

Tesis de grado en Ingeniería Civil

**RIGIDEZ INICIAL Y COHESIÓN EFECTIVA
DE LA
FORMACIÓN PAMPEANO**

Autor:

Gastón Quaglia

Tutor de Tesis:

Profesor Ing. Alejo O. Sfriso

Tesis de grado en Ingeniería Civil

RIGIDEZ INICIAL Y COHESIÓN EFECTIVA
DE LA
FORMACIÓN PAMPEANO

Autor:

Gastón Quaglia

Tutor de Tesis:

Profesor Ing. Alejo O. Sfriso

Firma del autor:

Firma del tutor:

Aceptada por:

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos aquellos que de alguna manera participaron en este proceso que significó realizar mi tesis de grado y que finaliza con este documento.

Particularmente a mi familia, por el apoyo no solo en esta etapa sino durante todos estos años. A mis compañeros, Osvaldo N. Ledesma, Maribel D. Quintela, Patricia Sagüés y al Ing. Mauro Codevilla quienes fueron parte del día a día en el laboratorio, gracias por su colaboración.

A mi profesor Ing. Alejo Sfriso, por su insistencia y motivación para elegir una manera distinta de terminar la carrera. Porque lo aprendido en el camino va mucho más allá de estas páginas.

A la Universidad de Buenos Aires, en especial a todos aquellos que trabajan en los laboratorios y departamentos de la FIUBA y que ayudaron a cumplir este objetivo, gracias.

Gastón Quaglia

INDICE	4
1 INTRODUCCIÓN	7
2 FORMACIÓN PAMPEANO	8
2.1 <i>Descripción general</i>	8
2.2 <i>Origen y transporte</i>	8
2.3 <i>Deposición</i>	8
2.4 <i>Procesos Post-deposicionales</i>	8
2.4.1 <i>Preconsolidación y Desecación</i>	9
2.4.2 <i>Cementación</i>	9
2.4.3 <i>Confinamiento lateral</i>	9
2.5 <i>Clasificación</i>	9
2.6 <i>El Pampeano en la ciudad de Buenos Aires</i>	10
2.7 <i>Caracterización Fisico-mecánica</i>	11
2.7.1 <i>Resistencia</i>	11
2.7.2 <i>Rigidez</i>	12
2.7.3 <i>Estado tensional</i>	12
2.7.4 <i>Permeabilidad</i>	13
2.8 <i>Obras en el Pampeano</i>	13
2.8.1 <i>Obras de tuneleria</i>	13
2.8.2 <i>Excavaciones urbanas a cielo abierto</i>	14
3 RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS COHESIVOS	16
3.1 <i>Características generales</i>	16
3.2 <i>Mecanismos de resistencia en materiales granulares</i>	16
3.2.1 <i>La fricción como mecanismo de falla</i>	16
3.2.2 <i>Fricción y dilatancia</i>	17
3.2.3 <i>La cohesión</i>	17
3.3 <i>Curva de resistencia intrínseca</i>	18
3.4 <i>¿Ordenada al origen?</i>	19
3.5 <i>Criterio de Mohr-Coulomb como mecanismo plástico</i>	20

3.5.1	<i>Superficie critica</i>	21
3.6	<i>Criterio de falla modificado</i>	21
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
4.1	<i>Material ensayado</i>	23
4.2	<i>Extracción de muestras</i>	23
4.3	<i>Preparación de las muestras</i>	24
4.4	<i>Acondicionamiento, fabricación e instalación de equipos</i>	24
4.4.1	<i>Acondicionamiento del equipo existente</i>	24
4.4.2	<i>Mediciones locales</i>	25
4.4.3	<i>Sistema de adquisición de datos</i>	25
4.4.4	<i>Software del DAQ</i>	25
4.5	<i>Implementación del DAQ en los ensayos</i>	26
4.5.1	<i>Medición de rigidez inicial</i>	26
4.5.2	<i>Medición de resistencia</i>	26
4.6	<i>Procedimientos de ensayos mecánicos</i>	27
4.6.1	<i>Medición de rigidez inicial</i>	27
4.6.2	<i>Medición de resistencia</i>	27
4.7	<i>Ensayos químicos</i>	27
5	RESULTADOS	29
5.1	<i>Rigidez inicial</i>	29
5.2	<i>Modulo de Poisson a bajas deformaciones</i>	29
5.3	<i>Curva de reducción del módulo de Young</i>	30
5.4	<i>Comparación del módulo de Young inicial entre muestras inalteradas y compactadas</i>	30
5.5	<i>Parámetros de resistencia</i>	30
5.6	<i>Simulación numérica de los ensayos</i>	32
5.7	<i>Resultados previos</i>	32
6	CONCLUSIONES	33
	REFERENCIAS	34

ANEXOS	35
<i>A1 – Informe de avance I</i>	36
<i>A2 – Informe de avance II</i>	47
<i>A3 – EMANT 300 Data Acquisition Module (Especificaciones)</i>	52
<i>A4 – Strain Application Adaptor for EMANT 300 (Especificaciones)</i>	57
<i>A5 – Pressure Application Adaptor for EMANT 300 (Especificaciones)</i>	62
<i>A6 – Pressure sensor MPX 2202 (Especificaciones)</i>	65
<i>A7 – Pressure sensor MPX 5010 (Especificaciones)</i>	71
<i>A8 – Determinación del contenido de Carbonato de Calcio. Procedimiento sobre muestras de suelo del Pampeano</i>	77

1 INTRODUCCION

Gran parte de las provincias de Buenos Aires, La Pampa y Córdoba, incluido el centro de la Capital Federal, están emplazadas en una formación geológica de suelos finos denominada Formación Pampeano.

El Pampeano es un suelo muy favorable para la ejecución de obras de ingeniería geotécnica, incluyendo túneles y excavaciones. Estas obras son diseñadas con frecuencia mediante modelos numéricos que emplean una serie de parámetros de rigidez y resistencia de los suelos. A la fecha, estos parámetros son calibrados a partir de la observación del comportamiento de estructuras ya construidas; los valores adoptados son muy diferentes a los que se obtienen en ensayos rutinarios de campo o laboratorio.

Las mayores discrepancias se presentan en la rigidez a baja deformación y en la cohesión efectiva. En el caso de los túneles, estos parámetros controlan las predicciones de los asentamientos en superficie y los cálculos de estabilidad del frente de excavación, por lo que la incertidumbre asociada a su determinación se traslada de manera directa a incertidumbres de diseño que redundan en mayores costos de construcción.

El objetivo de este trabajo es realizar algunas mediciones de laboratorio de algunos parámetros de resistencia y rigidez de suelos de la Formación Pampeano mediante ensayos triaxiales y estudiar si existe una correlación entre esos parámetros y alguna de las propiedades físicas del Pampeano, como el contenido de carbonato de calcio, la relación de vacíos, etcétera. El trabajo se enmarca dentro de un programa de investigación de las propiedades de los suelos de la Formación Pampeano que se lleva a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FIUBA.

Este trabajo está compuesto por seis capítulos y un conjunto de anexos. En el capítulo dos se presenta una descripción de la Formación Pampeano, particularmente de los suelos de la ciudad de Buenos Aires. Se analiza su composición y origen. Se describen los procesos de transporte, deposición y procesos post-deposicionales. Se realiza una caracterización físico-mecánica basada en trabajos previos con resultados de ensayos de campo y laboratorio. Finalmente se presenta una reseña de algunas obras de tunelería y grandes excavaciones ejecutadas en el Pampeano.

En el capítulo tres se analiza la resistencia al corte de los suelos cohesivos. Se describen las variables que afectan la resistencia y los diferentes mecanismos que intervienen conjuntamente 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 los resultados. Finalmente se discute la utilización de dicho criterio de manera sistematizada para programas de elementos finitos.

En el capítulo cuatro se presenta el programa experimental llevado a cabo en este trabajo, el cual esta compuesto de dos series de ensayos triaxiales. En la primera serie se midió la rigidez a bajas deformaciones; mientras que en la segunda se midieron la cohesión efectiva y el ángulo de fricción interna pico para bajas presiones de confinamiento. Se describe la técnica de extracción de las muestras obtenidas en las obras de ampliación de la línea H de subterráneos. Se presenta el equipo y los procedimientos empleados en cada serie de ensayos, entre los cuales se destaca la utilización de LDTs longitudinales y transversales (Sagüés 2008, Sfriso et al 2008) y la implementación de un sistema de adquisición de datos para la cámara triaxial. Se describe también el procedimiento utilizado para efectuar la medición del contenido de carbonato de calcio, que es una adaptación del método propuesto por ASTM D 4373.

En el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos: de la primera serie de ensayos, se presenta el módulo de Young para pequeñas deformaciones, su relación con la presión de confinamiento y la curva de reducción del módulo secante con el aumento de la deformación axial; ambos resultados se comparan con los obtenidos por Sagüés (2008) sobre muestras de Pampeano remoldeadas y compactadas; de la segunda serie de ensayos, se presentan los valores obtenidos para los parámetros de resistencia c' y $\phi_{máx}$ y la relación con el contenido de carbonato de calcio. Finalmente en el capítulo seis se exponen las conclusiones de este trabajo.

Del conjunto de anexos incluidos, vale la pena destacar los anexos uno y dos, que corresponden a los informes de avance. Estos informes describen gran parte de los trabajos realizados en 2007 en el laboratorio, los cuales consistieron en el reacondicionamiento de la cámara triaxial y la implementación de nuevos equipos. Muchas de las labores realizadas y descritas, en particular en el primer informe, no tienen mayor mérito académico por lo que no se las incluyó en el capítulo del programa experimental. Sin embargo, requirió de muchas horas de dedicación (Marzo-Diciembre de 2007) y fue parte de los trabajos realizados por el primer grupo de tesis. Este tiempo y esfuerzo no solo permitió llevar a cabo los objetivos planteados por el programa de investigación, sino también algo tan importante como fue la reactivación del Laboratorio de Mecánica de Suelos.

2 FORMACIÓN PAMPEANO

2.1 Descripción general

El Pampeano es un loess modificado preconsolidado por desecación y cementado con carbonatos de calcio y óxidos de magnesio.

Se encuentra en los niveles superiores del perfil estratigráfico de la Ciudad de Buenos Aires, desde la superficie hasta una profundidad de 40 m (+20 a -20 msnm aprox.), y está compuesto por capas paralelas de arcillas y limos (Bolognesi 1975, Fidalgo et al 1975, Nuñez 1986).

Las características del Pampeano están directamente relacionadas con el tipo y origen de las partículas que lo componen; el medio de transporte y forma de deposición; y los cambios climáticos que se produjeron durante y luego de su formación.

2.2 Origen y Transporte

En estos suelos predominan las partículas de origen volcánico originadas en los Andes centrales y en la Patagonia. Los sedimentos primarios fueron transportados y redepositados por acción de los vientos del sur y suroeste hacia el centro del país (Rocca et al 2006).

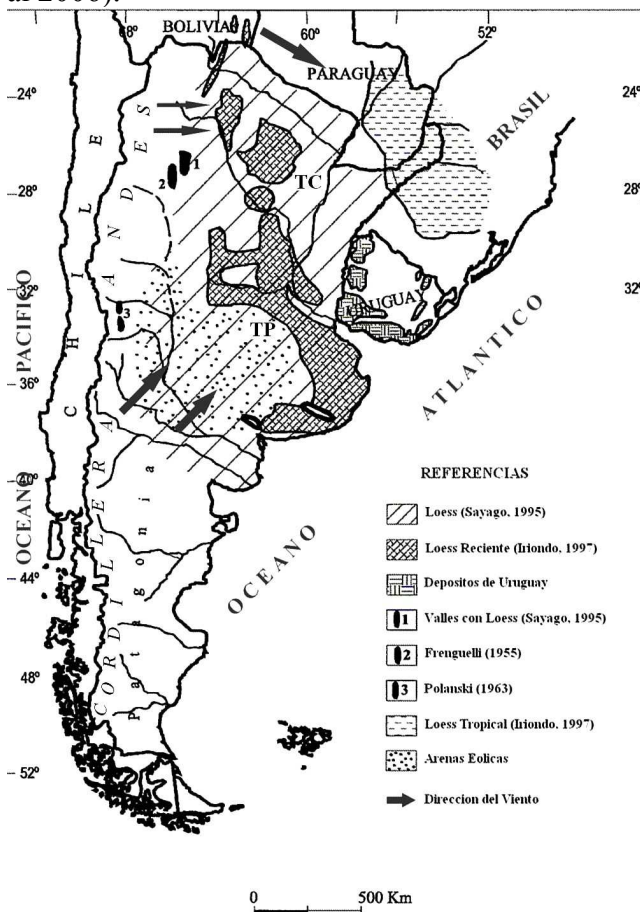


Figura 1: Distribución de Loess y Loessoides (Adaptado de Zarate 2003, Rocca et al 2006).

2.3 Deposición

Una de las explicaciones geológicas más aceptadas en cuanto al origen de esta formación está asociada a un proceso de subsidencia del fondo rocoso acompañado simultáneamente con la deposición de sedimentos eólicos y fluviales. Estos procesos se vieron interrumpidos periódicamente por levantamientos temporales provocando una erosión y redeposición de las partículas (Bolognesi y Moretto 1957).

Como consecuencia de estos procesos geológicos la formación Pampeano está formada por capas finas de materiales que van desde los loess depositados de manera fluvial y eólica hasta arcillas activas. Según los estudios mineralógicos realizados por González Bonorino y citados en el trabajo de Bolognesi y Moretto (Bolognesi y Moretto 1957), la formación Pampeano se depositó durante el Pleistoceno directamente sobre las Arenas Puelches (del Plioceno). El tercio inferior de la formación está compuesto por sedimentos fluviales depositados bajo agua y los dos tercios superiores por sedimentos eólicos.

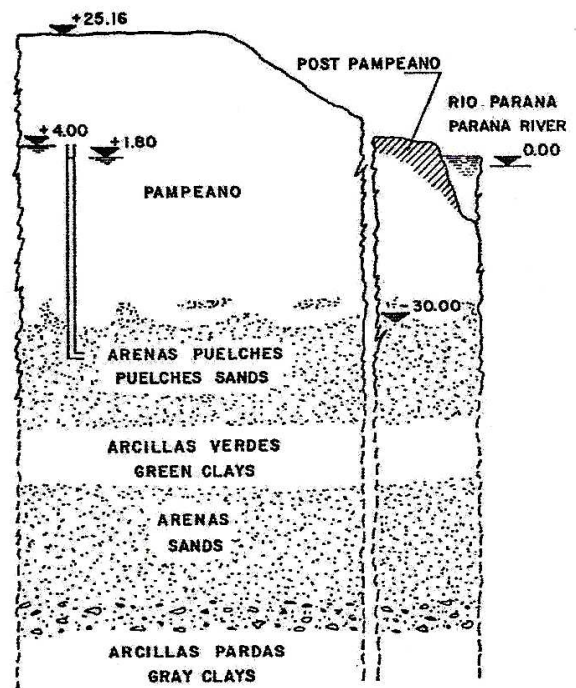


Figura 2: Perfil estratigráfico de la ciudad de Buenos Aires. (Bolognesi y Moretto 1975)

2.4 Procesos Post-deposicionales

Estos procesos pueden ser físicos, químicos o biológicos y ocurren debido a que los jóvenes sedimentos no son necesariamente estables en su nuevo medio, donde el material es expuesto a nuevas condiciones químicas, de presión y/o temperatura. El entendimiento de estos cambios es esencial para comprender las propiedades de los suelos y realizar una correcta interpretación de los datos obtenidos en los perfiles estratigráficos (Mitchell 1997).

2.4.1 Preconsolidación y Deseccación

El Pampeano presenta un alto grado de preconsolidación. Hay consenso general de que nunca ha existido una sobrecarga tal que genere este estado. Los causantes de esta preconsolidación son los procesos geológicos ocurridos durante y luego de la deposición de los sedimentos.

Los efectos de las últimas glaciaciones y el consecuente descenso del nivel del mar produjeron la preconsolidación de los depósitos fluviales; mientras que los periodos de fuertes sequías y la variación estacional del nivel freático preconsolidaron los depósitos eólicos por desecación y succión capilar. En la Figura 3 pueden observarse las presiones efectivas máximas $\bar{\sigma}'_{z\max}$ del suelo comparadas con la presión efectiva vertical creada por la tapada $\bar{\sigma}'_{zt}$ (Bolognesi 1975).

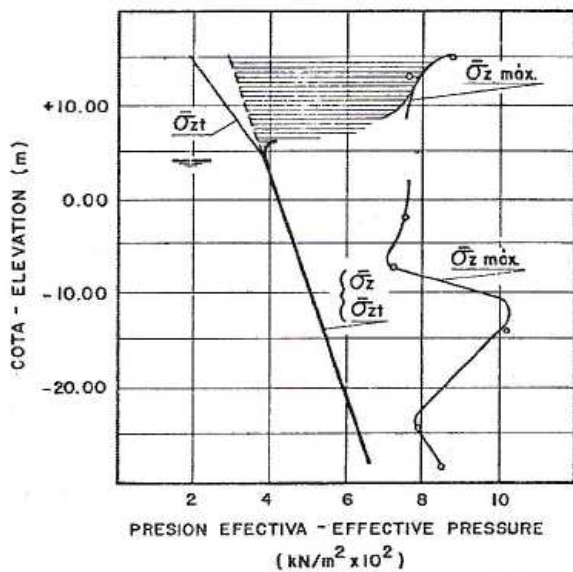


Figura 3: Presiones efectivas del terreno (Bolognesi 1975).

La desecación de los depósitos superiores produjo también un agrietamiento y contracción del terreno provocando una pérdida en el confinamiento y un camino para la filtración del agua de lluvia y el ingreso de sales.

2.4.2 Cementación

Durante la sedimentación de material, el carbonato de calcio presente en el agua y sales del suelo se precipitó en forma de nódulos y como impregnación entre partículas generando zonas cementadas de alta resistencia y forma irregular, formando lo que se conoce como tosca (Bolognesi 1975, Nuñez 1986).

Se reconocen tres grados de cementación: i) en forma de nódulos aislados en una matriz preconsolidada no cementada; ii) en forma de una matriz de cementación intermedia con algunos nódulos fuertemente cementados; y iii) lo que se conoce comúnmente como "tosca", que tiene la misma matriz medianamente cementada pero embebiendo

inclusiones grandes, muy resistentes, producidas por precipitación de carbonato de calcio. En las toscas, estas inclusiones tienen bordes muy nítidos en los que se observa un salto importante de propiedades mecánicas respecto a la matriz que las rodea (Nuñez y Micucci 1986).

2.4.3 Confinamiento lateral

La recuperación del nivel freático y sus fluctuaciones saturaron la mayor parte del terreno cuya expansión se vio restringida por el material sedimentado en las fisuras, aumentando así el confinamiento lateral y por lo tanto el coeficiente de empuje en reposo, se asume que se encuentra en el rango de $K_0 = 0.7-1.0$ (Nuñez 1986, Sfriso 2006).

2.5 Clasificación

Un loess es un sedimento eólico uniforme y cohesivo, que debe su cohesión a la presencia de un cementante que puede ser de naturaleza predominantemente calcárea o arcillosa (Terzaghi y Peck 1973).

Según su clasificación en la carta de plasticidad de Casagrande tanto los loess primarios como los redepositados se ubican muy cerca de la línea "A" y se los puede clasificar como ML, MH, CL o CH. En la Figura 4 puede observarse una clasificación realizada por Bolognesi y Moretto en 1957 comparando las características de los loess primarios y secundarios (redepositados).

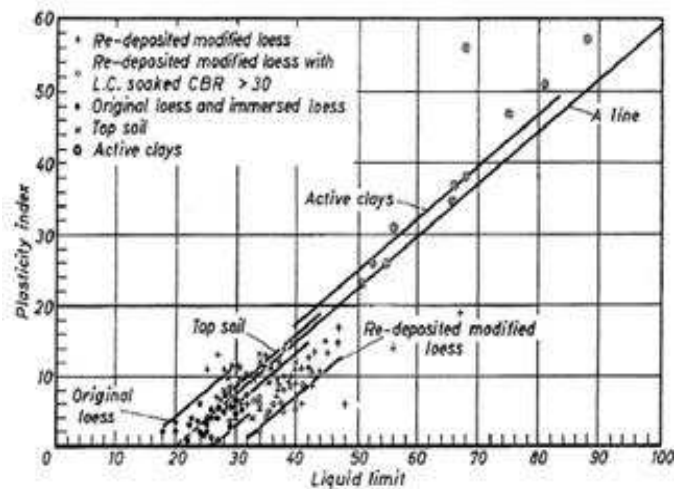


Figura 4: Clasificación de loess primario y redepositado (Bolognesi y Moretto 1957).

Como resultado de esta comparación se observa que el proceso de transporte y redeposición del suelo modificó las propiedades índice del loess provocando un aumento del límite líquido e índice de plasticidad sin que exista un cambio en el tamaño de las partículas. Aunque si hay una diferencia en la relación de vacíos, en los loess primarios se encuentra en valores de 0.8 a 1.15 mientras que en los loess redepositados es menor a 0.8 (Bolognesi y Moretto 1957).

La estratificación propuesta por González Bonorino (Bolognesi y Moretto 1957) se completa con un análisis mineralógico de cada zona y subzona, y la clasificación de los suelos en la carta de plasticidad.

Los estratos superiores, de deposición eólica, corresponden a la *Zona I*, compuesta de tres subzonas (a, b y c):

Tabla 1. Composición del perfil

Zona	Cota msnm	Clasificación	Mineralogía
a)	+25 a +10	CL o CH	Vidrio volcánico escaso
b)	+10 a -5	ML	Cementación calcárea y estructura macroporosa
c)	-5 a -8 -8 a -10	CL Limo cinerítico	Vidrio volcánico escaso y plagioclasa

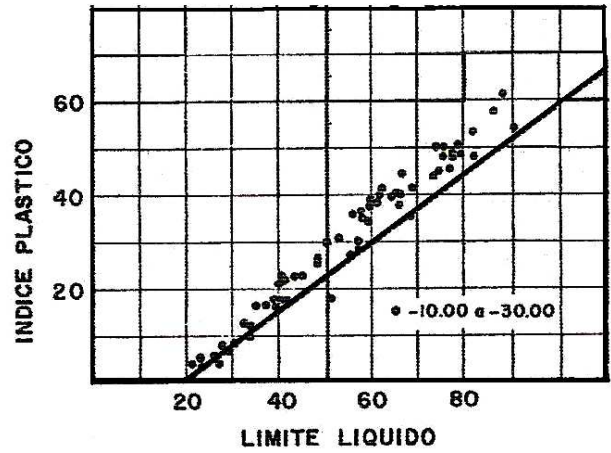


Figura 6: Carta de plasticidad de Casagrande, clasificación de suelos de la zona II (Bolognesi y Moretto 1975).

2.6 EL Pampeano en la ciudad de Bs.As.

En los suelos de la ciudad de Buenos Aires pueden identificarse dos zonas bien diferenciadas por sus propiedades geotécnicas.

Una es la Formación Pampeano que cubre la mayor extensión del área urbana. En ella se encuentra fundada la mayoría de los edificios y extendida casi toda la red de subterráneos. La otra es la formación Post Pampeano, compuesta principalmente por limos y arcillas de mediana y alta plasticidad y se extiende sobre la ribera del Río de la Plata y las márgenes y delta del Río Paraná.

Si bien la información geotécnica que existe en la región es abundante, hay pocos trabajos donde se encuentre sintetizada y sistematizada. Uno de ellos es la carta Geológico-Geotécnica de la ciudad de Buenos Aires, elaborada por el Dr. Horacio Rimoldi y publicada por el SEGEMAR (Servicio Geológico Minero) en el 2001. El AABA (Atlas Ambiental de Buenos Aires) reproduce una parte de dicha información en las figuras: Figura 7 y Figura 8. (AABA 2008).

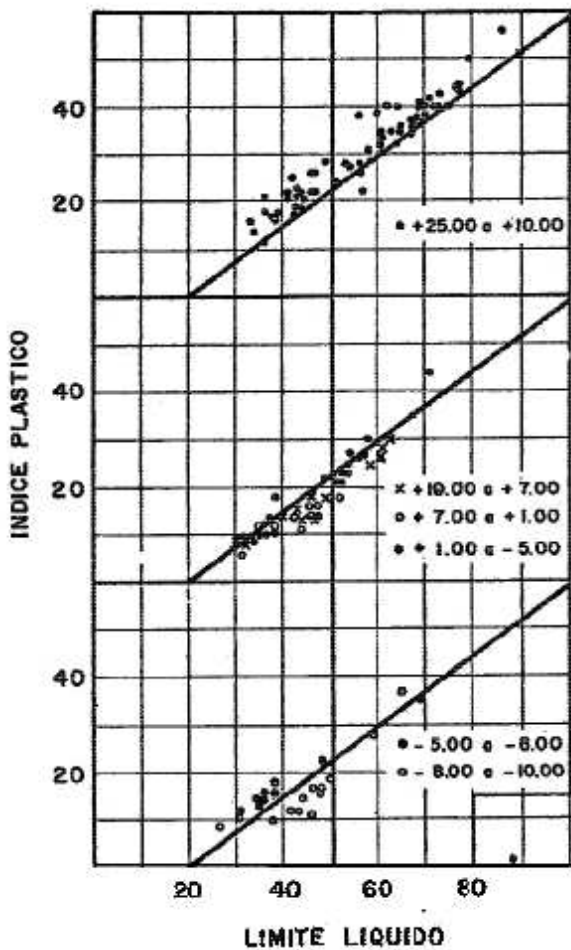


Figura 5: Carta de plasticidad de Casagrande, clasificación de suelos de la zona I (Bolognesi y Moretto 1975).

El tercio inferior constituye la *Zona II* y corresponde a los suelos de deposición fluvial.

Tabla 2: Composición del perfil

Zona	Cota msnm	Clasificación	Mineralogía
II	-8 a -25	CL o CH	Montmorillonita, Caolinita cuarzo abundante y escaso vidrio volcánico

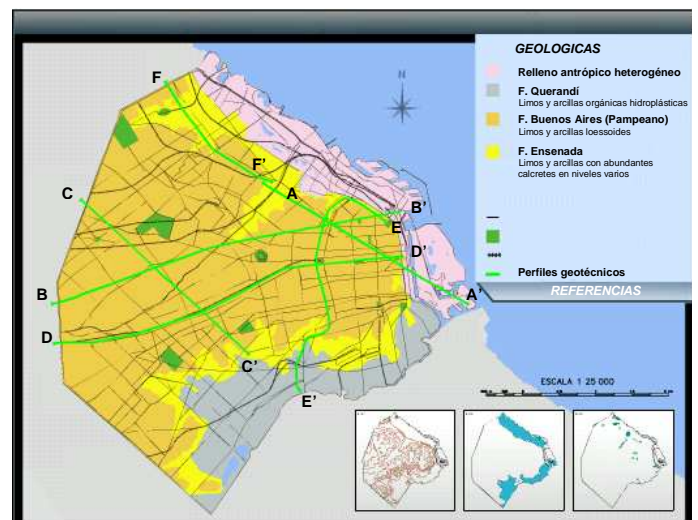


Figura 7: Carta geológico-geotécnica de Bs.As. (AABA 2008)

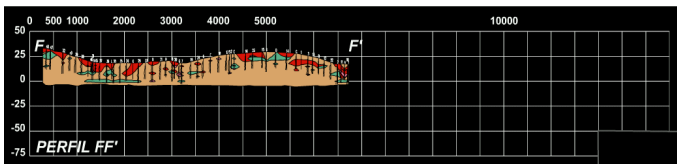
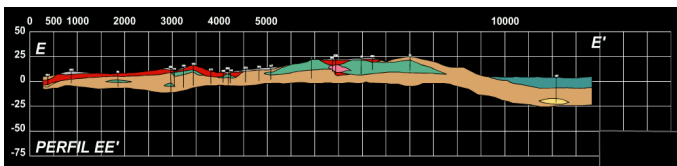
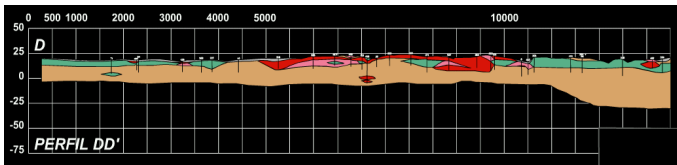
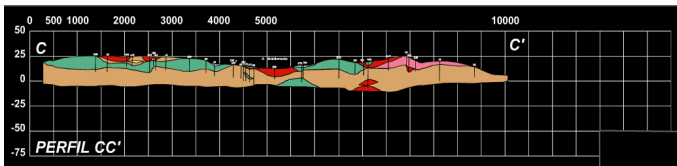
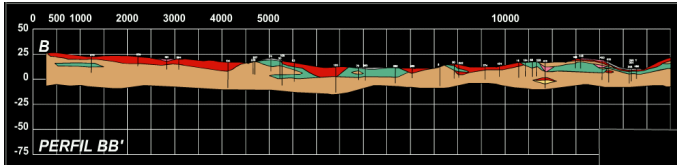
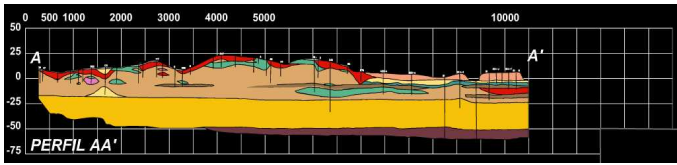
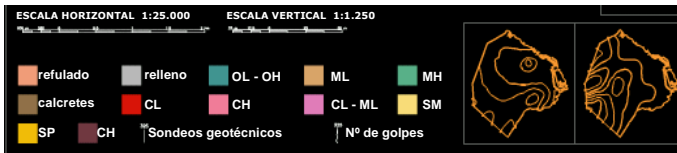


Figura 8: Perfiles geotécnicos indicados en la Figura 7

2.7 Caracterización Físico-Mecánica

En este apartado se realiza una descripción del comportamiento físico-mecánico del Pampeano. En particular, se tratan los aspectos relacionados a su resistencia, rigidez y permeabilidad. Además se citan algunos resultados obtenidos en trabajos previos mediante la utilización de ensayos de laboratorio y campo.

Para poder hacer una correcta estimación de los parámetros que definen estas propiedades es necesario analizar el Pampeano en su estado inalterado ya que su estructuración y heterogeneidad son determinantes sobre su real comportamiento. Debido a la dificultad que presenta la obtención de muestras “inalteradas” los ensayos in-situ presentan ventajas sobre los análisis de laboratorio. En la ciudad de Buenos Aires, la utilización de ensayos SPT es la práctica más habitual para todo tipo de obras. En algunos casos esta información se

complementa con la ejecución de ensayos de carga de placa (PLT) y presiómetros Menard. También se ven como alternativas el empleo de la sísmica de reflexión y de refracción junto con las técnicas de crosshole (CHT) y downhole (DHT) que permiten obtener un perfil estratigráfico y una buena caracterización de la rigidez de los suelos.

En la Figura 9 se observa un perfil estratigráfico típico tomado sobre la traza de la línea H de subterráneos para la obra de la Estación Corrientes.

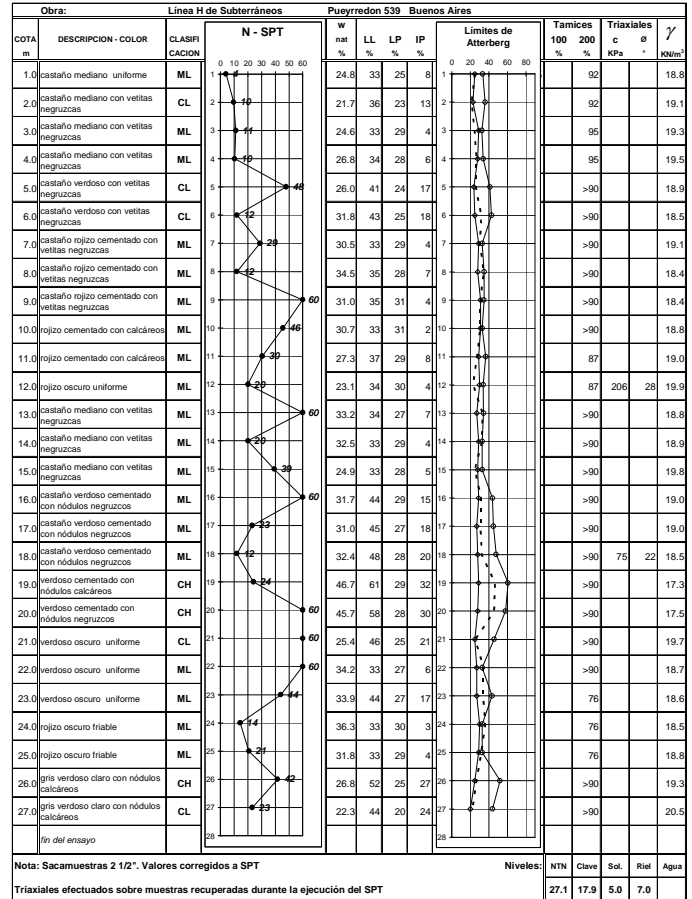


Figura 9: Resultados de campo (N_{SPT}) y laboratorio (ω_N , ω_L , ω_p , #200, c , ϕ y γ).

2.7.1 Resistencia

Estos depósitos son muy duros. Con excepción de los primeros seis metros, la resistencia a la penetración es sistemáticamente $N_{SPT} > 20$ con algunas zonas cementadas cuyo comportamiento es más parecido al de una roca débil con valores de $N_{SPT} > 50$ (Nuñez 1986, Nuñez y Micucci 1986).

La resistencia a compresión simple de muestras saturadas inalteradas, dependen del grado de cementación y tiene valores entre 300-2000 kPa. Para grandes presiones de confinamiento el ángulo de fricción es independiente del grado de cementación con valores de $\phi = 29^\circ$ (Nuñez y Micucci 1986).

Debido a la gran resistencia del terreno las fundaciones superficiales son muy utilizadas; las presiones de cálculo son del orden de 200 a 600 kPa para bases aisladas o combinadas y de 300 a 500 kPa para plateas (Nuñez 1986). A pesar de esto muchas

veces el diseño arquitectónico de las obras concentra grandes cargas en pocos puntos aislados lo que obliga a la utilización de pilotes perforados. Para el cálculo de la resistencia por fricción de los pilotes deben tenerse en cuenta algunos factores tales como el grado de cementación en el suelo y la destrucción del terreno debido al proceso de perforación, casos en los cuales se minimiza la capacidad de carga por fricción del pilote (Nuñez 1986).

2.7.2 Rigidez

La formación Pampeano presenta una gran rigidez. Gracias a esta propiedad los asentamientos medidos sobre las construcciones aquí realizadas reportan valores milimétricos. Aún en las grandes obras de tunelería el comportamiento del suelo es casi elástico minimizando los asentamientos y los efectos sobre las construcciones superficiales (Sfriso 2006 y 2008). Debido a esto resulta necesario conocer comportamiento del pampeano para bajos niveles de deformación, es decir, su rigidez inicial (E_0). Este concepto conlleva a realizar cambios en las prácticas rutinarias de campo y laboratorio.

La incorporación de medición de deformaciones locales en ensayos triaxiales así como el empleo de bender elements o columnas resonantes que permiten la medición del módulo de corte inicial G_0 son algunas de las formas de calcularlo de manera directa o indirecta.

$$E_0 = 2G_0(1 + \nu) \quad (1)$$

Los parámetros de rigidez pueden ser medidos in situ utilizando ensayos tales como ensayos de carga de placa (PLT), dilatómetros (DMT) y las técnicas geofísicas antes mencionadas. Sin embargo todos estos procedimientos miden módulos para distintos puntos de la curva tensión-deformación. Los módulos estimados a partir de los resultados de los ensayos de penetración no representan en buena manera los parámetros de rigidez iniciales, ya que el material se está deformando en el rango donde desarrolla su resistencia pico (Mayne 2001).

Por otro lado, no solo es importante conocer los valores de rigidez inicial debido a la baja deformación del Pampeano, sino también debido a que la mayoría de los problemas de deformaciones en la geotecnia se desarrollan para el estado de tensiones cercanos a K_0 y deformaciones en el rango de E_0 y G_0 (Burland 1989, Mayne 2001). En la Figura 10 puede observarse un esquema conceptual de la curva tensión-deformación que representa los distintos rangos de respuesta de los suelos y los parámetros significativos de cada uno.

Los ensayos geofísicos son algunos de los ensayos in situ que permiten estimar los valores de rigidez en el inicio de la curva a partir de la medición de la velocidad de las ondas de corte V_S (Tatsuoka & Shibuya, 1992; Jardine, et al., 1991)

$$G_0 = \rho_T \cdot V_S^2 \quad (2)$$

Siendo $\rho_T = \gamma_T/g$ = la densidad del terreno, γ_T = el peso unitario y g = la constante gravitacional.

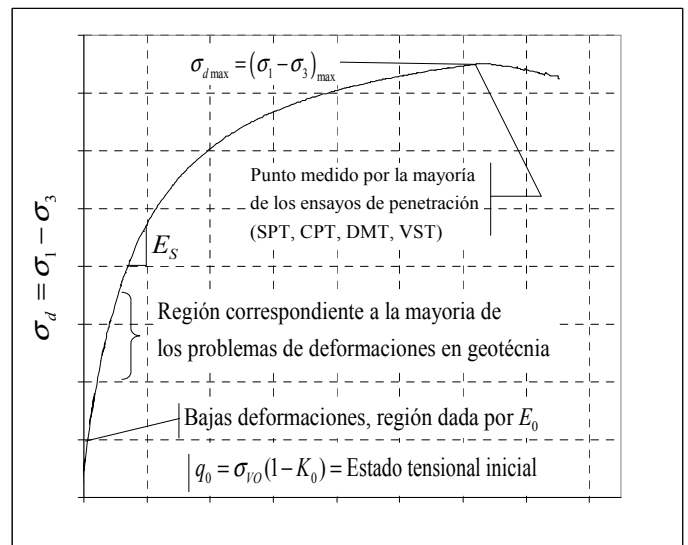


Figura 10: Curva tensión deformación conceptual (adaptada de Mayne 2001).

El ensayo de carga de placa permite la medición directa del coeficiente de reacción de la subrasante y una estimación razonable y precisa del módulo de Young no drenado (Sfriso 2006). En la Tabla 3 se presentan una serie de valores obtenidos mediante ensayos de placa realizados en Buenos Aires dentro de pozos verticales que muestran la variación con la profundidad del módulo de reacción de la subrasante K , el módulo de descarga-recarga K_{ur} . A partir de este último puede estimarse un módulo de Young pseudo elástico (Sfriso, 2006; Sfriso, et al 2008).

Tabla 3: Resultados de PLT; variación de los parámetros, K , K_{ur} , E_{PLT} con la profundidad

Prof. m	K MN/m ³	K_{ur} MN/m ³	E_{PLT} MPa
0 a 8/12	200 - 300	500 - 800	100 - 160
8/12 a 12/14	400 - 600	800 - 1200	160 - 240
12/14 a 20/24	600 - 800	1200 - 1800	240 - 360
20/24 a 30/32	250 - 500	600 - 1400	120 - 280

2.7.3 Estado tensional

El Pampeano es un suelo preconsolidado por desecación en el cual se puede asumir una presión de preconsolidación equivalente de 0.8-1.2 MPa (Sfriso 2008). En la Tabla 4 se presentan valores de K_0 obtenidos mediante análisis inverso (Sfriso 2006).

Tabla 4. Variación de K_0 con la profundidad

Prof. m	K_0
0 a 8/12	0.55 - 0.70
8/12 a 20/24	0.65 - 1.00
20/24 a 30/32	0.55 - 0.80

2.7.4 Permeabilidad

Debido a su estructura macroporosa junto con los sistemas de grietas y fisuras el Pampeano es un material que tiene in-situ una permeabilidad mucho mayor a la que es posible medir en muestras mediante ensayos de laboratorio. Esta propiedad se denomina permeabilidad secundaria de los suelos.

Las grietas y fisuras verticales generadas por los procesos de desecación junto con la cementación errática provocaron en el terreno una anisotropía hidráulica, haciendo que la permeabilidad vertical sea de mayor orden que la horizontal.

Los valores de k medidos en ensayos de bombeo o calculados mediante análisis inverso de caudales obtenidos en bombas permanentes en obras de tunelería se encuentran dentro de un amplio rango que va de $5 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$ a $5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$ (Sfriso 2006).

2.8 Obras en el Pampeano

El Pampeano es muy favorable para obras de tunelería y grandes excavaciones debido a su gran rigidez y resistencia a compresión simple en corto y mediano plazo, a la vez que exhibe un comportamiento altamente friccional (Sfriso 2006).

2.8.1 Obras de tunelería

Al momento de proyectar un túnel en el Pampeano deben tenerse presentes sus características tanto para diseñar las estructuras definitivas así como para proyectar los procedimientos constructivos y estructuras provisionales, con el fin de maximizar la seguridad en todas las etapas. En su trabajo "Procedimientos constructivos para la ejecución de túneles urbanos" Sfriso (2006) describe tres particularidades a tener en cuenta:

i) El Pampeano está fisurado y tiene algunas lentes de comportamiento cuasi friable. Lo que obliga a la colocación de un sostenimiento de primera etapa cerca del frente que evite la formación de chimeneas o sobre excavaciones en la clave (Nuñez 1986, Bolognesi 1991, Nuñez 2000, Nuñez 2007). El máximo avance sin sostenimiento que se acepta como seguro es de 2.5m si no existen filtraciones de agua.

ii) Los materiales drenan a una velocidad compatible con la construcción del túnel. Por lo que deben los análisis puramente no drenados (c_u y ϕ_u) son poco relevantes para el diseño.

iii) El Pampeano inferior, no expuesto a desecación (Fidalgo 1975, Nuñez 1986) y con cementación calcárea pobre o ausente, tiene un comportamiento poco seguro cuando se excavan en él largas galerías sin sostenimiento. El elevado estado tensional al que está sometido, la fisuración preexistente, la cementación pobre y el flujo de agua hacia el interior de las galerías puede provocar

inestabilidades locales en las paredes que exigen sistemas de contención temprana. En la siguiente figura se observa una comparación de una galería sin sostenimiento en el pampeano medio frente a otra ejecutada en el pampeano inferior (Sfriso 2006).

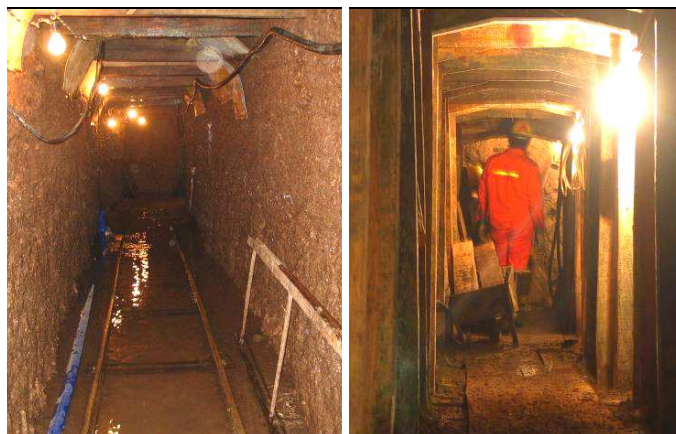


Figura 11: Galerías de la línea H, 2003

Estas imágenes son una prueba fehaciente de la existencia de un agente cementante que posibilita mantener cortes verticales en el terreno aún existiendo un flujo de agua que evite la formación de tensiones capilares entre partículas.

La correcta caracterización de esta propiedad que se podría denominar cohesión efectiva o cementación adquiere mayor importancia ya que no solo afecta el estado tensional del túnel ya construido y consecuentemente el dimensionamiento del revestimiento de segunda etapa sino que también es decisivo en la etapa constructiva para establecer la longitud de avance, el tiempo que es posible mantener el túnel sin revestimiento y la seguridad en el frente de avance.

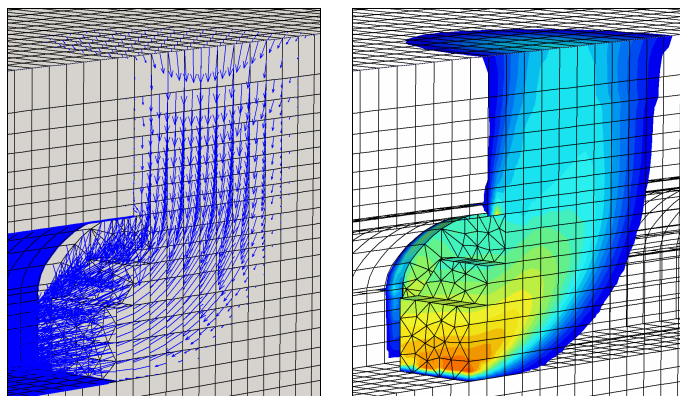


Figura 12: Forma de falla en el frente de avance asociada al método de Frente Completo.

Los túneles no solo modifican el estado del suelo adyacente y las instalaciones enterradas, también tienen influencia sobre las construcciones superficiales. Gracias a la rigidez y resistencia del Pampeano, esta influencia se limita a la aparición de desplazamientos milimétricos en la mayoría de los casos y dependen de la forma y tamaño del túnel, siendo prácticamente independientes del método constructivo (Sfriso 2006).

La Estación Corrientes es una de las últimas obras de tunelería ejecutadas en Buenos Aires. Una gran caverna de 135m de largo y 14m de alto y un largo hall de acceso de 6m de alto se excavaron utilizando el método de Frente Completo, en seis meses con descensos en la superficie menores a 10mm y minimizando las molestias en las zonas aledañas (Sfriso 2008).



Figura 13: Excavación de la Estación Corrientes, línea H 2008.

Los procedimientos constructivos para la ejecución de túneles han cambiado en los últimos años. Las técnicas analíticas y numéricas de cálculo y diseño tienen su principal fuente de datos en la observación y el análisis inverso del comportamiento del terreno durante la construcción de las obras (Sfriso 2006).

En la Tabla 5 se presenta un conjunto de parámetros utilizados para la modelación numérica de construcciones subterráneas en los suelos de Buenos Aires (Sfriso 1999, 2006, 2008; Sfriso et al. 2008). Esta serie de parámetros de entrada corresponden al modelo hiperbólico implementado mediante Plaxis (Schanz, et al. 1999). El HSM ha resultado eficiente para reproducir el comportamiento del suelo en obras de tunelería y excavaciones a cielo abierto (Sfriso 2008).

Tabla 5. Parámetros utilizados para simulación numérica

	Relleno		0-8/12		8/12-20/24		>20/24	
	min	max	min	max	min	max	min	max
c_u (kPa)	20	50	50	100	110	220	40	120
ϕ_u (°)	8	15	10	20	5	20	0	5
c' (kPa)	0	5	10	25	25	50	15	30
ϕ' (°)	28	30	28	31	30	34	28	31
ψ (°)	0	0	0	3	0	6	0	3
E_{50}^r (MPa)	10	20	60	100	75	150	60	100
E_{ur}^r (MPa)	25	50	150	250	180	300	140	220
m (-)	0	0	0	0	0	0	0	0
ν (-)	0.20	0.20	0.20	0.30	0.20	0.30	0.25	0.35
R_f (-)	0.85	0.90	0.80	0.90	0.80	0.90	0.80	0.90

Para todos los estratos analizados los valores de c' utilizados son distintos de cero.

2.8.2 Excavaciones urbanas a cielo abierto

En el Pampeano es común la ejecución de grandes excavaciones a cielo abierto con perfiles netamente verticales que permanecen a la intemperie permitiendo la modificación de las condiciones capilares. La razón por la cual estas excavaciones se mantienen estables es la presencia de un material cementante distribuido en la masa de suelo que le otorga la capacidad de absorber tensiones de tracción (Nuñez 1973).

Para suelos cohesivos es posible ejecutar cortes verticales sin apuntalamientos hasta una profundidad denominada crítica (H_c) para la cual el esfuerzo lateral resultante del estado de tensiones provocado en la masa de suelo sea nulo (Nuñez 1973).

$$H_c = \frac{4c}{\gamma} \cdot (N_\phi)^{0.5} \quad (3)$$

Para suelos fisurados como es el Pampeano, se considera que puede generarse un agrietamiento que disminuya esta profundidad de excavación. La experiencia indica que las grietas se prolongan generalmente hasta la mitad de la altura de la excavación. Por lo tanto la máxima altura teórica para realizar excavación sin estructura de sostén es:

$$H_{\max} = \frac{2}{3} H_c = \frac{8c}{3\gamma} \cdot (N_\phi)^{0.5} \quad (4)$$

Estas ecuaciones muestran la incidencia que tiene la cohesión efectiva y lo importante que resulta su correcta determinación en este tipo de problemas. Por ejemplo, para un perfil como los analizados en este trabajo con $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\phi' = 32^\circ$ y un rango de $c' = 2-50 \text{ kPa}$, la profundidad de excavación adquiere valores de $H_{\max} = 0.5\text{m}-13\text{m}$.

En la siguiente figura se observa una excavación realizada en el Pampeano (en la ciudad de La Plata) de 120m de lado y 22m de profundidad, en la cual se contuvieron los empujes utilizando anclajes pasivos y una placa de hormigón proyectado de 3" que los vinculaba (Nuñez 2007).



Figura 14: Excavación para el Teatro Argentino de La Plata.

En obras de excavaciones a cielo abierto en el pampeano, un diagrama de empujes totales simplificado (Moretto, en Terzaghi 1973) es utilizado para el dimensionamiento de estructuras de retención, temporarias o definitivas. Los valores y forma de este diagrama responden al hecho de que el pampeano es un suelo fisurado y que aún siendo $H < H_{\max}$, si la grieta se llenara de agua provocaría la existencia de un empuje mínimo que debe ser resistido (Nuñez 1973, Nuñez 2000). Este diagrama forma parte del Código de la Edificación de la Ciudad de Buenos Aires (CECBA).

El diagrama presenta las siguientes particularidades: i) se calcula utilizando un fluido equivalente $\gamma_{\text{eq}} = 0.25 \gamma_w$; ii) la distribución de presiones horizontales se realiza en dos bloques de altura "H/2"; en el bloque superior actúa el 60% del empuje, se considera una presión constante de $p_h = 0.15 \gamma_w$ y en el bloque inferior actúa el 40% restante con una presión constante $p_h = 0.10 \gamma_w$; iii) La resultante "P" se encuentra a $d = 0.55H$ medida desde el fondo de la excavación.

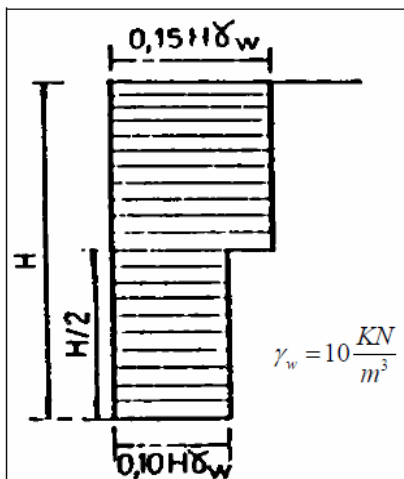


Figura 15: Diagrama de empujes del CECBA

3 RESISTENCIA AL CORTE EN SUELOS COHESIVOS

En este capítulo se presenta una introducción a la resistencia al corte de los suelos cohesivos. 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. Finalmente se discute la utilización del criterio de Mohr-Coulomb en programas de elementos finitos.

3.1 Características generales

En la mayoría de los problemas de la geotecnia donde la resistencia al corte juega un papel importante (ej. estabilidad de taludes, capacidad de carga, etc.); se utiliza el criterio de falla propuesto por Coulomb (1776)

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi' \quad (5)$$

donde τ_f es la resistencia al corte en el plano de falla, c es la cohesión, σ_f es el esfuerzo normal efectivo en el plano de falla y ϕ es el ángulo de fricción interna efectivo.

En realidad, la ecuación (5) es puramente fenomenológica. Desde el punto de vista de la física de los suelos, la resistencia al corte de los suelos depende de muchos mecanismos complejos de interacción eléctrica, química y mecánica entre las partículas y grupos de partículas. Mitchell (1997) postuló que una ecuación que contemple estas variables debería tener la forma

$$\tau_f = F(c', \phi', \sigma', e, H, T, \varepsilon, S) \quad (6)$$

donde además de los parámetros ya mencionados se incluye: la relación de vacíos e , la historia de tensiones H , la temperatura T , la deformación específica ε y la estructura interna S .

3.2 Mecanismos de resistencia en materiales granulares

La resistencia de los materiales granulares se debe principalmente a su naturaleza friccional, por lo que usualmente se los denomina materiales friccionales. Este mecanismo se moviliza por el desplazamiento relativo entre partículas; depende de la magnitud de las presiones efectivas y la tendencia a los cambios de volumen. No obstante, otras causas debidas a efectos del medio, procesos mecánicos y post deposicionales, le otorgan a los suelos una resistencia al corte extra independiente del estado tensional.

A continuación se describen algunas teorías que explican estos mecanismos de resistencia.

3.2.1 La fricción como mecanismo de falla

La fricción es un mecanismo que disipa energía; depende del estado tensional y la magnitud de las deformaciones. Este concepto desarrollado inicialmente por Leonardo da Vinci por el 1500 acerca de la fuerza de corte necesaria para desplazar un cuerpo A respecto de un cuerpo B fue luego retomado por Amontons en 1699 y son las conclusiones de dichos trabajos lo que frecuentemente se denomina como Leyes de Amontons y establecen que:

- 1 La fuerza friccional T , es directamente proporcional a la fuerza normal N (Figura 16).
- 2 La resistencia friccional es independiente del área de contacto entre dos cuerpos.

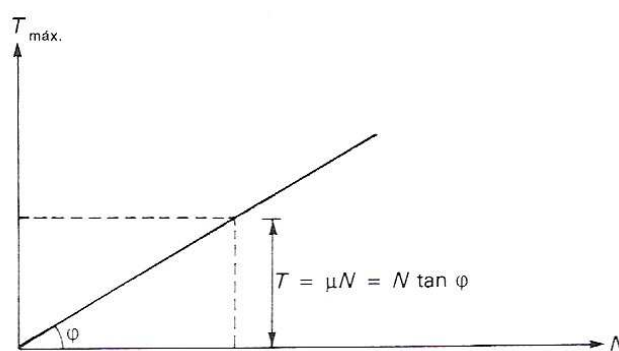


Figura 16: concepto físico de rozamiento

La forma matemática de estas leyes es la expresión

$$T = N \cdot \mu \quad (7)$$

Varias teorías han sido propuestas para explicar estas observaciones (Santamarina 2001).

La “teoría de aspericidad” (*asperity theory*), establece que todos los cuerpos presentan, en mayor o menor grado, una rugosidad superficial (Figura 17a) y es esta la causa del fenómeno de fricción. Una visión en escala reducida de las superficies (Figura 17b) muestra que la fuerza necesaria para vencer esa fricción es:

$$T_f = N \cdot \tan \alpha \quad (\alpha \text{ ángulo de rugosidad}) \quad (8)$$

La “teoría de adhesión” (*adhesion theory of friction*) propone que el área de contacto real entre dos superficies rugosas es muy pequeña, en estos puntos se produce un significativo aumento de las tensiones llevando el material a fluencia y generando una unión química entre ambas superficies. Siendo N/σ_y el área de contacto, la fuerza tangencial necesaria para producir el desplazamiento relativo es,

$$T_f = N \cdot \sigma_{ad} / \sigma_y \quad (9)$$

donde σ_{ad} es la tensión de adhesión y σ_y es la tensión de fluencia.

En ambas teorías, la fuerza tangencial T_f es proporcional a la fuerza normal e independiente del área aparente de contacto, coincidiendo con lo expuesto por Amontons (Santamarina 2001).

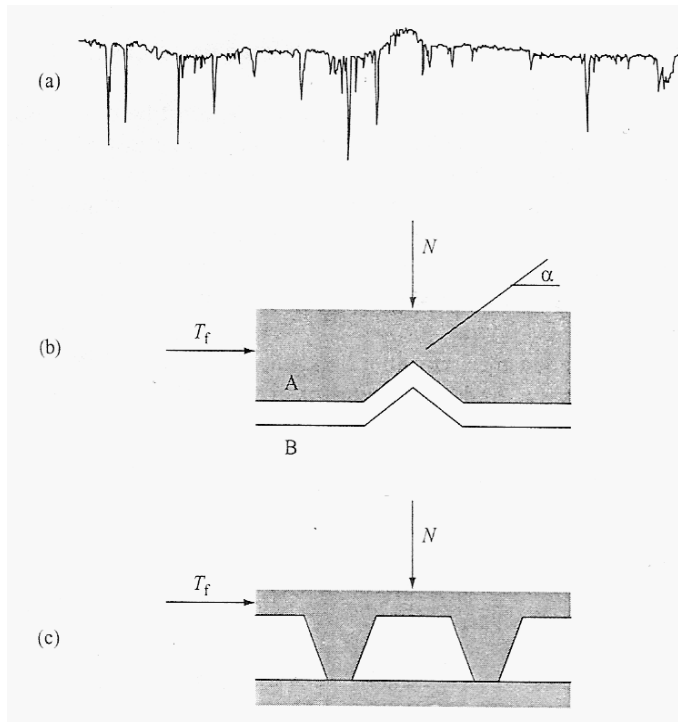


Figura 17: Teorías de fricción. (a) Perfil superficial de un mármol pulido, (b) teoría de aspéricidad, (c) teoría de adhesión (Santamarina 2001).

Para materiales discretos, como los suelos, la resistencia friccional entre partículas se mide a través del *ángulo de fricción interna* ϕ , de manera que $\mu = \tan(\phi)$.

La utilización de la ecuación (5) en lugar de la (7) implica definir un área de contacto en el plano de falla, para expresar la resistencia al corte en términos de tensiones en lugar de fuerzas. Este simple paso encierra aceptar la utilización de la mecánica del continuo en los suelos.

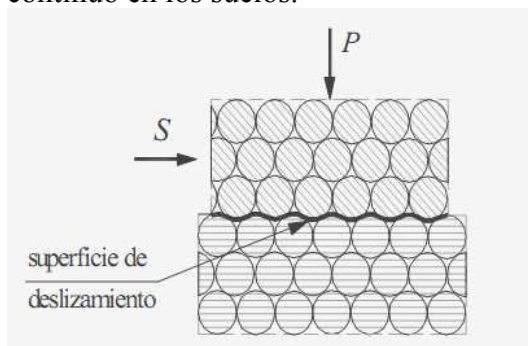


Figura 18: Esquema de material granular

3.2.2 Fricción y dilataancia

El criterio de falla de Mohr-Coulomb, descrito por la ecuación (5), tiene en cuenta que el ángulo de fricción interna tiene dos componentes

$$\phi = \phi_{cr} + \psi \quad (10)$$

siendo ϕ_{cr} el ángulo de resistencia crítica y ψ la dilataancia. El ángulo ϕ_{cr} tiene en cuenta el rozamiento mineral-mineral y, en menor medida, la forma y granulometría de las partículas. Por otro lado, ψ es una medida de la tendencia que tiene el material a cambiar de volumen. Mide la interferencia geométrica que existe entre las partículas que intentan desplazarse entre sí (Figura 19). Su valor depende de la geometría de las partículas y su disposición, es decir de la densidad o de la relación de vacíos. Por otro lado, ϕ_{cr} se define como la resistencia del suelo cuando se deforma a volumen constante.

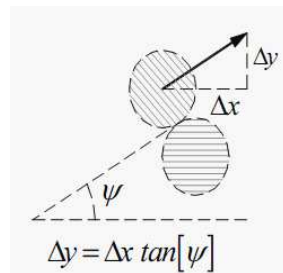


Figura 19: ángulo de dilataancia, ψ .

Por lo tanto la ecuación que describe la resistencia al corte en materiales friccionales puede reescribirse como

$$s = c' + \sigma' \tan(\phi_{cr} + \psi) \quad (11)$$

3.2.3 La cohesión

El concepto de cohesión como componente de la resistencia al corte de los suelos aparece a partir de los trabajos de Coulomb (1776). Este parámetro es la ordenada al origen de la recta que representa el criterio de falla de Mohr-Coulomb; es decir la resistencia al corte para esfuerzo normal de compresión nulo. Terzaghi (1942) no describe específicamente a que llama cohesión de los suelos, pero se deduce que es la causante de mantener las partículas unidas entre sí, generando un aporte a la resistencia al corte (Rinaldi 2006).

A continuación se cita el trabajo de Mitchell (1997) en el cual propone varias causas que pueden generar cohesión en los suelos. Diferenciando entre aquellas que generan una *cohesión verdadera o efectiva* y las que provocan una *cohesión aparente*.

a) Cohesión efectiva

1 *Cementación*. Es la unión química de partículas como resultado de la cementación por carbonatos, sílice, alumina, óxidos de hierro, y componentes orgánicos. Estos cementantes pueden provenir de los minerales presentes en el suelo como resultado de procesos de solución y precipitación.

La cementación puede llegar a tener valores de algunos cientos de kPa. Aún en muy bajos porcentajes la cementación tiene influencia sobre el comportamiento tensión-deformación.

2 *Atracción electrostática y electromagnética.* Este tipo de fuerzas se ponen de manifiesto entre partículas muy pequeñas. Las fuerzas electrostáticas son significativas ($>7\text{kPa}$) para separaciones menores a 2.5 nm. Las electromagnéticas o fuerzas de Van der Waals aportan resistencia a la tracción para partículas con una separación menor a $1\mu\text{m}$.

b) *Cohesión aparente*

1 *Succión capilar.* En los suelos parcialmente saturados se generan fuerzas de atracción aparentes debido al fenómeno de tensión superficial en el agua. De hecho, este es un mecanismo de resistencia friccional a partir de las tensiones efectivas generadas por las presiones de poro negativas.

2 *Fuerzas mecánicas aparentes.* La geometría de las partículas su disposición y trabazón irregular generan un efecto de empaquetamiento impidiendo la formación clara de un plano de falla, otorgando una resistencia al corte adicional.

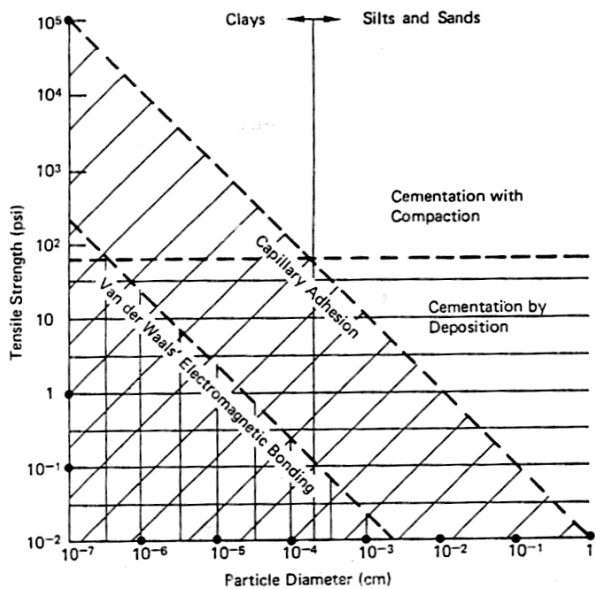


Figura 20: Contribución potencial de distintos mecanismos de unión en la resistencia al corte (Ingles, 1962).

De los todos los mecanismos mencionados, excepto por la cementación, la cohesión aparece como consecuencia de esfuerzos normales entre partículas. Mitchell (1997) expresa que, con excepción de la cementación, es conveniente pensar la cohesión como resultado de la fricción generado por fuerzas de atracción interna o interparticular; y que el término friccional de la ecuación de Mohr-Coulomb se desarrolla por la aplicación de esfuerzos externos.

Este mismo concepto fue sugerido por Taylor (1948) que define a la cohesión como resultados de una “presión intrínseca”.

A pesar de esto Mitchell (1997) concluye su explicación sobre la cohesión indicando que la evidencia presente muestra que la cohesión debida a fuerzas de atracción interparticulares es pequeña en la mayoría de los casos, mientras que, la debida a la cementación química puede ser muy importante.

Muchos autores han presentado críticas sobre la cohesión y el error que se comete al tomarla como mecanismo de resistencia en los suelos. Sin embargo la existencia de esfuerzos de tracción o esfuerzos de corte en ausencia de presiones de confinamiento confirman su existencia.

Si bien corroborar su valor mediante ensayos de laboratorio resulta difícil, los casos presentados en el capítulo dos de este trabajo son un ejemplo de la presencia de cohesión efectiva en los suelos, ya que en los ellos quedan descartadas las causas que podrían generar una cohesión aparente.

3.3 *Curva de resistencia intrínseca*

A diferencia de la mayoría de los materiales que tienen una resistencia máxima definida, por ejemplo en los aceros donde hay una fluencia marcada; los materiales friccionales modifican su capacidad de resistencia en función de su estado tensional. Es decir, no fallan al alcanzar un valor de tensión determinado, sino por una combinación de esfuerzos.

Utilizando algunos términos de la mecánica del continuo, el estado tensional en el entorno de un punto puede ser representado con un círculo de Mohr en el plano $\sigma-\tau$, a partir de los valores de los esfuerzos principales σ_1 y σ_3 . La ecuación (11) representa la combinación de tensiones de corte y esfuerzos efectivos normales que no pueden ser superados. No es posible trazar un círculo de Mohr que supere esta recta, por lo que esta se define como una línea de estados límites (Figura 21).

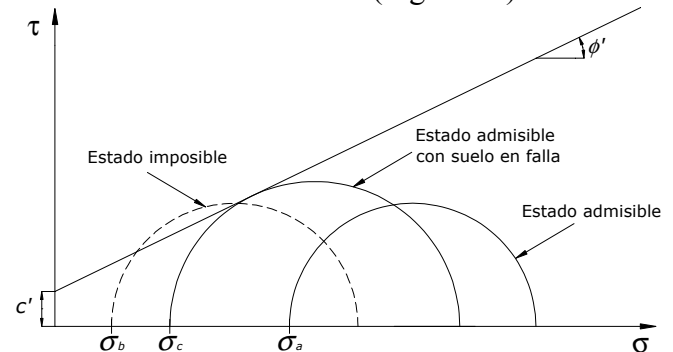


Figura 21: (a) Estados admisibles; (b) Estados imposibles; (c) Estados admisibles con el suelo en falla.

La representación los círculos de Mohr en falla para todos los valores de σ_3 permitiría establecer una curva tangente a ellos que se denomina *envolvente de falla*.

En muchos casos, es decir, para muchos suelos y para la mayor parte de los valores de σ la envolvente puede ser prácticamente recta. Sin embargo, para arenas densas y arcillas preconsolidadas, debido a los cambios de volumen que experimentan los suelos sometidos al corte, la envolvente tiene una curvatura inicial con valores de resistencia por encima de la recta de estado crítico. En las curvas tensión-deformación que se obtienen en los ensayos sobre este tipo de suelos se observa una marcada resistencia pico y una posterior curva de ablandamiento hasta llegar a la resistencia crítica ($\epsilon_v = \text{cte.}$) (Figura 22). Esta curva inicial corresponde a la envolvente de falla de los estados pico.

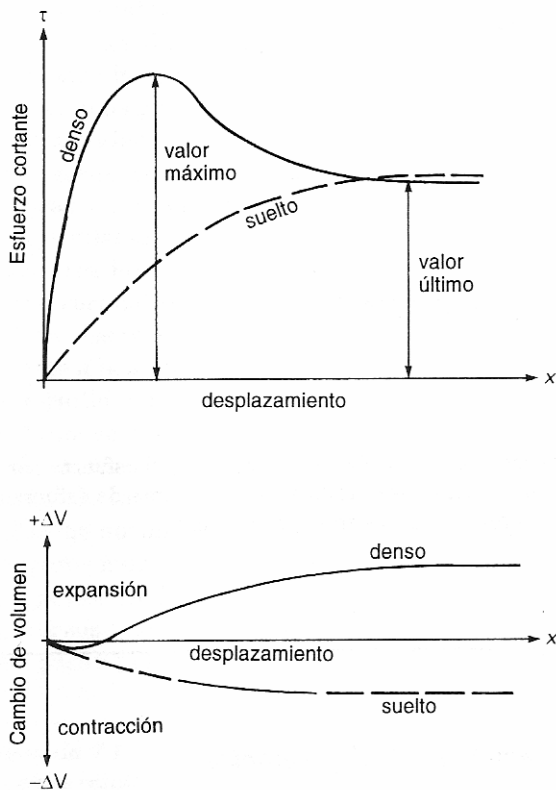


Figura 22: Comportamiento σ - ϵ para suelos densos y sueltos

La envolvente de falla puede obtenerse a partir de ensayos de laboratorio como ensayos triaxiales, ensayos de corte directo, etc. Si bien la envolvente y los parámetros de resistencia dependen de las condiciones de drenaje y consolidación que se utilicen en estos ensayos, en este capítulo se analizan los resultados obtenidos a partir de ensayos triaxiales consolidados drenados.

A partir de lo observado en la Figura 22, puede inferirse que la representación de los esfuerzos máximo y residual permite trazar dos curvas de estado límite, la de estado pico (ϕ_{max}) y la del estado crítico (ϕ_{cr}). La diferencia entre ambos es lo aportado por la dilatancia y se mide con el ángulo ψ (Figura 23). Aunque nuevamente esta idea lleva a representar la envolvente de falla a partir de rectas.

En lo desarrollado hasta aquí, no se incluyó como variable de estado explícita a la relación de vacíos.

Sin embargo, el ángulo de fricción interna máximo depende directamente de la relación de vacíos y de la presión media actuante en el plano de falla. Para los tipos de suelos estudiados en este trabajo, (preconsolidados y cementados), el efecto de la cementación se superpone a la contribución de la relación de vacíos y la enmascara, por lo que puede ocurrir que muestras con mayores relaciones de vacíos pero más cementadas tengan una mayor resistencia al corte y exhiban mayor dilatancia que otras muestras más densas. Además, desde el punto de vista experimental, es casi imposible encontrar muestras naturales con la misma relación de vacíos, por lo que es casi imposible el trazado de una envolvente de falla para una relación de vacíos dada.

No obstante, es importante poner en evidencia que dos muestras ensayadas bajo las mismas condiciones de confinamiento presentan resistencias distintas en función de su estructuración, es decir, de su relación de vacíos.

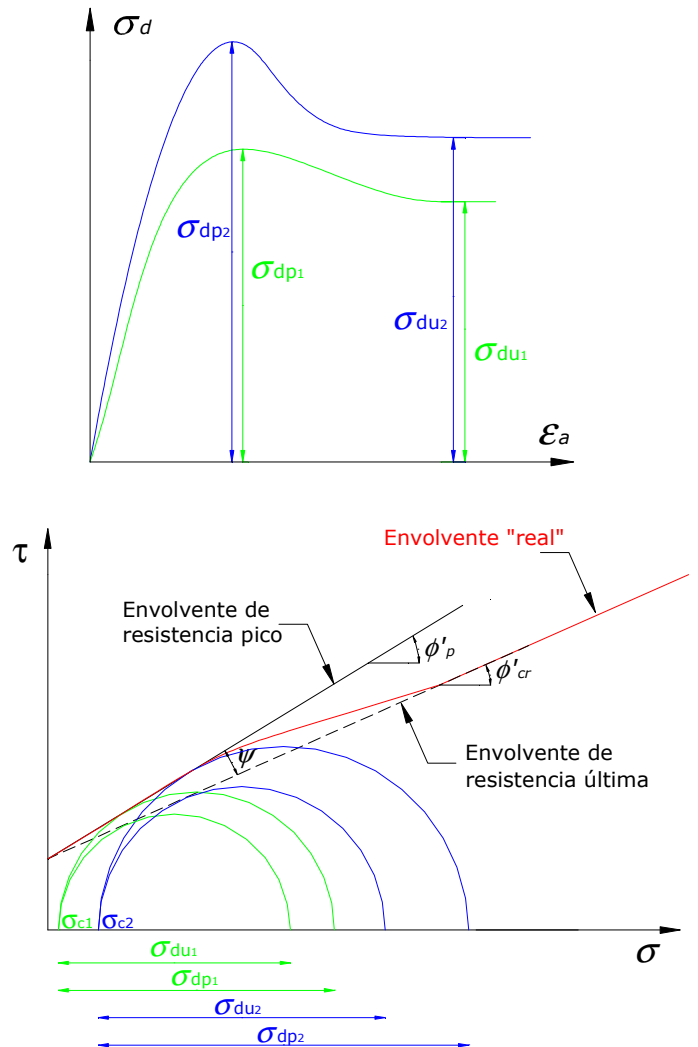


Figura 23: Envolturas de resistencia máxima y última o crítica

3.4 ¿Ordenada al origen?

En general estas curvas de resistencia intrínseca son representadas sin ordenada al origen, cumpliendo con el concepto de que en los suelos en ausencia de

presiones normales no hay resistencia al corte. Parte de este trabajo tiene como objetivo discutir si la envolvente de falla para suelos cementados como los de la formación Pampeano tienen o no ordenada al origen.

Más allá de los resultados experimentales que se conocen y los que pueden presentarse en este documento, la evidencia física en el terreno muestra que realmente existe este factor de resistencia.

Cuando se intenta obtener la envolvente de falla a partir de ensayos de laboratorio y se representan los resultados obtenidos, los ensayos para muy bajas presiones de confinamiento muestran resistencias no nulas y la tendencia de dicha envolvente no parece tender a un valor nulo. Confirmar la existencia de dicho valor exigiría conocer la proyección de la envolvente detrás de $\sigma'_1=0$. Para esto lo ideal sería ejecutar ensayos de tracción, pero su ejecución resulta imposible en la mayoría de los suelos.

Aún considerando todo esto, es más lógico pensar en que la CRI tiene una ordenada al origen y no forzar a dicha curva a tener un valor nulo para cumplir con lo estipulado por las teorías simples de mecánica de partículas.

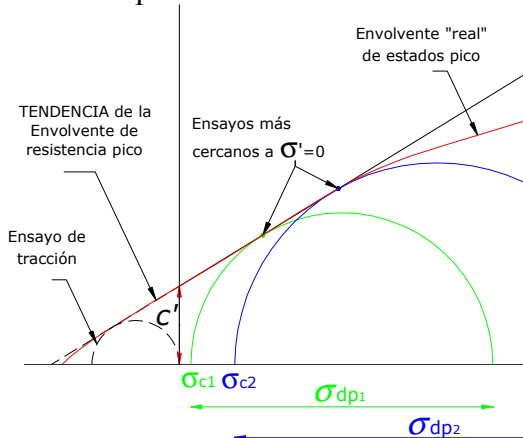


Figura 24: Análisis de la CRI en la zona de $\sigma'_1=0$

Finalmente, las envolventes de falla obtenidas a partir de ensayos nos permiten describir el comportamiento resistente de los suelos utilizando algún modelo y realizando aproximaciones. En general para ello se utilizan los parámetros c' y ϕ' , denominados comúnmente como parámetros de resistencia al corte. Y tal como se expresa en las ecuaciones (10) y (11) el ángulo de fricción interna puede tener dos componentes.

3.5 El criterio de Mohr-Coulomb como mecanismo plástico

El criterio de Mohr-Coulomb es un *modelo de falla* para materiales friccionales. Representa la combinación de esfuerzos $\tau-\sigma$ que no pueden superarse, describiendo esta condición matemáticamente con una recta utilizando los parámetros de resistencia al corte, tal que:

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi' \quad (12)$$

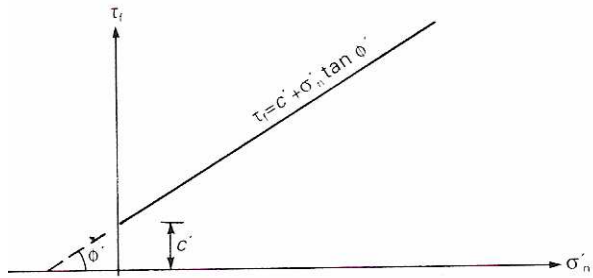


Figura 25: Criterio de falla de Mohr-Coulomb

En términos de tensiones principales el criterio de Mohr-Coulomb puede expresarse como una relación entre σ_1 y σ_3 tal que:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 N_\phi + 2c'\sqrt{N_\phi} \quad (13)$$

$$N_\phi = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (14)$$

De la geometría de la construcción de Mohr-Coulomb se puede deducir que el plano de falla se genera a un ángulo α respecto de la horizontal.

$$\alpha = 45^\circ + \phi/2 \quad (15)$$

Este criterio es una aproximación a la curva de resistencia intrínseca y permite obtener parámetros que describan la resistencia al corte a partir de la interpretación de los resultados de ensayos triaxiales (Figura 26). A partir de dos o tres pruebas ejecutadas para distintas presiones de confinamiento, se traza para cada una el círculo de Mohr correspondiente al esfuerzo máximo o último de falla. Se traza una tangente común a los círculos y se supone que esto es un ajuste bueno de la envolvente de falla.

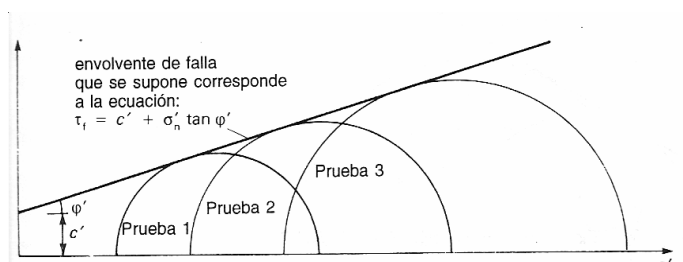


Figura 26: Obtención de la envolvente de falla aproximada con el criterio de Mohr-Coulomb (Whitlow, 1994)

Esta aproximación funciona razonablemente para arenas sueltas y arcillas normalmente consolidadas, mientras que en arenas densas y arcillas preconsolidadas, donde la curva de resistencia intrínseca presenta una curvatura inicial, el criterio

de Mohr-Coulomb no representa bien la resistencia del suelo. Aún sabiendo esto, es posible utilizarlo haciendo aproximaciones lineales por tramos.

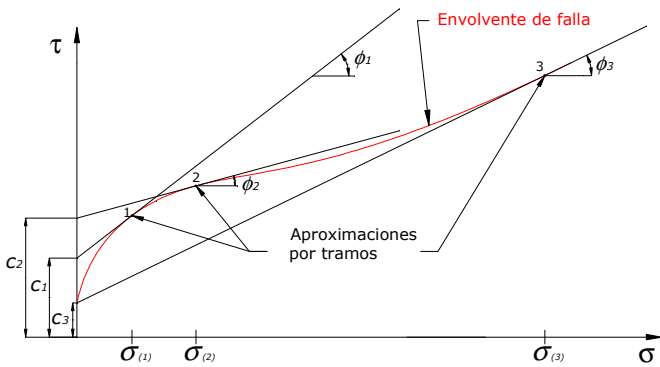


Figura 27: Aproximación por tramos empleando el criterio de Mohr-Coulomb.

En este caso los valores de los parámetros de resistencia deberán ser elegidos en función del problema y del nivel de tensión analizado. Los valores de c y ϕ pueden ser muy distintos a los obtenidos mediante los ensayos por lo que pierden en cierto grado su sentido físico y se transforman solo en parámetros de la recta de aproximación.

El inconveniente que genera este planteo en la resolución de un problema real, es la necesidad de conocer previamente la totalidad de la envolvente de falla y tener que adoptar distintos parámetros para describir el comportamiento de un mismo suelo bajo distintos niveles de confinamiento.

3.5.1 Superficie crítica

En el espacio de tensiones ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) la línea de falla de Mohr-Coulomb se convierte en una superficie.

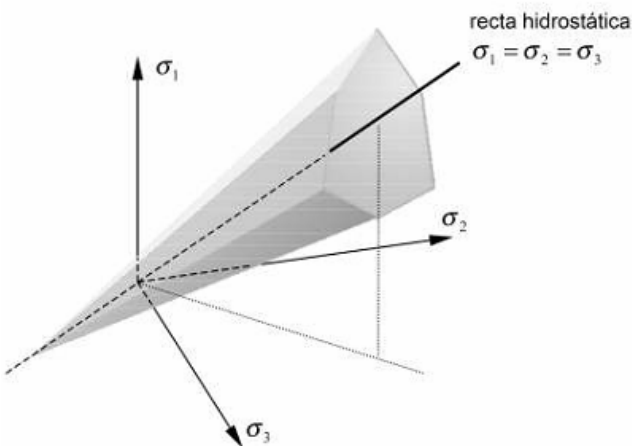


Figura 28: Superficie crítica de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones principales

En este mismo espacio pueden visualizarse otros criterios de falla, como por ejemplo los de Von Mises y Drucker-Prager.

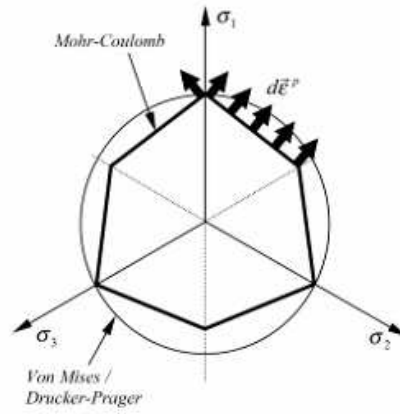


Figura 29: Sección obtenida con un plano normal a la recta hidrostática.

3.6 Criterio de falla modificado

Durante este capítulo se ha analizado la capacidad que tienen los suelos de resistir los esfuerzos de corte. Se estableció que, debido a que son materiales friccionales, la resistencia al corte depende del estado tensional, de la relación de vacíos y de la tendencia al cambio de volumen; y junto a esto una resistencia adicional correspondiente a uniones químicas entre las partículas, que denominamos cementación y otorga una resistencia al corte aún en ausencia de presiones normales.

Con todo esto se estableció que la resistencia al corte para distintos estados tensionales tiene un límite que puede ser representado por una curva denominada envolvente de falla.

Pese a que el análisis de todos estos puntos demuestra que dicha envolvente puede no ser una recta, tradicionalmente se ha optado por representarla de esta manera.

Ahora bien, en algunos casos este “error” se supera estableciendo aproximaciones por tramos (Figura 27), que requieren del criterio ingenieril para elegir los parámetros. Aunque se obtuviese una buena aproximación esta herramienta resulta poco útil para sistematizarla, ya que dicha aproximación depende de elegir dos parámetros, que pueden no tener fundamento físico (por ejemplo $\phi_i < \phi_{cr}$) y que a su vez dependen del intervalo analizado.

Si se tiene en cuenta la variación de resistencia que se produce en el inicio de la curva y expresada a partir de parámetros de resistencia al corte que pueden obtenerse de los ensayos triaxiales, junto con el efecto de la sobreconsolidación, puede proponerse una ecuación fenomenológica simple de la forma

$$S = c' + \sigma' \tan[\phi[OCR]] \quad (16)$$

$$\phi[OCR] = \phi'_{cr} + \Delta\phi'[OCR] \quad (17)$$

siendo c' la cohesión efectiva medida en ensayos con bajas presiones de confinamiento; ϕ_{cr} el ángulo de fricción interna crítico o último y un $\Delta\phi$ variable, que tiene en cuenta el aumento de resistencia que se produce por la interferencia geométrica y la tendencia a los cambios de volumen. Si bien $\Delta\phi$ conceptualmente puede representar lo mismo que el ángulo de dilatación, en este caso solo es un parámetro matemático que cambia su valor en función del OCR.

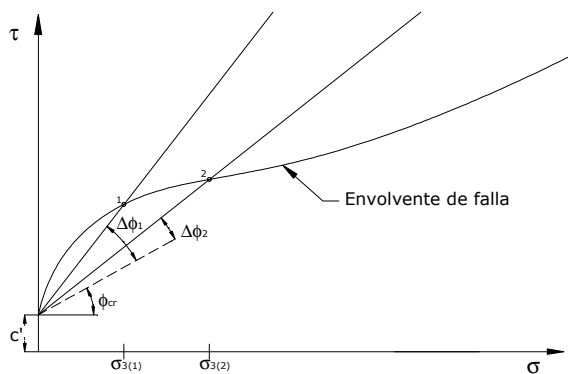


Figura 30: Criterio de Mohr-Coulomb con FI dependiente de OCR.

Este criterio no puede extenderse fuera del rango de los suelos preconsolidados, porque se asume que los mecanismos plásticos asociados a los fenómenos de consolidación y compresión plástica involucran deformaciones específicas grandes que destruyen la componente cohesiva de la resistencia al corte.

4.1 Material ensayado

En la Tabla 6 se presentan las propiedades índice de todas las muestras ensayadas. Se determinaron los siguientes parámetros: ω_i : humedad inicial; ω_f : humedad final; γ_d : Peso seco unitario; $\%CaCO_3$: porcentaje de carbonato de calcio; LL: limite liquido; LP: limite plástico.

Tabla 6. Propiedades de las muestras ensayadas

	Fecha de Extracción	ω_i %	ω_f %	γ_d KN/m ³	CaCO ₃ %	LL %	LP %
T1	25/09/07	32.0	32.8	13.60	2.10	56	33
T2	10/11/07	33.2	34.0	12.50	2.15	41	27
T3	16/11/07	37.7	38.8	14.10	0.96	45	28
T4	16/11/07	27.2	27.8	14.60	0.22	45	28
T5	22/11/07	27.0	28.0	14.40	0.37	40	n/a
T6	22/11/07	27.5	28.7	14.20	0.27	40	n/a
T9	05/12/07	34.5	36.0	13.40	0.89	56	34
T10	05/02/08	37.5	40.9	13.10	1.75	59	37
T11	05/02/08	37.1	40.0	13.40	3.49	59	37
T12	05/02/08	35.4	38.8	13.80	1.79	59	37
T13	09/02/08	35.6	36.3	14.40	1.58	60	35
T14	09/02/08	35.0	36.5	14.70	1.76	60	35
T15	09/02/08	32.0	32.9	14.40	1.15	60	35
T16	05/12/07	39.5	40.5	12.60	1.31	56	34
T17	26/02/08	32.0	34.9	13.70	0.32	55	36
T18	26/02/08	33.1	35.7	14.00	3.58	55	36
T19	26/02/08	33.3	37.0	13.40	3.23	55	36

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental desarrollado en el presente trabajo está compuesto de dos partes. Todos los ensayos fueron realizados sobre muestras “inalteradas” de la formación Pampeano obtenidas en la excavación de la caverna de de la “Estación Corrientes” correspondiente a la ampliación de la línea H de subterráneos (Sfriso 2007). Las muestras se extrajeron con la ayuda de una retroexcavadora en el frente de avance de la obra (Figuras Figura 31, Figura 32 y Figura 33).



Figura 31: Excavación de la caverna “Estación corrientes”

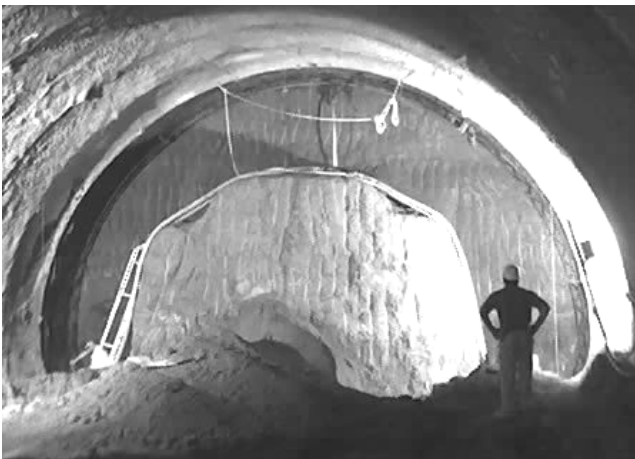


Figura 32: Frente del túnel, línea H.



Figura 33: Extracción de muestra inalterada.

4.2 Extracción de las muestras

Se hincaron estáticamente tubos de acero de 101 mm de diámetro y 2 mm de espesor utilizando el peso propio de la retroexcavadora como elemento de reacción. Una vez enterrados los tubos se removi6 el suelo circundante y se extrajeron los tubos con las muestras. Una vez retirados, los tubos se envolvieron con papel film para conservar el contenido de humedad in-situ y se trasladaron al laboratorio (Figura 34).



Figura 34: Procedimiento de extracción de muestras inalteradas mediante hinca estática de un tubo.

4.3 Preparación de las muestras

Las muestras se saturaron con agua destilada y desaireada dentro de los moldes, utilizando un dispositivo fabricado en el laboratorio. Con la ayuda de una bomba de vacío se produjo una succión en la cara superior de la muestra, generando un flujo ascendente mientras que la cara inferior permaneció inundada en agua a presión atmosférica durante un periodo de seis a veinticuatro horas. Se instalaron piedras porosas y cabezales de fijación que minimizaron las deformaciones y desprendimientos de suelo durante esta etapa (Figura 35). Finalizado el procedimiento las muestras fueron enrasadas a una altura de 127 mm +/- 1 mm y extraídas de los tubos. El proceso de saturación se completo dentro de la cámara triaxial mediante la circulación ascendente de agua desaireada con bajo gradiente y una presión de cola de 100 kPa.

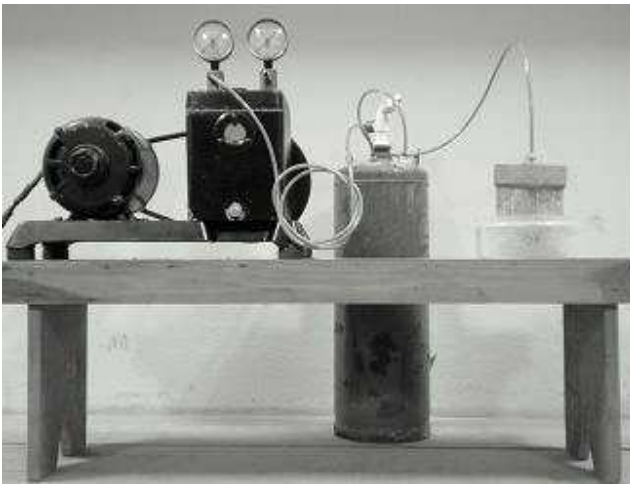


Figura 35: Dispositivo para saturación de muestras.

4.4 Acondicionamiento, fabricación e instalación de equipos.

En este trabajo se realizaron dos series de ensayos triaxiales con distintas características. Para ambos se llevaron a cabo tareas de acondicionamiento de equipo existente, fabricación e instalación de equipo e instrumental nuevo.

4.4.1 Acondicionamiento de equipo existente

El equipo existente en el LMS está formado por una cámara triaxial Wykeham-Farrance, con una capacidad de 7250 cm³ y presiones de confinamiento de hasta 800 kPa. Permite ensayar muestras de 76mm-101mm de diámetro y 100–200mm de altura. La capacidad del marco de carga es de 10 kN, con una caja de velocidades de 30 marchas lo cual permite establecer velocidades de deformación de 1.2-7500µm/min (Figura 36).

La primera modificación que se realizó sobre este equipo es la utilización de aire como fluido de confinamiento, en lugar de agua. Este punto está directamente relacionado con el trabajo conjunto de

re-acondicionamiento de la cámara triaxial realizado durante 2007-2008 (Sagüés 2008). El cambio de fluido presenta varias ventajas, principalmente la posibilidad de ubicar instrumentos de medición dentro de la cámara misma y que no pueden estar inmersos en agua. Por otro lado aumenta la versatilidad tanto en la aplicación como la remoción de la presión de la cámara. El único inconveniente asociado al empleo de aire es el riesgo de explosión por ruptura del cilindro de perspex que forma la cámara.

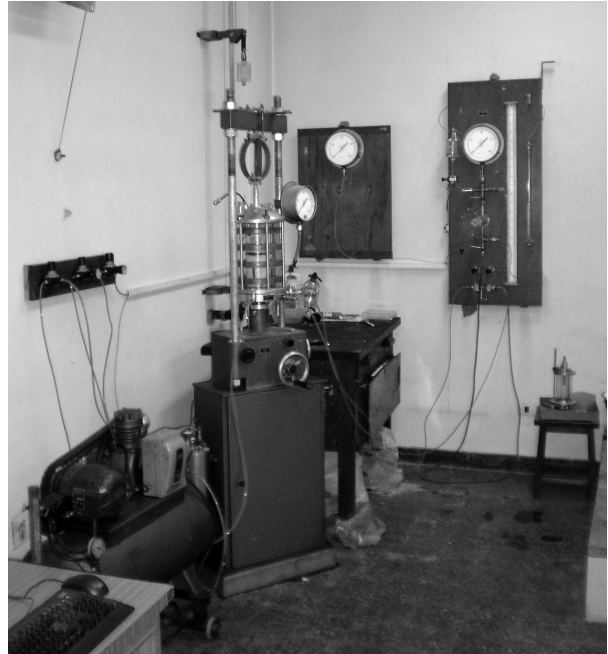


Figura 36: Cámara triaxial Wykeham-Farrance

En esta etapa se acondicionó y puso en funcionamiento el equipo de suministro de aire, los reguladores de presión, el sistema de válvulas, el sistema de medición y el tablero de presiones neutras que forman parte de la cámara y que permiten el direccionamiento de los flujos de aire y agua.

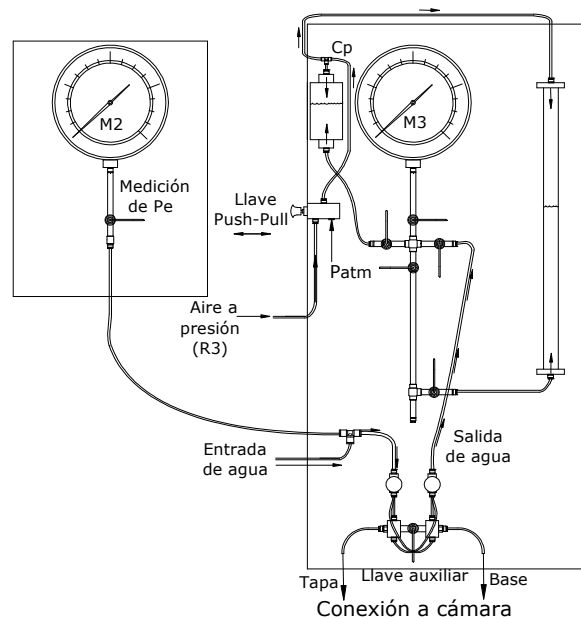


Figura 37: Croquis del tablero de presiones neutras

Las características técnicas de cada elemento perteneciente a la cámara triaxial y su funcionamiento están descritos en el anexo A1 (Informe de avance N°1).

4.4.2 Mediciones locales

Para llevar a cabo la primera serie de ensayos se utilizaron los instrumentos de medición local construidos en el LMS. El equipo de medición de deformaciones esta compuesto de dos LDT axiales y tres transversales. (Sagüés 2008, Sfriso et al 2008).

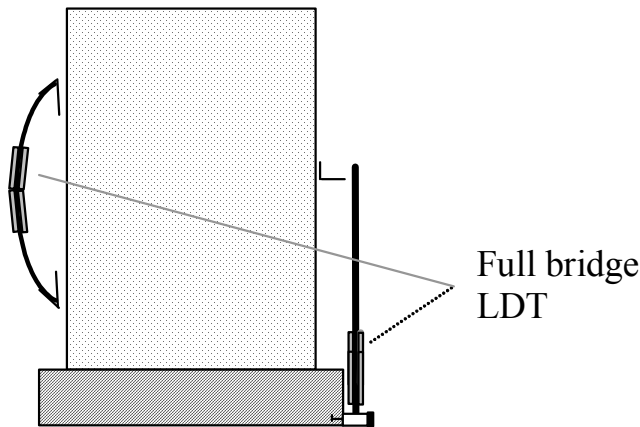


Figura 38: LDT axial y transversal. (Sagüés 2008)

Los LDT: *Local deformation transducers* (Goto et al 1991, Dasari et al 1995) están constituidos básicamente por un arreglo de *strain gauges* formando un puente de wheatstone. Traducen la deformación de un fleje metálico al cual se encuentran adheridos, en una variación de resistencia en cada *strain gauge* y por lo tanto una variación de potencial en la salida del puente. En la siguiente figura se muestra un esquema de un LDT longitudinal y un croquis básico sobre de su funcionamiento.

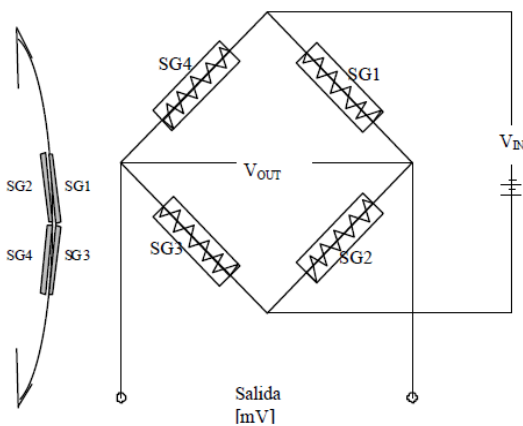


Figura 39: LDT axial.

Para la medición de la carga aplicada se compro una celda de carga de 10 kN x 10 N que se colocó dentro de la cámara, evitando incorporar en las lecturas la fricción que se genera entre el vástago de carga y el buje de la cámara.

Los LDT y la celda de carga se median originalmente con un equipo manual VISHAT-P 3500 perteneciente al LAME que permite conectar varios puentes en forma simultánea. Este sistema se reemplazó por un sistema de adquisición de datos conectado a una PC que permitió obtener las lecturas simultáneas y en tiempo real.

4.4.3 Sistema de adquisición de datos

El hardware que forma el sistema de adquisición de datos (DAQ: Data Aquisition system) se adquirió de la empresa EMANT y consta de tres módulos de adquisición EMANT 300 y de dos tipos de placas adaptadoras: una placa que permite la conexión y medición de *strain gauges* (SAA), y otra que está provista de un medidor de presión.

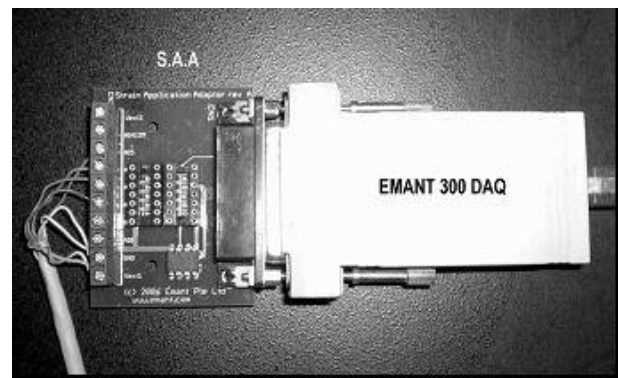


Figura 40: Módulo de adquisición de datos.

El SAA mide *strain gauges* basándose en el empleo de puentes de Wheatstone en sus distintas configuraciones (cuarto puente, medio puente o puente completo), por lo tanto esta misma placa permitió tomar las lecturas de otros instrumentos que respondieran al mismo principio de funcionamiento (puentes de Wheatstone) como por ejemplo: celdas de carga, manómetros piezo-resistivos, etcétera. Cada placa SAA permite la conexión simultánea de hasta tres puentes completos.

Trabajos posteriores (Serigós 2009) evaluaron los errores que introducía la utilización de este sistema de adquisición. La diferencia entre los valores medidos directamente de los instrumentos con voltímetros comparados con las lecturas obtenidas a través del DAQ mostró una diferencia del 1%.

4.4.4 Software del DAQ

El hardware que se adquirió tiene la posibilidad de utilizar programas diseñados en entornos tales como LABVIEW, C#, C++, Visual Basic, etcétera.

El diseño de software para los ensayos triaxiales se realizó en un entorno de Visual Basic para macros de Excel. A partir de un macro básico provisto por EMANT, se modificó el código para utilizar varios módulos simultáneamente y que todos los datos obtenidos se referencien a un mismo

archivo. Esto permitió un seguimiento en tiempo real, factor condicionante para los tipos de ensayo que se llevaron a cabo.

4.5 Implementación de DAQ en los ensayos

4.5.1 Medición de rigidez inicial

En estos ensayos se utilizaron tres módulos DAQ lo que permitió la conexión simultánea de dos LDTs longitudinales de 90 mm de longitud para medir la deformación axial (módulo 1), tres LDTs transversales sujetos a la base de la cámara, con una disposición en ménsula permitiendo medir la deformación radial desde tres puntos distintos (módulo 2) y una celda de carga (módulo 3).



Figura 41: Muestra armada lista para el ensayo.

La utilización de módulos independientes para cada clase de instrumento responde al hecho de que cada uno de ellos debe ser configurado según la tensión de excitación, resistencia propia y *gauge factor* del instrumento que tenga conectado.

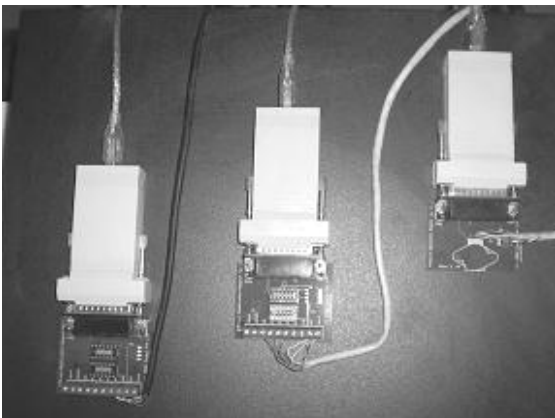


Figura 42: Conexión de DAQ para ensayos triaxiales.

La configuración de puente completo para todos los LDTs no solo mejora la precisión del instrumento, respecto a la utilización de un solo *strain gauge*, sino que además compensa el error que se genera debido a la variación de temperatura que produce por el calentamiento de las resistencias eléctricas (Dasari et al 1995).

4.5.2 Medición de resistencia

Debido a que en estos ensayos las muestras fueron deformadas hasta la ruptura los instrumentos de medición local tuvieron que ser removidos y fueron reemplazados por calibres digitales externos conectados al sistema de adquisición de datos para medir la deformación axial.

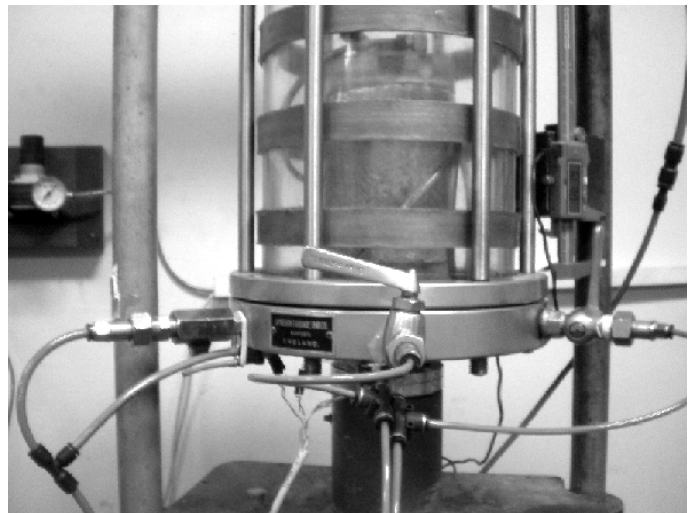


Figura 43: Cámara triaxial implementada con los sensores de presión y el calibre externo

El cambio de volumen se midió con una bureta graduada provista de presión de cola y conectada a un sensor piezo-resistivo de 10 kPa (MPX 5010).

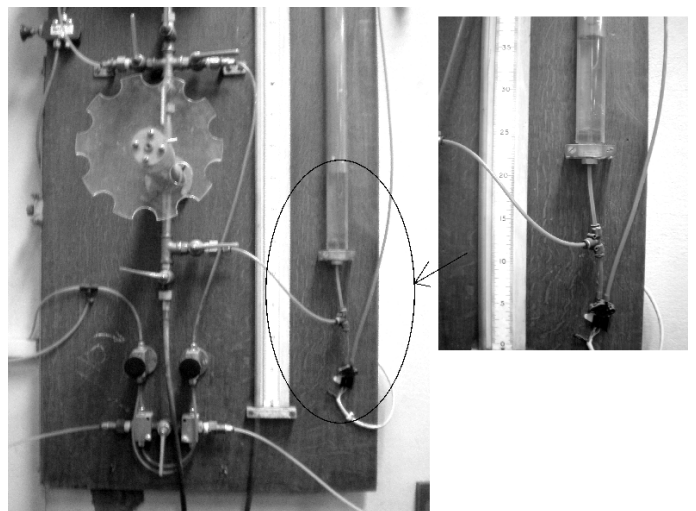


Figura 44: Medición del cambio de volumen en el tablero de presiones neutras.

Esta configuración es posterior a la presentada en la Figura 37, pero no modifica sus funciones básicas. Solo incorpora la medición del cambio de volumen.

Para completar las de mediciones en el ensayo se instalaron otros dos sensores, uno para controlar la presión de cámara y el otro que permite medir el gradiente de presión durante el proceso de saturación de la muestra o la presión neutra en un ensayo no drenado. Estos dos sensores tienen un rango de trabajo de 200 kPa (MPX 2202) (Figura 43).

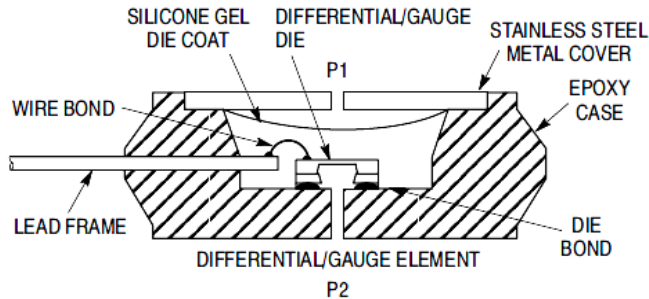


Figura 45: Corte esquemático del sensor de presión diferencial

Estos medidores dan una respuesta lineal (en mV) frente a una variación en la presión diferencial. Por la forma en que están contruidos siempre debe cumplirse que $P_1 > P_2$.

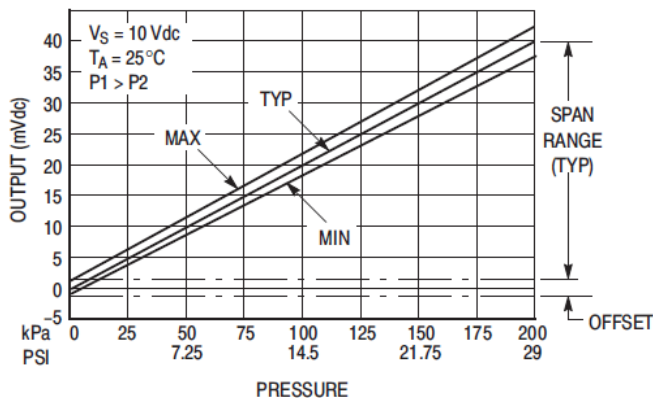


Figura 46: Curva de respuesta del sensor

Las hojas técnicas (*Data sheet*) de los instrumentos provistos por EMANT, los sensores de presión incorporados y los calibres se adjuntan al presente trabajo en los Anexos: A3, A4, A5, A6 y A7.

4.6 Procedimientos de ensayos mecánicos

Todos los ensayos fueron consolidados-drenados (CD). A continuación se describen los procedimientos utilizados en cada caso.

4.6.1 Medición de rigidez inicial.

Para las muestras T1 a T6, se realizaron los ensayos CD con cinco escalones de carga y descarga. Se colocó el instrumental de medición según lo indicado en el punto (4.5.1) y para cada escalón se utilizó el siguiente procedimiento:

- 1 Se impuso una presión de confinamiento σ_3 .
- 2 Se impuso una deformación axial monotónica (0.9mm/hr) hasta obtener una relación de tensiones $\sigma_d/\sigma_3 = 1$ ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$).
- 3 Se descargo a la misma velocidad hasta anular el esfuerzo desviador ($\sigma_d/\sigma_3 = 0$).
- 4 Se aumentó σ_3 y se repitió el procedimiento.

4.6.2 Medición de resistencia

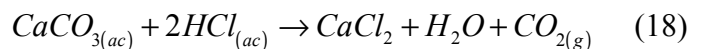
Para las muestras T9 a T19, se ejecutaron los ensayos CD con dos escalones de carga. Se colocó el instrumental de medición según lo indicado en el punto (4.5.2) y se utilizó el siguiente procedimiento:

- 1 Se impuso una presión de cámara de 20 kPa.
- 2 Se impuso una deformación axial monotónica de 0.9mm/hr hasta (casi) alcanzar la resistencia máxima.
- 3 Se descargo a la misma velocidad hasta anular el esfuerzo desviador ($\sigma_d/\sigma_3 = 0$).
- 4 Se aumentó la presión de cámara a 50 kPa y se llevó la muestra a rotura.

4.7 Ensayos Químicos.

El procedimiento utilizado para medir la cantidad de carbonato de calcio presente en cada muestra es un procedimiento simplificado respecto del propuesto por la ASTM (ASTM D 4373-02).

El ensayo, se basa en un método gasométrico el cual consiste en la determinación del volumen de CO_2 que se desprende al agregar una cantidad conocida de ácido clorhídrico. La reacción química queda representada por la siguiente ecuación.



Dado que el número de moles de carbonato de calcio [$nCaCO_{3(s)}$] que reacciona es igual al número de moles de dióxido de carbono [$nCO_{2(g)}$] que se desprende, la determinación de $CaCO_3$ es inmediata. Simplemente midiendo el volumen de gas que se genera y aplicando la ecuación de gases ideales:

$$P.V_{(CO_2)} = nCO_2.R.T \quad (R = 0.082atm.l / k.mol) \quad (19)$$

Siendo, [V_{CO_2}]: el volumen medido en el ensayo; [P]: la presión; y [T]: la temperatura, estas ultimas dos medidas en el momento y lugar donde se realiza el ensayo. Se obtiene:

$$nCO_{2(g)} = nCaCO_{3(s)} \quad (20)$$

Conocido el número de moles y la masa molar $[Mr]$ del carbonato de calcio (aprox. 100 g/mol), se calcula el porcentaje de carbonato de calcio:

$$mCaCO_{3(s)} = nCaCO_{3(s)} \cdot Mr_{CaCO_3} \quad (21)$$

$$\%CaCO_{3(s)} = mCaCO_{3(s)} / m_{total} \quad (22)$$

Se asume que la porción de muestra ensayada es representativa del suelo que queremos caracterizar.

En la Figura 47 se muestran los elementos utilizados para llevar a cabo este ensayo. El procedimiento detallado se adjunta al presente trabajo en el Anexo A8 (*Determinación del contenido de carbonato de calcio. Procedimiento sobre muestras de suelo del Pampeano. Quaglia G. Quintela M. 2008*).

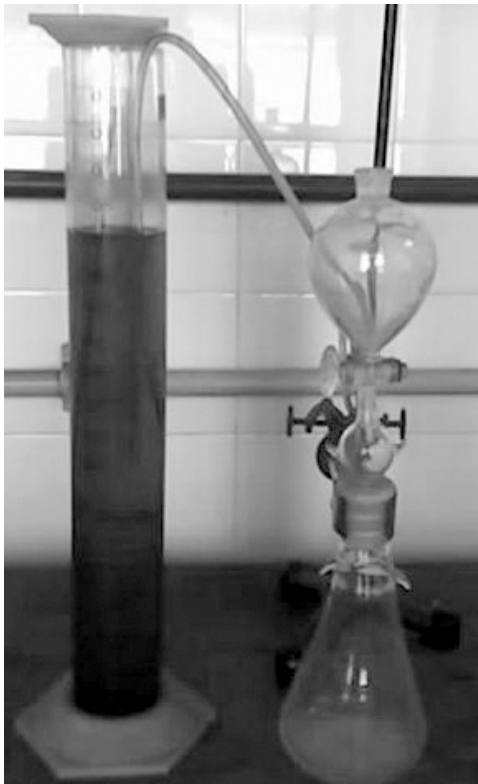


Figura 47: Matraz y bureta graduada

5 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las dos series de ensayos triaxiales realizados en el marco de este trabajo de tesis. Se analizan los resultados obtenidos en función de las metodologías de ensayo adoptadas y se realiza un análisis inverso de los resultados a través de un programa de elementos finitos. Finalmente se realiza una revisión y comparación con algunos resultados presentados en trabajos previos sobre los suelos de Buenos Aires.

5.1 Rigidez inicial

Se define como E_0 al valor del módulo de Young medido al inicio de cada escalón de carga, para muy pequeñas deformaciones. En teoría, E_0 puede ser considerado igual al módulo de recarga E_{ur} , que puede obtenerse en un ciclo de descarga y recarga (Figura 48).

El módulo de Young secante se define para un punto cualquiera de la curva de tensión-deformación como:

$$E_s = \sigma_d / \varepsilon_a \quad (23)$$

donde $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ es el esfuerzo desviador que se le aplica a la muestra y ε_a es la deformación específica axial.

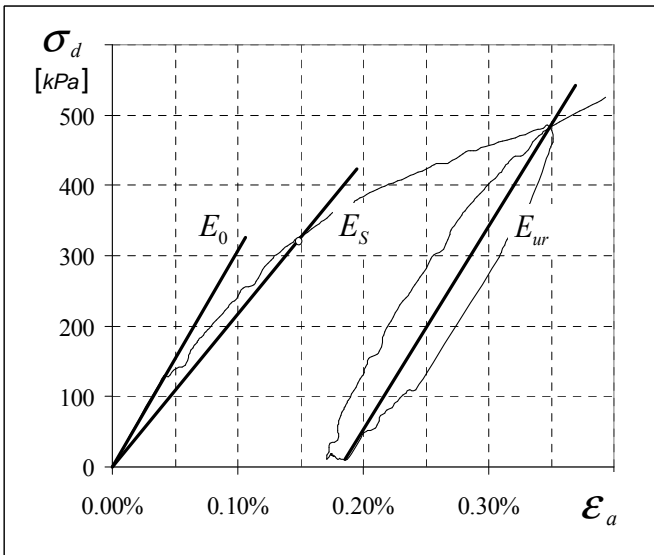


Figura 48: Definición de E_0 , E_s y E_{ur}

Los valores de E_0 obtenidos corresponden a deformaciones del orden de $\varepsilon_a = 10^{-5}$. Este orden de magnitud está vinculado a la precisión de los LDT. Para deformaciones del orden $\varepsilon_a = 10^{-6}$, los resultados mostraron una gran dispersión. Este comportamiento puede estar asociado a las imperfecciones en el contacto de los apoyos de los LDT axiales (Dasari, 1995).

Sin embargo tal como se menciona en el capítulo cuatro deben tenerse en cuenta al momento de analizar los resultados y la precisión de los instrumentos el error introducido por el sistema de adquisición (DAQ).

En la Figura 49 se presenta un resultado típico de los obtenidos en esta serie de ensayos.

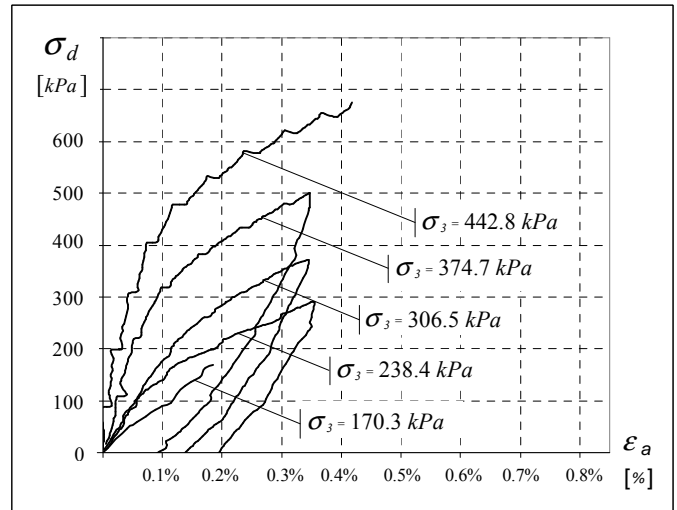


Figura 49: Ensayo triaxial CD con 5 escalones de carga.

E_0 cambia en cada escalón de carga, aumentando con el aumento de la presión de confinamiento. Se representan los valores obtenidos de E_0 en función de la presión de confinamiento (Figura 50).

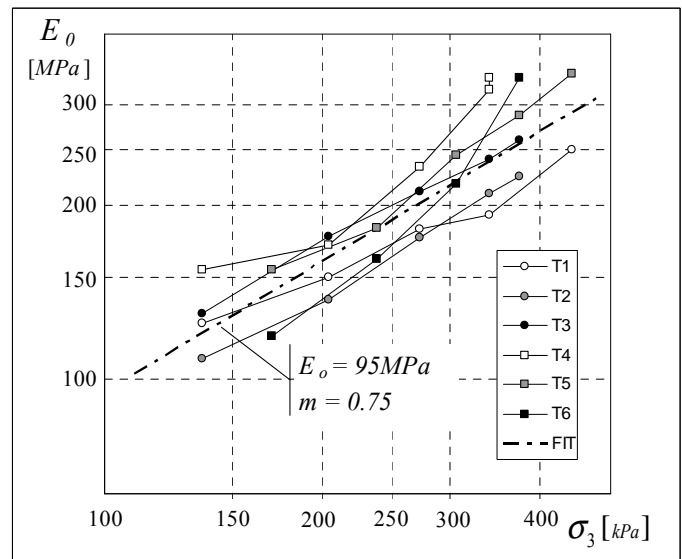


Figura 50: Módulo de Young inicial en función de la presión de confinamiento.

El mejor ajuste de la ecuación de Janbu para estos resultados es (Janbu 1963).

$$E_0 = 95 \left(\frac{\sigma_3}{100 \text{ kPa}} \right)^{0.75} \text{ MPa} \quad (24)$$

5.2 Módulo de Poisson a bajas deformaciones

El módulo de Poisson cayó en el rango 0.15-0.18 para todos los ensayos y escalones de carga. No se

encontró ninguna dependencia entre el valor del módulo de Poisson y la presión de confinamiento.

5.3 Curva de reducción del módulo de Young

Entre las expresiones disponibles para modelar la reducción del módulo secante se eligió la propuesta en el modelo hiperbólico (Hardin y Richart 1963) que relaciona el módulo secante E_s con el módulo inicial E_0 a través de

$$E_s = E_0 / (1 + \varepsilon_a / \varepsilon_r) \quad (25)$$

donde ε_r es un parámetro denominado deformación de referencia y se obtiene gráficamente de la representación gráfica de E_s/E_0 vs. ε_a ; cuyo valor es la abscisa que corresponde a una relación en ordenadas de $E_s/E_0 = 1/2$.

En la Figura 51 se presentan los resultados obtenidos. Se observa que para los ensayos realizados la banda es relativamente estrecha y ε_r cae en el rango de 10^{-3} a $3 \cdot 10^{-3}$.

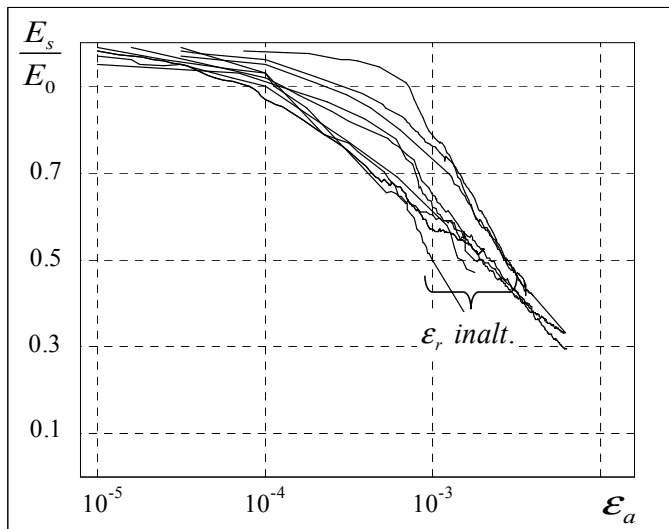


Figura 51: Reducción del módulo de Young en función de la deformación axial ε_a .

5.4 Comparación del Modulo de Young inicial entre muestras inalteradas y compactadas.

Se realiza una comparación entre los resultados obtenidos para las muestras inalteradas y los obtenidos por Sagüés (2008) en su tesis de grado sobre muestras de pampeano remodeladas y compactadas. Se observa que para ambos tipos de muestras el valor de E_{ur} depende de la presión de confinamiento.

La banda de valores obtenidos permite calibrar la ecuación de rigidez del modelo hiperbólico, adoptando $c = 0$ kPa, con un límite inferior del módulo de referencia de $E_{ur}^{ref} = 80$ MPa, un límite superior de $E_{ur}^{ref} = 130$ MPa y un exponente $m = 0.7$. Este exponente resulta inesperadamente alto para caracterizar la rigidez del Pampeano medio respecto de los valores utilizados hasta el momento en la modelación numérica (Sfriso 2006, Sfriso et al 2008).

En la siguiente figura se muestra una comparativa de los resultados obtenidos para las muestras inalteradas y para las compactadas.

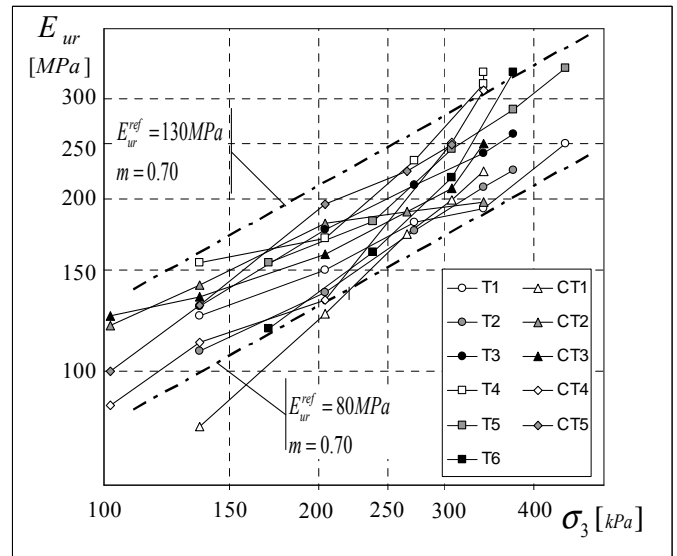


Figura 52: Modulo de Young inicial en función de la presión de confinamiento.

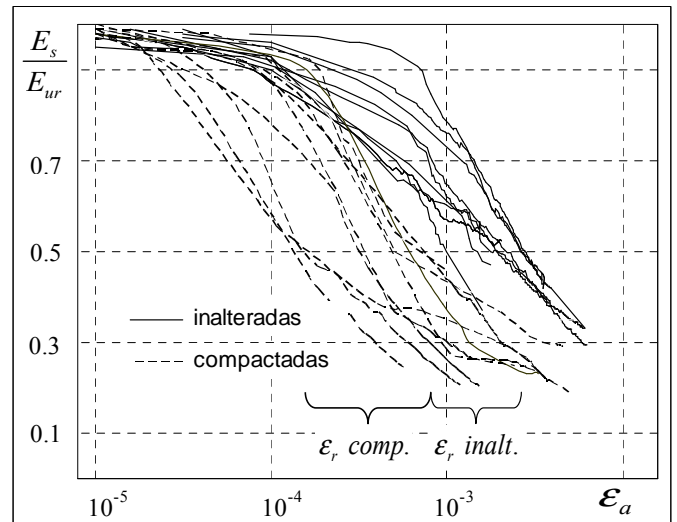


Figura 53: Curvas de reducción del módulo de Young.

5.5 Parámetros de resistencia

En prácticamente todas las muestras ensayadas se observó un comportamiento correspondiente al de un material fuertemente preconsolidado con una marcada resistencia máxima y una curva de ablandamiento posterior. La relación altura-diámetro de las muestras utilizadas fue $H/D = 5''/4'' = 1.25$, por lo que los parámetros resistentes medidos están influidos por la restricción de deformación impuesta por los cabezales.



Figura 54: Muestras ensayadas

Para poder medir la influencia de la cementación en la resistencia del suelo se realizaron ensayos con dos escalones de carga a muy bajas presiones de confinamiento (20 y 50 kPa). En la Figura 55 puede observarse un resultado típico de las curvas σ - ε obtenidas.

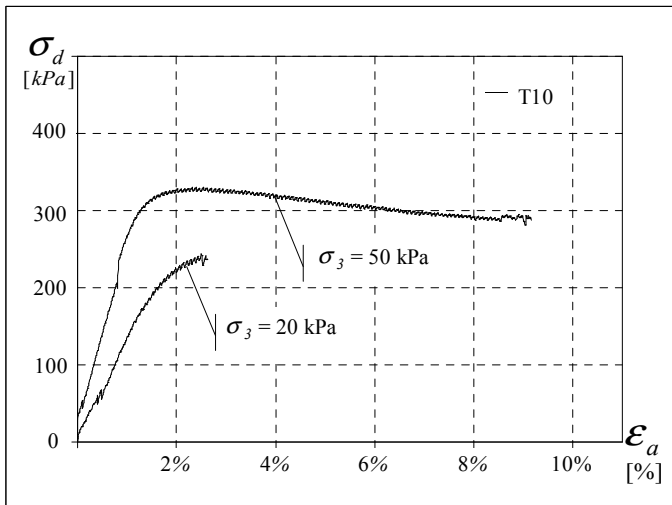


Figura 55: Curva σ - ε , 2° serie de ensayos CD

En la Tabla 7 se presentan los parámetros de resistencia y rigidez medidos en cada uno de los ensayos.

Tabla 7. Parámetros resistentes

	Fecha de Extracción	c' kPa	ϕ'_{max} °	E_{ur} kPa	E_{50} kPa	$CaCO_3$ %
T9	05/12/07	38.0	45.8	6700	25200	0.89
T10	05/02/08	43.3	37.4	12810	24600	1.75
T11	05/02/08	30.8	38.7	11570	22100	3.49
T12	05/02/08	37.7	36.5	12400	25300	1.79
T13	09/02/08	57.2	35.0	13750	30990	1.58
T14	09/02/08	22.4	45.1	14510	32210	1.76
T15	09/02/08	47.3	36.6	21520	34670	1.15
T16	05/12/07	24.4	35.0	9300	22700	1.31
T17	26/02/08	2.0	48.5	13100	28360	0.32
T18	26/02/08	21.7	42.6	12250	28760	3.58
T19	26/02/08	18.8	43.3	5330	20790	3.23

En la siguiente figura se observan los círculos de Mohr de que representan cada ensayo y las líneas de falla correspondientes a los estados pico (ϕ'_{max}).

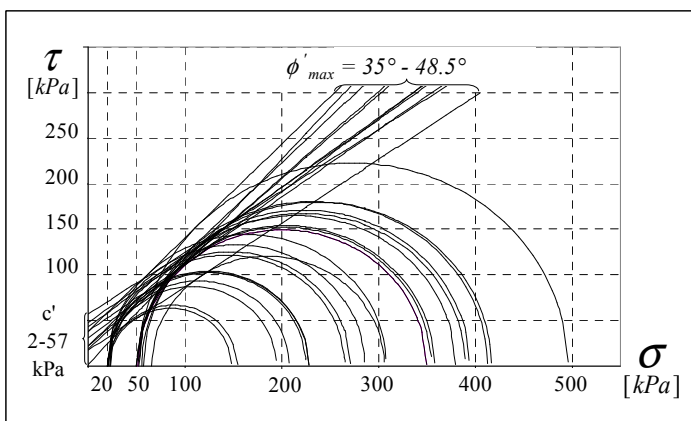


Figura 56: Envolventes de falla para estados pico.

No se observó ninguna correlación entre los parámetros resistentes y las propiedades índice medidas o el contenido de carbonato de calcio. En la Figura 57 se muestra la relación entre la cohesión efectiva y el contenido de $CaCO_3$.

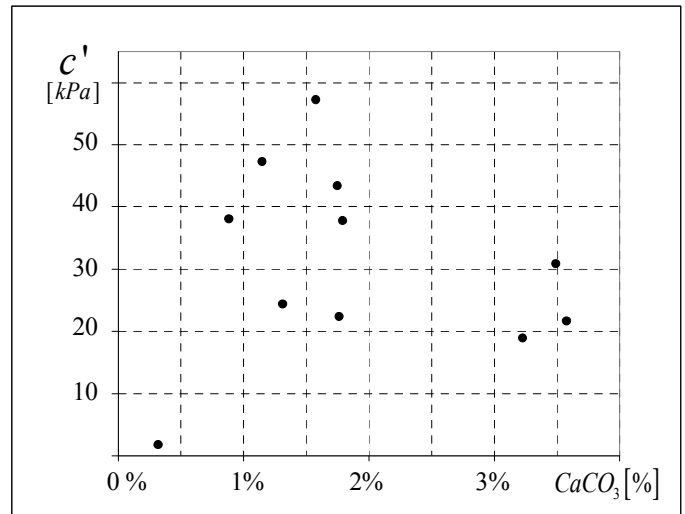


Figura 57: Relación entre c' y contenido de carbonato de calcio.

Es importante establecer que el análisis químico utilizado no permite distinguir sistemáticamente si el contenido de carbonato de calcio presente en la muestra forma parte de la matriz calcárea o es parte de inclusiones o nódulos. Los ensayos químicos realizados corroboran la presencia errática de carbonato oscilando en varios puntos aún para muestras obtenidas en la misma fecha.

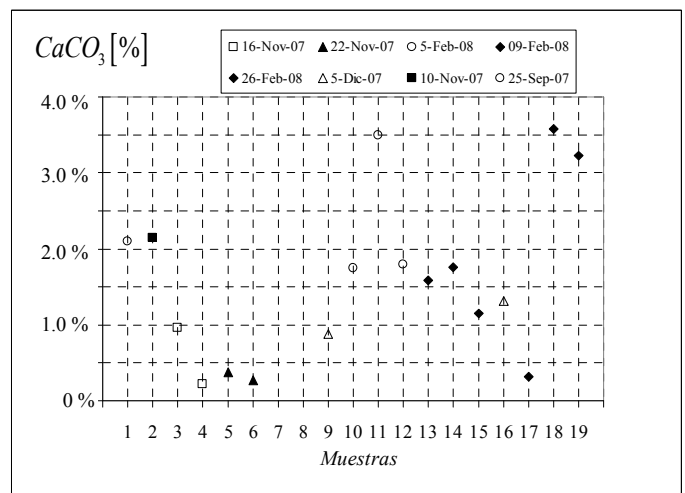


Figura 58: Contenido de $CaCO_3$ en las muestras ensayadas.

En la tabla de resultados también puede observarse que el módulo de Young inicial E_{ur} en esta serie de ensayos es significativamente inferior al módulo de Young medido con deformación local presentado en la Figura 50.

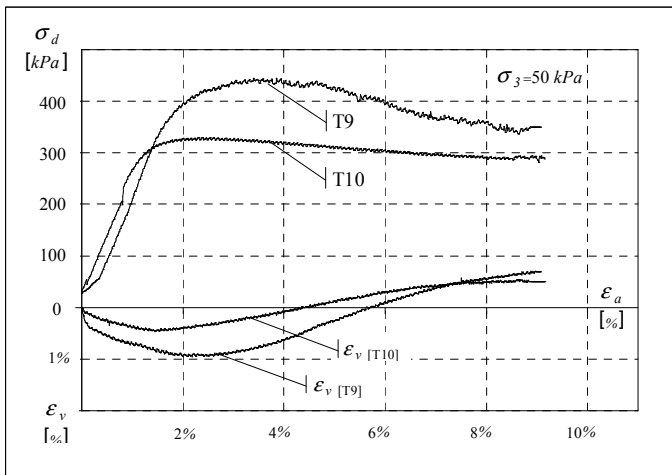


Figura 59: Curvas σ_d - ϵ_a y ϵ_v - ϵ_a .

5.6 Simulación numérica de los ensayos

Debido a la baja relación altura-diámetro, las muestras fueron ensayadas con condiciones cinemáticas no uniformes y plano de ruptura impuesto. Por lo tanto, los valores de resistencia obtenidos son mayores que los que habrían sido obtenidos para condiciones ideales.

La reducción de los resultados medidos a parámetros convencionales se efectuó mediante un análisis inverso. Se empleó el programa Plaxis (Vermeer 1998) con el modelo constitutivo HSM, que es una modificación del modelo hiperbólico de Duncan-Chang (1970). Para todas las simulaciones se supuso un valor del ángulo de dilatación $\psi = 5^\circ$, valor aceptable para modelación del pampeano medio ($\psi = 0^\circ - 6^\circ$, Sfriso 2006).

En la Figura 60 se observa la malla deformada en uno de los ensayos. Se modelizó un cuarto de muestra con simetría axial.

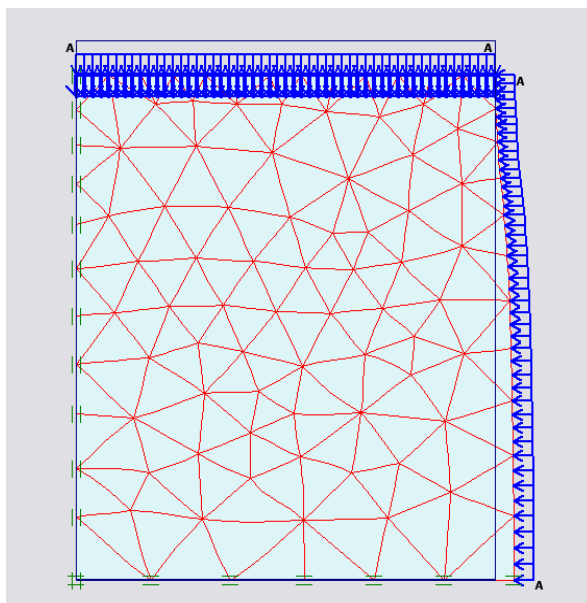


Figura 60: modelización de un cuarto de muestra, con simetría axial.

Los parámetros resistentes corregidos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Análisis inverso, variables de entrada.

Modelo Ensayo	c_{med} kPa	c_{PLX} kPa	ϕ_{med} °	ϕ_{PLX} °
T9	38.0	37.0	45.8	45.8
T10	43.3	41.0	37.4	40.0
T11	30.8	29.0	38.7	39.0
T12	37.7	37.5	36.5	36.0
T13	57.2	49.0	35.0	37.5
T14	22.4	20.0	45.1	46.0
T15	47.3	44.0	36.6	37.5
T16	24.4	20.0	35.0	35.0
T17	1.8	2.0	48.4	48.0
T18	21.7	20.0	42.6	43.0
T19	18.8	18.0	43.3	43.0

5.7 Resultados previos

Además de todos los datos utilizados en el capítulo dos para describir las características mecánicas del Pampeano. Vale la pena hacer mención sobre algunos datos particulares.

En este trabajo se intentó analizar cual es el grado de influencia de la cementación sobre la resistencia del Pampeano. Por otro lado resultados presentados por Nuñez en "Cemented Preconsolidated soils as very weak rocks" (Nuñez 1986), muestran que para grandes presiones de confinamiento, del orden de 5000 y 10000 kPa en las cuales se pierde totalmente la influencia de la cementación, el Pampeano tiene un ángulo de fricción interna $\phi' = 29^\circ$.

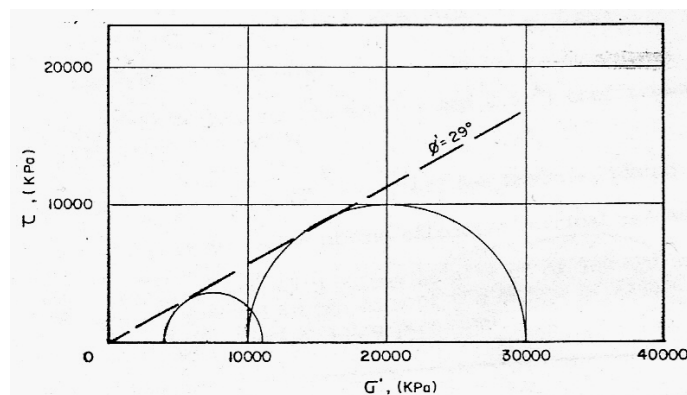


Figura 61: Cálculo del ángulo de fricción interna del Pampeano para altas presiones de confinamiento (Nuñez 1986)

El otro punto que también merece ser analizado está relacionado con la influencia o no, de la presión de confinamiento sobre el valor del Módulo de Young para bajas deformaciones (E_0).

Si bien la práctica usual en la modelación de estructuras subterráneas desacopla estos dos factores, los resultados obtenidos en este trabajo, muestran una correlación entre ambos.

Expresado en términos de la modelación en Plaxis, la influencia de la presión de confinamiento medida a través de $m = 0.70$ a 0.75 , se contraponen con la utilización del exponente "m" igual a cero. Aunque debe tenerse en cuenta que la cantidad de resultados obtenidos no son suficientes para dar afirmaciones definitivas.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una serie de ensayos en los que se midió la rigidez inicial y los parámetros de resistencia al corte de suelos de la Formación Pampeano en la ciudad de Buenos Aires.

Se presentó una descripción de las características físicas y mecánicas salientes de los suelos estudiados y un repaso de las teorías de resistencia al corte de suelos cohesivos.

Se discutió acerca de la existencia de una componente de cohesión real en los suelos ensayados. Se concluyó que el mecanismo que puede generar el efecto cohesivo es la cementación entre partículas. A partir de estudios anteriores se acepta que la cementación del Pampeano se debe principalmente a la precipitación de carbonato de calcio.

Se describió el programa experimental llevado a cabo para esta tesis. Se detallaron los procedimientos de extracción y preparación de muestras; y los equipos y procedimientos utilizados en los ensayos.

Se presentaron los resultados de dos series de ensayos triaxiales sobre muestras inalteradas del Pampeano, en los que se midió el módulo de Young inicial con medición local de deformaciones y los parámetros de resistencia al corte con bajas presiones de confinamiento. Se observó que:

i) Existe una importante dependencia del módulo de Young respecto de la presión de confinamiento para bajas deformaciones.

ii) La dependencia del módulo de Young para pequeñas deformaciones respecto de la presión de confinamiento es muy similar para muestras inalteradas y para muestras remoldeadas y compactadas; de esto se infiere que la estructuración y la cementación no tienen mayor efecto sobre dicho parámetro, al menos en el rango de presiones analizado (125-500kPa).

iii) Existe un valor no nulo para la cohesión efectiva en todas las muestras ensayadas con valores entre 2-57kPa.

iv) El ángulo de fricción interna (pico o máximo) para bajas presiones de confinamiento es mayor a 35° y alcanza valores de hasta 48,5°.

v) No es posible determinar una correlación entre los parámetros de resistencia y el contenido de carbonato de calcio u otras propiedades índice medidas.

vi) Los módulos de Young medidos de manera externa son notablemente menores que los obtenidos en los ensayos con medición local.

vii) El análisis inverso de los parámetros de resistencia arrojó como resultado en general una disminución de los valores de c' , mientras que los valores de ϕ_{max} son similares.

Algunos resultados obtenidos en este trabajo difieren del comportamiento asumido en la práctica para los suelos de la Formación Pampeano, como la dependencia del módulo de Young respecto de la presión de confinamiento y el comportamiento similar de muestras compactadas e inalteradas.

La cantidad de ensayos efectuados, las incertidumbres experimentales y la cantidad de información de respaldo disponible no permite confirmar una tendencia al respecto, por lo que se recomienda continuar con las investigaciones sobre este tema.

REFERENCIAS

- ABBA, (2008) (www.atlasdebuenosaires.gov.ar/aaba/)
- Bolognesi, A. and Moretto, O. (1957). "Properties and behaviour of silty soils originated from loess formations". IV Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engng. London, England 1957. Vol I: 9-12
- Bolognesi, A. and Moretto, O. (1957). "Propiedades del subsuelo del Gran Buenos Aires", 1st CPMSC, I, 303-314.
- Bolognesi, A. and Moretto, O. (1959). "Propiedades del subsuelo del Gran Buenos Aires", 1st CPMSC, I, 303-314.
- Bolognesi, A. (1975). "Compresión de los suelos Formación Pampeano", V PCSMFE, Argentina, V: 255-302.
- Dasari, G., Bolton, M., and Ng, C. (1995). "Small strain measurement using modified LDTs", Report CUED/D-SOILS/TR275, Geotech. Group, Cambridge University.
- Duncan, J. and Chang, C. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", Journal of Soil Mechanics Foundation Division, ASCE, 96, SM5, 1629-1653.
- Duncan, J., Byrne, P., Wong, K., and Mabry, P. (1980). "Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses", Report UCB/GT/80-01, Berkeley, 72 p
- Fidalgo, F., De Francesco, F. and Pascual, R. (1975). "Geología superficial de la llanura Bonaerense", VI Arg. Geol. Conf, 110 - 147.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. and Sato, T. (1991). "A simple gauge for local small strain meas. in laboratory", Soils and Found. 31, 1, 169-180.
- Janbu, N. (1963). "Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests", Proc. Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Wiesbaden, I, 19-25.
- Jardine, R.J., Potts, D.M., St. Jhon, H.D., and Hight, D.W. (1991). Some practical applications of a nonlinear ground model. *Proceedings*, 10^o European conference on soil mechanics and foundation engineering, Firenze, 223-228.
- Hardin, B. and F. Richart (1963). "Elastic wave velocities in granular soils", JSMFD, ASCE, 89, SM1, 33-65.
- Mayne, P. (2001). Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. *Proceedings*, Int. Conf. on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories, Bali, Indonesia.
- Mitchell, J. (1997) "Fundamentals of Soil Behavior" (tercera edición) pp 79-83 y pp 334-402.
- Núñez, E. (1973). "Empujes sobre apuntalamientos en el centro de la ciudad de Buenos Aires", p 1-14.
- Núñez, E. (1986). "Panel Report: Geotechnical conditions in Buenos Aires City", V Int. Conference IAEG, 2623-2630.
- Núñez, E. and C. Mucucci (1986). "Cemented preconsolidated soils as very weak rocks", V Conference IAEG, 403-410.
- Núñez, E. (2000). "Conf. Ing. Fernando Torres: Excavaciones y túneles en el Pampeano", XV CAMSIG, GEOBA 2000.
- Núñez, E. (2007). "Casagrande lecture: Uncertainties and Approximations in Geotechnics", XIII PCSMGE, Venezuela, pp. 1 - 17.
- Quaglia, G. Quintela, M (2008) "Determinación del contenido de carbonato de calcio. Procedimiento sobre muestras de suelo del Pampeano",
- Rocca, R., Redolfi, E. Terzariol, R. (2006) "Características geotécnicas de los loess de Argentina". Rev. Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol 6(2), pp 149-165
- Rinaldi, V. Capdevila, J. (2006) "La cohesión en la resistencia al corte de los suelos".
- Santamarina, J. Carlos (2001) "Soil and Waves. Particulate materials behavior. Characterization and process monitoring" pp. 103-158.
- Schanz, T., Vermeer, P. and Bonnier, P. (1999). "The hardening soil model: formulation and verification". Proc Plaxis Symp Beyond 2000 in Computational Geotechnics Amsterdam, Balkema, pp. 55-58.
- Serigos, P. (2009). "Rigidez a baja deformación de mezclas de suelo de la Formación Pampeano y cemento Portland" <http://fi.uba.ar/materias/64.08/investigación.htm>
- Sfriso, A. (1999). "Tunnels in Buenos Aires: Application of numerical methods to the structural design of linings", XI PCSMGE, 637-642.
- Sfriso, A. (2006). "Algunos proc. constructivos para la ejecución de túneles urbanos", XIII CAMSIG, San Juan.
- Sfriso, A. (2007). "Procedimiento Constructivo de la Estación Corrientes del Subterráneo de Buenos Aires, Argentina". VI Chilean Conf. Geot. Eng., 124-132.
- Sfriso, A. (2008). "Metro tunnels in Buenos Aires: Design and construction procedures 1998 - 2007", Sixth Int. Symp. Geot. Aspects Underground Constr. in Soft Ground (IS-Shanghai 2008).
- Sfriso, A. Sagües, P. Quaglia, G. Quintela, M. & Ledesma, O. (2008). "Small-strain stiffness of the Pampeano Formation" *Proceedings of 4th Int. Symposium on Deformation charact. of geomaterials IS-Atlanta 2008*. Vol I: pp 237-244
- Tatsuoka, F & Shibuya, S (1992). Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory test. Rept. of the Institute of Industrial Science, Vol 37, N°1, Univ. of Tokyo, 136 p.
- Taylor D.W. (1948). "Fundamentals of soil mechanics". Jhon Wiley & Sons, Inc. New Cork.
- Whitlow, R. (1994). Fundamentos de la mecánica de Suelos (segunda edición) pp 157-189 y pp 231-272.

ANEXOS

A1 – Informe de avance I

A2 – Informe de avance II

A3 – EMANT 300 Data Acquisition Module (Especificaciones)

A4 – Strain Application Adaptor for EMANT 300 (Especificaciones)

A5 – Pressure Application Adaptor for EMANT 300 (Especificaciones)

A6 – Pressure sensor MPX 2202 (Especificaciones)

A7 – Pressure sensor MPX 5010 (Especificaciones)

A8 – Determinación del contenido de Carbonato de Calcio. Procedimiento sobre muestras de suelo del Pampeano



TESIS

COHESION EFECTIVA DEL PAMPEANO MEDIO INFORME DE AVANCE I

Gastón Quaglia

INTRODUCCIÓN

Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis es medir la cohesión efectiva de muestras inalteradas de suelos de la formación Pampeano mediante la ejecución de ensayos triaxiales drenados y no drenados. Se estudiará si existe una correlación entre algunas propiedades físicas (p.ej. contenido de carbonato de calcio) y la cohesión efectiva.

Este trabajo se enmarca dentro de un programa de investigación de las propiedades de los suelos de la Formación Pampeano que se lleva a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del LAME – FIUBA.

Metodología de trabajo

El programa experimental se basa en la realización de ensayos triaxiales escalonados con presiones de confinamiento muy bajas. Se ejecutarán ensayos consolidados no drenados y ensayos drenados.

Se ensayarán muestras inalteradas del suelo de la ciudad de Buenos Aires, obtenidas en los túneles que se construyen en 2007 para las líneas de subterráneos “H” y “B”. La mayor parte de las muestras será obtenida de suelos ubicados en el tercio medio de la formación Pampeano.

Para el completo análisis de las muestras se las clasificará y se medirán algunas propiedades físicas – humedad, relación de vacíos, contenido de carbonato de calcio, superficie específica, y otros. Estas mediciones permitirán un análisis de correlación entre propiedades físicas y cohesión efectiva.

FORMACION PAMPEANO

El suelo en estudio se encuentra en los niveles superiores del perfil estratigráfico de la Ciudad de Buenos Aires. Este estrato, denominado “Formación Pampeano”, se extiende desde la superficie (+20 msnm aprox.) hasta una profundidad de 40 m (-20 msnm aprox.), y está compuesto por capas paralelas de arcillas y limos [1] [2] [3] [4].

El Pampeano es un loess modificado (redepositado). Un loess es un sedimento eólico uniforme y cohesivo, que debe su cohesión a la presencia de un cementante que puede ser de naturaleza predominantemente calcárea o arcillosa [6].



Laboratorio de Mecánica de Suelos

Laboratorio de Materiales y Estructuras
Departamentos de Estabilidad y Construcciones
Facultad de Ingeniería – UBA

Las características del Pampeano están determinadas por la forma de deposición de las partículas y los cambios climáticos que se produjeron durante y luego de su formación.

Los efectos de las últimas glaciaciones y el consecuente descenso del nivel del mar, junto con los periodos de fuertes sequías preconsolidaron el suelo por desecación.

Durante la sedimentación de material, el carbonato de calcio presente en el agua y sales del suelo precipitó en forma de nódulos y como impregnación entre partículas generando zonas cementadas de alta resistencia y forma irregular, dando origen a lo que se conoce como tosca.

Se reconocen tres grados de cementación: i) en forma de nódulos aislados en una matriz preconsolidada no cementada; ii) en forma de una matriz de cementación intermedia con algunos nódulos fuertemente cementados; y iii) lo que se conoce comúnmente como “tosca”, que tiene la misma matriz medianamente cementada pero embebiendo inclusiones grandes, muy resistentes, producidas por precipitación de carbonato de calcio. En las toscas, estas inclusiones tienen bordes muy nítidos en los que se observa un salto importante de propiedades mecánicas respecto a la matriz que las rodea.

El contenido de carbonato de calcio es, quizás, el parámetro más asociado a las variación de los valores de cohesión efectiva. La corroboración de esta suposición es parte de este trabajo.

ACONDICIONAMIENTO DE LA CAMARA TRIAXIAL

Proyecto conjunto de modificación de cámara

El sistema original de la cámara triaxial Wykeham Farrance que se encuentra en el laboratorio utilizaba agua como fluido de control de la presión de confinamiento.

A partir del proyecto general de re-acondicionamiento de la cámara, que involucra este trabajo junto al realizado por Patricia Sagües [5], se decidió modificar el sistema general optando por la utilización de aire comprimido como fluido de cámara.

Una de las principales razones de esta decisión es que los dispositivos de medición que se colocarán dentro de la cámara no pueden estar inmersos en agua.

El otro punto a favor que tiene es la versatilidad que se obtiene, tanto en la velocidad de aplicación y remoción de la presión de cámara como en la sencillez del mantenimiento de una presión constante. El único inconveniente asociado al empleo de aire como fluido de cámara es el riesgo de explosión por ruptura del cilindro de perspex que forma la cámara.

En este trabajo se diseñó, re-construyó y se puso en funcionamiento el equipo de suministro de aire, los reguladores de presión, los sistemas de válvulas, los sistemas de medición, y el tablero de presiones neutras que forman parte del sistema.

Estos trabajos se realizaron durante el primer cuatrimestre del 2007, entre el 12 de Marzo y el 31 de Julio.



Laboratorio de Mecánica de Suelos

Laboratorio de Materiales y Estructuras
Departamentos de Estabilidad y Construcciones
Facultad de Ingeniería – UBA

Con las modificaciones documentadas en este informe y las presentadas en [5], el equipo tiene capacidad para realizar ensayos drenados y no drenados con medición de presiones neutras; de deformaciones locales mediante LDT's y de carga mediante celda ubicada dentro de la cámara. También permite la saturación de las muestras con un gradiente hidráulico controlado.

Descripción general del equipo reacondicionado

El equipo es una cámara Wickenham Farrace para muestras de 3" y 4" x 70 mm a 130 mm de altura, apta para presiones de confinamiento hasta 800 KPa. El marco de carga tiene accionamiento mecánico a tornillo con 30 velocidades en el rango 0.0012 a 7.5 mm/min. La capacidad del marco es de 10 KN. En la Figura 1 se aprecia una vista general del equipo.



Fig. 1. Vista general de la cámara triaxial con accesorios.

Compresor

El compresor que alimenta el sistema permite trabajar con un rango de presiones de hasta 800 KPa. La presión máxima y el rango de descarga son regulados por un sistema mecánico de regulación manual (Fig. 2).



Fig. 2. Vista del compresor.

Reguladores

Para la utilización de aire comprimido se construyó un banco de reguladores. Los reguladores son marca Micro, serie QBS1 con un rango de trabajo de 0 - 10 bar. Su operación es manual con un valor de presión de salida constante con un error de 0.02 bar (Fig. 3).

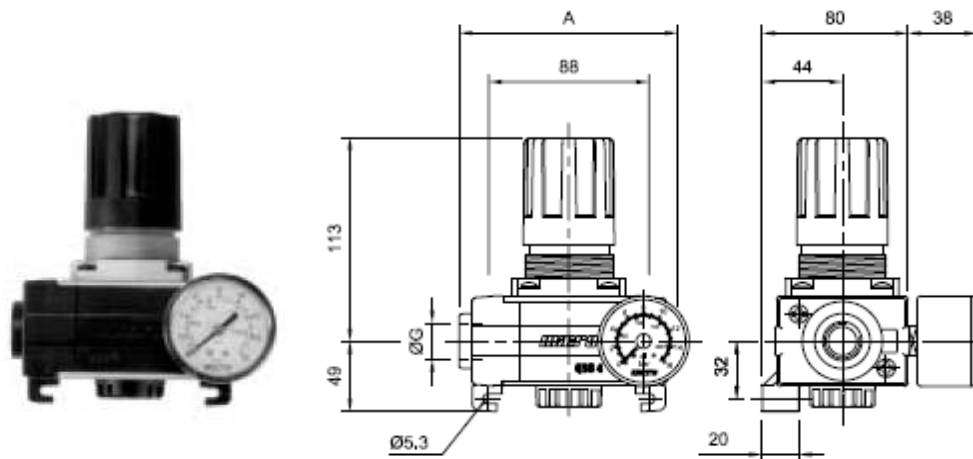


Fig. 3. Vista y detalle del regulador QSB1

Hay tres reguladores:

- R1: Recibe la presión de entrada del compresor con salida a la cámara y al segundo regulador. La presión de salida de R1 es la presión de cámara p_c .
- R2: Recibe la presión p_c de R1 con salidas al tanque de agua desaireada y al tercer regulador. La presión de salida es la presión de entrada de agua a la base de la muestra p_e .
- R3: Recibe presión p_e de R2 con salida a la contrapresión del tablero p_s .

Los reguladores se colocaron en serie para garantizar que la presión de cámara sea mayor que la presión de entrada de agua a la muestra, y que ésta sea mayor que la presión de salida de agua o contrapresión (Fig. 4). Este hecho es importante ya que la muestra se encuentra recubierta por una membrana que impide la transferencia de fluido de cámara al interior de la muestra; una presión externa mayor que la interna asegura una correcta adherencia entre la membrana y la muestra; si la presión de agua en la muestra es mayor que la de cámara, la membrana se infla y el ensayo fracasa.

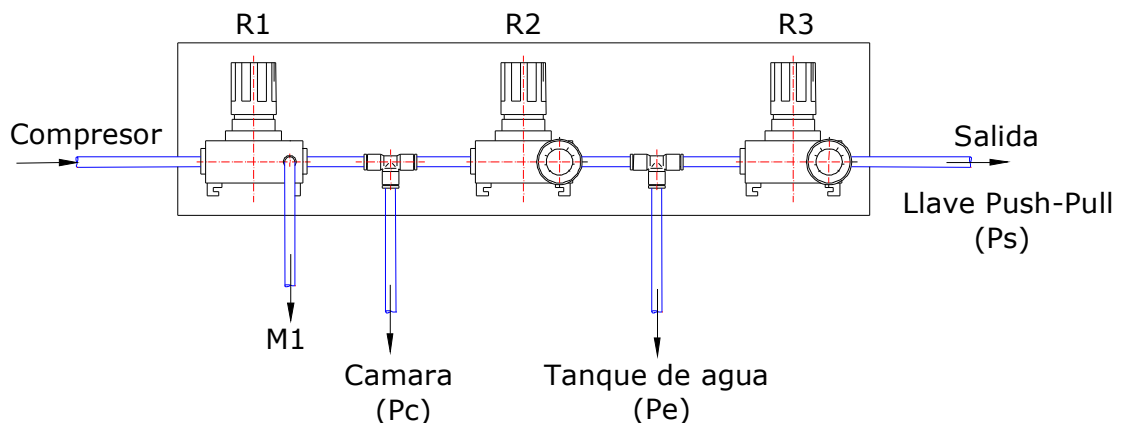


Fig. 4. Croquis de armado del banco de reguladores

En el regulador R1 se reemplazo el manómetro incluido en la unidad por una conexión directa al manómetro M1 ubicado sobre el pórtico de la maquina. En la Fig. 5 se aprecia una vista general del banco de reguladores.



Fig. 5. Vista general del banco de reguladores

Alimentación de agua al sistema

Existe un tanque de agua desaireada (Fig. 6 y 7) que recibe aire del regulador R2 y entrega agua a la válvula de entrada del tablero principal a presión p_e . Sobre la línea de salida se ubicó el manómetro M2.

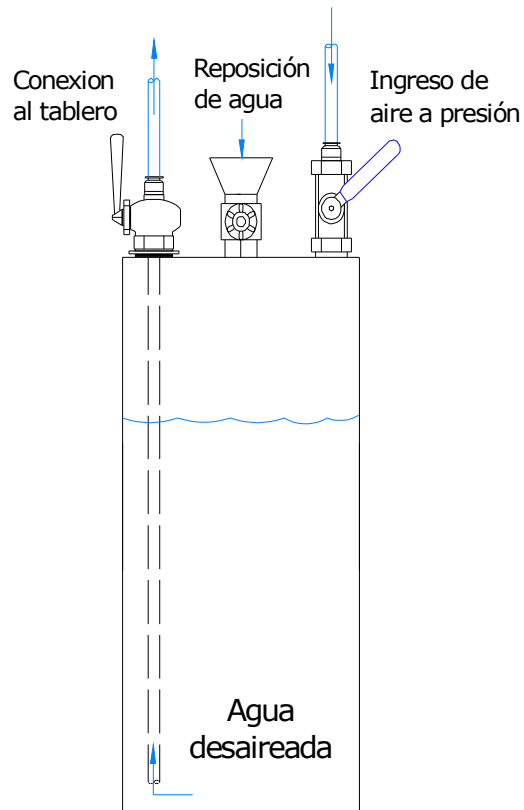


Fig. 6. Croquis del tanque de agua presurizada.



Fig. 7. Vistas del tanque de presurización de agua.

Tablero Principal

Las llaves, cañerías y manómetros del tablero estaban incluidos en la configuración original de la cámara triaxial. El trabajo realizado consistió en la adición de acoples rápidos, el cambio de tubos, el acondicionamiento de válvulas y el diseño de un sistema de conexión que permite el control de la dirección de flujo de agua dentro de la muestra. En la Figura 8 se aprecia un croquis del tablero y una vista general.

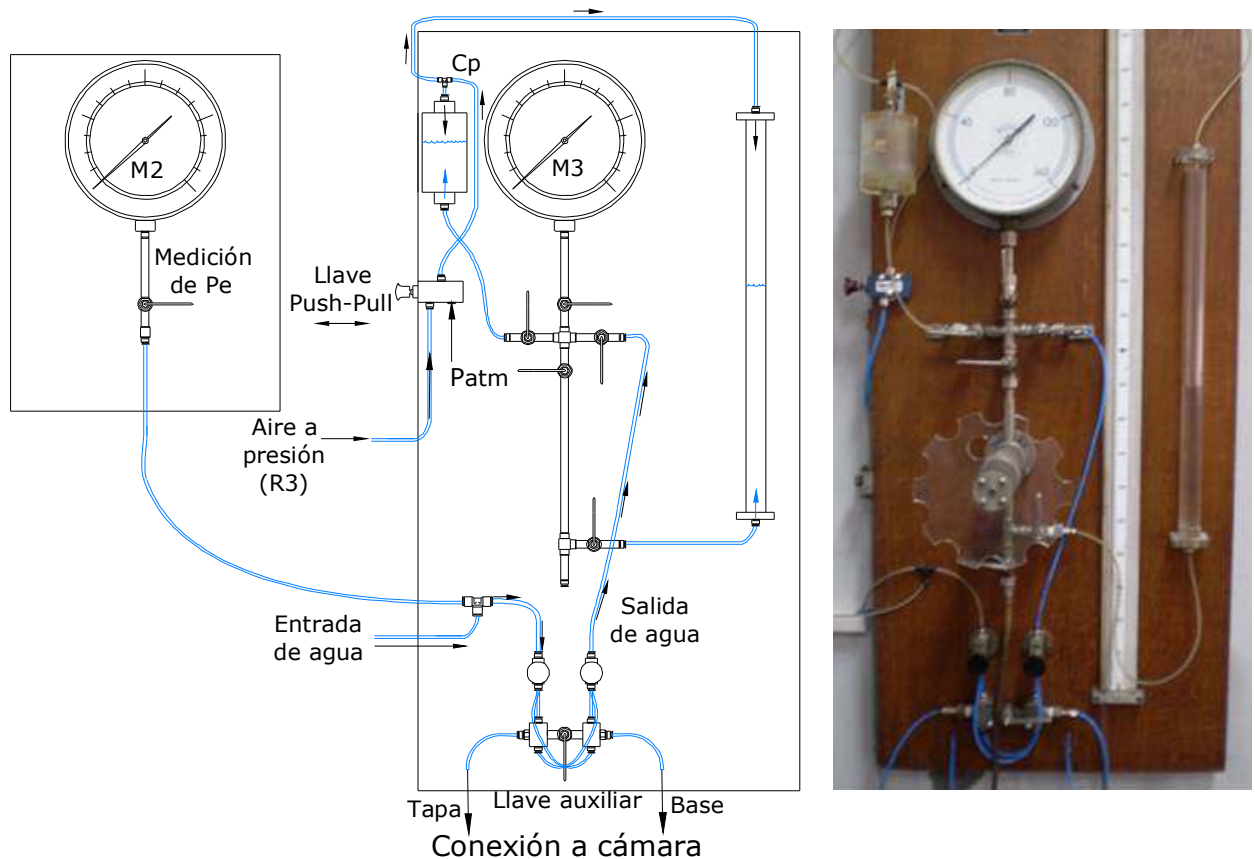


Figura 8. Croquis y vista del tablero principal.

Llaves de comando

Hay dos llaves de comando que manejan la entrada y salida de agua a la muestra. Estas llaves se denominan C1 y C2 (Fig. 9 y 10) y tienen cuatro posiciones (A, B, C, D). Están conectadas a las válvulas de los cabezales de la muestra en la celda.

Estas llaves permiten direccionar el flujo de agua en el sentido deseado para la saturación de la muestra. Hay dos configuraciones:

- Entrada: cabezal superior , Salida: cabezal inferior (Flujo descendente).
- Entrada: cabezal inferior, Salida: cabezal superior (Flujo ascendente).

Para los ensayos drenados la entrada permanece cerrada; mientras que tanto base como tapa están conectadas a la salida y contrapresión mediante la llave auxiliar A1.

Para los ensayos no drenados entrada y salida permanecen cerrados. En las Figuras 9 y 10 se aprecia un croquis y vista general del sistema de llaves.

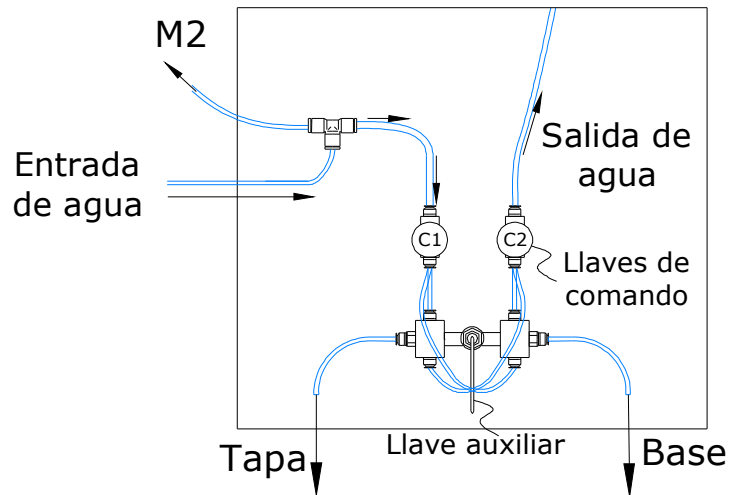


Fig. 9. Croquis y foto de llaves de comando del tablero. Vista frontal.

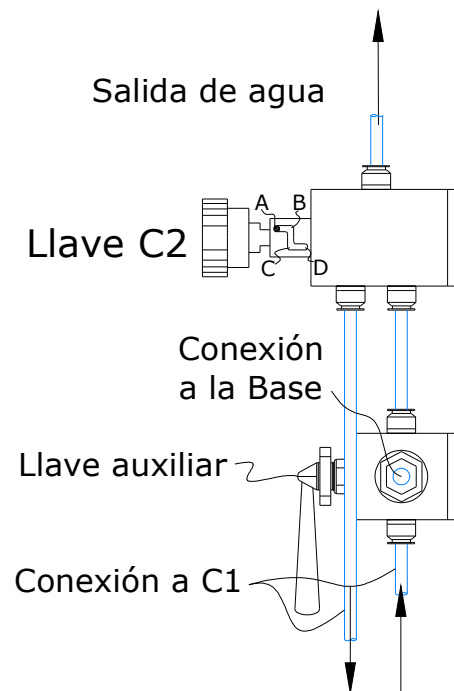


Fig. 10. Croquis y foto de llaves de comando del tablero. Vista lateral.

Salida del sistema

El flujo de agua saliente se acumula en recipientes que tienen impuesta una contrapresión p_s que se mide en el manómetro M3. Entre el tercer regulador y la salida

hay interpuesta una llave de dos puntos Micro *push-pull* de servicio liviano que permite aplicar tanto contrapresión p_s como salida directa a atmósfera (Fig. 11).

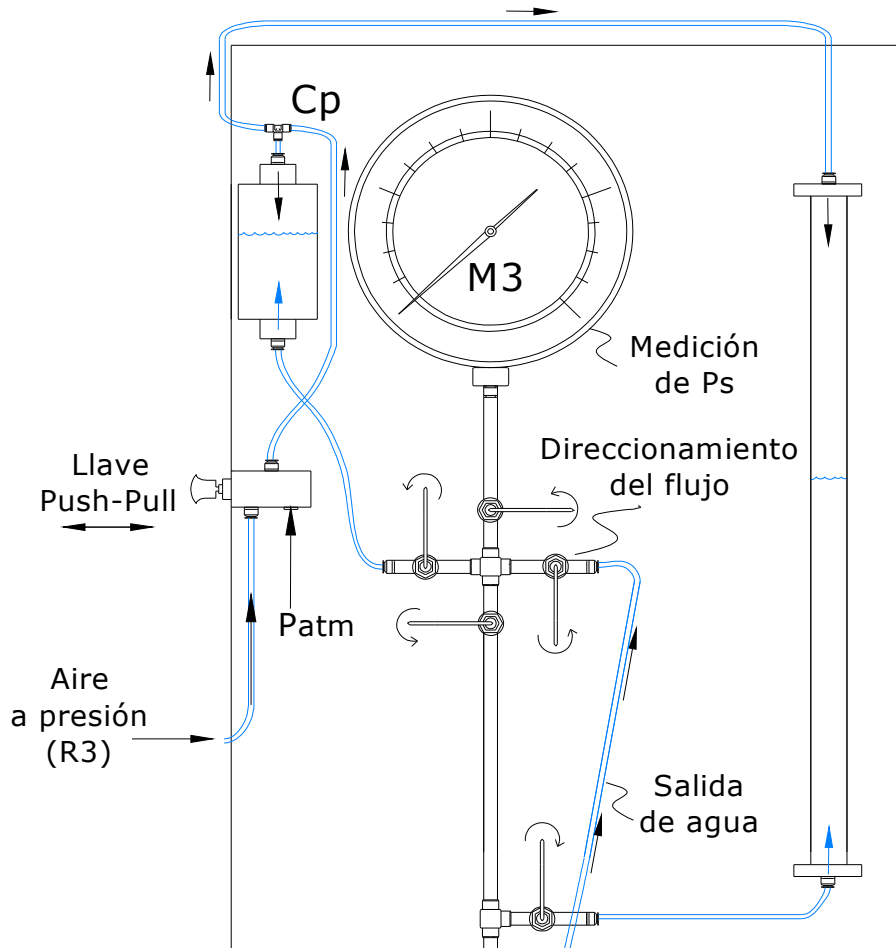


Fig. 11. Croquis y vista frontal de la salida del tablero.

Conexiones a la cámara triaxial

La base de la cámara tiene tres válvulas que permiten la conexión de la presión de cámara, de la base de la muestra y de la tapa. En las tres válvulas se instalaron acoples rápidos (Fig. 12).



Fig. 12. Vista superior y lateral de la base de la cámara triaxial con acoples rápidos instalados en sus válvulas.

Acoples

Para las conexiones entre las distintas partes del sistema se utilizaron tubos de HDPE para alta presión marca Micro. También se utilizaron acoples rápidos que permiten una manipulación sencilla y segura de los tubos y un acople estanco. En la Figura 13 se aprecian detalles de las conexiones entre distintos elementos de la cámara.

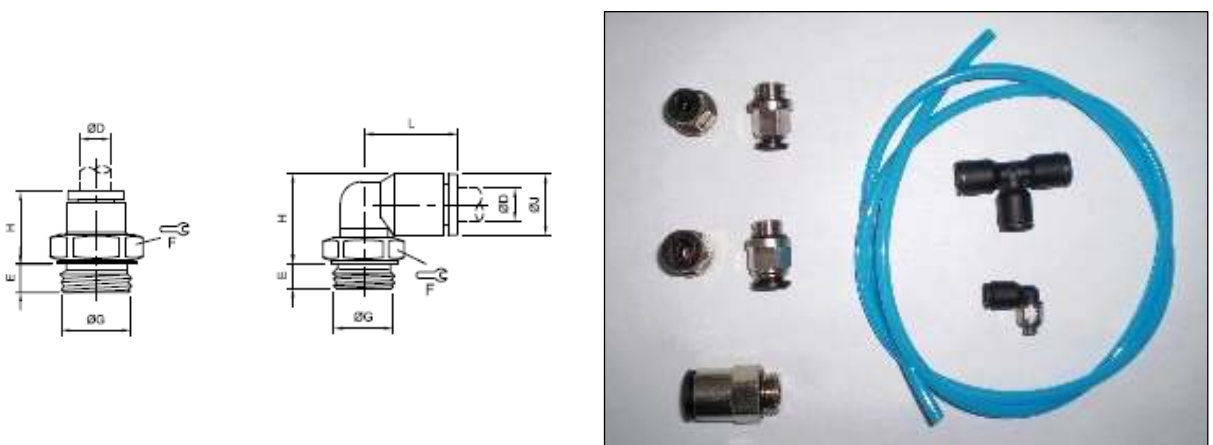


Fig. 13. Detalles de las conexiones entre elementos de la cámara.



Laboratorio de Mecánica de Suelos

Laboratorio de Materiales y Estructuras
Departamentos de Estabilidad y Construcciones
Facultad de Ingeniería – UBA

ETAPA SIGUIENTE DEL PROGRAMA

El equipo se encuentra reacondicionado y preparado para operación manual. En la siguiente etapa se implementará un sistema digital de adquisición de datos y se efectuará la calibración general del equipo.

REFERENCIAS

- [1] Bolognesi, A. (1975). “Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano”. V PCSMFE, Buenos Aires, V: 255-302.
- [2] Fidalgo, F., De Francesco, F. y Pascual, R. (1975). “Geología superficial de la llanura Bonaerense”. En: VI Congreso Geológico Argentino.
- [3] Núñez, E. (1986). “Panel report: geotechnical conditions in Buenos Aires City”. En: Proceedings, Fifth International Conference, International Association of Engineering Geology.
- [4] Núñez, E. y Micucci, C. (1986b). “Cemented preconsolidated soils as very weak rocks”. En: Proceedings, Fifth International Conference, International Association of Engineering Geology.
- [5] Sagües, P. (2007). “proyecto de tesis: caracterización mecánica de loess pampeano compactado”, <http://www.fi.uba.ar/materias/6408/Sagues%20-%20Informe%2001.pdf>
- [6] Terzaghi, K. y R. Peck (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. Trad. O. Moretto, Ed. El Ateneo, 722 p.

Tesis

COHESION EFECTIVA DEL PAMPEANO MEDIO

Informe de avance N° 2

Gastón Quaglia

Laboratorio de Mecánica de Suelos – Facultad de Ingeniería - UBA

1 INTRODUCCION

Este informe reúne el trabajo de investigación realizado en el LMS (Laboratorio de Mecánica de Suelos) entre Agosto y Diciembre de 2007.

Se ejecutó una serie de ensayos triaxiales consolidados-drenados con ciclos escalonados de carga y descarga, en los cuales se midió el comportamiento del suelo a bajas deformaciones. En estos ensayos se utilizó el equipo construido durante la primera parte del año 2007 (Quaglia 2007) y (Sagües 2007), en particular se destaca la utilización de LDTs para la medición de deformaciones locales.

El análisis de las muestras se completó realizando ensayos de caracterización del suelo: medición de contenido de humedad inicial y final, límites líquido y plástico; y la determinación del contenido de $CaCO_3$, con un procedimiento que también es explicado en este informe.

2 EXTRACCION DE MUESTRAS

Las muestras inalteradas se obtuvieron en la excavación de la caverna de la “Estación Corrientes” correspondiente a la ampliación de la línea H de subterráneos (Sfriso 2007). Las muestras se extrajeron con la ayuda de una retroexcavadora en el frente de avance de la obra (Figuras 1 y 2).



Figura 1. Frente del túnel, línea H.



Figura 2. Extracción de muestra inalterada.

Se hincaron estáticamente tubos de acero de 101mm de diámetro utilizando el peso propio de la retroexcavadora como elemento de reacción. Una vez enterrados los tubos se removió el suelo circundante y se extrajeron los tubos con las muestras. Una vez retirados, los tubos se envolvieron con papel film para conservar el contenido de humedad in-situ y se trasladaron al laboratorio (Figura 3).



Figura 3. Procedimiento de extracción de muestras inalteradas mediante hinca estática de un tubo.

3 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

3.1 Saturación

Las muestras se saturaron dentro de los moldes, utilizando un dispositivo fabricado en el laboratorio. Con la ayuda de una bomba de vacío se produce una succión en la cara superior de la muestra. Los moldes se colocan dentro de un recipiente lleno de agua; de esta manera la subpresión aplicada fuerza el ascenso del agua a través de la muestra. Para evitar el desprendimiento de suelo de la muestra debido al elevado gradiente hidráulico se colocaron piedras porosas de 101mm de diámetro en ambas caras de las muestras (Figura 4).

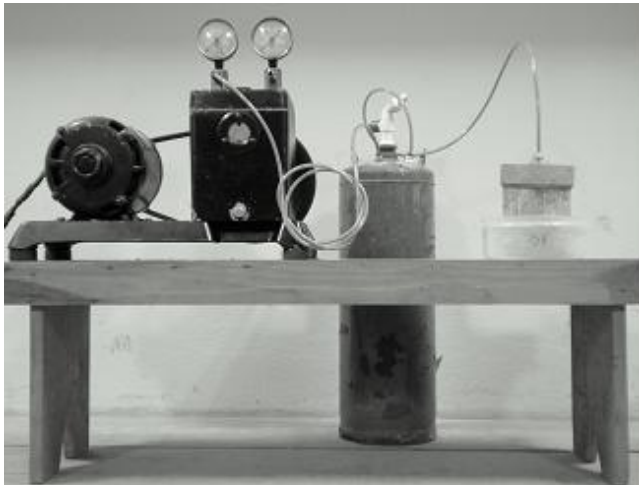


Figura 4: Dispositivo para saturación de muestras.

Terminado el procedimiento de saturación las muestras fueron enrasadas a una altura de 127mm +/- 1mm y extraídas de los tubos. Una vez colocadas dentro de la cámara triaxial se completó el proceso de saturación haciendo circular agua por dentro de la muestra con un gradiente de presión controlado. El agua que se utilizó en ambos procedimientos para saturar las muestras fue previamente desaireada.

3.2 Caracterización de muestras

Para cada una de las seis muestras ensayadas se determinaron los siguientes parámetros: *LL*: límite líquido; *LP*: límite plástico; ω_i : humedad inicial; ω_f : humedad final; %*CaCO*₃: porcentaje de carbonato de calcio presente en la muestra; γ_d : Peso seco unitario (Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades de las muestras ensayadas

	Fecha de Extracción	ω_i %	ω_f %	γ_d KN/m ³	<i>CaCO</i> ₃ %	<i>LL</i> %	<i>LP</i> %
T1	25/09/07	32.0	32.8	13.60	2.10	56.5	33.3
T2	10/11/07	33.2	34.0	12.50	2.15	41.6	27.7
T3	16/11/07	37.7	38.8	14.10	0.96	45.0	28.0
T4	16/11/07	27.2	27.8	14.60	0.22	45.0	28.0
T5	22/11/07	27.0	28.0	14.40	0.37	40.0	n/a
T6	22/11/07	27.5	28.7	14.20	0.27	40.0	n/a

4 ENSAYOS TRIAXIALES

4.1 Descripción

Sobre las muestras inalteradas se realizaron ensayos Consolidados-Drenados (CD) con cinco escalones de carga y descarga.

En cada ensayo se midió la carga aplicada con la celda de carga ubicada dentro de la cámara y las deformaciones locales (axiales y radiales) con LDT's (Figura 5). Todos los datos obtenidos durante el ensayo fueron registrados por el sistema de adquisición de datos (DAQ) y representados en tiempo real en una computadora.



Figura 5: Muestra armada lista para el ensayo.

4.2 Procedimiento de ensayo

El ensayo siguió los siguientes pasos:

- 1 Se impuso un valor constante de presión de confinamiento efectiva (σ_3)
- 2 Se impuso una carga axial monotónica hasta obtener una relación de tensiones $\sigma_d/\sigma_3 = 1.0$.
- 3 Se detuvo la carga y se descargó a la misma velocidad hasta anular el esfuerzo desviador.
- 4 Se aumentó la presión de cámara y se repitió el procedimiento.

Se utilizó una velocidad de ensayo de 0.9mm/hr para todos los ensayos. El criterio utilizado para detener cada escalón tuvo como objetivo no dañar la estructura interna de la muestra, en especial la cementación entre las partículas de suelo. Solo se llevó a rotura en el último escalón.

5 SISTEMAS DE MEDICION Y ADQUISICION DE DATOS

El equipo utilizado para realizar las mediciones en los ensayos fue construido durante la primera parte del año 2007 (Sagües 2007).

Los LDTs se miden con un equipo VISHAT-P 3500 que pertenece al LAME y que permite conectar varios puentes de Wheatstone en forma simultánea. Este sistema fue reemplazado por un sistema de adquisición de datos en tiempo real.

5.1 Actualización del equipo

Se desarrolló un Sistema de Adquisición de Datos (DAQ) controlado por PC. El DAQ se compró a la empresa EMANT y se importó desde Singapur. Las tareas de instalación, calibración y programación del DAQ se realizaron en conjunto con otros tesisistas.

El hardware que se adquirió consta de tres módulos de adquisición EMANT 300 y de dos tipos de placas: una placa que permite la conexión y medición de *strain gauges* (SAA), y otra que está provista de un medidor de presión (Figura 6).

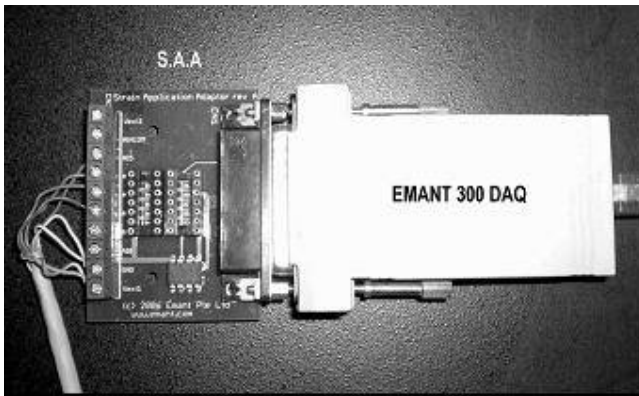


Figura 6: Módulo de adquisición de datos.

El SAA mide *strain gauges* mediante el empleo de puentes de Wheatstone en sus distintas configuraciones (cuarto puente, medio puente o puente completo). Del análisis de las características de estas placas y la interacción con la empresa proveedora se llegó a la conclusión de que era posible medir otros instrumentos que respondieran al mismo principio de funcionamiento (puentes de Wheatstone) como por ejemplo las celdas de carga, manómetros piezo-resistivos, etcétera. Cada SAA lee hasta tres puentes completos.

5.2 Software del DAQ

El hardware que se adquirió tiene la posibilidad de utilizar programas diseñados en entornos tales como LABVIEW, C#, C++, Visual Basic, etcétera.

Emant provee a sus compradores algunos programas básicos, con unas pocas líneas de código en los distintos lenguajes para realizar operaciones elementales.

El diseño de software para los ensayos triaxiales se realizó en un entorno de Visual Basic para macros de Excel.

A partir de un macro básico provisto por Emant, se modificó el código para utilizar varios módulos simultáneamente y que todos los datos obtenidos se referencien a un mismo archivo. Esto permitió un seguimiento en tiempo real del estado del ensayo, factor condicionante para el tipo de ensayo que se llevó a cabo.

5.3 Utilización de DAQ en los ensayos triaxiales

El equipo utilizado en la realización de cada ensayo triaxial constaba de: tres (3) módulos DAQ acoplados con un SAA cada uno.

Esto posibilitó la conexión simultánea de dos LDTs longitudinales (placa 1), tres LDTs transversales (placa 2) y una celda de carga (placa 3). Si bien el equipo empleado representa 6 puentes completos, la necesidad de configurar independientemente las tensiones de excitación, resistencia propia, y *gauge factor* de cada uno de los dispositivos hicieron inevitable la utilización de tres módulos en lugar de dos (Figura 7). Todo el sistema de medición fue recalibrado con el DAQ previa a su utilización en los ensayos.

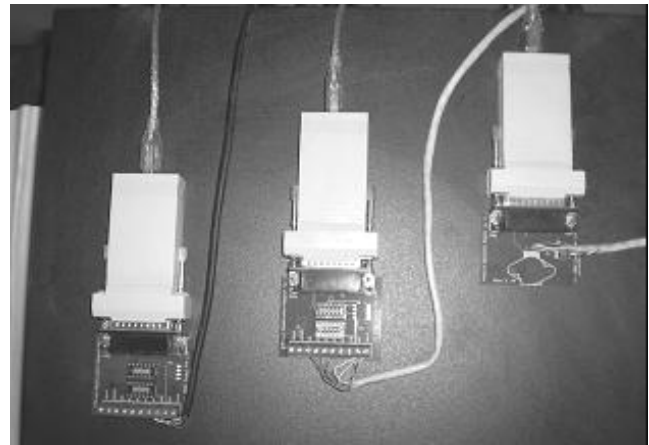


Figura 7: Conexión de DAQ para ensayos triaxiales.

6 RESULTADOS PRELIMINARES

6.1 Módulo de Young inicial

Se define como E_0 al valor del módulo de Young medido al inicio de cada escalón de carga, para muy pequeñas deformaciones. E_0 puede ser considerado igual al módulo de recarga E_{ur} , que puede obtenerse en un ciclo de descarga y recarga (Figura 8).

Los valores de E_0 obtenidos corresponden a deformaciones del orden de $\varepsilon_a=10^{-5}$. Este orden de magnitud está vinculado a la precisión de los LDT. Para deformaciones del orden $\varepsilon_a=10^{-6}$, los resultados mostraron una gran dispersión. Este

comportamiento puede estar asociado al desplazamiento de las bisagras donde se apoyan los LDT axiales (Dasari, 1995).

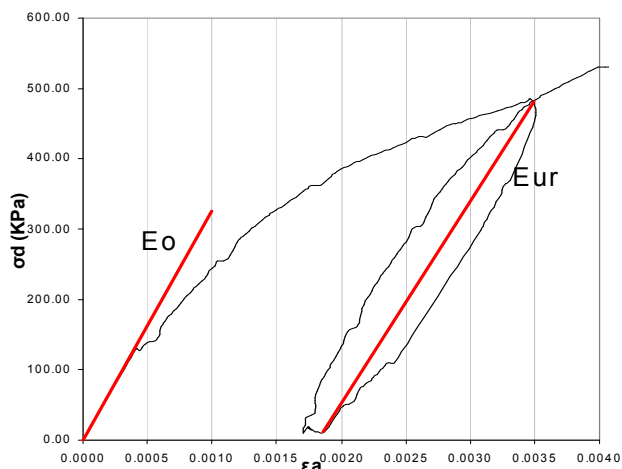


Figura 8: Definición de E_0 y E_{ur} .

E_0 cambia en cada escalón de carga, aumentando con el aumento de la presión de confinamiento. Se representan los valores obtenidos de E_0 en función de la presión de confinamiento (Figura 9).

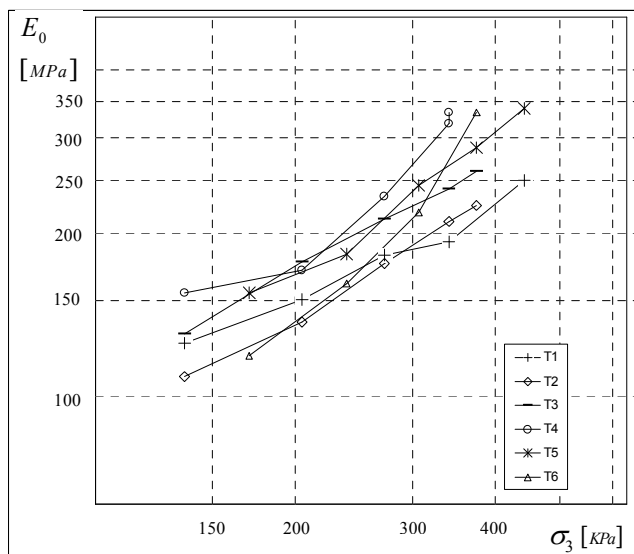


Figura 9. Módulo de Young inicial para bajas deformaciones en función de la presión de confinamiento.

El mejor ajuste de la ecuación de Janbu para estos resultados es (Janbu 1963)

$$E_0 = 120 \left(\frac{\sigma_3}{100 \text{ KPa}} \right)^{0.52} \text{ MPa} \quad (1)$$

6.2 Módulo de Poisson a bajas deformaciones

El módulo de Poisson cayó en el rango 0.15 - 0.18 para todos los ensayos y escalones de carga.

No se encontró ninguna dependencia entre el valor del módulo de Poisson y la presión de confinamiento.

6.3 Curva de reducción del módulo de Young

El módulo de Young secante se define para un punto cualquiera de la curva de tensión-deformación como

$$E_s = \sigma_d / \varepsilon_a \quad (2)$$

donde $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ es el esfuerzo desviador que se le aplica a la muestra y ε_a es la deformación específica axial.

El modelo hiperbólico (Hardin y Richart 1963) relaciona el módulo secante E_s con el módulo inicial E_0 a través de

$$E_s = E_0 / (1 + \varepsilon_a / \varepsilon_r) \quad (3)$$

Donde ε_r , deformación de referencia, es un parámetro que se obtiene gráficamente de la representación gráfica de E_s/E_0 vs. ε_a ; cuyo valor es la abscisa que corresponde a una relación en ordenadas de $E_s/E_0 = 1/2$.

En la figura 10 se presentan los resultados obtenidos. Se observa que para los ensayos realizados $\varepsilon_r > 10^{-3}$.

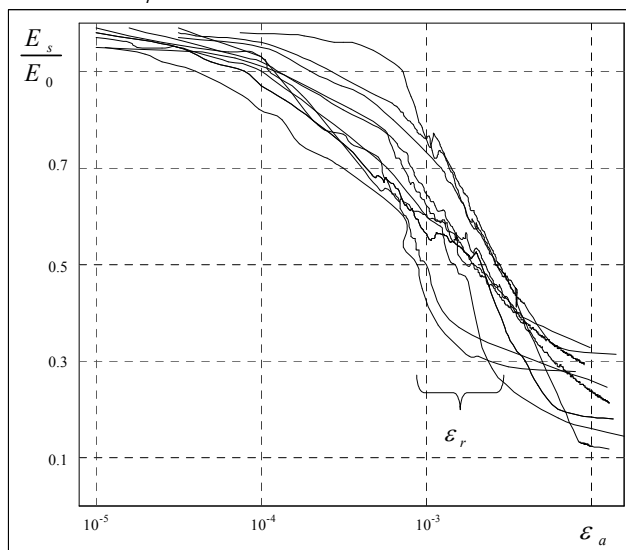


Figura 10. Reducción del módulo de Young en función de la deformación axial ε_a .

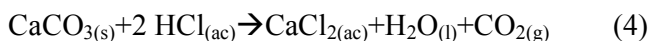
7 ENSAYOS QUIMICOS

Sobre cada una de las muestras ensayadas se realizó una medición del contenido de carbonato de calcio.

7.1 Introducción

El procedimiento utilizado para la determinación del contenido de CaCO_3 en una masa de suelo conocida consiste en la determinación del volumen de CO_2 que se desprende al agregar ácido clorhídrico $\text{HCl}_{(ac)}$.

La reacción química que se produce queda representada por la siguiente ecuación.



Dado que el número de moles de carbonato de calcio [$nCaCO_{3(s)}$] es igual al número de moles de dióxido de carbono [$nCO_{2(g)}$], la determinación de $CaCO_3$ es inmediata a partir del volumen de gas desprendido. Para ello se utiliza la ecuación de gases ideales:

$$p \cdot V_{CO_2} = N_{CO_2} \cdot R \cdot T \quad (5)$$

donde $R = 0.082 \text{ atm.l/k.mol}$, p es la presión y T es la temperatura absoluta correspondientes al momento del ensayo y

$$nCaCO_{3(s)} = nCO_{2(g)} \quad (6)$$

Conocido el número de moles y la masa molar [Mr] del carbonato de calcio (100 g/mol), se tiene

$$mCaCO_{3(s)} = nCaCO_{3(s)} \cdot Mr \quad (7)$$

$$\% CaCO_3 = mCaCO_3 / m_{total} \quad (8)$$

De esta manera se obtiene el porcentaje de carbonato de calcio presente en la muestra ensayada.

8 COMENTARIOS Y SIGUIENTE ETAPA

Los ensayos ejecutados en esta etapa tuvieron una serie de objetivos complementarios entre sí: la calibración de los equipos, la medición de la dependencia del módulo de Young respecto a la presión de confinamiento y una evaluación preliminar del grado de alteración de las muestras durante su extracción.

A partir de los resultados disponibles se concluye que modelo de ensayo elegido no permite la medición confiable de la cohesión efectiva de las muestras analizadas. Entre las principales desventajas se observa que la utilización de presiones de confinamiento efectivas mayores a 100 kPa hace despreciable la influencia de la cementación sobre la resistencia del material. Se requiere una mayor cantidad de ensayos y una disminución en la dispersión de los resultados para poder extraer algunas conclusiones al respecto.

La nueva serie de ensayos contará con una menor cantidad de escalones de carga y recarga con presiones de confinamiento considerablemente menores. Además, se eliminará la medición local de deformaciones para poder ensayar las muestras por fuera del rango de funcionamiento de estos instrumentos.

En algunos ensayos se medirá el ángulo de fricción interna. Si la variación de ϕ no es grande entre las distintas muestras, se ensayará algunas muestras hasta la falla en una única etapa. De esta manera se espera obtener la cohesión efectiva por medición directa a bajo confinamiento.

Se continuarán realizando los ensayos de caracterización de las muestras con el objetivo de encontrar una posible correlación entre parámetros físico-químicos y el comportamiento mecánico.

9 CONCLUSIONES

En este informe de avance se presentó parte del programa experimental ejecutado durante el último trimestre de 2007.

Se implementó un sistema de adquisición de datos en una PC que permitió la captura de información de ensayos triaxiales.

Se realizaron seis ensayos triaxiales sobre muestras inalteradas de la formación Pampeano obtenidas de la traza en construcción de la línea H de subterráneos en la ciudad de Buenos Aires. También se caracterizaron las muestras con ensayos físicos y químicos.

Se observó una fuerte dependencia del módulo de Young a bajas deformaciones respecto de la presión de confinamiento.

Se presentaron algunos comentarios y propuestas de trabajo para la siguiente etapa de la tesis.

REFERENCIAS

- Dasari, G., Bolton, M., and Ng, C. (1995). "Small strain measurement using modified LDTs", Report CUED/D-SOILS/TR275, Geotech. Group, Cambridge University.
- Janbu, N. (1963). "Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests", Proc. Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Wiesbaden, I, 19-25.
- Hardin, B. and F. Richart (1963). "Elastic wave velocities in granular soils", JSMFD, ASCE, 89, SM1, 33-65.
- Quaglia, G. (2007) "Informe de avance N°1: cohesión efectiva del pampeano medio".
- Quaglia, G y Quintela, M (2007) "determinación del contenido de carbonato de calcio" Informe. [www.fi.uba.ar / materias / 6408 / investigacion.htm](http://www.fi.uba.ar/materias/6408/investigacion.htm).
- Sagües, P. (2007) "Informe de avance N°1: Caracterización mecánica del Loess Pampeano compactado".
- Sagües, P. (2007) "Informe de avance N°2: Caracterización mecánica del Loes Pampeano compactado".
- Sfriso, A. (2007). "Procedimiento Constructivo de la Estación Corrientes del Subterráneo de Buenos Aires, Argentina". VI Chilean Conf. Geot. Eng., 124-132.

EMANT300

FEATURES

- Low cost and portable data acquisition system
- up to 6 channels of differential multiplexed ADC
 - single channel 22 bit @ 10 samples/sec
 - single channel 16 bit waveform @ 2500 samples/sec (max)
 - Programmable Gain 1-128
- 1 channel of 8-bit D/A conversion (current output)
- 8 digital IO channels
- One 16-bit general-purpose counter OR 16-bit PWM
- USB 2.0 Full Speed connectivity to desktop PC, notebook
- Low cost and easily available 25 pin D-Sub connects to the physical world.
- Application adaptors with instructional guides for fuss free learning.



APPLICATIONS

The **EMANT300** is a low-cost and compact data acquisition system developed for learning purposes. It can be used readily with a desktop personal computer for data acquisition and control. When connected to a notebook, portability and/or isolation is achieved.

Together with the communication capabilities inherent in the computer, it allows learners to experiment and design solutions that **capture, compute, control and connect** to the world.

The high resolution ADC, Differential Inputs & Programmable Gain Amplifier simplifies sensor connection. Learners can connect thermocouples and strain gauges directly to read temperature and strain without needing expensive and sophisticated signal conditioning.

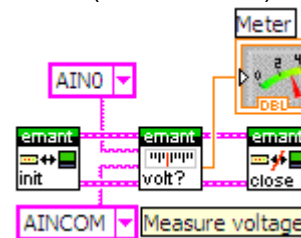
The current output DAC allows users to measure resistance directly. Thus, resistive sensors like thermistors can be connected directly to measure temperature.

The counter can be used to measure flow rate or RPM. When the counter is not used, its clock can be used for PWM output for heating or motor control experiments.

USB allows for quick and fuss free connection. 3 icons (LabVIEW) or 6 lines of code (C# on .NET) later, the learner has created a voltage meter.

SOFTWARE SUPPORT AVAILABLE

LabVIEW driver (ver7.0 or later)



.NET driver for use with C#, VB and C++ (.NET Framework 1.1 or later)

```
double volt;
EMANT300 DAQ = new EMANT300();
DAQ.Open();
volt = DAQ.ReadAnalog(AIN0, AINCOM);
Console.WriteLine(volt);
DAQ.Close();
```

Using the internet connectivity, the same voltage can now be read across the world using email, browser or messenger.

Attaching a mobile phone with PC connectivity (or GSM modem) to the PC, this voltage reading is now available on a mobile phone.

Simple examples are provided with instructional guide to allow the learner to explore and build on the knowledge.

SPECIFICATIONS

Typical at 25 °C unless otherwise noted.

Parameter	Condition	Specification	Unit
ANALOG INPUT (AIN0-AIN5, AINCOM)			
Number of analog input channels		6 single ended / 3 differential	
Resolution		24	Bits
Sampling Rate Resolution	10 samples/s	22	Bits
Single Channel ¹	2500 samples/s	16	Bits
Max Sampling Rate ¹		2500	Hz
Input gains (PGA)		1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 or 128	
Full-Scale Input Voltage Range	Unipolar	0 to VREF/PGA	V
	Bipolar	±VREF/PGA	V
Analog Input Range	Buffer OFF	-0.1 to 5.1	V
	Buffer ON	0.05 to 3.5	V
Differential Input Impedance Buffer	Buffer OFF	7/PGA	MΩ
Input Current	Buffer ON	0.5	nA

Note 1: Single Channel. There is a 3 cycle delay between samples of multiplexed inputs

ON-CHIP VOLTAGE REFERENCE			
Output Voltage	VREFH = 1	2.5	V
	VREFH = 0	1.25	V
Current Source		9	mA
Current Sink		10	mA

TEMPERATURE SENSOR			
Temperature Sensor Voltage	T = +25°C	115	mV
Temperature Sensor Coefficient		375	µV/°C

IDAC OUTPUT CHARACTERISTICS			
Full-Scale Output Current		1	mA
Compliance Voltage		3.5	V
Resolution		8	Bits

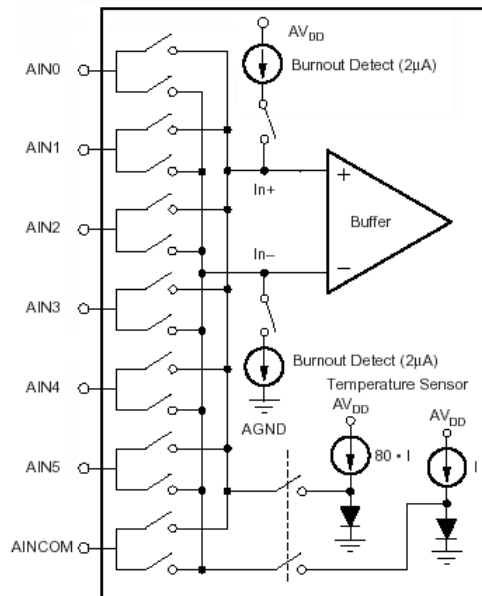


Fig 1: Analog Input Schematic

Parameter	Condition	Specification	Unit
DIGITAL IO			
Number of channels		8	
Direction control		Each channel configurable as input or output	
Absolute maximum voltage range		-0.5 to +5.8	V
Input Low Voltage (Max)		1	V
Input High Voltage (Min)		3	V
Output low voltage (Max)	$I_{OL} = 1\text{mA}$	0.4	V
	$I_{OL} = 20\text{mA}$	1.5	V
Pull-Up Resistors		11	k Ω
COUNTER²			
Number of counters		1	
Resolution		16	Bits
Counter measurements		Edge counting (falling edge)	
Maximum input frequency		5	MHz
Input Low Voltage (Max)		1	V
Input High Voltage (Min)		3	V
PWM² (Pulse Width Modulation Output)			
Number of channels		1	
Resolution		16	Bits
Period		0.05 – 35	ms
Duty cycle		0 to 100	%
Deadtime		8	usec
Output low voltage (Max)	$I_{OL} = 20\text{mA}$	1.5	V
Output high voltage (Min)	$I_{OH} = 20\text{mA}$	3.5	V
Note 2: Both the Counter and PWM shares the same clock. Therefore only one function is available at any one time.			
POWER AVAILABLE AT I/O CONNECTOR			
+5 V output	Max	300	mA
PHYSICAL CHARACTERISTICS			
Dimensions		5.7 by 9.5 by 2.4	cm
Weight		60	g
I/O Connectors		USB series B receptacle 25 pin D-Sub connector (Plug)	

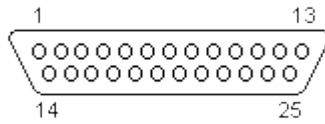


Fig 2: DB25 pin out connection to the real world

DB25 Pin	Signal Name	Description	DB25 Pin	Signal Name	Description
1	IDAC	Analog Current Output	14	D0	Digital IO
2	AGND	Analog Ground	15	D1	Digital IO
3	REFOUT	Reference Voltage +ve	16	D2	Digital IO
4	REFIN-	Reference Voltage -ve	17	D3	Digital IO
5	AINCOM	Analog Input Common	18	D4	Digital IO
6	AIN5	Analog Input	19	D5	Digital IO
7	AIN4	Analog Input	20	D6	Digital IO
8	AIN3	Analog Input	21	COUNTER	Counter Input
9	AIN2	Analog Input	22	PWM	PWM Output
10	AIN1	Analog Input	23	D7	Digital IO
11	AIN0	Analog Input	24	USB Gnd	USB Supply Gnd
12	USB Gnd	USB Supply Gnd	25	USB 5V	USB Supply 5V
13	USB 5V	USB Supply 5V			

TYPICAL APPLICATION SCHEMATICS

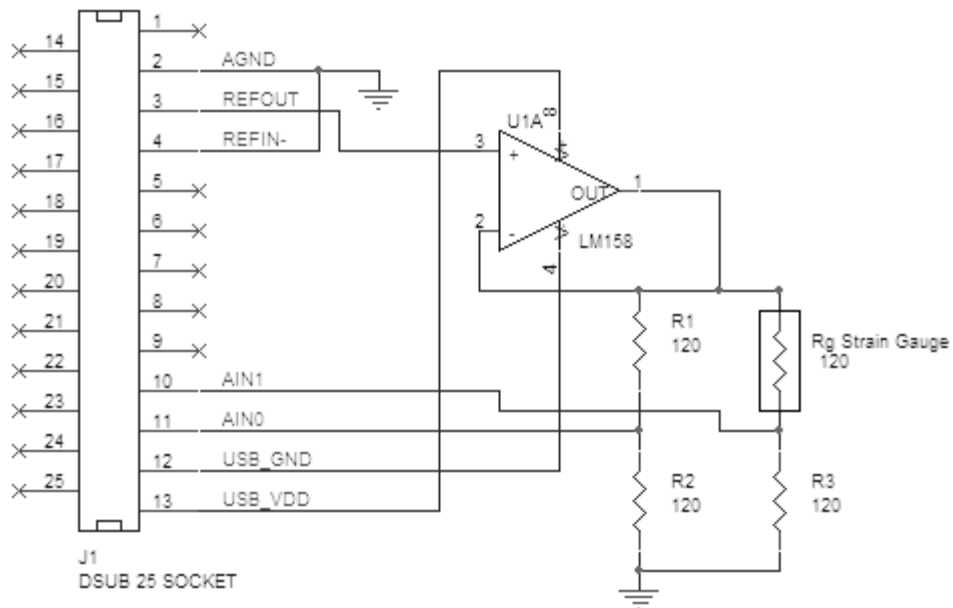


Fig 3: Quarter Bridge Strain Gauge Measurement
(REFIN- connected to AGND to use the internal reference)

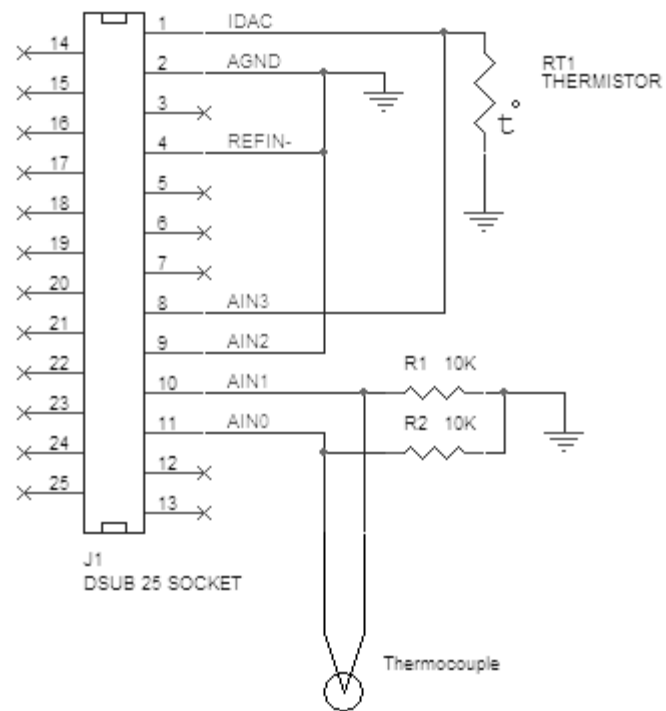


Fig 4: Temperature Measurement using Thermocouple with Thermistor for Cold Junction Compensation
(REFIN- connected to AGND to use the internal reference)

STRAIN APPLICATION ADAPTOR FOR EMANT300

The Strain Application Adaptor is used for the teaching or demonstrating of PC Based Data Acquisition. Used with the **EMANT300** Low Cost USB Data Acquisition Module, they form a very low cost PC based Strain Data Logger. It is ideal for use in hands-on teaching laboratories and projects involving strain measurements.



FEATURES

- 2.5 V excitation source.
- Up to 6 inputs
- Accepts quarter, half or full bridge configurations

When an object is stretched due to an external force and the length of the object increases from L to $L+\Delta L$, the ratio $\Delta L/L$ is called strain.

$$\epsilon = \Delta L/L$$

As the ratio of deformation is often very small, it is often represented in a units of 10^{-6} or μ strain

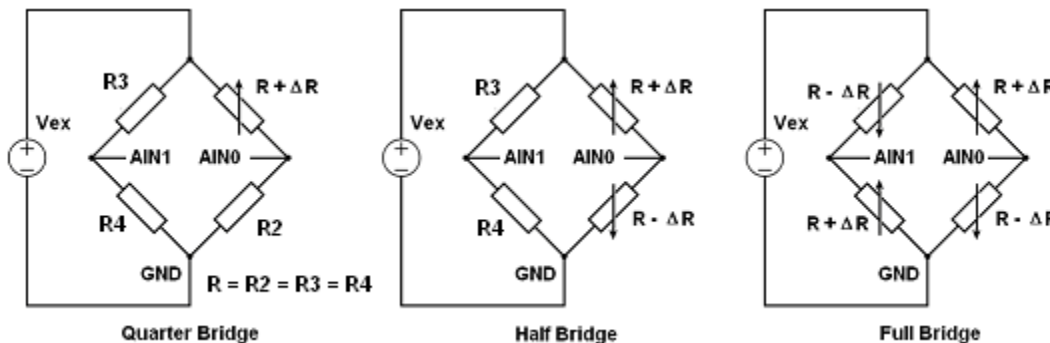


A strain gauge can be used to measure the strain of this object. The most common type of strain gauge consists of a flexible backing which supports a metallic foil pattern etched onto the backing. As the object is deformed, the foil pattern is deformed, causing its electrical resistance to change. This resistance change, usually measured using a Wheatstone bridge circuit, can be used to calculate the exact amount of deformation.

The gauge factor of a strain gauge relates strain to change in electrical resistance. The gauge factor G_F is defined by the formula

$$G_F = \frac{\Delta R / R_G}{\epsilon}$$

where R_G is the resistance of the undeformed gauge, ΔR is the change in resistance caused by strain, and ϵ is strain. ΔR is typically in the region of 0.1%. To measure such small resistance changes, a Wheatstone bridge is employed. There are 3 configurations are used - quarter bridge, half bridge or full bridge. The strain adaptor allows for all these three configurations by plugging in the respective bridge completion resistors and then wiring up the strain gauges via the screw terminals. Excitation voltage of 2.5V is provided. Up to six input channels are available.



Typical Application: Quarter Bridge Strain Measurement

We will use one strain gauge with $G_F=2$, $R_G = 120$ ohms and connected in a quarter bridge configuration. The bridge is excited at $V_{EXC}=2.5V$.

The voltage output of the wheatstone bridge V_o (seen at the differential input AIN0, AIN1) is given by

$$V_o = V_{EXC} \left[\frac{R_2}{R_G + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$

$$V_o = -V_{EXC} \left[\frac{R_G R_4 - R_2 R_3}{(R_G + R_2)(R_3 + R_4)} \right]$$

If the bridge is balanced $V_o = 0$ since all the resistances are equal. When a strain is applied, R_G becomes $R + \Delta R$ and substituting R to all the other resistances, the equation becomes

$$\Delta V_o = -V_{EXC} \left[\frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \right]$$

If we assume $2 \Delta R \ll 4R$

$$\Delta V_o = -V_{EXC} \left[\frac{\epsilon G_F}{4} \right]$$

Finally substituting $V_{EXC}=2.5V$, $G_F=2$, we obtain

$$\epsilon = \frac{-\Delta V_o}{1.25}$$

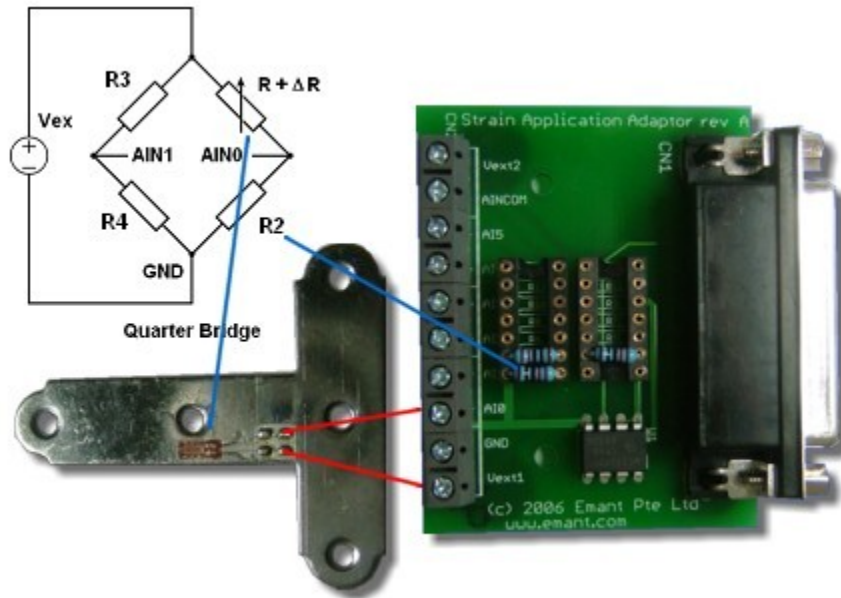
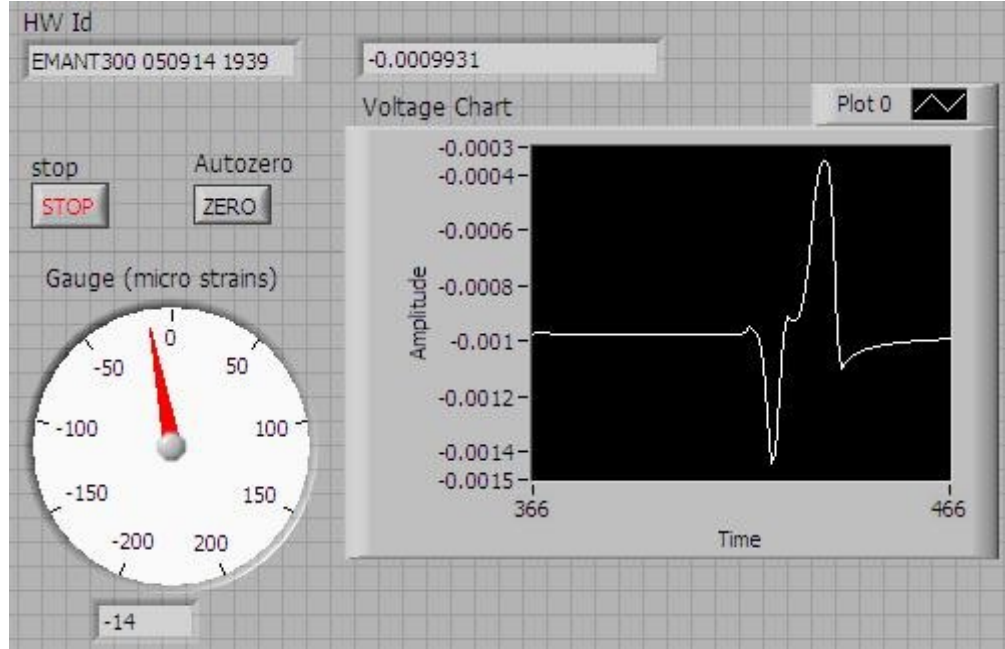


Fig 3: Connecting the strain gauge and bridge completion resistors

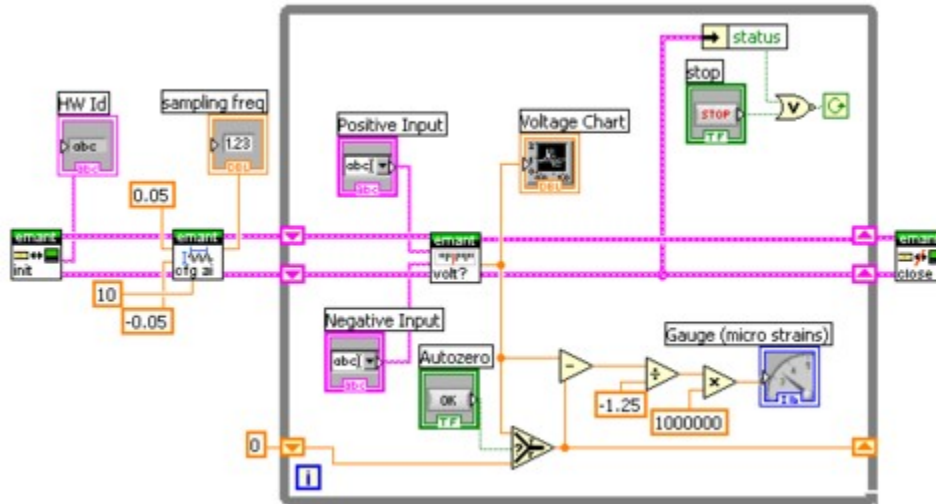
LabVIEW Program

The following LabVIEW VI that reads the voltage across the bridge and converts the voltage to μ strain. We use software zeroing of the offset.

Front Panel



Block Diagram



LabVIEW is a trademark of National Instruments

C# Program

Below is part of the C# program that reads the voltage across the bridge and converts the voltage to μ strain. We use software zeroing of the offset.

```
emant3001.ConfigAnalog(0.05,Emant.Emant300.POLARITY.Bipolar, 10);  
  
temp = emant3001.ReadAnalog(Emant.Emant300.AIN.AIN0,Emant.Emant300.AIN.AIN1);  
label1.Text = temp.ToString("0.000000 Volt");  
analogMeter1.Value = (temp - zero) /-1.25 * 1000000;  
label2.Text = analogMeter1.Value.ToString("0 ustrain");
```

Optional Accessories

1) Gaged Bracket

Together with the strain application adaptor and EMANT300 it forms a strain training kit. A 120 ohm strain gage is mounted on the bracket.

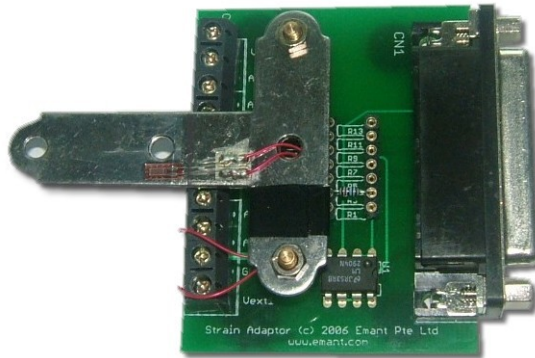
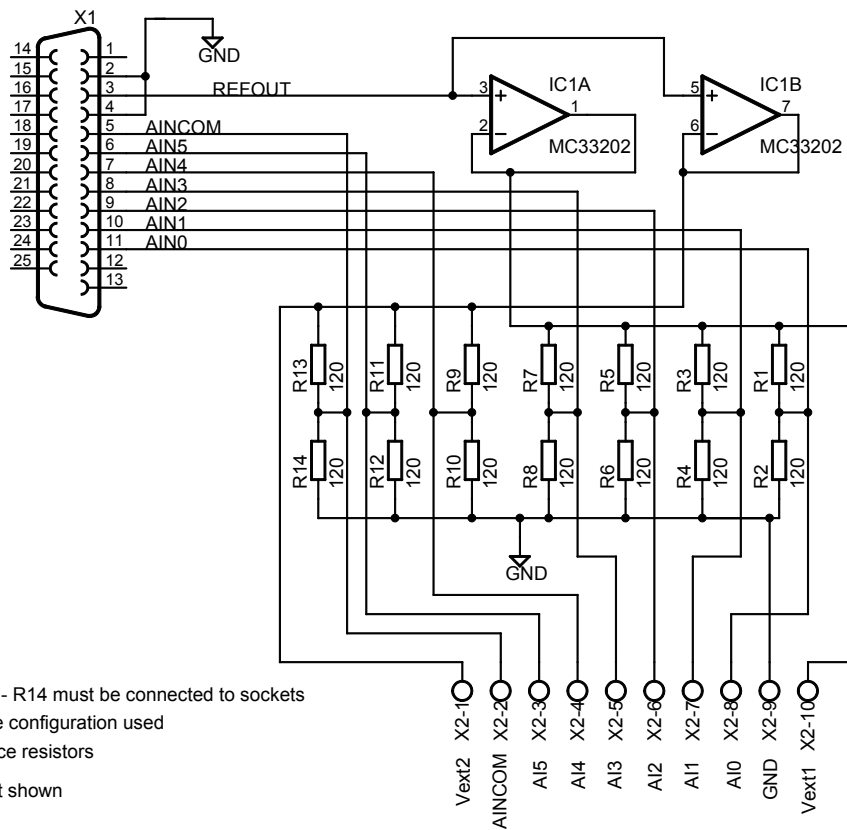


Fig 4: Optional gaged bracket with strain application adaptor

2) Strain Gage

Manufacturer **Kyowa**
Type **KFG-2-120-C1-11**
Temperature compensated for **Steel**
Gage length **2mm**
Gage resistance (24°C, 50%RH) **119.8 +/- 0.2 ohms**
Gage Factor (24°C, 50%RH) **2.11 +/- 1.0%**





Note: Completion resistors R1 - R14 must be connected to sockets according to strain bridge configuration used
 Use 1% or better tolerance resistors
 VDD and GND of IC1 not shown

TITLE: strain schematic	
Document Number:	REV:
Date: 14/02/2008 06:42:19p	Sheet: 1/1

PRESSURE APPLICATION ADAPTOR FOR EMANT300

The Pressure Application Adaptor is used for the teaching or demonstrating of PC Based Data Acquisition. Used with the **EMANT300** Low Cost USB Data Acquisition Module, they form a very low cost PC based Manometer. It is ideal for use in hands-on teaching laboratories and projects involving pressure measurements.

FEATURES

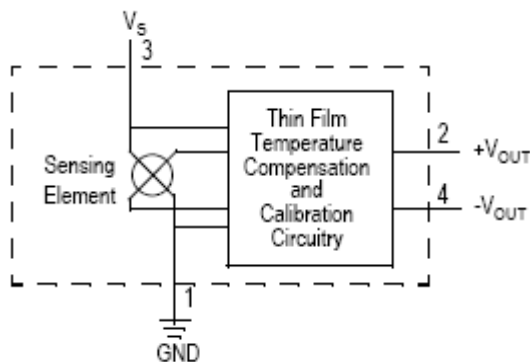
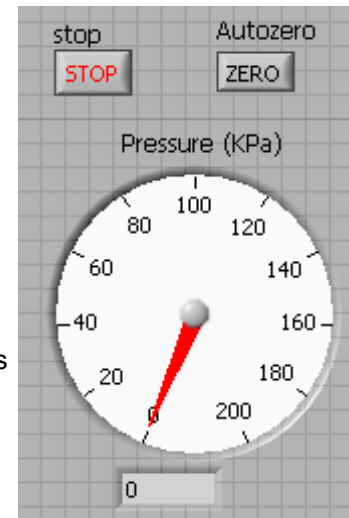
- 200 kPa Freescale MPX2202
- Temperature Compensated Over 0°C to +85°C
- ±0.25% Linearity
- Available in Absolute or Differential Configurations



Examples of project and demonstrations that can be built around this board

- medical diagnostics
 - blood pressure measurement
 - spirometer
- barometer
- altimeter
- pump/motor controllers
- robotics
- level indicators

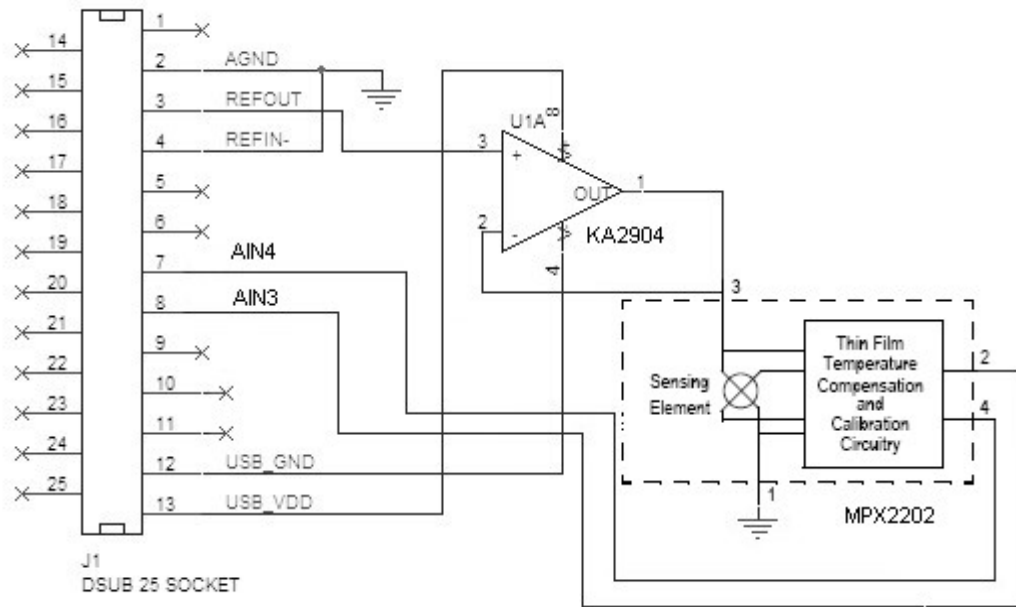
The MPX2202 series device is a silicon piezoresistive pressure sensor that provides a highly accurate and linear voltage output - directly proportional to the applied pressure. The sensor is a single monolithic silicon diaphragm with the strain gage and a thin-film resistor network integrated on-chip. The chip is laser trimmed for precise span and offset calibration and temperature compensation.



The differential voltage output of the sensor is directly proportional to the differential pressure applied. The absolute sensor has a built-in reference vacuum. The output voltage will decrease as vacuum, relative to ambient, is drawn on the pressure (P1) side. The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure (P1) side relative to the vacuum (P2) side.

With a 10V excitation, it measures from 0 TO 200 kPa (0 TO 29 psi) giving a 40 mV full scale span. The output is ratiometric when excited by voltages lower than 10V.

In our adaptor design, the sensor is excited at $V_{EXC}=2.5V$. As the current required at the bridge is much higher than what is available from REFOUT, a simple buffer amplifier is required.



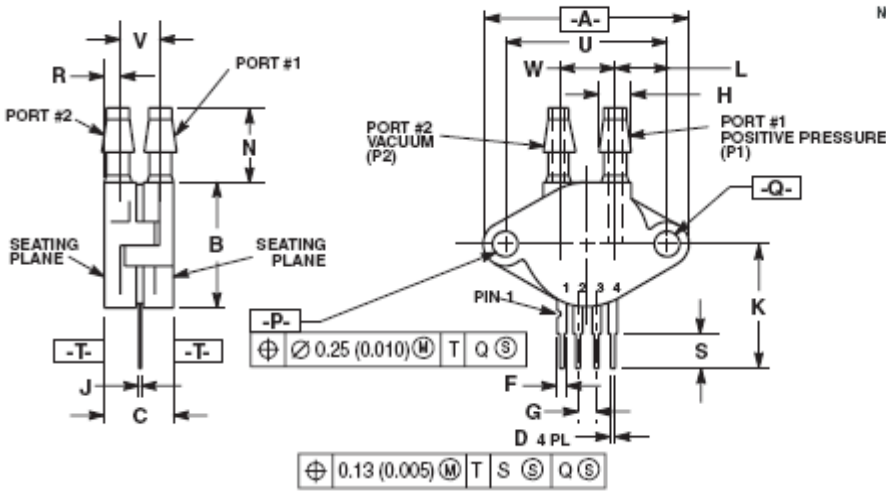
Since the excitation voltage is 2.5V, the full span output is scaled to 10mV. When the input of the EMANT300 is set to this range, the module can measure better than 1uV due to its programmable gain amplifier and the resolution of the ADC.

Thus the pressure in kPa with respect to the voltage output V_o (seen at the differential input AIN4, AIN3) is given by

$$\rho = V_o * 20000$$

Note: Absolute Maximum Pressure (P1 > P2) **800 kPa**. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

Sensor Dimensions (Differential)

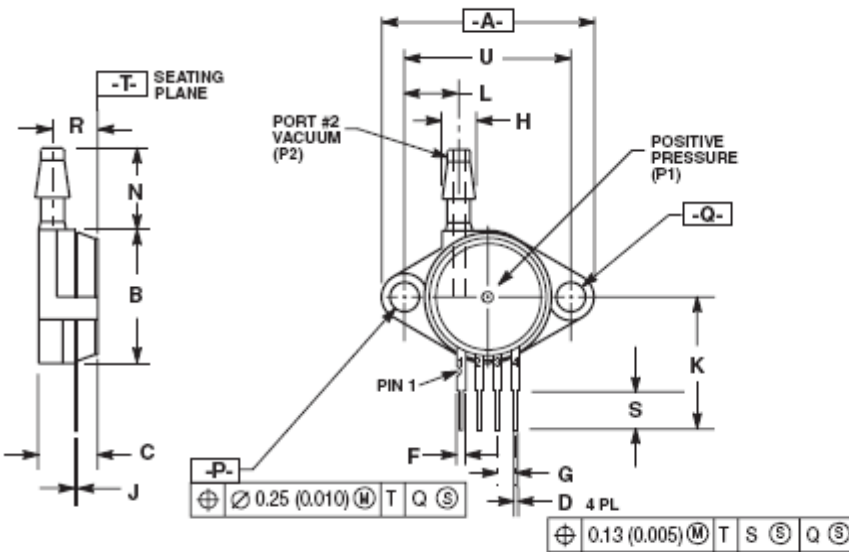


- NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.145	1.175	29.08	29.85
B	0.685	0.715	17.40	18.18
C	0.405	0.435	10.29	11.05
D	0.016	0.020	0.41	0.51
F	0.048	0.064	1.22	1.63
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.182	0.194	4.62	4.93
J	0.014	0.016	0.36	0.41
K	0.695	0.725	17.65	18.42
L	0.290	0.300	7.37	7.62
N	0.420	0.440	10.67	11.18
P	0.153	0.159	3.89	4.04
Q	0.153	0.159	3.89	4.04
R	0.063	0.083	1.60	2.11
S	0.220	0.240	5.59	6.10
U	0.910 BSC		23.11 BSC	
V	0.248	0.278	6.30	7.06
W	0.310	0.330	7.87	8.38

- STYLE 1:
 PIN 1. GROUND
 2. + OUTPUT
 3. + SUPPLY
 4. - OUTPUT

Sensor Dimensions (Absolute)



- NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.145	1.175	29.08	29.85
B	0.685	0.715	17.40	18.16
C	0.305	0.325	7.75	8.26
D	0.016	0.020	0.41	0.51
F	0.048	0.064	1.22	1.63
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.182	0.194	4.62	4.93
J	0.014	0.016	0.36	0.41
K	0.695	0.725	17.65	18.42
L	0.290	0.300	7.37	7.62
N	0.420	0.440	10.67	11.18
P	0.153	0.159	3.89	4.04
Q	0.153	0.159	3.89	4.04
R	0.230	0.250	5.84	6.35
S	0.220	0.240	5.59	6.10
U	0.910 BSC		23.11 BSC	

- STYLE 1:
 PIN 1. GROUND
 2. + OUTPUT
 3. + SUPPLY
 4. - OUTPUT

200 kPa On-Chip Temperature Compensated & Calibrated Pressure Sensors

The MPX2202/MPXV2202G device series is a silicon piezoresistive pressure sensor providing a highly accurate and linear voltage output — directly proportional to the applied pressure. The sensor is a single monolithic silicon diaphragm with the strain gauge and a thin-film resistor network integrated on-chip. The chip is laser trimmed for precise span and offset calibration and temperature compensation. They are designed for use in applications such as pump/motor controllers, robotics, level indicators, medical diagnostics, pressure switching, barometers, altimeters, etc.

Features

- Temperature Compensated Over 0°C to +85°C
- Easy-to-Use Chip Carrier Package Options
- Available in Absolute, Differential and Gauge Configurations

Application Examples

- Pump/Motor Controllers
- Robotics
- Level Indicators
- Medical Diagnostics
- Pressure Switching
- Barometers
- Altimeters

Figure 1 illustrates a block diagram of the internal circuitry on the stand-alone pressure sensor chip.

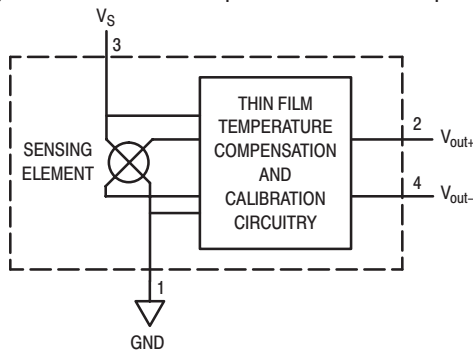


Figure 1. Temperature Compensated Pressure Sensor Schematic

VOLTAGE OUTPUT versus APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE

The differential voltage output of the sensor is directly proportional to the differential pressure applied.

The absolute sensor has a built-in reference vacuum. The output voltage will decrease as vacuum, relative to ambient, is drawn on the pressure (P1) side.

The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure (P1) side relative to the vacuum (P2) side. Similarly, output voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum (P2) side relative to the pressure (P1) side.

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

Replaces MPX2200/D

REV 2

**MPX2202
MPXV2202G
SERIES**

Motorola Preferred Device

**0 to 200 kPa (0 to 29 psi)
40 mV FULL SCALE SPAN
(TYPICAL)**

**SMALL OUTLINE PACKAGE
SURFACE MOUNT**

**MPXV2202GP
CASE 1369**

**MPXV2202DP
CASE 1351**

PIN NUMBER			
1	Gnd	5	N/C
2	+V _{out}	6	N/C
3	V _S	7	N/C
4	-V _{out}	8	N/C

NOTE: Pin 1 is noted by the notch in the lead.

UNIBODY PACKAGE

**MPX2202A/D
CASE 344**

**MPX2202AP/GP
CASE 344B**

**MPX2202DP
CASE 344C**

**MPX2202ASX/GSX
CASE 344F**

PIN NUMBER			
1	Gnd	3	V _S
2	+V _{out}	4	-V _{out}

NOTE: Pin 1 is noted by the notch in the lead.

**MPX2202GVP
CASE 344D**

MPX2202 MPXV2202G SERIES

MAXIMUM RATINGS(NOTE)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure (P1 > P2)	P _{max}	800	kPa
Storage Temperature	T _{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T _A	-40 to +125	°C

NOTE: Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

OPERATING CHARACTERISTICS (V_S = 10 Vdc, T_A = 25°C unless otherwise noted, P1 > P2)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾	P _{OP}	0	—	200	kPa
Supply Voltage	V _S	—	10	16	Vdc
Supply Current	I _o	—	6.0	—	mAdc
Full Scale Span ⁽³⁾	V _{FSS}	38.5	40	41.5	mV
Offset ⁽⁴⁾	V _{off}	-1.0	—	1.0	mV
Sensitivity	ΔV/ΔP	—	0.2	—	mV/kPa
Linearity ⁽⁵⁾	MPX2202D Series MPX2202A Series	-0.6 -1.0	— —	0.4 1.0	%V _{FSS}
Pressure Hysteresis ⁽⁵⁾ (0 to 200 kPa)	—	—	±0.1	—	%V _{FSS}
Temperature Hysteresis ⁽⁵⁾ (-40°C to +125°C)	—	—	±0.5	—	%V _{FSS}
Temperature Effect on Full Scale Span ⁽⁵⁾	TCV _{FSS}	-2.0	—	2.0	%V _{FSS}
Temperature Effect on Offset ⁽⁵⁾	TCV _{off}	-1.0	—	1.0	mV
Input Impedance	Z _{in}	1000	—	2500	Ω
Output Impedance	Z _{out}	1400	—	3000	Ω
Response Time ⁽⁶⁾ (10% to 90%)	t _R	—	1.0	—	ms
Warm-Up	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁷⁾	—	—	±0.5	—	%V _{FSS}

NOTES:

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device above the specified excitation range may induce additional error due to device self-heating.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure, using end point method, over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
 - TcSpan: Output deviation at full rated pressure over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
 - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

LINEARITY

Linearity refers to how well a transducer's output follows the equation: $V_{out} = V_{off} + \text{sensitivity} \times P$ over the operating pressure range. There are two basic methods for calculating nonlinearity: (1) end point straight line fit (see Figure 2) or (2) a least squares best line fit. While a least squares fit gives the "best case" linearity error (lower numerical value), the calculations required are burdensome.

Conversely, an end point fit will give the "worst case" error (often more desirable in error budget calculations) and the calculations are more straightforward for the user. Motorola's specified pressure sensor linearities are based on the end point straight line method measured at the midrange pressure.

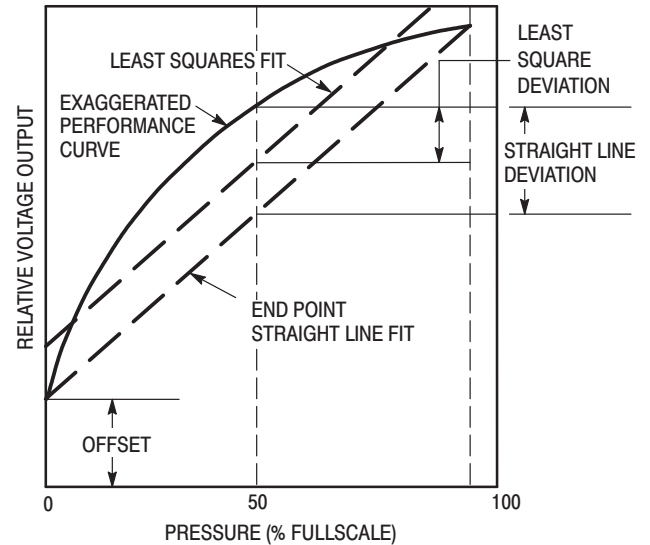


Figure 2. Linearity Specification Comparison

ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION and CALIBRATION

Figure 3 shows the output characteristics of the MPX2202/MPXV2202G series at 25°C. The output is directly proportional to the differential pressure and is essentially a

straight line.

The effects of temperature on Full Scale Span and Offset are very small and are shown under Operating Characteristics.

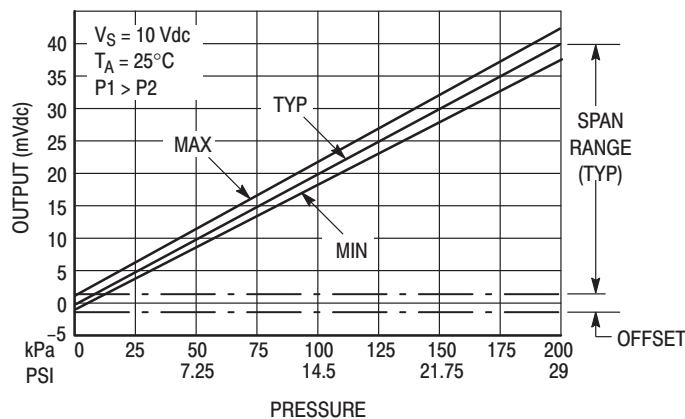


Figure 3. Output versus Pressure Differential

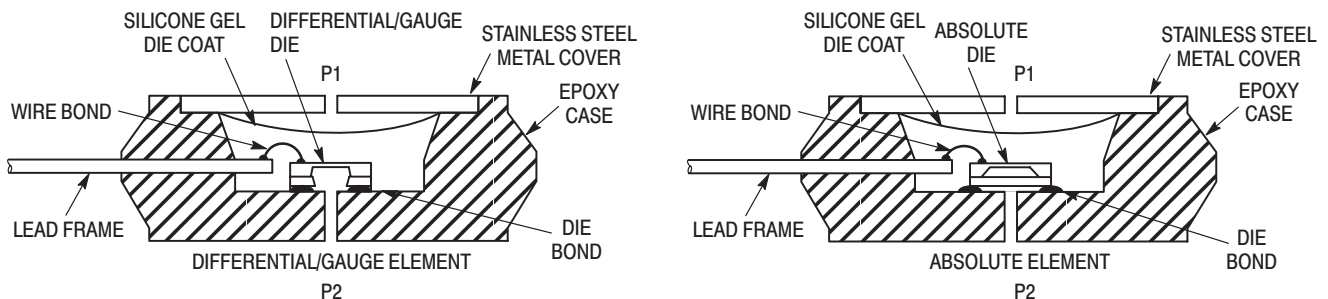


Figure 4. Cross-Sectional Diagrams (Not to Scale)

Figure 4 illustrates an absolute sensing die (right) and the differential or gauge die in the basic chip carrier (Case 344). A silicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the silicon diaphragm.

The MPX2202/MPXV2202G series pressure sensor oper-

ating characteristics and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media other than dry air may have adverse effects on sensor performance and long term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

MPX2202 MPXV2202G SERIES

PRESSURE (P1)/VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE

Motorola designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing the silicone gel which isolates the die from the environment. The differential or gauge sensor is designed to operate with positive differen-

tial pressure applied, $P1 > P2$. The absolute sensor is designed for vacuum applied to P1 side.

The Pressure (P1) side may be identified by using the table below:

Part Number		Case Type	Pressure (P1) Side Identifier
MPX2202A	MPX2202D	344	Stainless Steel Cap
MPX2202DP		344C	Side with Part Marking
MPX2202AP	MPX2202GP	344B	Side with Port Attached
MPX2202GVP		344D	Stainless Steel Cap
MPX2202ASX	MPX2202GSX	344F	Side with Port Attached
MPXV2202GP		1369	Side with Port Attached
MPXV2202DP		1351	Side with Part Marking

ORDERING INFORMATION — UNIBODY PACKAGE (MPX2202 SERIES)

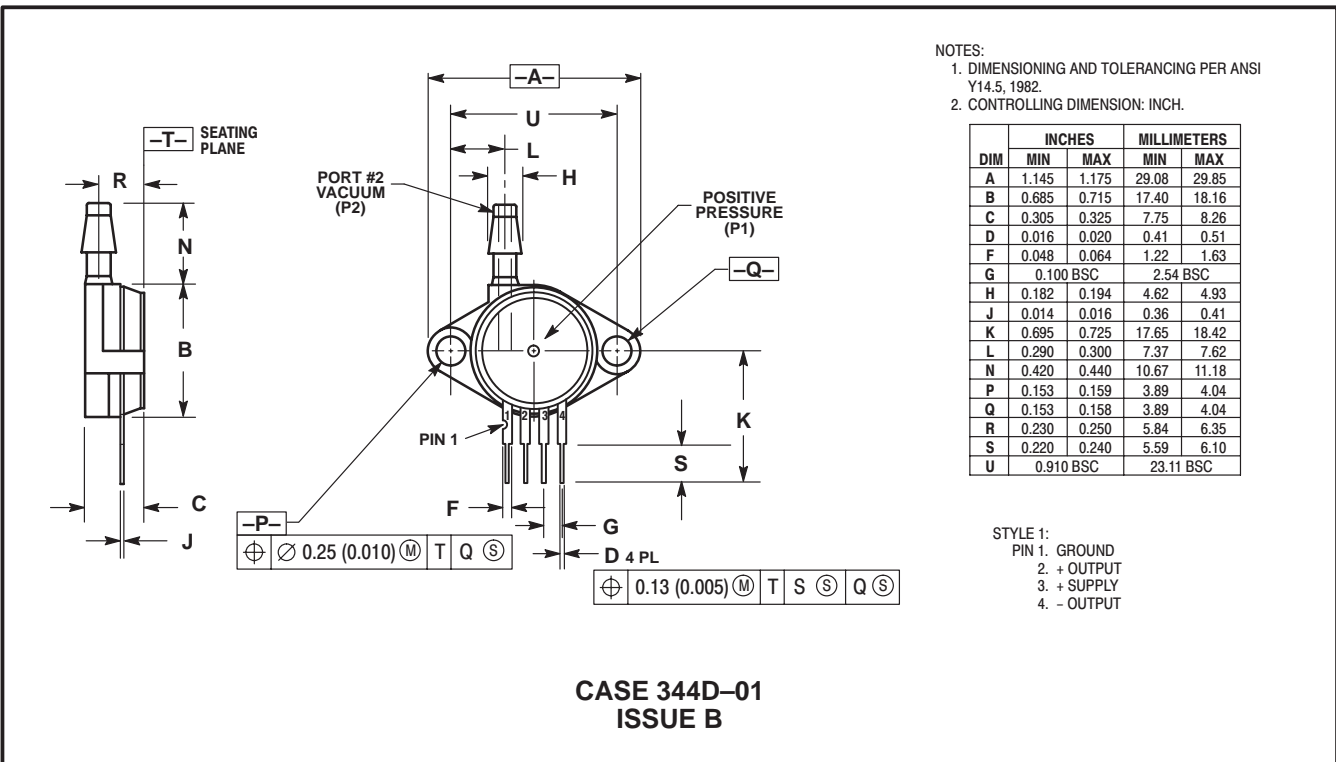
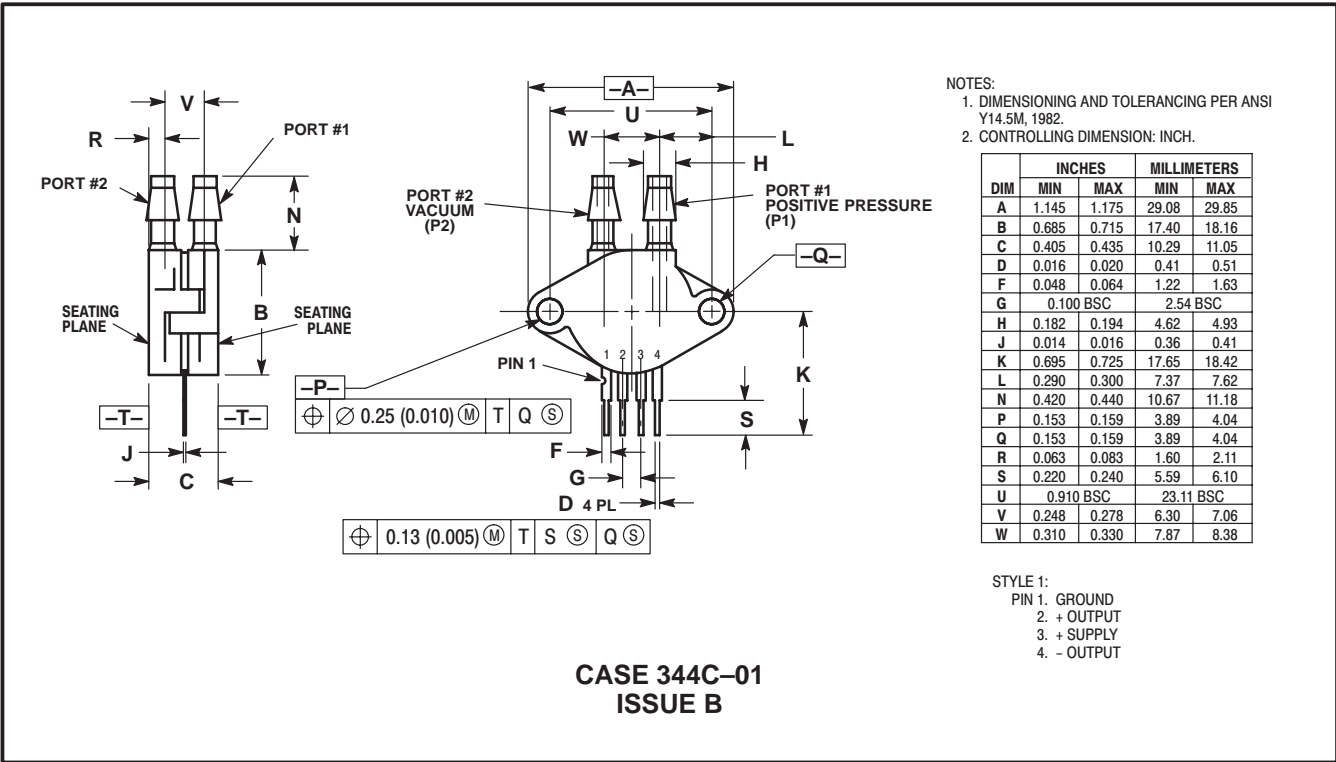
Device Type	Options	Case Type	MPX Series	
			Order Number	Device Marking
Basic Element	Absolute, Differential	344	MPX2202A MPX2202D	MPX2202A MPX2202D
Ported Elements	Differential, Dual Port	344C	MPX2202DP	MPX2202DP
	Absolute, Gauge	344B	MPX2202AP MPX2202GP	MPX2202AP MPX2202GP
	Absolute, Gauge Axial	344F	MPX2202ASX MPX2202GSX	MPX2202A MPX2202D
	Gauge, Vacuum	344D	MPX2202GVP	MPX2202GVP

ORDERING INFORMATION — SMALL OUTLINE PACKAGE (MPXV2202G SERIES)

Device Type	Options	Case No.	MPX Series Order No.	Packing Options	Marking
Ported Elements	Gauge, Side Port, SMT	1369	MPXV2202GP	Trays	MPXV2202G
	Differential, Dual Port, SMT	1351	MPXV2202DP	Trays	MPXV2202G

MPX2202 MPXV2202G SERIES

UNIBODY PACKAGE DIMENSIONS — CONTINUED



MPX2202 MPXV2202G SERIES

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and the Stylized M Logo are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

MOTOROLA and the Stylized M Logo are registered in the US Patent & Trademark Office. All other product or service names are the property of their respective owners.

© Motorola, Inc. 2002.

How to reach us:

USA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution; P.O. Box 5405, Denver, Colorado 80217. 1-303-675-2140 or 1-800-441-2447

JAPAN: Motorola Japan Ltd.; SPS, Technical Information Center, 3-20-1, Minami-Azabu, Minato-ku, Tokyo 106-8573 Japan. 81-3-3440-3569

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; Silicon Harbour Centre, 2 Dai King Street, Tai Po Industrial Estate, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26668334

Technical Information Center: 1-800-521-6274

HOME PAGE: <http://www.motorola.com/semiconductors/>



MOTOROLA



MPX2202/D



Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5010 series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 5.0% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Durable Epoxy Unibody Element
- Temperature Compensated over -40° to +125°C

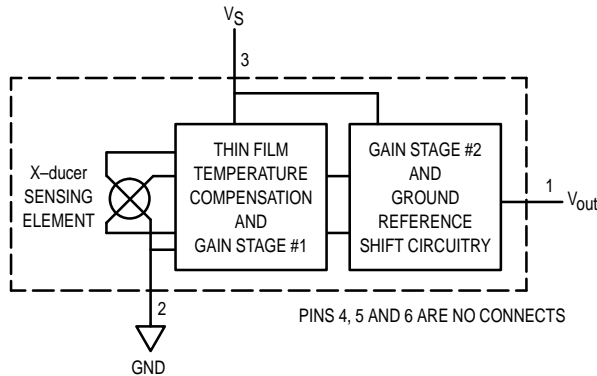


Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic

MAXIMUM RATINGS(1)

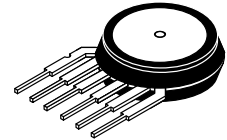
Parametrics	Symbol	Value	Unit
Overpressure(2) (P1 > P2)	P _{max}	75	kPa
Burst Pressure(2) (P1 > P2)	P _{burst}	100	kPa
Storage Temperature	T _{stg}	-40 to +125	°C
Operating Temperature	T _A	-40 to +125	°C

1. T_C = 25°C unless otherwise noted.

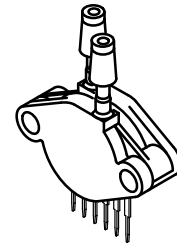
2. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

MPX5010 SERIES

INTEGRATED
PRESSURE SENSOR
0 to 10 kPa (0 to 1.45 psi)
0.2 to 4.7 V OUTPUT



BASIC CHIP
CARRIER ELEMENT
CASE 867-08, STYLE 1



DIFFERENTIAL
PORT OPTION
CASE 867C-05, STYLE 1

PIN NUMBER

1	V _{out}	4	N/C
2	Gnd	5	N/C
3	V _S	6	N/C

NOTE: Pins 4, 5, and 6 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the Lead.

Senseon and X-ducer are trademarks of Motorola, Inc.



MPX5010 SERIES

OPERATING CHARACTERISTICS ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P_1 > P_2$)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾	P_{OP}	0	—	10	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	I_o	—	7.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽³⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{off}	0	0.2	0.425	Vdc
Full Scale Output ⁽⁴⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSO}	4.475	4.7	4.925	Vdc
Full Scale Span ⁽⁵⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts	V_{FSS}	—	4.5	—	Vdc
Accuracy ⁽⁶⁾	—	—	—	± 5.0	% V_{FSS}
Sensitivity	V/P	—	450	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾	t_R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I_{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁹⁾	—	—	± 0.5	—	% V_{FSS}

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Weight, Basic Element (Case 867)	—	—	4.0	—	Grams
Common Mode Line Pressure ⁽¹⁰⁾	—	—	—	690	kPa

NOTES:

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range.
- Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C .
 - TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C , relative to 25°C .
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C .
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Warm-up is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the Pressure has been stabilized.
- Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.
- Common mode pressures beyond what is specified may result in leakage at the case-to-lead interface.

ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION, CALIBRATION AND SIGNAL CONDITIONING

Figure 2 illustrates the Differential/Gauge Sensing Chip in the basic chip carrier (Case 867). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm.

The MPX5010 series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor performance and long-term reliability. Contact the factory for information

regarding media compatibility in your application.

Figure 3 shows a typical decoupling circuit for interfacing the integrated sensor to the A/D input of a microprocessor. Proper decoupling of the power supply is recommended.

Figure 4 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0° to 85°C using the decoupling circuit below. (The output will saturate outside of the specified pressure range.)

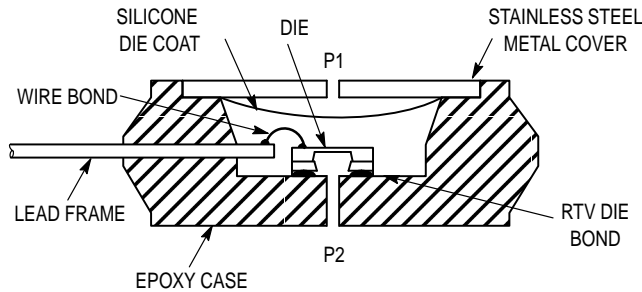


Figure 2. Cross-Sectional Diagram (Not to Scale)

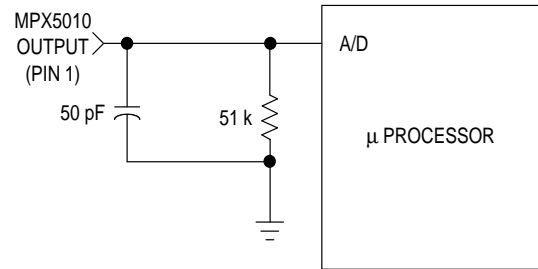


Figure 3. Typical Decoupling Filter for Sensor to Microprocessor Interface

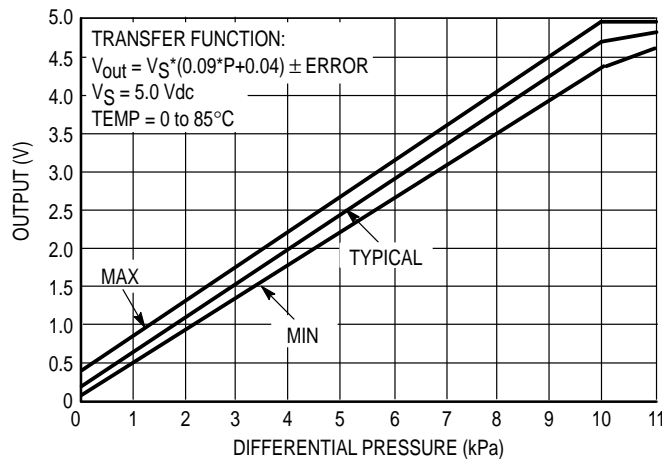


Figure 4. Output versus Pressure Differential

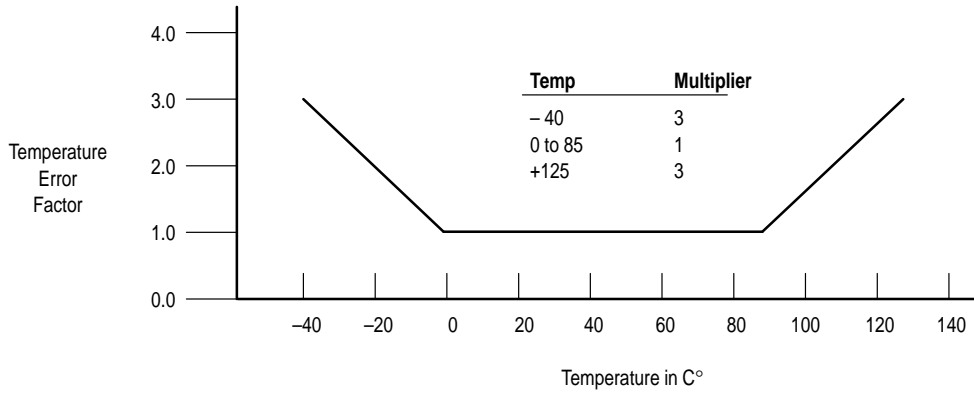
MPX5010 SERIES

Transfer Function (MPX5010D)

Nominal Transfer Value: $V_{out} = V_S \times (0.09 \times P + 0.04)$
 $\pm (\text{Pressure Error} \times \text{Temp. Factor} \times 0.09 \times V_S)$
 $V_S = 5.0 \text{ V} \pm 0.25 \text{ Vdc}$

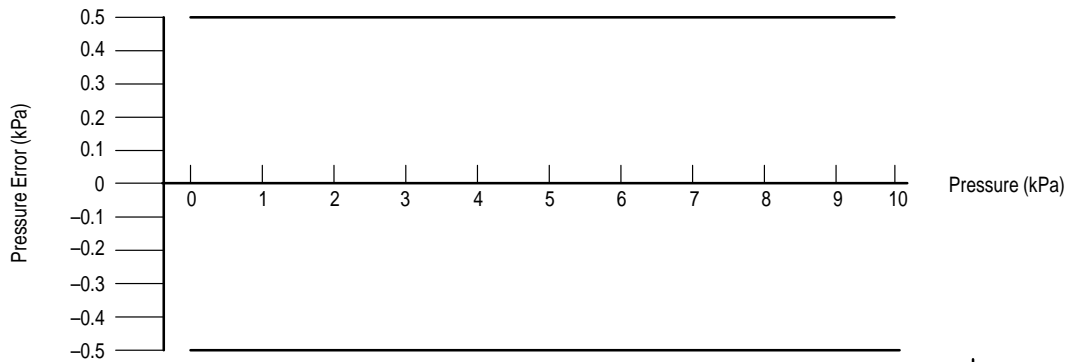
Temperature Error Band

MPX5010D Series



NOTE: The Temperature Multiplier is a linear response from 0° to -40°C and from 85° to 125°C.

Pressure Error Band



Pressure	Error (Max)
0 to 10 kPa	± 0.5 kPa

PRESSURE (P1)/VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE

Motorola designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing fluoro silicone gel which protects the die from harsh media. The Motorola MPX

pressure sensor is designed to operate with positive differential pressure applied, $P1 > P2$.

The Pressure (P1) side may be identified by using the table below:

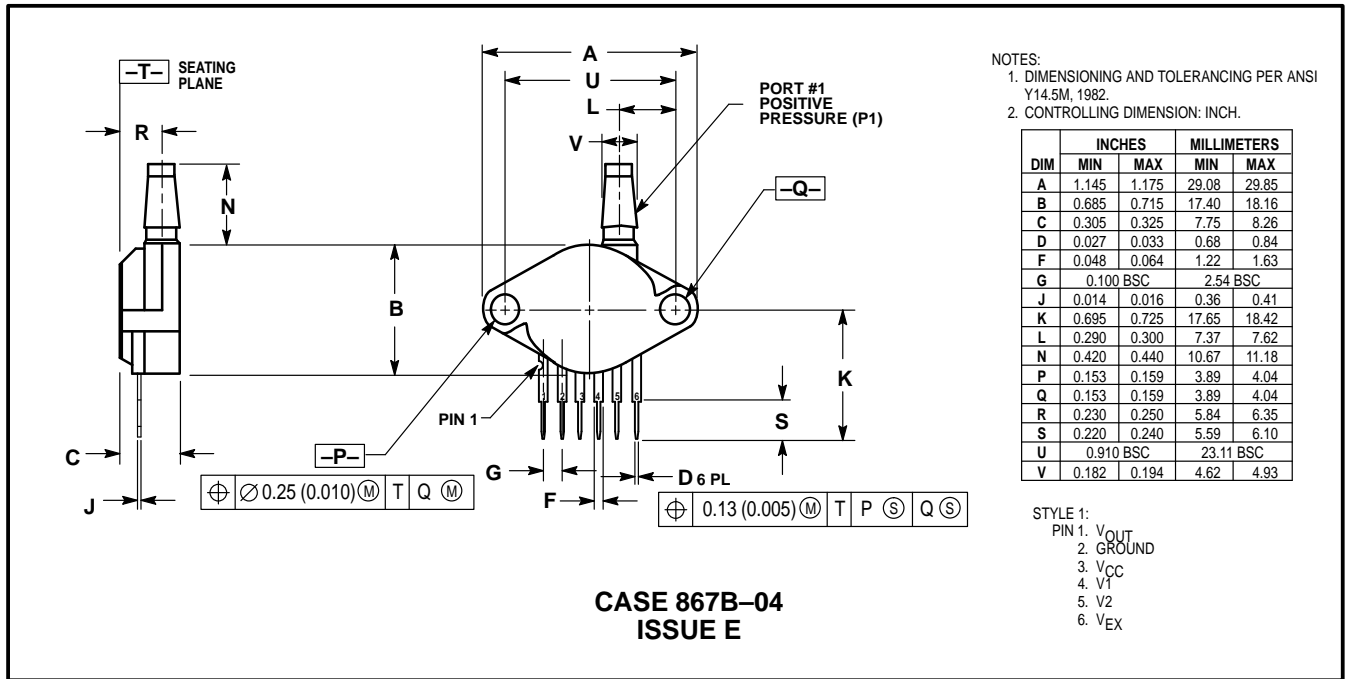
Part Number	Case Type	Pressure (P1) Side Identifier
MPX5010D	867-08	Stainless Steel Cap
MPX5010DP	867C-05	Side with Part Marking
MPX5010GP	867B-04	Side with Port Attached
MPX5010GVP	867D-04	Stainless Steel Cap
MPX5010GS	867E-03	Side with Port Attached
MPX5010GVS	867A-04	Stainless Steel Cap
MPX5010GSX	867F-03	Side with Port Attached
MPX5010GVSX	867G-03	Stainless Steel Cap

ORDERING INFORMATION

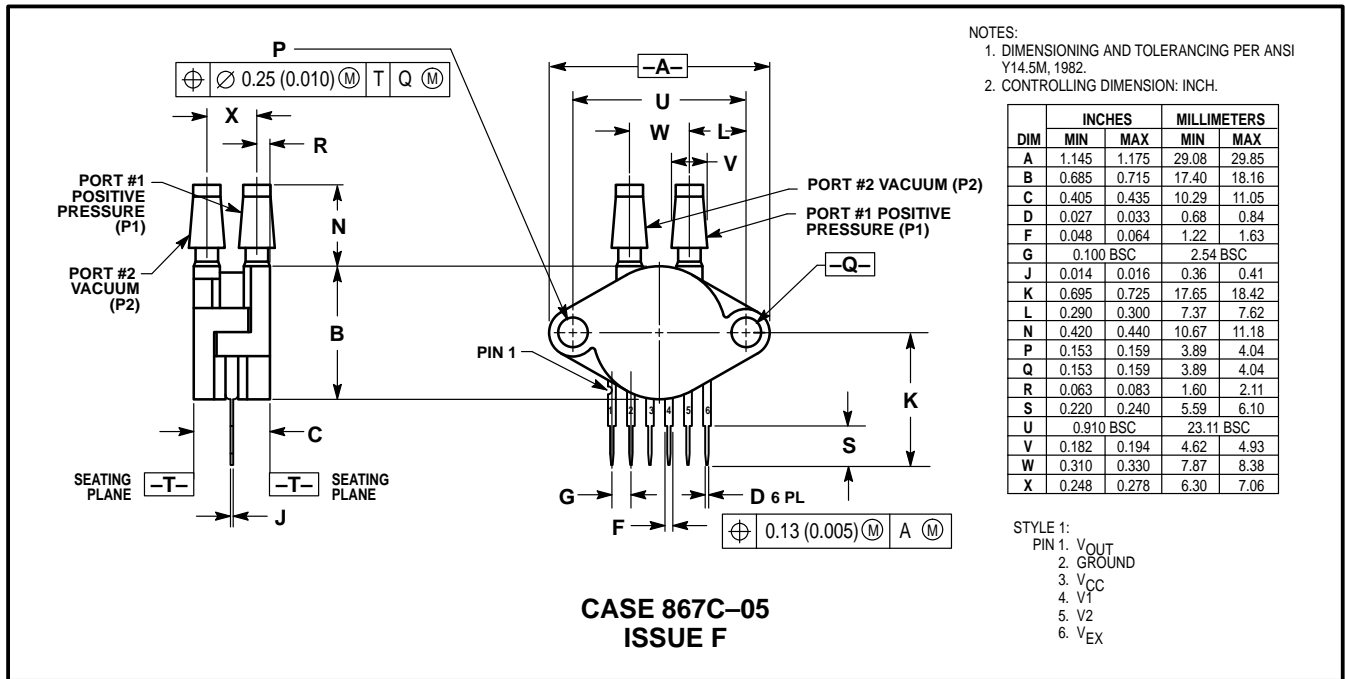
The MPX5010 pressure sensor is available in differential and gauge configurations. Devices are available in the basic element package or with pressure port fittings that provide printed circuit board mounting ease and barbed hose pressure connections.

Device Type	Options	Case Type	MPX Series	
			Order Number	Device Marking
Basic Element	Differential	867-08	MPX5010D	MPX5010D
Ported Elements	Differential Dual Ports	867C-05	MPX5010DP	MPX5010DP
	Gauge	867B-04	MPX5010GP	MPX5010GP
	Gauge Vacuum Port	867D-04	MPX5010GVP	MPX5010GVP
	Gauge, Axial	867E-03	MPX5010GS	MPX5010D
	Gauge Vacuum Axial	867A-04	MPX5010GVS	MPX5010D
	Gauge, Axial PC Mount	867F-03	MPX5010GSX	MPX5010D
	Gauge Vacuum Axial PC Mount	867G-03	MPX5010GVSX	MPX5010D

PACKAGE DIMENSIONS—CONTINUED



PRESSURE SIDE PORTED (GP)



PRESSURE AND VACUUM SIDES PORTED (DP)

Determinación del contenido de carbonato de calcio.

Procedimiento sobre muestras de suelo del pampeano.

Quaglia G, Quintela M. D.

Laboratorio de Mecánica de Suelos – Facultad de Ingeniería – UBA

Este procedimiento es una simplificación del propuesto por la ASTM (ASTM D4373-02), adaptado a los instrumentos de medición de los que se disponía en el Laboratorio de Química del LAME (Laboratorio de Materiales y Estructuras, FIUBA).

1 INTRODUCCIÓN

El procedimiento utilizado para la determinación del contenido de carbonato de calcio en una masa de suelo conocida, se basa en un método gasométrico el cual consiste en la determinación del volumen de CO_2 que se desprende al agregar una cantidad conocida de ácido clorhídrico.

La reacción química queda representada por la siguiente ecuación.



Dado que el número de moles de carbonato de calcio [$n\text{CaCO}_{3(s)}$] que reacciona es igual al número de moles de dióxido de carbono [$n\text{CO}_{2(g)}$] que se desprende, la determinación de CaCO_3 es inmediata. Simplemente midiendo el volumen de gas que se genera y aplicando la ecuación de gases ideales:

$$P \cdot V_{\text{CO}_2} = n\text{CO}_2 \cdot R \cdot T \quad (R=0.082 \text{ atm}\cdot\text{l}/\text{k}\cdot\text{mol}) \quad (2)$$

Siendo, [V_{CO_2}]: el volumen medido en el ensayo; [P]: la presión; y [T]: la temperatura estas dos medidas en el momento y lugar donde se realiza el ensayo. Se obtiene:

$$n\text{CO}_{2(g)} = n\text{CaCO}_{3(s)} \quad (3)$$

Conocido el número de moles y la masa molar [Mr] del carbonato de calcio (aprox. 100 g/mol), se calcula el porcentaje de carbonato de calcio:

$$m\text{CaCO}_{3(s)} = n\text{CaCO}_{3(s)} \cdot Mr \quad (2)$$

$$\% \text{CaCO}_3 = m\text{CaCO}_3 / m_{\text{total}} \quad (3)$$

Se asume que la porción de muestra ensayada es representativa del suelo que queremos caracterizar.

2 ENSAYO

2.1 Dispositivo de ensayo

El dispositivo de ensayo está compuesto de:

- 1 Un erlenmeyer, para colocar la muestra de suelo a ensayar y realizar la reacción.
- 2 Un recipiente superior, graduado, para agregar el ácido, el cual está provisto de una válvula que permita dosificar la cantidad de ácido a incorporar.
- 3 Dos buretas graduadas, una colocada dentro de la otra en forma invertida y queroseno en el interior de ambas.

El erlenmeyer está conectado mediante una manguera a la bureta invertida, de modo que el gas que se genere allí se dirija a la bureta haciendo bajar el nivel de queroseno en la misma.

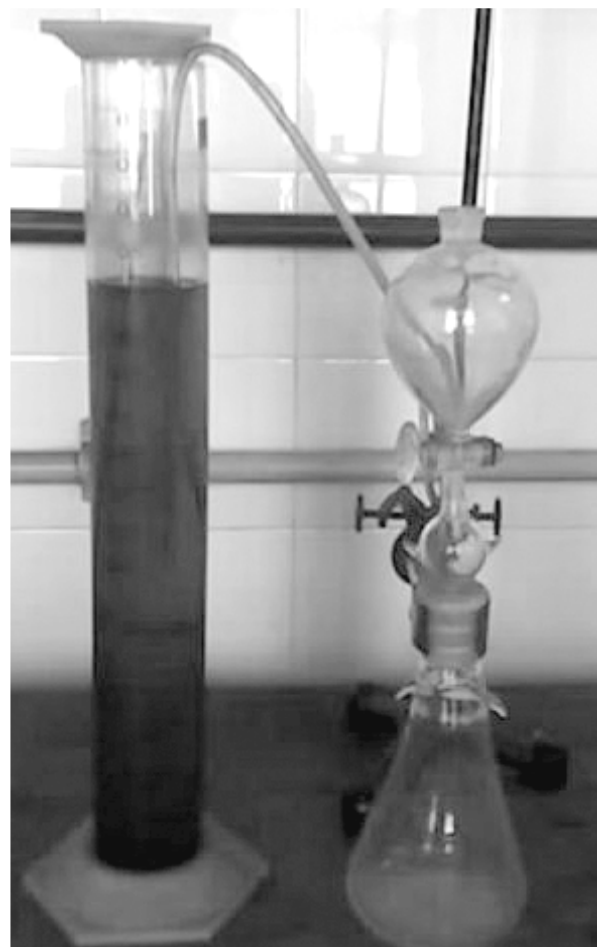


Figura 1: Dispositivo de ensayo.

2.2 Procedimiento de ensayo

- 1 Pesar 10-15g de una muestra de suelo molido seco a horno. Colocar en el matraz de un erlenmeyer con agua destilada y luego agitarlo levemente para homogeneizar la mezcla. La combinación con agua destilada permitirá acelerar la velocidad de reacción
- 2 Cerrar el recipiente y verificar que la válvula superior también lo esté. Se recomienda aplicar grasa siliconada en la boca del matraz para asegurar un sellado hermético al colocar el recipiente superior.
- 3 Agregar 10-20ml de ácido clorhídrico al recipiente superior (Solución 1 molar).
- 4 Medir el nivel inicial del queroseno levantando la bureta invertida hasta hacer coincidir el nivel interno con el externo.
- 5 Abrir la válvula para dejar caer el HCl(ac) que reacciona con el carbonato de calcio presente en el suelo. La válvula se debe cerrar inmediatamente después de introducir el ácido para evitar el escape del gas. La cantidad de ácido que se agrega debe ser perfectamente conocida para efectuar una posterior corrección.
- 6 Durante el tiempo en el que se produce la reacción (20-60 min.) agitar suavemente el recipiente en dos o tres oportunidades.
- 7 Cuando se deja de observar la formación de burbujas sobre la superficie de la mezcla, como consecuencia del desprendimiento de CO₂(g) se mide nuevamente el nivel del líquido igualando los niveles de las buretas. Con este valor de nivel final se puede calcular el volumen desplazado.

Después de cada ensayo es recomendable lavar el erlenmeyer con agua destilada y secarlo totalmente de manera de no introducir errores en el siguiente ensayo.

2.3 Corrección del volumen desplazado

Una pequeña parte del volumen desplazado dentro de la bureta se debe a la incorporación de HCl_(ac), y por lo tanto se lo debe calcular para luego corregir la medición efectuada en el ensayo y así obtener el verdadero volumen V para reemplazar en la ecuación (4).

Para calcular el error que se comete basta con repetir el procedimiento de ensayo descrito anteriormente pero sin colocar el suelo y de este

modo sólo medir el cambio de volumen en la bureta en función de la cantidad de ácido incorporado.

3 REFERENCIAS

ASTM D 4373-02 "Standard test method for rapid determination of carbonate content soils".(ASTM international).