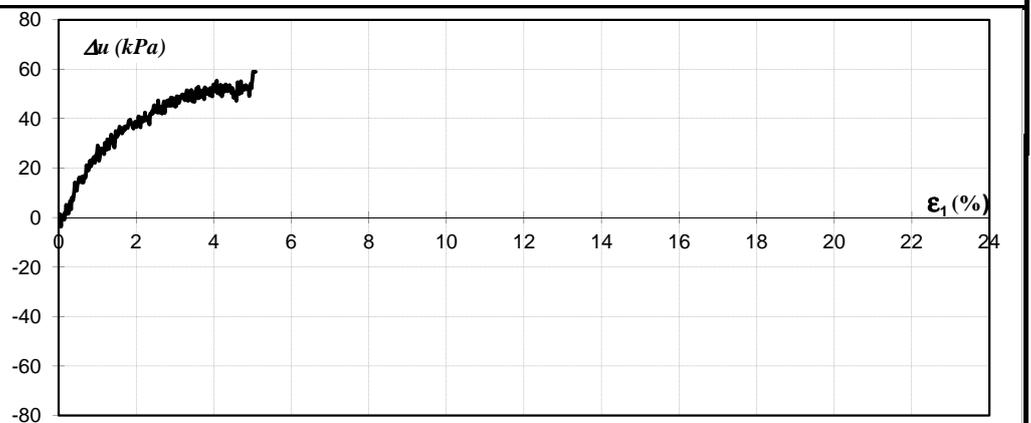
1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ _{final}	301	kPa
B _{final}	51,7	%

2- CONSOLIDACIÓN

H _{cons}	219	mm
σ' ₃	51	kPa
t ₅₀	-	seg
e _{cons}	1,05	-
D _r _{cons}	10,1	%

PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

ε _{1 peak}	0,62	%
σ _{d peak}	40	kPa
s _{u máx}	20,0	kPa
ε _{1 crít}	0,62	%
σ' _{1 crít}	77	kPa
σ' _{3 crít}	37	kPa
s _{u res}	20	kPa
φ _{crít}	20,5	°

MUESTRA EN FALLA

FOTO

TRAYECTORIA TENSIONES

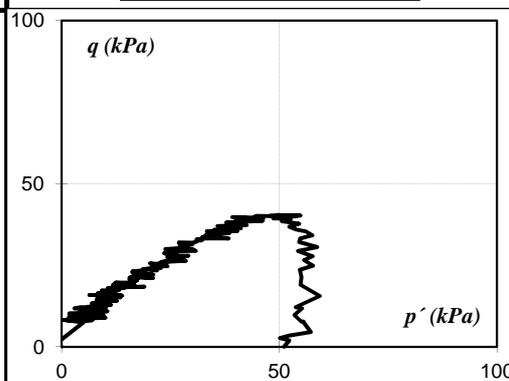
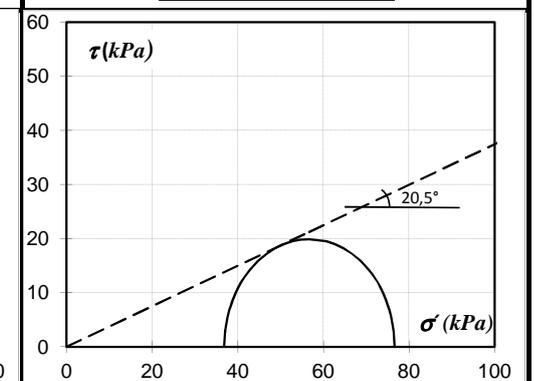


DIAGRAMA DE MÖHR

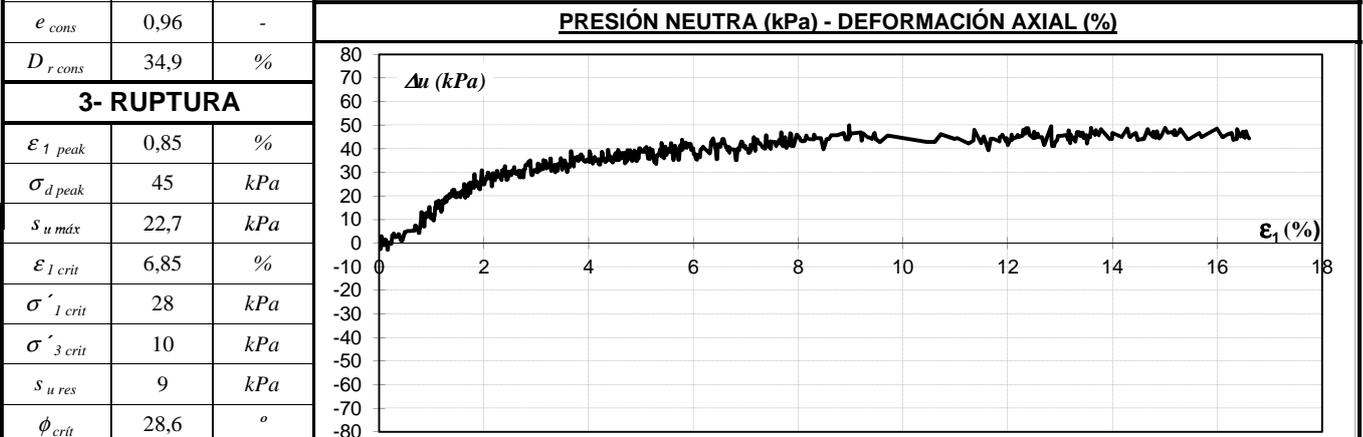
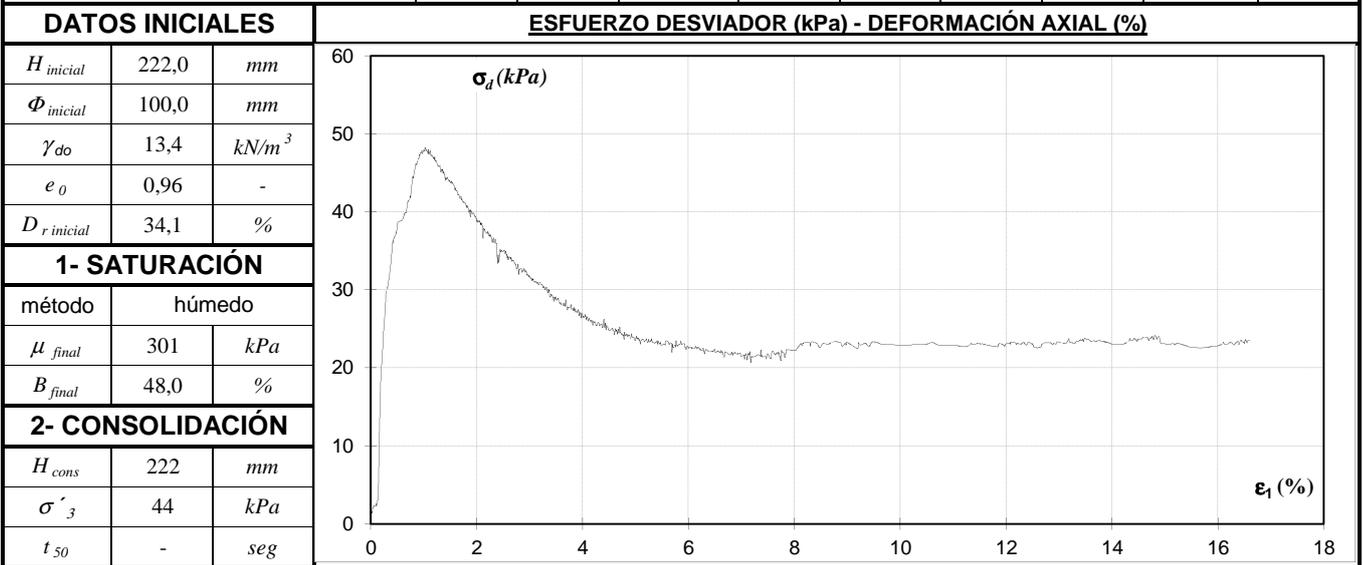


ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)

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



Fecha	07/05/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	1,10	mm/min	
Operador	GR - FP					$E_{membrana}$	1249	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{máx}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{mín}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200



ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)

Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería

Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos

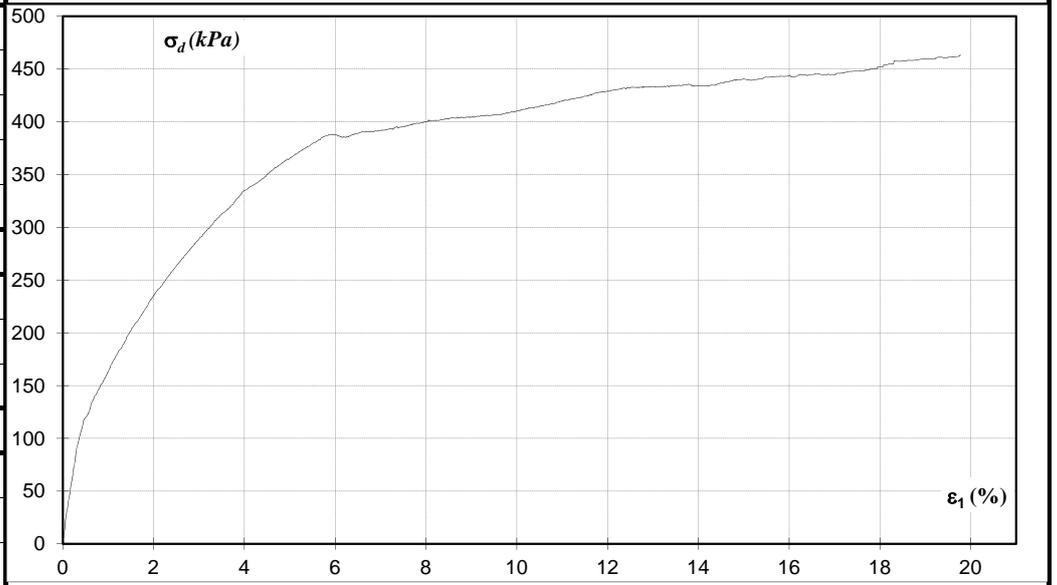


Fecha	08/05/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	1,10	mm/min	
Operador	GR - FP					E _{membrana}	1249	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{m\acute{a}x}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{m\acute{i}n}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

$H_{inicial}$	222,0	mm
$\Phi_{inicial}$	100,0	mm
γ_{do}	14,5	kN/m^3
e_0	0,80	-
$D_r_{inicial}$	74,6	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



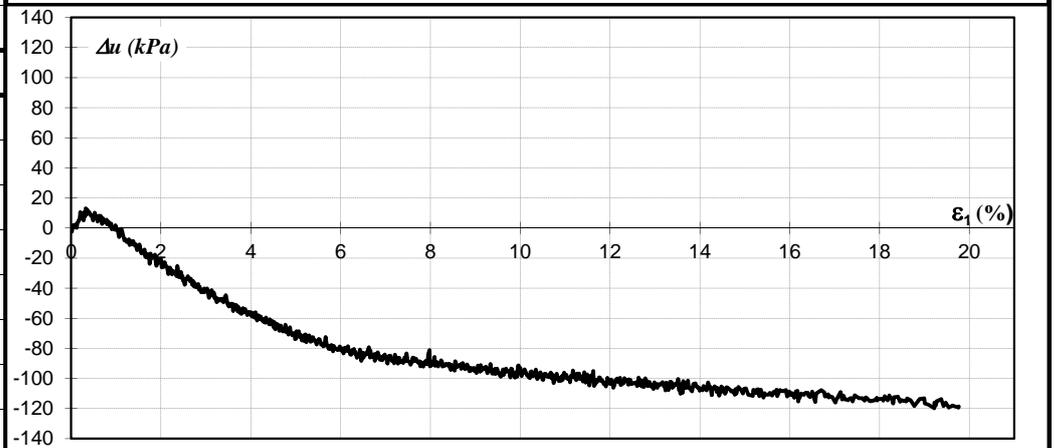
1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ_{final}	350	kPa
B_{final}	31,9	%

2- CONSOLIDACIÓN

H_{cons}	222	mm
σ'_{z3}	50	kPa
t_{50}	10	seg
e_{cons}	0,80	-
D_r_{cons}	75,3	%

PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

$\epsilon_{1\ peak}$	18,00	%
$\sigma_{d\ peak}$	442	kPa
$s_{u\ máx}$	221,0	kPa
$\epsilon_{1\ crít}$	18,00	%
$\sigma'_{1\ crít}$	604	kPa
$\sigma'_{3\ crít}$	162	kPa
$s_{u\ res}$	221	kPa
$\phi_{crít}$	35,2	°

MUESTRA EN FALLA



TRAYECTORIA TENSIONES

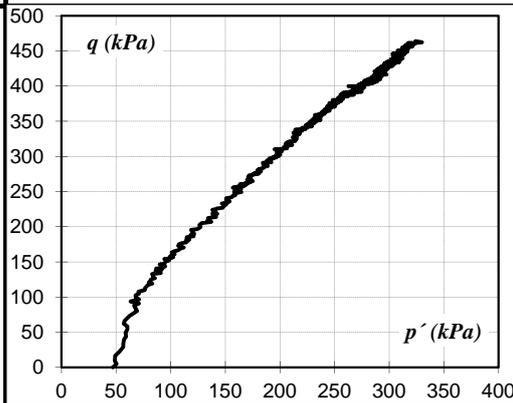
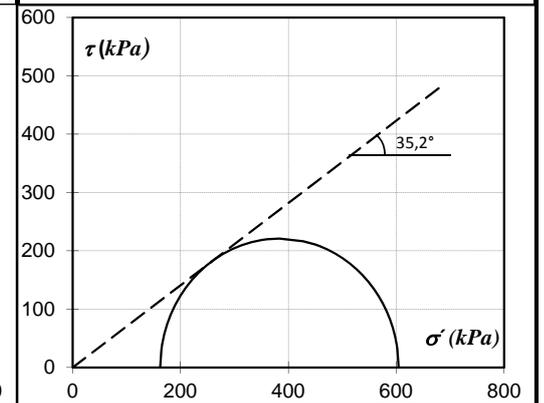


DIAGRAMA DE MÖHR



ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)

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



Fecha	18/04/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	0,74	mm/min	
Operador	GR - FP					E _{membrana}	1249	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{máx}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{mín}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES			ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)						
$H_{inicial}$	204,3	mm							
$\Phi_{inicial}$	99,8	mm							
γ_{do}	12,7	kN/m^3							
e_0	1,07	-							
$D_r_{inicial}$	5,3	%							

1- SATURACIÓN		
método	húmedo	
μ_{final}	403	kPa
B_{final}	78,6	%
2- CONSOLIDACIÓN		
H_{cons}	203	mm
σ'_3	87	kPa
t_{50}	-	seg
e_{cons}	1,06	-
D_r_{cons}	7,7	%

3- RUPTURA			PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)						
$\epsilon_{1 peak}$	0,44	%							
$\sigma_{d peak}$	41	kPa							
$s_{u máx}$	20,4	kPa							
$\epsilon_{1 crit}$	0,44	%							
$\sigma'_{1 crit}$	97	kPa							
$\sigma'_{3 crit}$	57	kPa							
$s_{u res}$	20	kPa							
ϕ_{crit}	15,3	°							

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

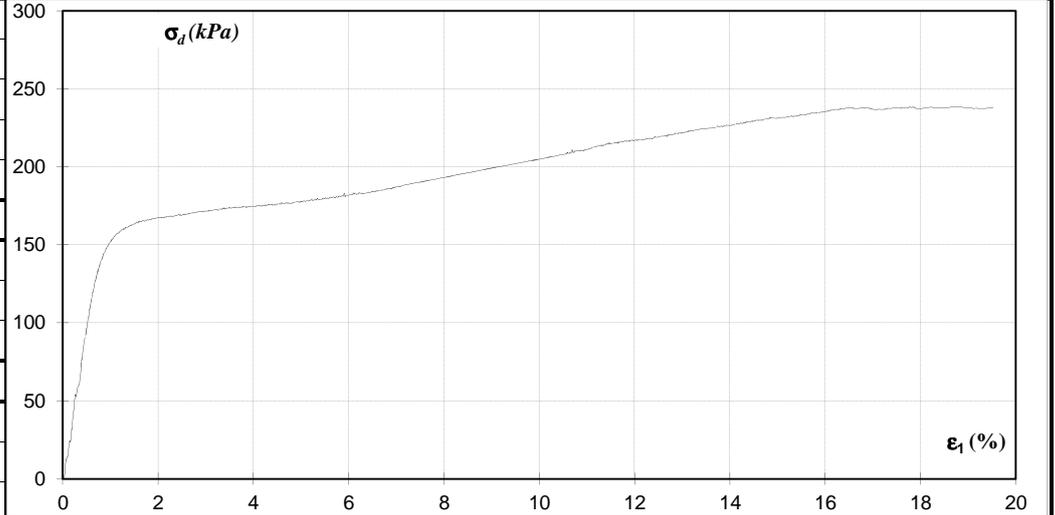


Fecha	24/04/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	1,10	mm/min	
Operador	GR - FP					E _{membrana}	1249	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{máx}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{mín}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

$H_{inicial}$	222,0	mm
$\Phi_{inicial}$	100,0	mm
γ_{do}	13,9	kN/m^3
e_0	0,88	-
$D_r_{inicial}$	54,0	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



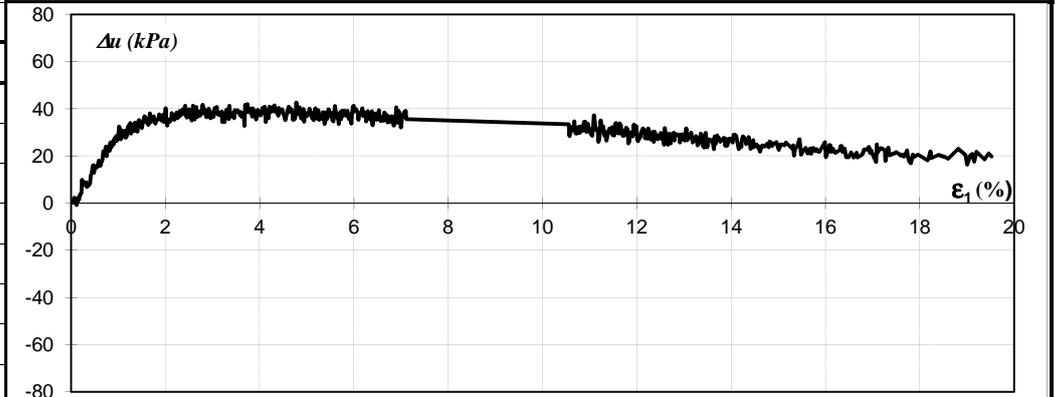
1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ_{final}	0	kPa
B_{final}	39,7	%

2- CONSOLIDACIÓN

H_{cons}	221	mm
σ'_3	105	kPa
t_{50}	-	seg
e_{cons}	0,88	-
D_r_{cons}	55,7	%

PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

$\epsilon_{1 peak}$	17,76	%
$\sigma_{d peak}$	228	kPa
$s_{u máx}$	114,1	kPa
$\epsilon_{1 crit}$	17,76	%
$\sigma'_{1 crit}$	315	kPa
$\sigma'_{3 crit}$	87	kPa
$s_{u res}$	114	kPa
ϕ_{crit}	34,6	°

MUESTRA EN FALLA



TRAYECTORIA TENSIONES

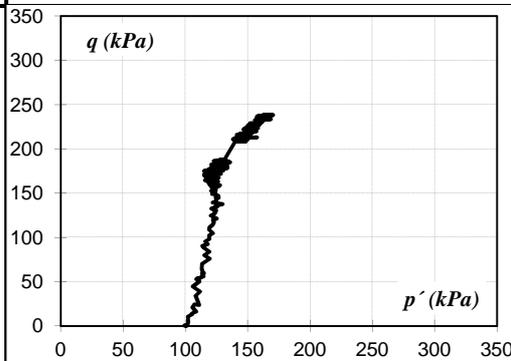
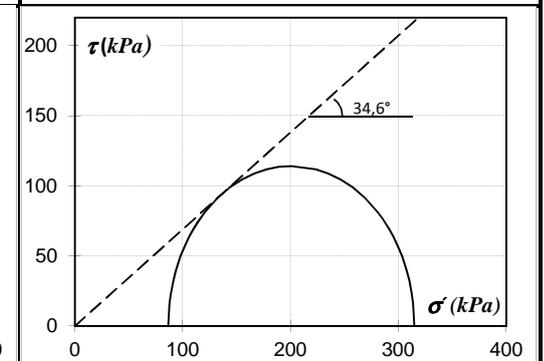


DIAGRAMA DE MÖHR



ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)

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

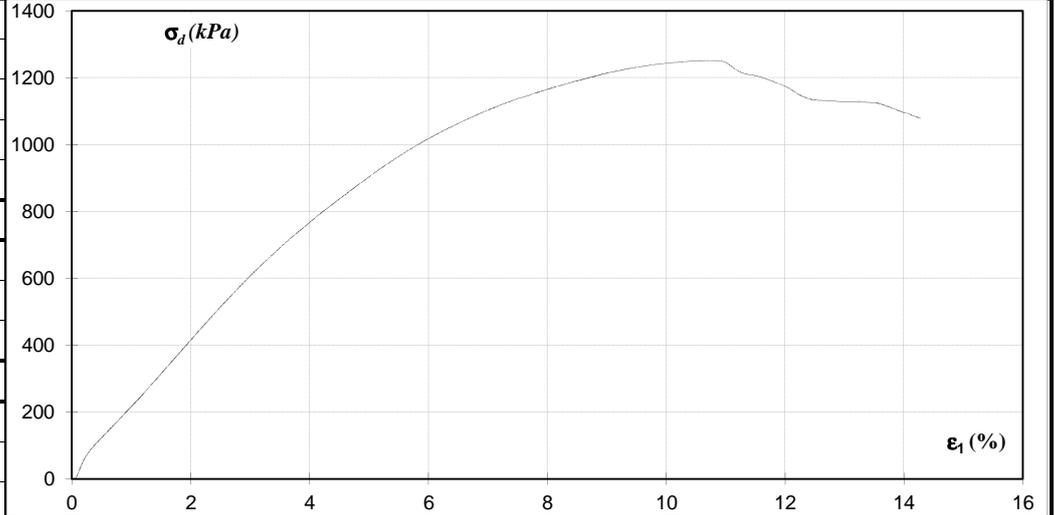


Fecha	23/04/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	1,10	mm/min	
Operador	GR - FP					$E_{membrana}$	1249	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{máx}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{mín}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

$H_{inicial}$	222,0	mm
$\Phi_{inicial}$	100,0	mm
γ_{do}	14,8	kN/m^3
e_0	0,77	-
$D_r_{inicial}$	83,2	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ_{final}	440	kPa
B_{final}	66,3	%

2- CONSOLIDACIÓN

H_{cons}	222	mm
σ'_3	121	kPa
t_{50}	15	seg
e_{cons}	0,77	-
D_r_{cons}	83,4	%

PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

$\epsilon_{1 peak}$	10,81	%
$\sigma_{d peak}$	1245	kPa
$s_{u máx}$	622,5	kPa
$\epsilon_{1 crit}$	10,81	%
$\sigma'_{1 crit}$	1671	kPa
$\sigma'_{3 crit}$	426	kPa
$s_{u res}$	622	kPa
ϕ_{crit}	36,4	°

MUESTRA EN FALLA



TRAYECTORIA TENSIONES

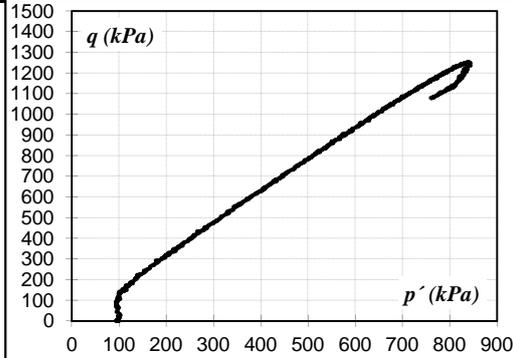
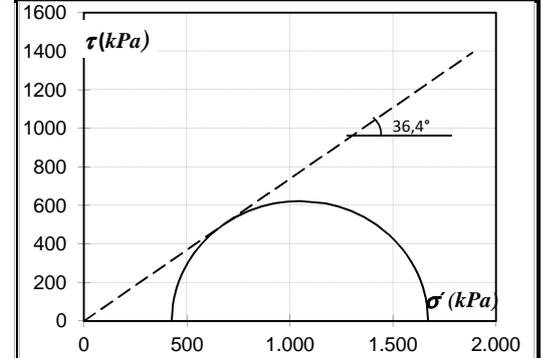


DIAGRAMA DE MÖHR



ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)

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

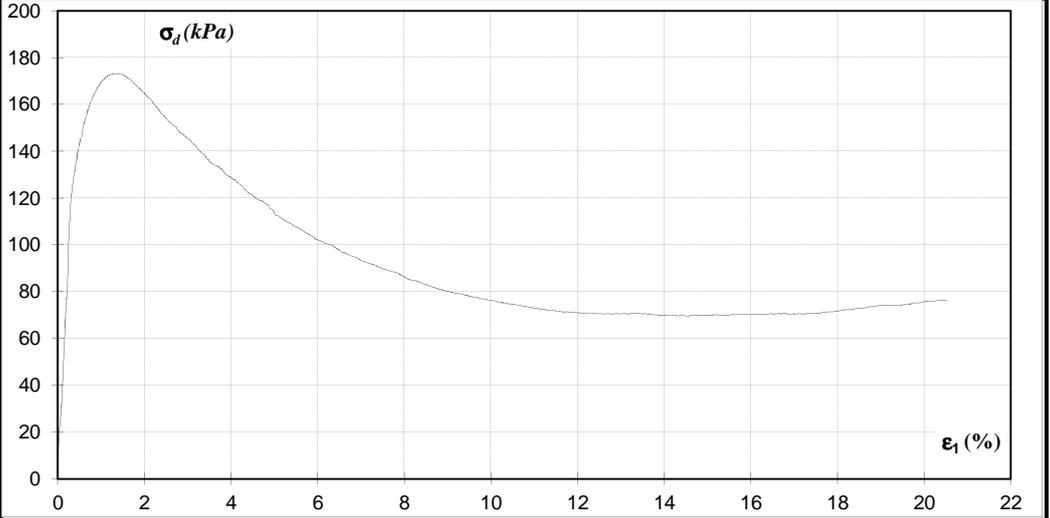


Fecha	27/04/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	1,10	mm/min	
Operador	00:00					E _{membrana}	1249	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{máx}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{mín}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

$H_{inicial}$	222,0	mm
$\Phi_{inicial}$	100,0	mm
γ_{do}	12,8	kN/m^3
e_0	1,05	-
$D_r_{inicial}$	11,9	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



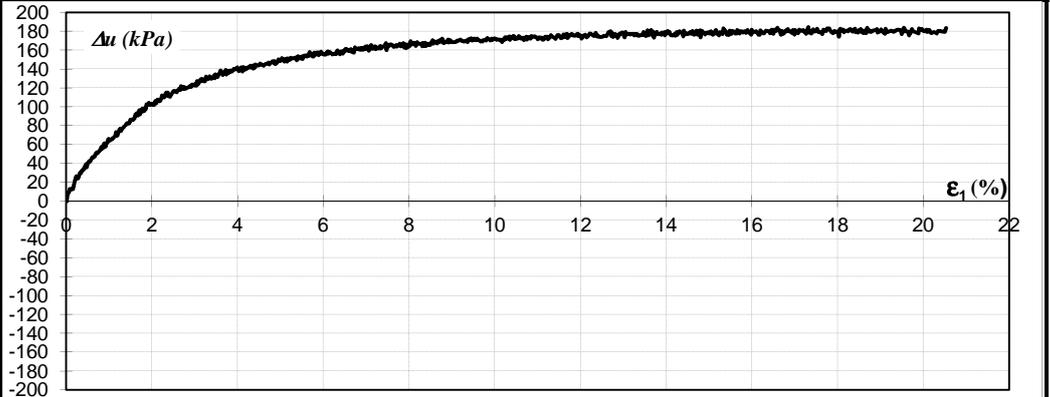
1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ_{final}	305	kPa
B_{final}	55,6	%

2- CONSOLIDACIÓN

H_{cons}	219	mm
σ'_3	200	kPa
t_{50}	-	seg
e_{cons}	1,02	-
D_{rcons}	19,4	%

PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

$\epsilon_{1 peak}$	1,29	%
$\sigma_{d peak}$	172	kPa
$s_{u máx}$	86,2	kPa
$\epsilon_{1 crit}$	19,91	%
$\sigma'_{1 crit}$	92	kPa
$\sigma'_{3 crit}$	28	kPa
$s_{u res}$	32	kPa
ϕ_{crit}	32,6	°

MUESTRA EN FALLA

FOTO

TRAYECTORIA TENSIONES

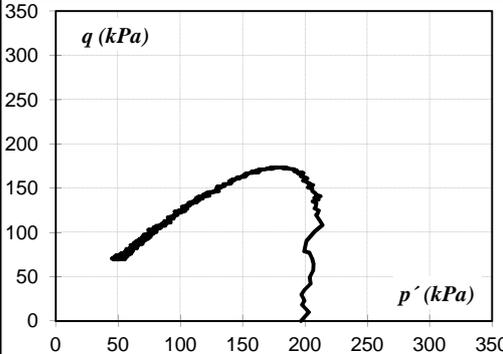
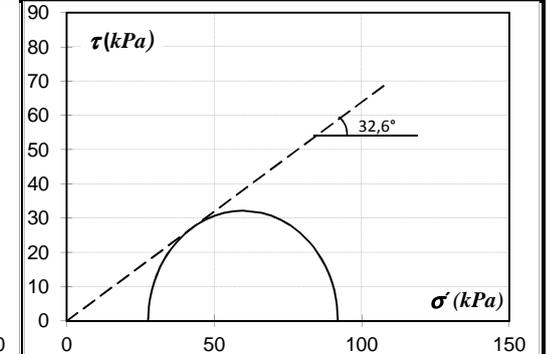


DIAGRAMA DE MÖHR



ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)

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

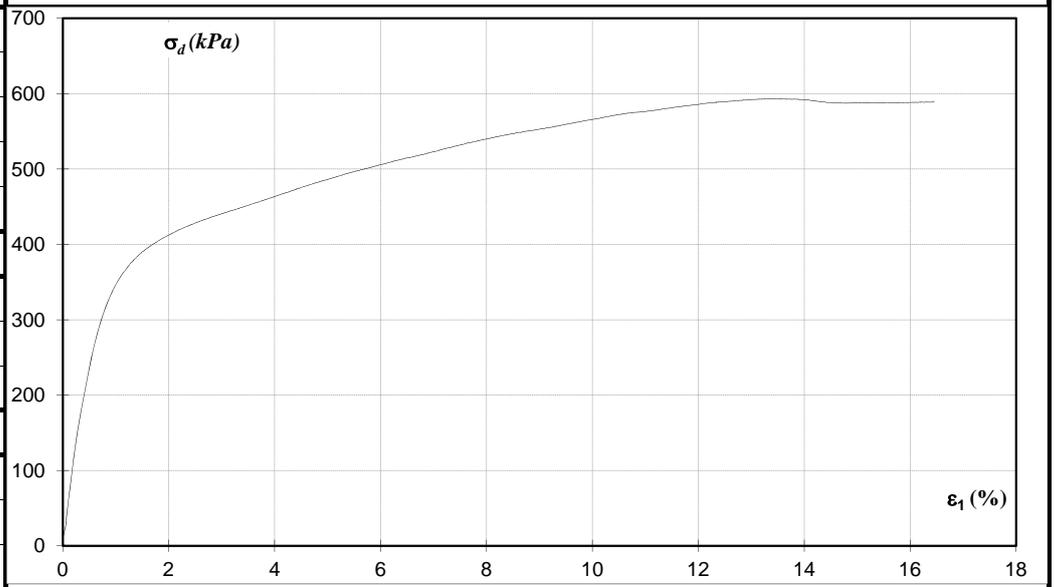


Fecha	02/05/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02			Vel def	1,10	mm/min	
Operador	GR - FP					E _{membrana}	1249	kPa	
Material ensayado		TECPLATA		$e_{máx}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{mín}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

DATOS INICIALES

$H_{inicial}$	222,0	mm
$\Phi_{inicial}$	100,0	mm
γ_{do}	14,0	kN/m^3
e_0	0,87	-
$D_{r\ inicial}$	57,6	%

ESFUERZO DESVIADOR (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



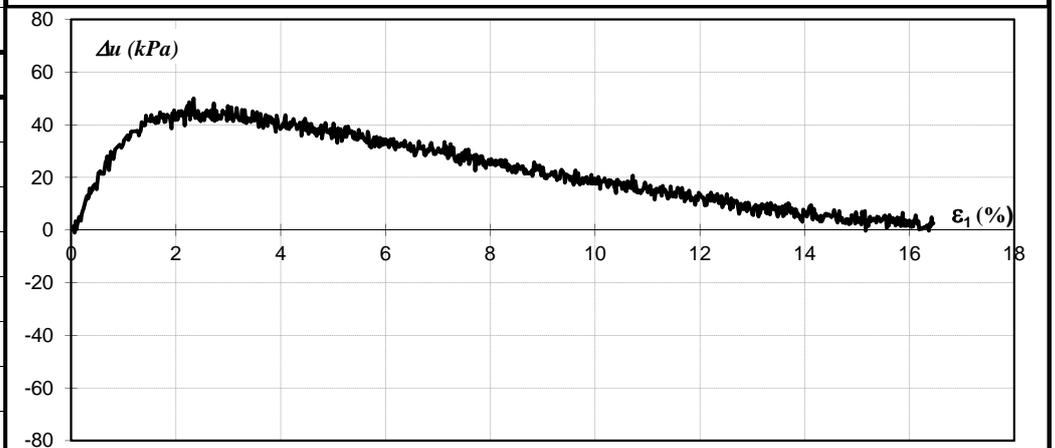
1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ_{final}	0	kPa
B_{final}	40,7	%

2- CONSOLIDACIÓN

H_{cons}	221	mm
σ'_{3}	220	kPa
t_{50}	-	seg
e_{cons}	0,86	-
$D_{r\ cons}$	60,9	%

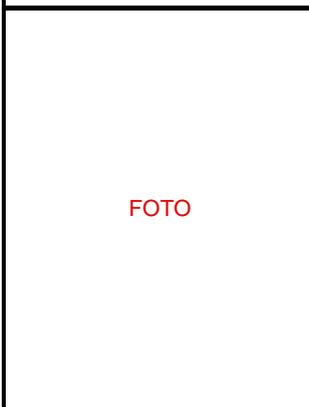
PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)



3- RUPTURA

$\epsilon_{1\ peak}$	13,00	%
$\sigma_{d\ peak}$	585	kPa
$s_{u\ máx}$	292,4	kPa
$\epsilon_{1\ crit}$	12,00	%
$\sigma'_{1\ crit}$	797	kPa
$\sigma'_{3\ crit}$	218	kPa
$s_{u\ res}$	290	kPa
ϕ_{crit}	34,8	°

MUESTRA EN FALLA



TRAYECTORIA TENSIONES

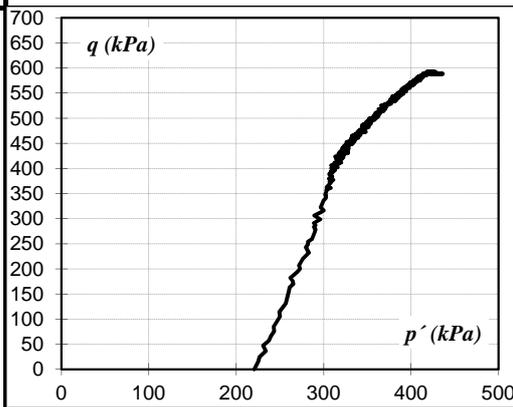
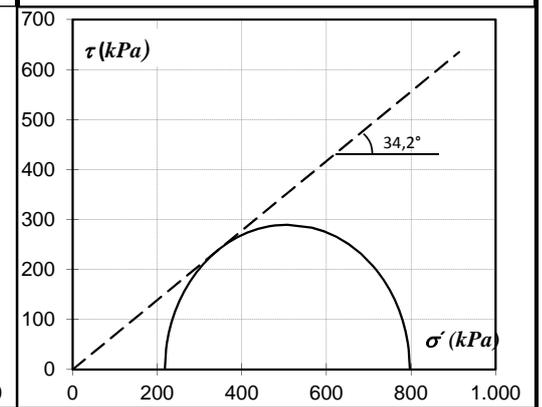


DIAGRAMA DE MÖHR



ENSAYO TRIAXIAL CIUC (CONSOLIDADO - NO DRENADO)

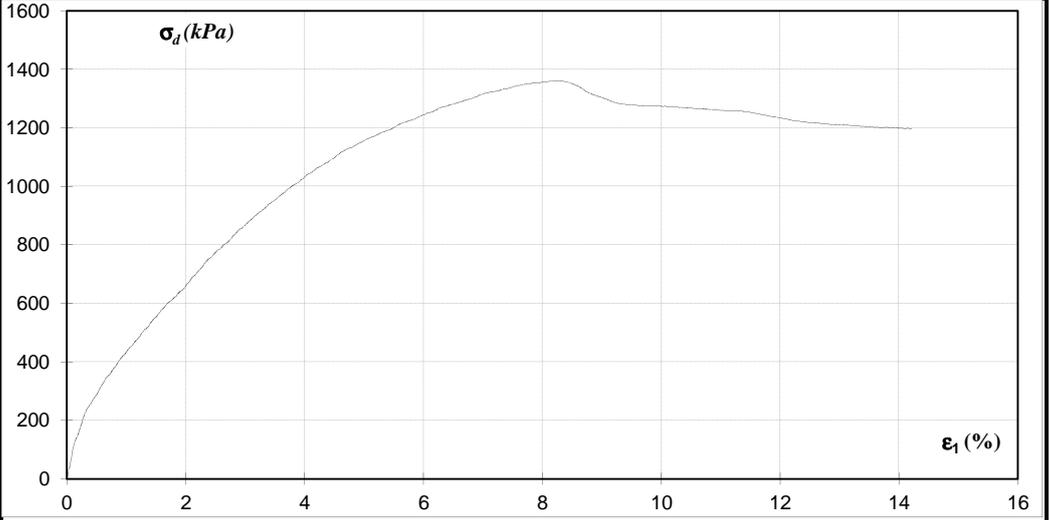
Univ. Buenos Aires - Facultad de Ingeniería
Lab. Mat. y Estructuras - Área Mec. Suelos



Fecha	26/04/2012	Normas de trabajo	ASTM D2166, D2435, D2850, D4767-02	Vel def	1,10	mm/min			
Operador	IE - FP			$E_{membrana}$	1249	kPa			
Material ensayado		TECPLATA		$e_{máx}$	1,09	C_u	7,17	Ret #4	0,41%
		γ_s	26,2	kN/m^3	$e_{mín}$	0,71	C_c	1,68	Pasa #200

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

$H_{inicial}$	222,0	mm
$\Phi_{inicial}$	100,0	mm
γ_{do}	15,6	kN/m^3
e_0	0,68	-
$D_r_{inicial}$	106,1	%



1- SATURACIÓN

método	húmedo	
μ_{final}	300	kPa
B_{final}	75,3	%

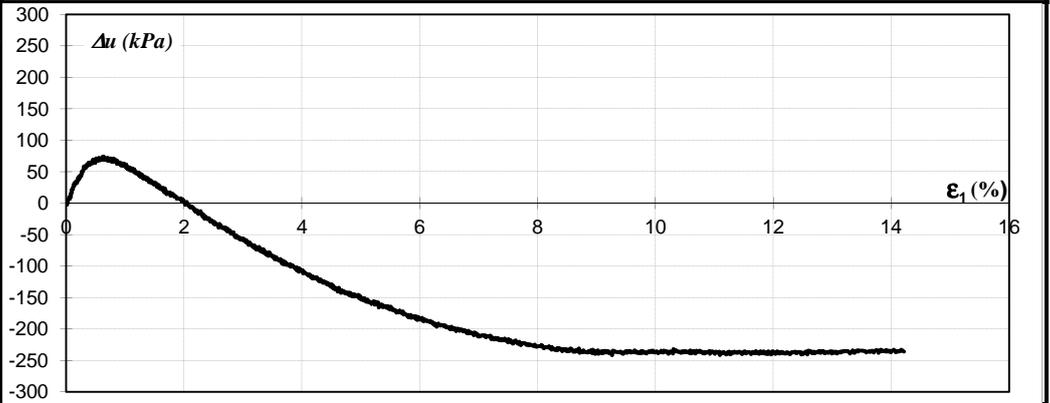
2- CONSOLIDACIÓN

H_{cons}	221	mm
σ'_3	206	kPa
t_{50}	33	seg
e_{cons}	0,68	-
D_r_{cons}	107,7	%

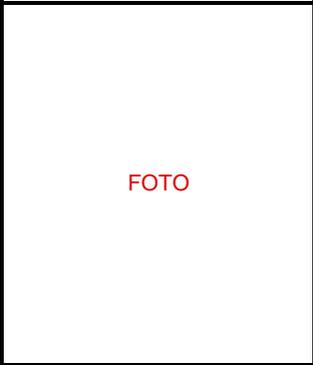
PRESIÓN NEUTRA (kPa) - DEFORMACIÓN AXIAL (%)

3- RUPTURA

$\epsilon_{1 peak}$	8,15	%
$\sigma_{d peak}$	1354	kPa
$s_{u máx}$	677,2	kPa
$\epsilon_{1 crit}$	8,15	%
$\sigma'_{1 crit}$	1789	kPa
$\sigma'_{3 crit}$	435	kPa
$s_{u res}$	677	kPa
ϕ_{crit}	37,5	°



MUESTRA EN FALLA



TRAYECTORIA TENSIONES

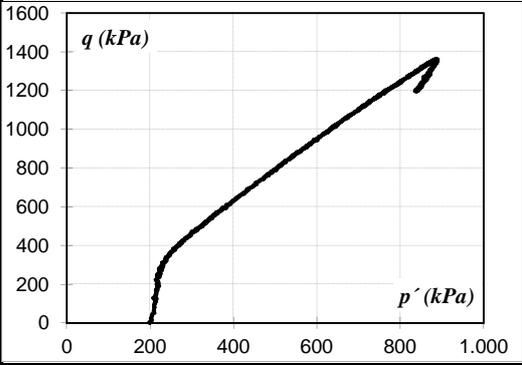
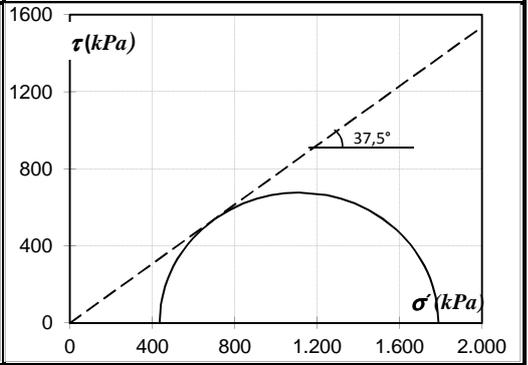


DIAGRAMA DE MÖHR



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 envasinado de la base.

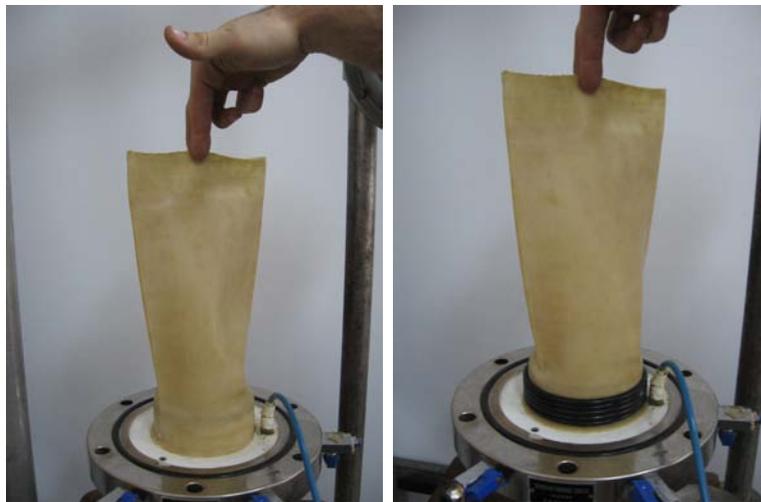


Figura 1.2: Colocación y fijación de membrana.



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 25kPa.
2. Establecer una presión de agua en el sistema de 10kPa 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 $20kPa$ [41, 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 [41].
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 [41].
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 1×10^{-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
- ±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 / Vs = 8-32 Vdc Optional 3-wire: 0-10 V / Vs = 14-30 Vdc Optional 3-wire ratiometric: Vsig = 0.5-4.5 Vs / Vs = 5 ± 0.5 Vdc
Accuracy	±0.5% FSO
Permissible Load	2-wire: Rmax = [(Vs - Vs min) / 0.02] Ohm 3-wire: Rmin = 10 kOhm
Influence Effects	Supply: 0.05% FSO / 10 V Load: 0.05% FSO / kOhm
Response Time	2-wire: <10 msec 3-wire: <3 msec
Measuring Rate	1 kHz
Thermal Error	<±0.5% FSO / 10K
Permissible Temperatures	Medium: -13°F to 257°F (-25°C to 125°C) Electronics environment: -13°F to 185°F (-25°C to 85°C) Storage: -40°F to 185°F (-40°C to 85°C)
Short-circuit Protection	Permanent 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 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. Diaphragm: Ceramic Al ₂ O ₃ 96%
Weight	120 g
Current Consumption	2-wire: 25 mA max 3-wire ratiometric: 1.5 mA 3-wire voltage: 5 mA (short-circuit current 20 mA)
Long-term Stability	<±0.3% FSO/yr at reference conditions
Operation Life	>100 x 10 ⁶ cycles
CE Conformity	EMC directive: 2004/108/EC 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

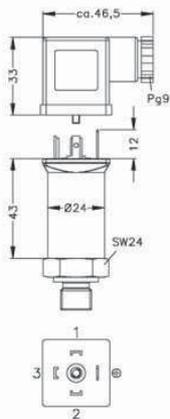
Order Codes

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

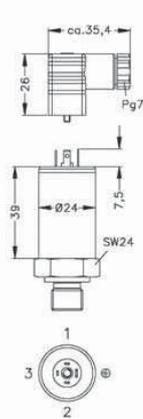
Electrical Connection

Standard

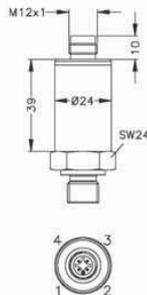


ISO 4400
(IP 65)

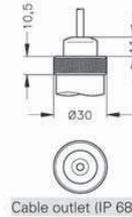
Optional



Micro, contact
distance 9.4 mm (IP 65)



M12x1, 4-pin
(IP 67)

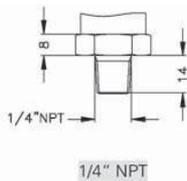


Cable outlet (IP 68)⁵

⁵ Different cable types/lengths available

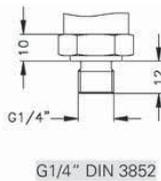
Mechanical Connection

Standard



1/4" NPT

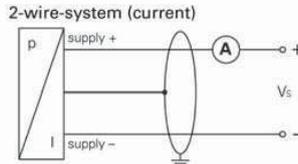
Optional



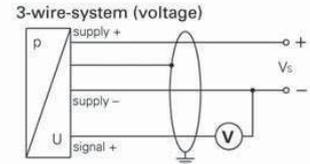
G1/4" DIN 3852

Wiring Diagram

Standard



Optional

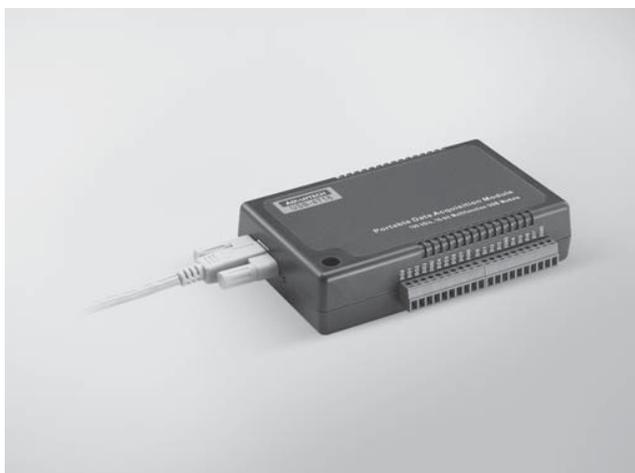


Note: Measurements are in mm

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 GΩ
- **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	±10	±5	±2.5	±1.25	±0.625
Input Range	Unipolar	N/A	0 ~ 10	0 ~ 5	0 ~ 2.5
Input Range	Bipolar	N/A	0 ~ 10	0 ~ 5	0 ~ 2.5

Analog Output

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

Internal Reference	Unipolar	Bipolar
	0 ~ 5, 0 ~ 10	±5, ±10

- **Slew Rate** 0.7 V/μs
- **Driving Capability** 5 mA
- **Output Impedance** 0.1 Ω max.
- **Operation Mode** Single output
- **Accuracy** Relative: ±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

MAIL.: 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 Nº2497 – BARRACAS (C 1 291 ACB) C.A.B.A.
ARGENTINA**

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

WEB: WWW.HEELT.COM.AR

MAIL.: 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

MAIL.: 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

MAIL.: 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 3470 @ 60 Hz	1440 @ 50 Hz 1730 @ 60 Hz	1440 @ 50 Hz 1730 @ 60 Hz	1425 @ 50 Hz 1715 @ 60 Hz
Tensión	115/ 230 V Arranque por capacitor Protector térmico c/ react. automat.	110/ 220 V Arranque por capacitor Protector térmico c/ react. automat.	110/ 220 V Arranque por capacitor Protector térmico c/ react. automat.	110/ 220 V Arranque por capacitor Protector térmico c/ react. automat.
Desplazamiento	30 l/min @ 50 Hz 36 l/min @ 60 Hz	95 l/min @ 50 Hz 114 l/min @ 60 Hz	140 l/min @ 50 Hz 170 l/min @ 60 Hz	280 l/min @ 50 Hz 340 l/min @ 60 Hz
Nº etapas	2	2	2	2
Vacio nominal	50 um Hg 0.065 mbar	15 um Hg 0.020 mbar	15 um Hg 0.020 mbar	15 um Hg 0.020 mbar
Conexiones	¼" FLARE- ½" ACME	¼" FLARE- ½" ACME	¼" FLARE- ½" ACME	¼" FLARE- 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 (C 1 2 9 1 A C B) C.A.B.A.
 ARGENTINA**

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

WEB: WWW.HEELT.COM.AR

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

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

MAIL.: HEELT@HEELT.COM.AR

HERRAMIENTAS EQUIPOS DE ENSAYO PARA LABORATORIOS TÉCNICOS

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

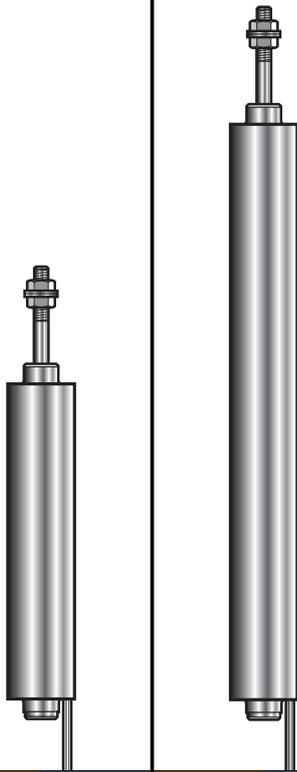
(1) Sólo para modelos DVR 95, DVR 140 y DVR 280.

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

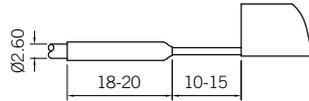
TE./FAX: (54-11) 4302-9714/6709

WEB: WWW.HEELT.COM.AR

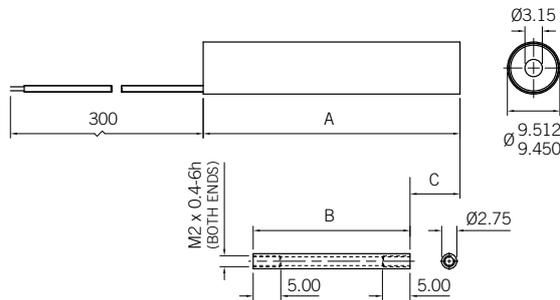
MAIL.: HEELT@HEELT.COM.AR



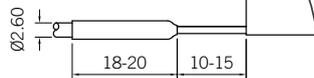
Free Core



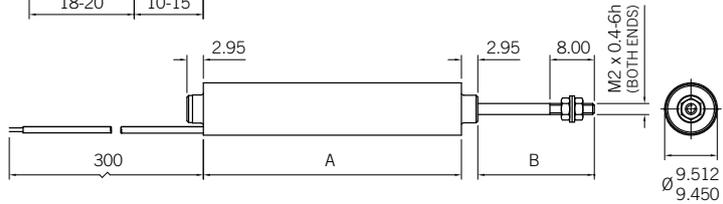
Type	'A' Body Length	'B' Core Length	'C' At Null
OP1.5	20.60	11.00	4.80
OP6.0	46.50	28.40	9.05
OP12.5	83.50	50.80	16.35



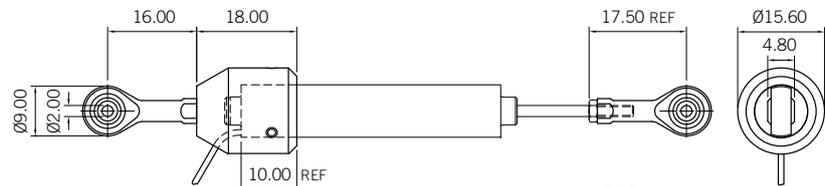
Guided Core



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
±6.0	12	±12.5	25
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		
Measurement Range (mm)	±1.5	3
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 ¹ (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) ²	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.

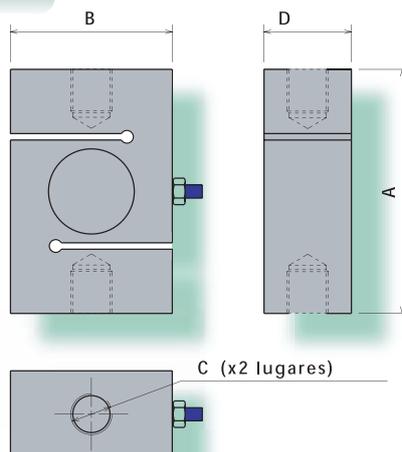


ESPECIFICACIONES GENERALES

Tensión max V	15
Capacidades Kg. 500,1000,2500,5000,10000	
Sensibilidad mV/V	2 +/- 10%
Resistencia del puente Ω	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 Ω	> 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

