

FUNDAMENTOS GEOTECNICO DEL PROYECTO

1.- INTRODUCCIÓN

En el presente informe se tratarán en forma general aspectos técnicos del encuadre geológico – geotécnico, que hacen al proyecto de las obras civiles necesarias para resolver el saneamiento integral de la cuenca Matanza - Riachuelo.

2.- ANÁLISIS GEOLÓGICOS - GEOTÉCNICOS DE RELEVANCIA

A través del delta del Río Paraná y el estuario del Río de la Plata, que conforma su salida al mar, se drena una importante y compleja red hidrográfica cuyos principales afluentes son los ríos Paraná, Uruguay y Paraguay (Figura 1).

Estos ríos encierran un área de bañados cuya extensión es la más importante del mundo en su género, donde la flora y fauna son únicas en diversidad y variedad. Se trata de un complejo sistema hídrico que acarrea una gran cantidad y variedad de sedimentos cuya dinámica de transporte y deposición modifican continuamente la morfología del delta y del estuario.

Los depósitos sedimentarios recubren el cauce del río correspondiente a una depresión labrada en formaciones más antiguas y que afloran en las márgenes, donde se apoyan en la actualidad los edificios y las estructuras de las ciudades costeras.

El avance del frente sedimentario que conforma el delta del río es muy acelerado, verificándose un progreso de aproximadamente 70-100 m/año.

Dado que los sedimentos son muy jóvenes y se generan en un ambiente ácuo, su comportamiento corresponde a suelos normalmente consolidados, de muy baja capacidad portante. La expansión de las importantes ciudades y centros industriales circundantes y su avance sobre estas formaciones recientes, hace que el conocimiento de su comportamiento geotécnico adquiera significativa relevancia.

En el presente informe trataremos de describir la distribución de las distintas formaciones litológicas que componen el cauce y los sedimentos deltaicos de este sector del Río de la Plata, revisar su geología a nivel regional y describir los parámetros geotécnicos fundamentales que gobiernan su comportamiento mecánico.

Para cumplimentar este objetivo, detallaremos con perfiles lo más claramente posible el origen geológico y la secuencia cronológica de las distintas formaciones.

La distribución regional de las mismas se muestra en perfiles estratigráficos desarrollados

específicamente por antecedentes de estudios anteriores que forman parte de nuestra base de datos, recopilados a través de más de 35 años de trabajos basados en perforaciones geotécnicas con ensayos de campo y de laboratorio, realizadas para grandes obras proyectadas en el área de estudio.

2.- ASPECTOS HIDROGRÁFICOS DE LA CUENCA DEL PLATA

El delta del Río Paraná se forma en las proximidades de la confluencia de los ríos Paraná y Uruguay y ocupa una extensa depresión de aproximadamente 15000 km², en las llanuras de las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos, siendo su desarrollo de entre 20 y 100 km de ancho, con una longitud de unos 300 km, desde la localidad de Diamante hasta el inicio del Río de la Plata. Su desembocadura al mar, forma un estuario por donde drena aproximadamente la cuarta parte del territorio de América del Sur (2.966.000 km²), a través de una compleja red hidrográfica que comprende los territorios de Uruguay, Paraguay, Noreste de Argentina, Sureste de Brasil y Sureste de Bolivia (Figura 1). Las precipitaciones anuales promedio en la cuenca del Paraná rondan los 1.200 mm, distribuidos entre octubre y marzo. El caudal medio de los ríos Paraná y Uruguay es de 20.000 m³/s, con máximos en febrero y mínimos en agosto. Solo el Río Paraná posee un caudal de entre 18.000 m³/s y 50.000 m³/s en períodos de normalidad y de crecida extraordinaria, respectivamente.

El río de La Plata transporta sedimentos en suspensión en una concentración aproximada de 300 mg/l, lo cual se traduce en un acarreo total de materiales de aproximadamente 160 millones de toneladas anuales. El pasaje del delta al estuario funciona como un factor de precipitación de sedimentos debido a la pérdida de velocidad del agua y a cambios en su salinidad.

Estos sedimentos están compuestos aproximadamente por un 28% de arcillas, 56% de limos y 16% de arenas, siendo la fuente principal de provisión de sedimentos, la cuenca alta del río Bermejo. La Imagen 1 muestra una resolución satelital de la cuenca del Río de la Plata en la que se observan nítidamente los cambios de tonalidades relacionados con el acarreo, descarga y precipitación de los sedimentos.



Figura 1:



Imagen 1

3.- ASPECTOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

Los deltas pueden considerarse ambientes de transición, entre los continentales y los marinos. Sus depósitos están influidos fundamentalmente por el ambiente de deposición, y la naturaleza y el origen de los sedimentos, el régimen de hundimiento de la cuenca que los aloja, las condiciones climáticas y geológicas en la cuenca tributaria y la geometría y tamaño de los canales de escurrimientos principales y subsidiarios.

En general, la estratigrafía de los sedimentos presenta secuencias sub-paralelas. La primera capa depositada en la etapa primigenia del río y no erosionada es la capa basal, a la que le suceden las capas frontales, depósitos más gruesos, inclinados, producto de la sedimentación súbita en las crecientes, cuando el curso de agua pierde velocidad.

Cronológicamente, la secuencia corresponde a eventos pre-holocénicos (el labrado del paleocauce del Río de la Plata) y holocenos (los rellenos modernos que conforman el delta del Paraná y el lecho del Río de la Plata), respectivamente.

El paleocauce fue labrado sobre terrenos de edades precámbricas a pleistocenas, abarcando desde el basamento ígneo-metamórfico, aflorante en la isla Martín García y algunos sectores de la costa del Uruguay, y comprometiendo los estratos de las arcillas verdes de la formación Paraná (Mioceno), las arenas de la formación Puelche (Pleistoceno inferior) y a las “toscas” del Río de La Plata (Plio- Pleistoceno - Pleistoceno).

Los rellenos de este antiguo lecho son conocidos como Postpampeano y tienen naturaleza continental o marina, según las oscilaciones del nivel del mar que se verifican como consecuencia de los cambios climáticos. Comienzan con las arcillas marinas pertenecientes a la formación Atalaya (Holoceno inferior) las cuales son coronadas por arenas y fangos aluvionales de la formación Playa Honda (Holoceno superior).

Los materiales de superficie forman islas que están definidas por brazos fluviales entrelazados y que se encuentran actualmente sometidas a erosión. Los materiales removidos se depositan en áreas marginales de menor energía o son llevados hacia la parte distal del aparato deltaico, ya en el estuario, conformando el llamado pro-delta.

4.- ESTRATIGRAFÍA

Para un mejor entendimiento de las distintas formaciones geológicas que conforman la estratigrafía de los suelos del Río de La Plata, hemos confeccionado un perfil transversal esquemático, que se muestra en la Figura 2.

En éste perfil transversal del Río de La Plata, se repite desde el inicio del mismo hasta más allá de la zona del puerto de la Ciudad de La Plata.

Se aprecia en este perfil que en la costa de margen derecha (Argentina) tenemos los suelos de la alta terraza de la ciudad de Buenos Aires, apoyado encima del horizonte de las arenas Puelches, ésta formación pleistocena conocida como Pampeano (Ensenadense y Bonaerense), está constituida de limos y limos loessicos

representativos de períodos alternantes cataclimáticos (fríos y húmedos) y anticlimáticos (cálidos y secos).

Se desarrollan en ella paleosuelos superpuestos representativos de estas condiciones climáticas alternantes (deposición discontinua alternante con erosión y desarrollo de suelos).

Se destacan también la presencia local de cementación calcárea (tosca) y en algunos casos concreciones de hierro señalando un origen subacueo.

Los horizontes del Bonaerense que se superponen, de características litológicas y genéticas similares se diferencian por su menor cementación calcárea indicando la dominancia del agente eólico de formación con procesos edáficos profundos.

Esta unidad erosionada más profunda y selectivamente que la anterior presenta frecuentes redepósitos locales (remoción, transporte y sedimentación a corta distancia).

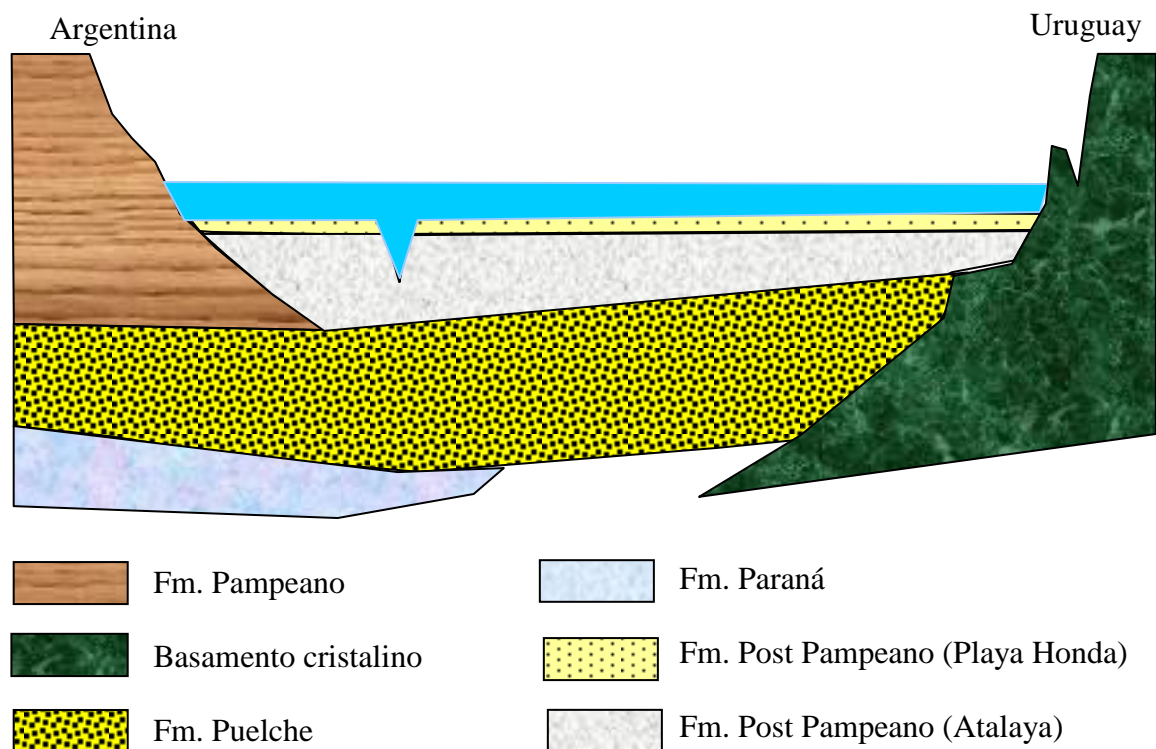


Figura 2: Perfil típico del río de La Plata en la desembocadura del Riachuelo

Desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos, estos sedimentos al sufrir en su vida geológica los períodos anticlimáticos han sido fuertemente preconsolidados por desecación.

Prof. Ing. Augusto José Leoni

Esta fuerte desecación ha provocado en su masa un agrietamiento masivo de la misma en todas direcciones. Lo que hace que no se los pueda considerar como un medio cohesivo continuo cuando los mismos son sometidos a pequeños esfuerzos de tracción, ya que los planos de fracturación cortan los conductos capilares y por lo tanto se anula la tensión superficial que da origen a la cohesión aparente.

Por debajo de esta formación se ubican aproximadamente entre cotas -25 m a -30 m, las arenas de la Fm. Puelche, que por lo general presentan un espesor del orden de los 15 a 20 m, son arenas finas, limpias, de granulometría uniforme, conformadas por granos fundamentalmente de cuarzo, del tipo “SP” y “SP-SM”, que se presentan como “densas” a “muy densas”.

Por debajo de las arenas Puelche se observan las arcillas de la formación Paraná, conformada por arcillas de muy alta plasticidad, de tonalidad verde azulado, del tipo “CH”, con una compacidad correspondiente a la de los suelos “muy compactos” y que presentan un espesor muy uniforme del orden de los 10 metros.

La formación Post Pampeano conformadas por las sub formaciones, “Atalaya” y “Playa Honda”, toman toda su dimensión en el delta del río y se van sumergiendo hacia el estuario con una pendiente muy suave.

Su presencia se observa en zonas costeras a lo largo de la costa sur de la Ciudad de Buenos Aires, ocupando los sectores bajos de la costa fluvial y marítima, donde se presentan hasta varios kilómetros dentro del continente y a lo largo y hacia aguas arriba en aproximadamente 15 km de la cuenca Matanza Riachuelo.

La secuencia estratigráfica generalizada está conformada por la Fm. Paraná, la Fm. Puelche y la Fm. Pampeano, finalizando en superficie, con los depósitos de la Fm. Post Pampeanos correspondientes a las formaciones Atalaya y Playa Honda

El basamento cristalino que se detecta en superficie en las márgenes del Uruguay, aflora en la isla Martín García y hacia la margen derecha (Argentina) se profundiza hacia la cuenca del río Salado y volviendo a aflorar en el Sistema de Tandilia, en el interior de la provincia de Buenos Aires.

La profundidad del basamento cristalinos en la zona de la Ciudad de Buenos Aires se detecta aproximadamente a -250 m, con la presencia de gneisses.

En la figura 3 que se adjunta se puede apreciar un sondeo ejecutado en el lecho del río de La Plata, aproximadamente a 5 km de la costa, donde se destacan los perfiles descritos en el párrafo anterior (hasta la Fm. Paraná) y en la que se pueden apreciar las propiedades

índices de los distintos estratos y los valores recopilados del ensayo normal de penetración, “SPT” ejecutados con una energía del 90 % de la teórica.

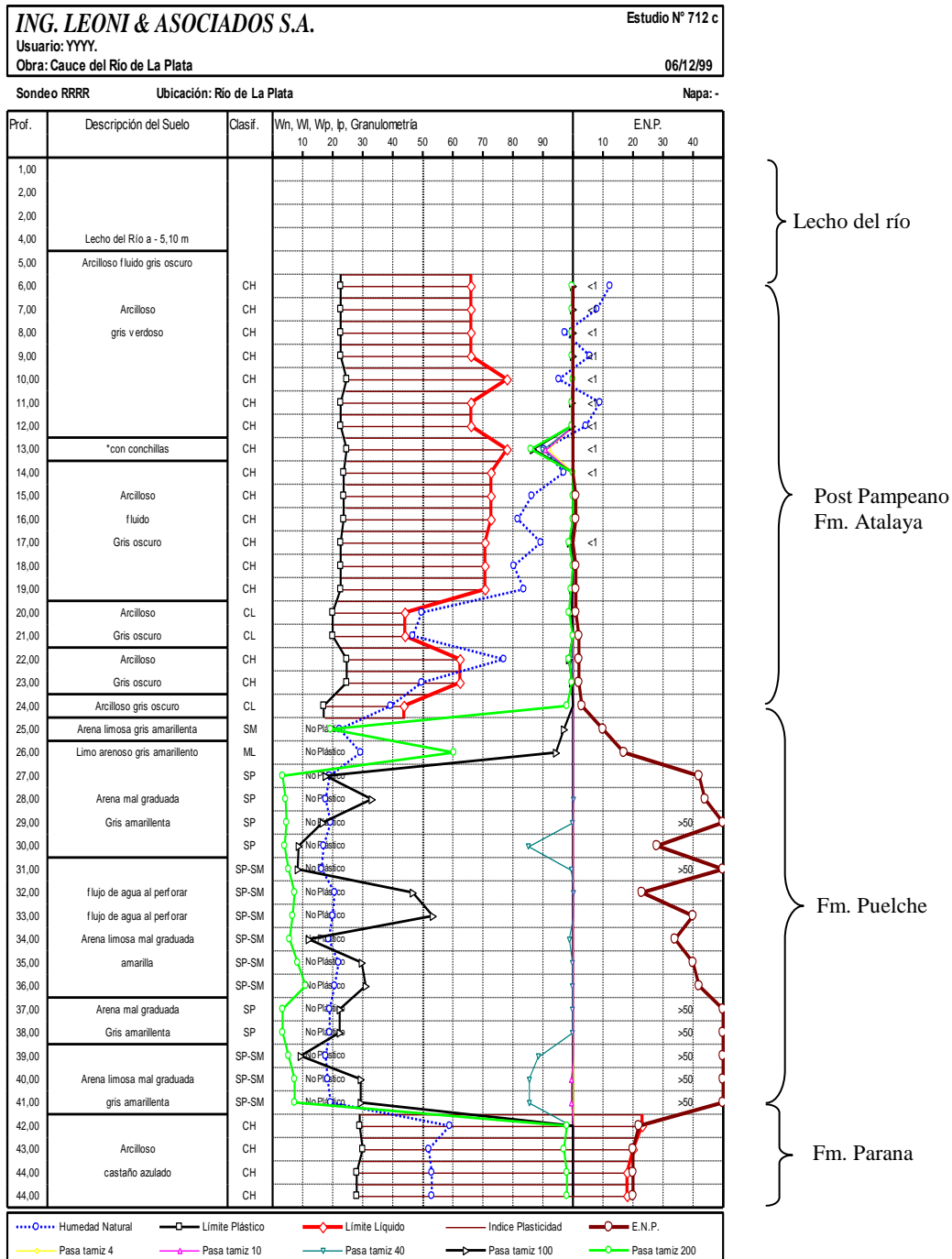


Figura 3: Perfil de estudio de suelos en el lecho del río de La Plata, frente a la Ciudad de Buenos Aires

5.- FORMACIONES

En esta sección se describen y discuten los parámetros geotécnicos fundamentales que caracterizan el comportamiento de las distintas formaciones identificadas. La descripción

de los sedimentos del Post Pampeano se realiza con mayor detenimiento, dado su predominio con respecto a las demás formaciones y la relevancia geotécnica que adquieren para el presente trabajo.

Los sedimentos del Postpampeano comprenden los depósitos recientes del Holoceno, conformados por limos arenosos y arcillas normalmente consolidados. El comportamiento mecánico de estos sedimentos no ha recibido atención hasta los estudios de Sfriso (1997), Leoni (2002) y Rinaldi Zeballos (2004).

En estos sedimentos se diferencia una deposición inferior, conformada por arcillas de origen marino de coloración gris oscura verdosa, y una deposición superior de arcillas y limos arenosos de origen fluvial de coloración grisácea. Ambos estratos corresponden a las formaciones Atalaya y Playa Honda, respectivamente. El estrato de limos superiores de la formación Playa Honda, tiene un escaso espesor en el estuario del Río de la Plata (menos de 1,00 m), pero alcanza algo más de 10 m aguas arriba, en el delta del Río Paraná y hacia la margen derecha del mismo. El espesor de la formación Atalaya resulta mucho mayor y en algunos sectores del área que nos ocupa alcanza espesores mayores a los 30 m.

5.1.- Perfiles típicos de la Cuenca del Riachuelo

De la búsqueda de antecedentes geotécnicos sobre trabajos de estudios de suelos ejecutados en la zona, hemos recopilado más de 30 perforaciones y perfiles geotécnicos que se ejecutaron en la zona que nos ocupa. Los mismos se destacan en la imagen de la figura 4.

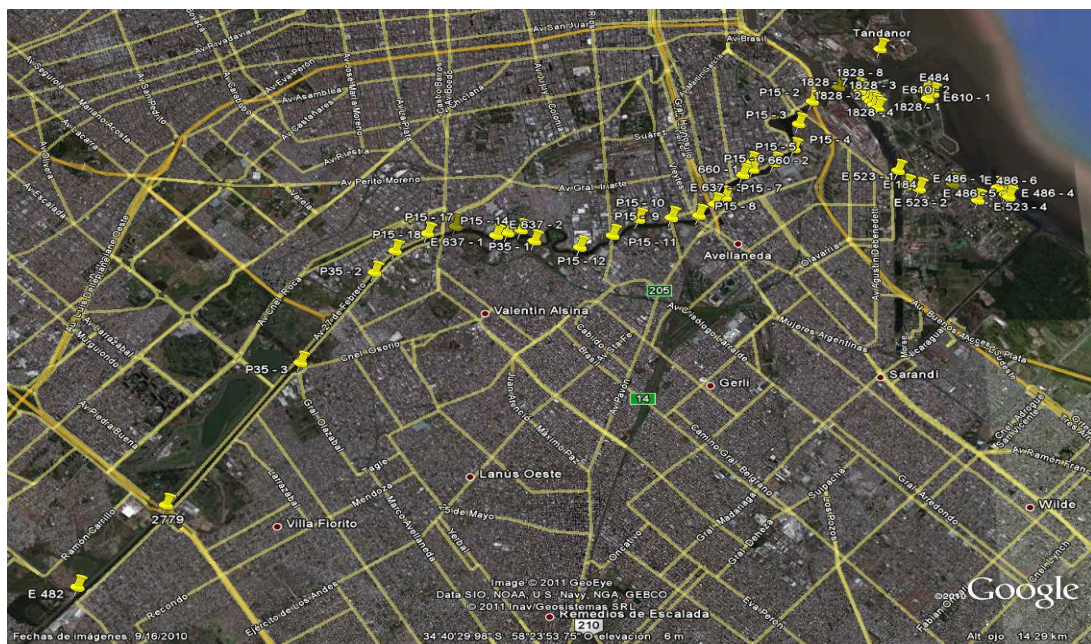


Figura 4: Estudios de suelos ejecutados en la zona de obra

Del análisis de los mismos podemos describir los siguientes perfiles típicos:

5.1.1.- Puerto Piojo

En la gráfica que se presenta en la figura 5 se puede apreciar el perfil geotécnico de una perforación ejecutada en la zona de Puerto Piojo (cercano a la torre de alta tensión lado norte).

- En la parte superior se pueden apreciar los suelos de la Fm. Playa Honda apoyados sobre los de la Fm. Atalaya, que supera la profundidad de 30 m.
- Estas estratigrafías en la zona de la cuenca Matanza Riachuelo, son muy erráticas ya que en el área, los cauces fluviales durante millones de años han discurrido por diferentes trazas erosionando algunas y redepositando en otras.

En la figura 6 se muestra otro perfil del suelo, en la misma zona de Puerto Piojo (cercano a la torre de alta tensión del lado sur) que difiere absolutamente con el del perfil de la figura 4.

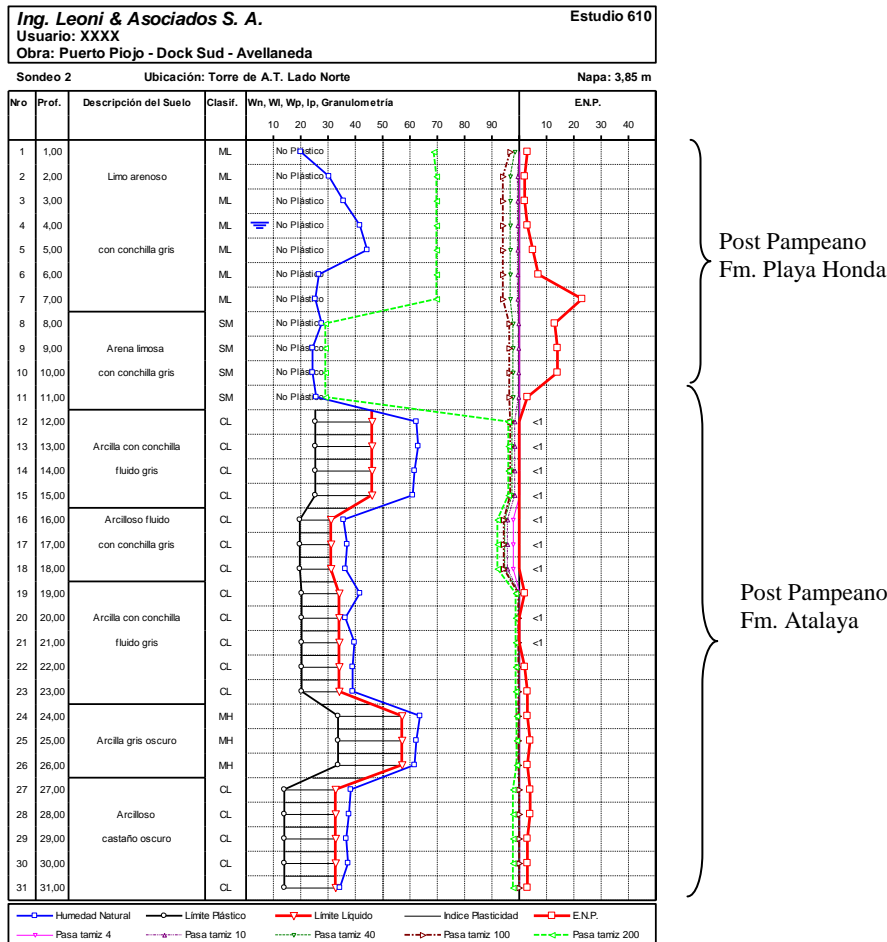


Figura 5: Perfil del suelo en Puerto Piojo donde se aprecia la Fm Playa Honda en superficie, sobre los sedimentos de la Fm. Atalaya, ambas del Post Pampeano

- En éste se nota claramente la presencia por debajo de los suelos del Post Pampeano que llegan hasta los -19 m. Los suelos de la Fm. Pampeano que presentan una compacidad

mayor y que por ello no han podido ser erosionados por las aguas del Riachuelo y que llegan hasta el nivel de los -27 m.

- A partir del nivel anterior se observan las arenas de la Fm. Puelche.

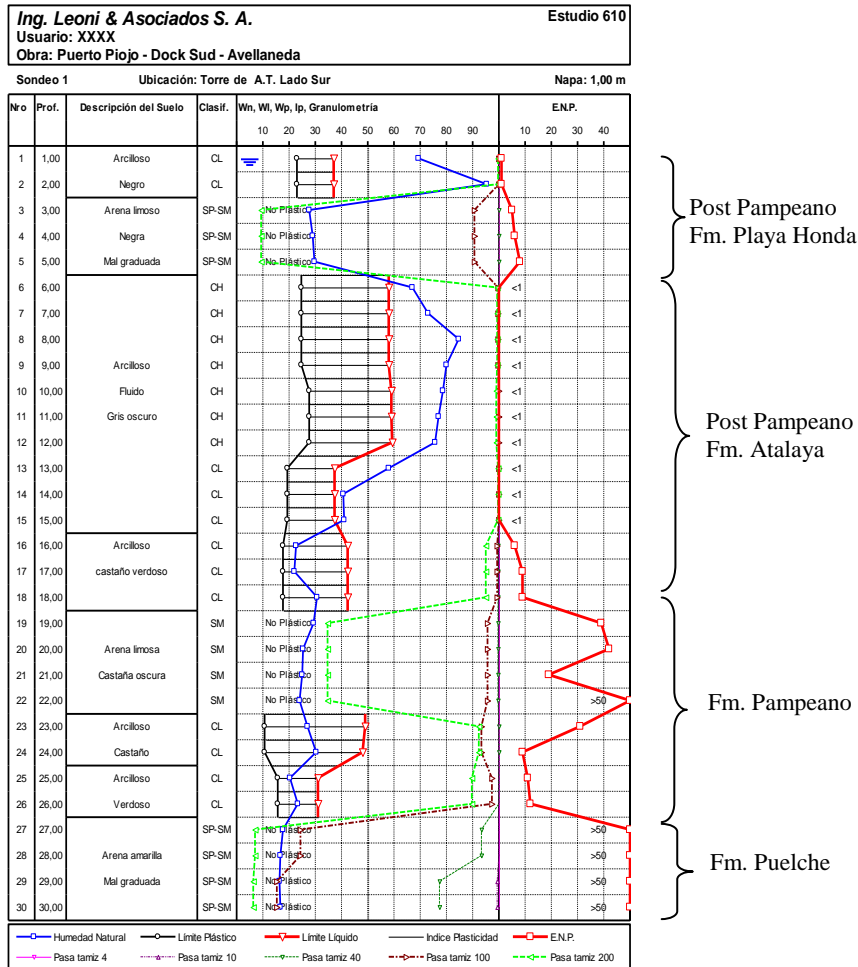


Figura 6: Perfil del suelo en Puerto Piojo donde se aprecia la Fm Playa Honda en superficie, sobre los sedimentos de la Fm. Atalaya y a partir de los -19 m aparece la Fm. Pampeano

5.2.- Perfil de la calle Irala

Si observamos el perfil de la figura 7, que representa el perfil estratigráfico de un sondeo ejecutado en el cauce del Riachuelo a la altura de la calle Irala de la Ciudad de Buenos Aires, notaremos que:

- El lecho se ubica a los -2,50 m desde el pelo de agua
- Luego continúan los suelos del Post Pampeano (Fm. Playa Honda) hasta los -9,50 m
- Posteriormente se ubican sedimentos de la Fm. Atalaya hasta los -15 m.
- A continuación y hasta los -25 m se destacan sedimentos de la Fm. Pampeano y luego, al final las arenas de la Fm. Puelche.

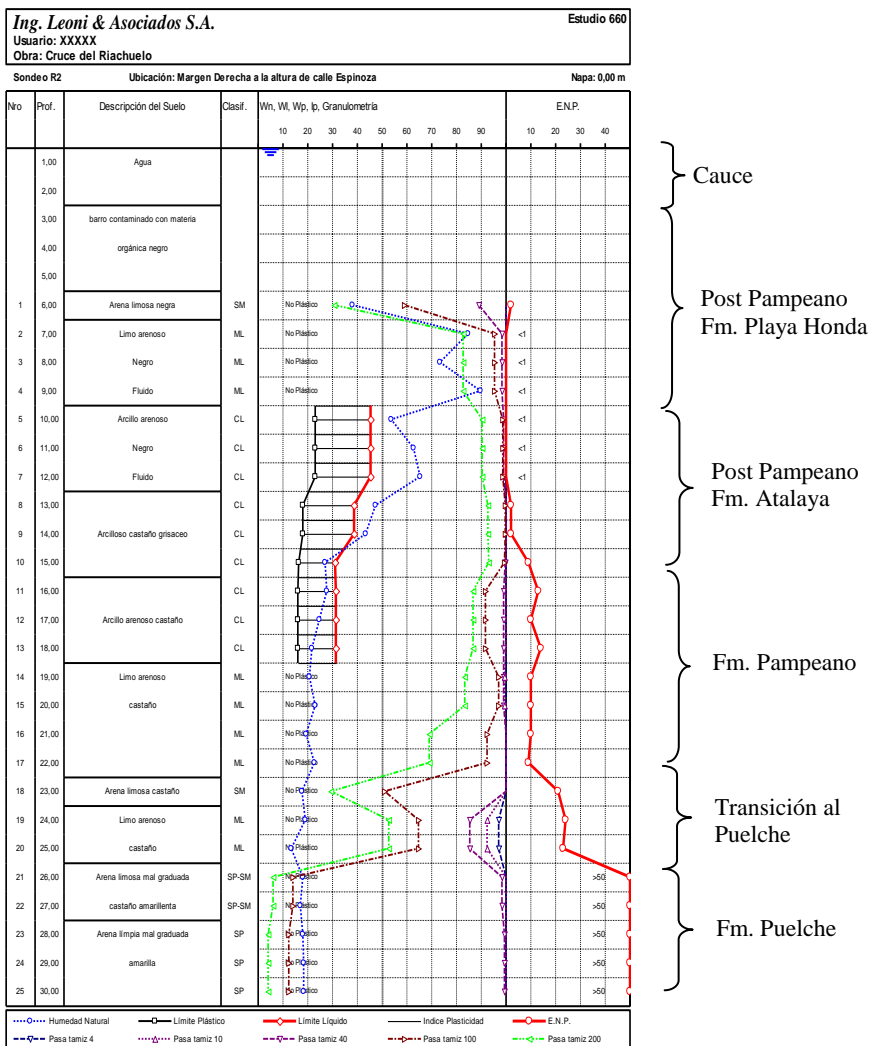


Figura 7: Perfil del suelo en el cauce del riachuelo a la altura de la calle Irala de la CABA

5.3.- Puente La Noria

En el perfil de la figura 8, tenemos un estudio de suelos ejecutado en las márgenes del Riachuelo en coincidencia con el puente La Noria, donde el nivel de la napa de agua, ubicado a -1,90 m de profundidad, indica el nivel del pelo de agua del río.

- En éste perfil se detectan en la parte superior, suelos de la Fm. Playa Honda que se extienden hasta el nivel de los -4,50 m.
- Posteriormente y hasta el nivel de los -7,50 m se ubican sedimentos “medianamente compactos” de características arcillo limosas.
- A continuación y hasta el límite investigado se observan sedimentos de la Fm. Pampeano.

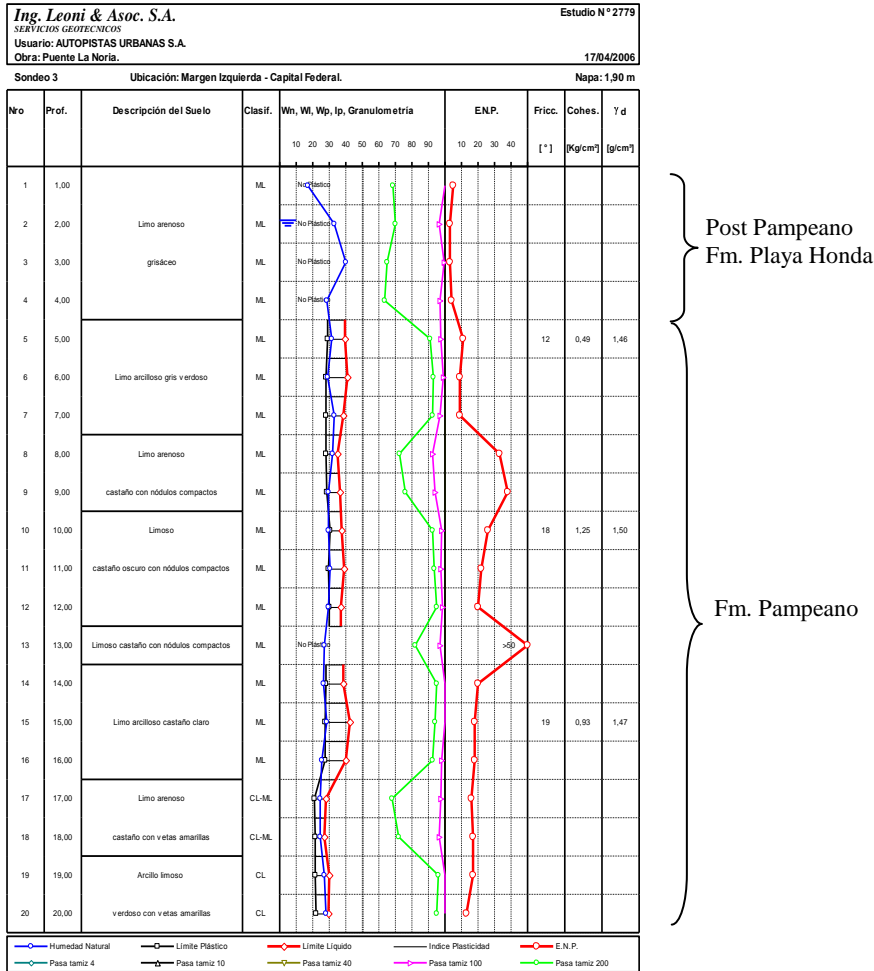


Figura 8: Perfil del suelo en márgenes del Riachuelo a la altura del Puente La Noria

5.4.- Perfil de los suelos en el área de la Feria La Salada.

El cauce del río Matanza a la altura de la Feria La Salada, presenta un desnivel con relación a las márgenes del mismo, del orden de los 3 a 4 metros, por lo tanto si comparamos los perfiles del suelo determinados mediante sondeos ejecutados sobre las márgenes del mismo, observaremos que el lecho del río se encuentra sobre los suelos de la Fm. Pampeano “muy compactos” a “duros” (figura 9).

Esto indica que el dragado sobre estos tramos del cauce demandarán una energía adicional importante con relación a la de los tramos inferiores y que no será significativo el espesor del manto contaminado que se detecte sobre el mismo.

Consideramos además que el espesor de dragado de este tramo, será únicamente dependiente de las condiciones hidráulicas del río.

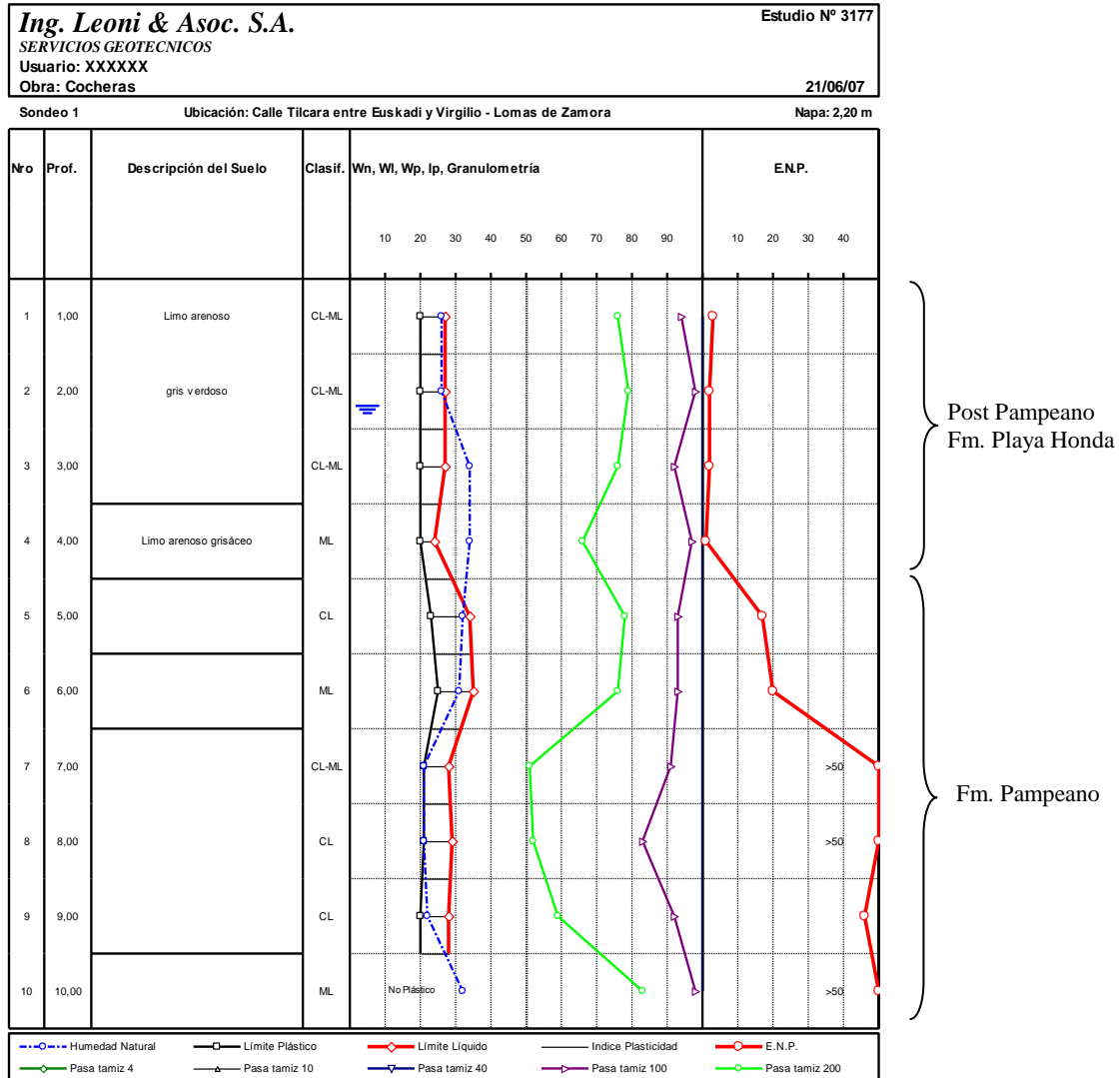


Figura 9: Perfil del suelo en márgenes del Riachuelo a la altura de la Feria La Salada

6.- IDENTIFICACIÓN Y CONSTANTES FÍSICAS

En el Sistema de Clasificación Unificada, los suelos de la formación Playa Honda son típicamente del tipo CL, ML con algunas deposiciones de arenas finas limosas del tipo “SM”.

Mientras que los suelos de la formación Atalaya, son básicamente arcillas de elevada plasticidad y se clasifican fundamentalmente como CH con algunos mantos de suelos MH.

En una campaña, realizada en el Río de La Plata, se obtuvieron muestras inalteradas, a las profundidades de -5 -10 -15 y -20 m de profundidad dentro del manto arcilloso de la Fm. Atalaya. Sobre esta muestras, además de realizar ensayos de consolidación y de compresión triaxial, hemos calculado con sumo cuidado las densidades midiendo el

volumen con el método del mercurio sobre trozos inalterados y también en forma geométrica midiendo las probetas recortadas para la ejecución de ensayos triaxiales y de consolidación. Como conclusión de esta recopilación obtuvimos los resultados que se muestran en la Figura 10, de la cual podemos deducir una función de $\gamma' = f(z)$ como la que se da a continuación:

Donde γ' se expresa en KN/m^3 y z en metros.

$$\gamma' = 7 + 0,15 \cdot z \quad (\text{KN/m}^3) \quad (1)$$

Hemos observado en las mediciones efectuadas de las presiones verticales efectivas σ'_v calculadas teniendo en cuenta los valores de la densidad efectiva γ' dadas por la fórmula anterior, que comparándolas con los valores de las cargas de preconsolidación σ'_c , obtenidas de los ensayos de consolidación, como era lógico, los suelos son normalmente consolidados como se aprecia en el gráfico que se muestra en la Figura 6, donde además se han representado los resultados obtenidos en muestras recuperadas del lecho del Río de La Plata, a la altura del Puerto la Plata.(Sfriso)

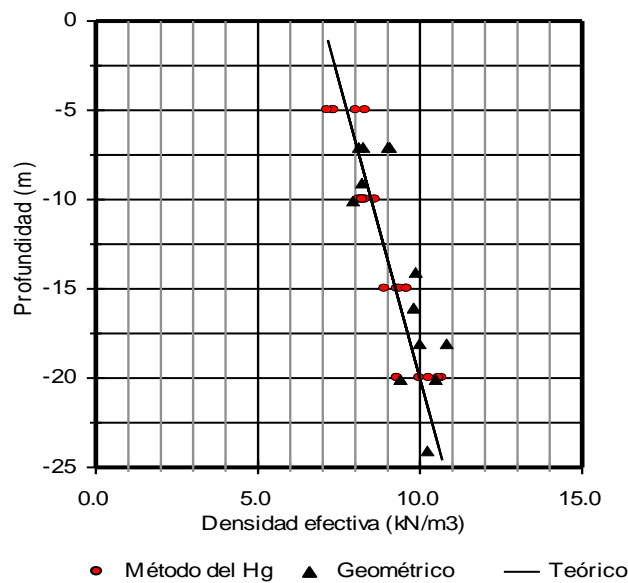


Figura N° 10: Densidad efectiva γ' en función de la profundidad “z”

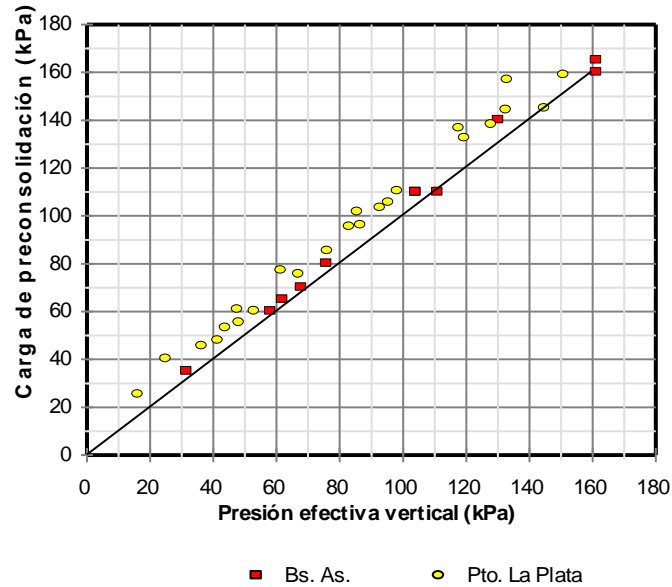


Figura N° 11: relación entre σ'_v y σ'_c deducida de los ensayos de consolidación

Con los resultados de los ensayos de consolidación realizados sobre las muestras indisturbadas, obtenidas de las perforaciones ejecutadas tanto en Buenos Aires como en La Plata, se ha representado el Índice de Compresión “Cc” con el valor del Límite Líquido de las muestras (Figura 12), con la relación de vacíos inicial “e_o” (Figura 13) y con la humedad natural de las mismas (Figura 14).

En la primera gráfica se aprecia que el valor de “Cc” se aproxima bastante a la siguiente ecuación

$$C_c = 1,45.W_L - 0,55 \quad (\text{Con } W_L \text{ en decimal}) \quad (2)$$

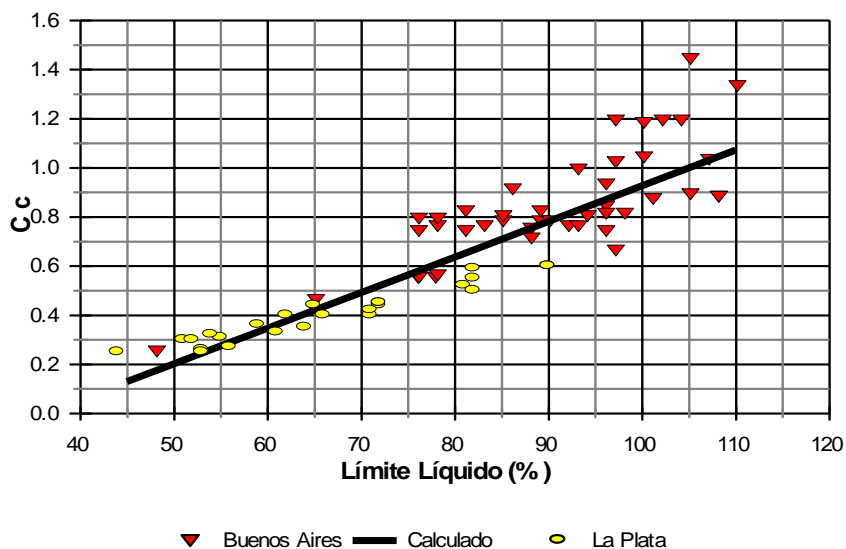


Figura N° 12: Variación del Índice de Compresión con el valor del Límite Líquido

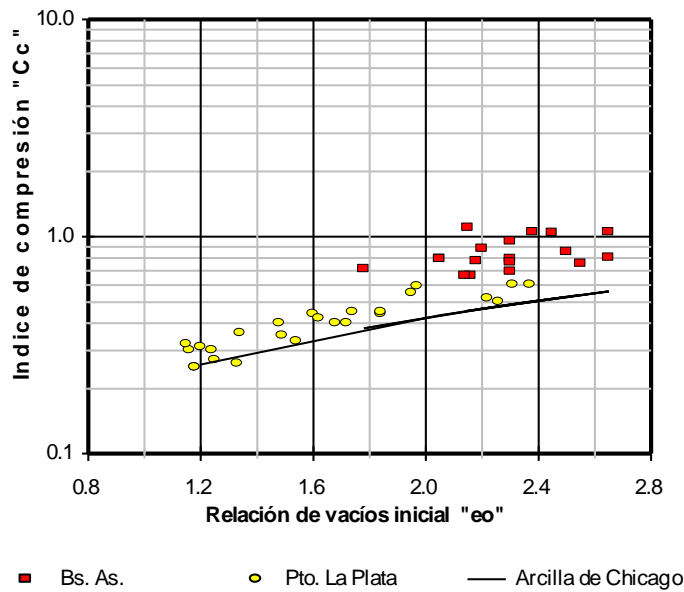


Figura N° 13: Variación del Índice de Compresión con la relación de vacíos inicial.

En la segunda gráfica se representa la variación de “Cc” con la relación de vacíos inicial “e_o”. Se incluye también, a modo de comparación, la variación de estos parámetros con los obtenidos para las arcillas de la Ciudad de Chicago dada por la siguiente relación:

$$C_c = 0,208 e_o - 0,0083$$

Se aprecia en este sentido que los valores hallados para el material de la Fm. Post Pampeano son algo mayores a aquellos, y pueden ser aproximados por:

$$C_c = 0,38 e_o - 0,15 \quad (3)$$

Finalmente en la tercera gráfica se observa que los valores de “Cc” se correlacionan con buena aproximación a la ecuación dada por Jimenez Salas para las arcillas españolas normalmente consolidadas, mediante la siguiente expresión:

$$C_c = 0,99.w_n^{1,315} \quad (4)$$

Finalmente, en la figura 15, se representa una nube de curvas que muestran los resultados de varios ensayos de consolidación, ejecutados sobre muestras naturales extraídas del Post Pampeano.

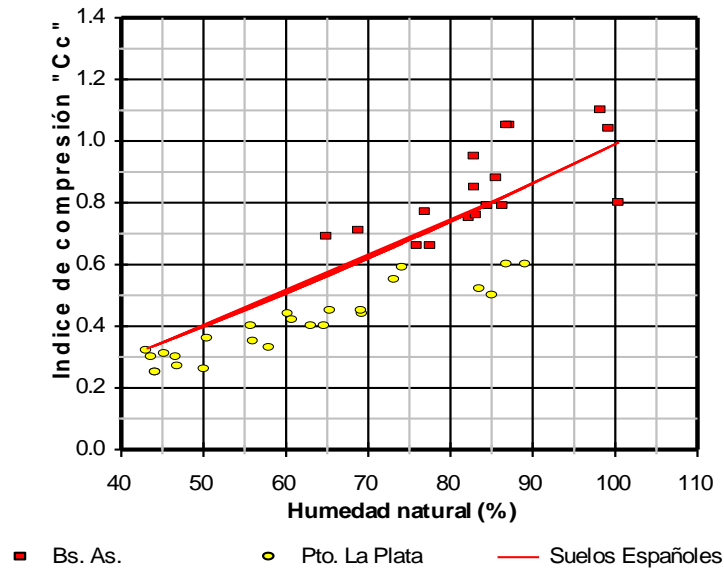


Figura N° 14: Variación del Índice de Compresión con la humedad natural de las muestras.

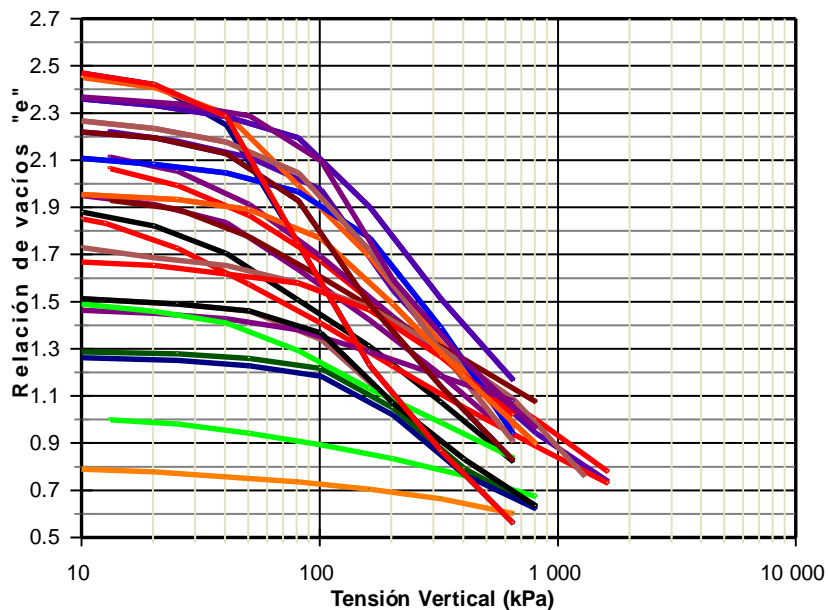


Figura N° 15: Curvas de compresibilidad en ensayos de consolidación unidimensional ejecutados sobre muestras inalteradas

7.- PROPIEDADES ÍNDICES Y RESISTENCIA AL CORTE

Considerando las experiencias de Skempton y Northey del año 1953, en las que observaron que para suelos de similares composición mineralógica, existía una relación constante entre la cohesión con la humedad del límite líquido y la cohesión del mismo suelo con la humedad del límite plástico. Teniendo en cuenta además la teoría del estado crítico o de "Cam Clay" representada esquemáticamente y en parte, en la figura 16, donde se

representa la línea de falla de pendiente “M” y la línea estado crítico (CSL) de pendiente “λ” en la representación semi logarítmica, para una sollicitación de compresión no drenada. Vemos que en la gráfica superior, podremos representar sobre la línea de falla de pendiente “M”, los valores de la tensión de confinamiento y de su correspondiente tensión desviante en la falla, para un mismo suelo que tenga en un punto la humedad del límite líquido y en el otro la humedad del límite plástico, de tal forma que podamos obtener la relación entre ambos valores, que llamaremos “R” y que quedará definida por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{c_{u_{wp}}}{c_{u_{wL}}}$$

Como $\frac{1}{2}q_{wL} = c_{u_{wL}}$ y $\frac{1}{2}q_{wp} = c_{u_{wp}}$ de la observación de la figura 15 podemos

obtener las siguientes relaciones.

$$q_{wp} = M \cdot q_{wp} \quad \text{y} \quad q_{wL} = M \cdot q_{wL}$$

Dividiendo obtenemos

$$\frac{p'_{wp}}{p'_{wL}} = \frac{q_{wp}}{q'_{wL}} = \frac{Cu_{wp}}{Cu_{wL}} = R$$

Por otra parte a partir de este gráfico y de su parte inferior y a la derecha, podemos hacer:

$$e_{wL} + \lambda \cdot \text{Ln}(p'_{wL}) = \Gamma = e_{wp} + \lambda \cdot \text{Ln}(p'_{wp})$$

$$e_{wL} - e_{wp} = \lambda (\ln p'_{wp} - \ln p'_{wL})$$

Como además $e = w \cdot \gamma_s$ podemos escribir:

$$w_{LL} - w_{LP} = Ip = \frac{\lambda \cdot [\text{Ln}(p'_{wp}) - \text{Ln}(p'_{wL})]}{\gamma_s / \gamma_w}$$

$$Ip = \lambda \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \text{Ln} \left(\frac{p'_{wp}}{p'_{wL}} \right)$$

Que al final podemos representar como:

$$Ip = \lambda \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \text{Ln}(R)$$

$$\lambda = \frac{Ip \cdot \gamma_s}{\text{Ln}(R) \cdot \gamma_w} \quad (5)$$

Como además $Cc = 2,3 \cdot \lambda$

$$Cc = 2,3 \cdot \lambda = \frac{2,3 \cdot I_p \cdot \gamma_s}{Ln(R) \cdot \gamma_w} \quad (6)$$

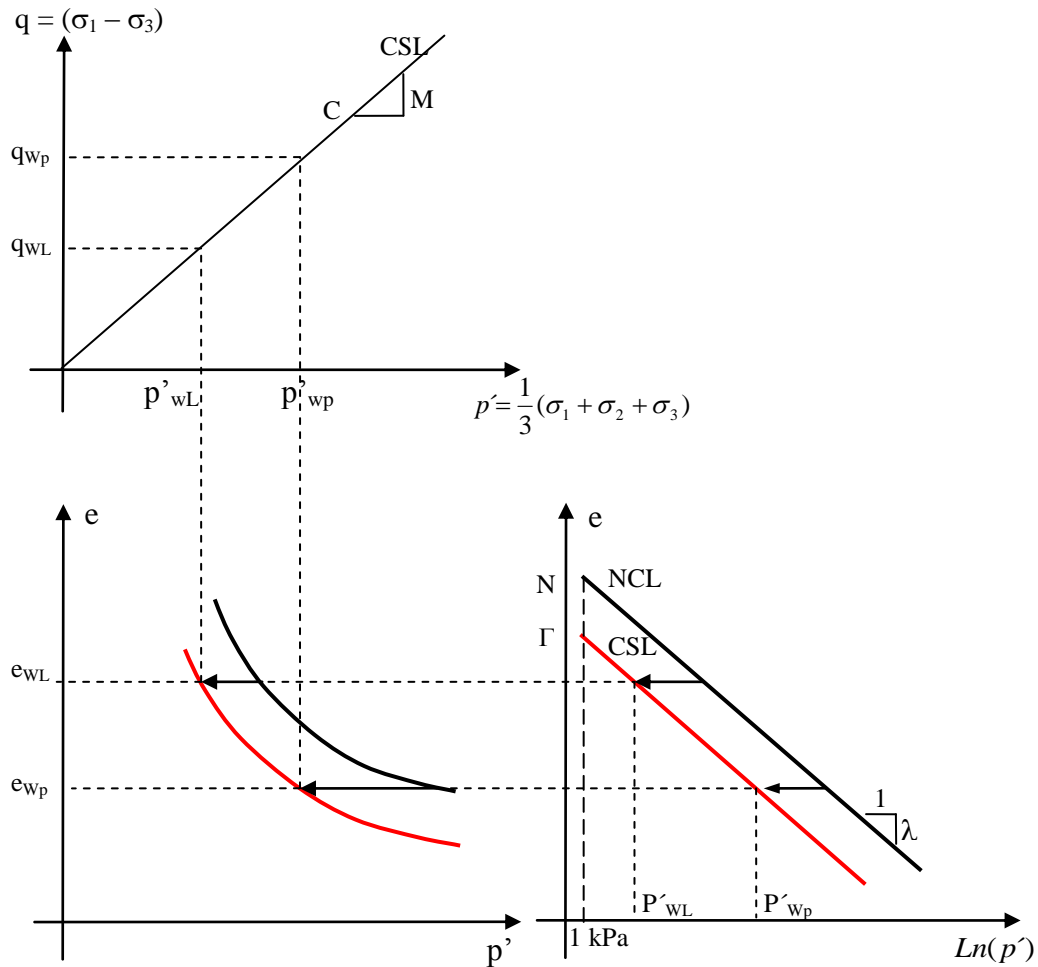


Figura N° 16: Propiedades índices y su relación con el modelo de estado crítico

Para obtener en las arcillas que estamos investigando el valor de la relación “R”, hemos tomado varias muestras de las arcillas del Post Pampeano, las amasamos en el laboratorio con su humedad natural, que por lo general es elevada, o le hemos agregado agua hasta llevarlas a valores de humedad superior o semejante al valor del límite líquido.

Posteriormente con la utilización del Pocket Penetrometer y el Torvane que se muestran en las figuras 17 y 18, determinamos la resistencia al corte de la masa, para distintos grados de humedad.

Es decir, con el Pocket Penetrometer determinamos la resistencia a la compresión simple y como se trata de suelos arcillosos saturados, calculamos posteriormente el valor de la cohesión no drenada, haciendo $c_u = \frac{1}{2} q_u$. mientras que con el Torvane directamente obtuvimos la cohesión no drenada del material siguiendo las especificaciones del fabricante del equipo.

En la fotografía que se muestran, se puede apreciar con claridad el momento en que se miden los parámetros sobre una muestra amasada en el laboratorio y con una cierta humedad.



Foto N° 17: Medición de la resistencia a la compresión simple de una muestras de la Fm. Post pampeano amasadas en el laboratorio, con las distintas puntas del Pocket Penetrometer



Foto N° 18: Equipo de Torvane con las distintas veletas de corte, al momento de medir la resistencia al corte de muestras de la Fm. Post pampeano, amasadas en el laboratorio

Los resultados de las determinaciones de los valores de la cohesión no drenada “ c_u ” se representaron en una gráfica semi logarítmica en función de la variación del Índice de Liquidez “ I_L ” correspondiente a cada muestra analizada, teniendo en cuenta sus parámetros de W_L y W_p .

$$I_L = \frac{(W_n - W_p)}{I_p} \quad (7)$$

Como vemos en la ecuación anterior el I_L toma valores característicos cuando la humedad de la muestra coincide con el valor del W_L , ($w = W_L$) el índice de liquidez se hace igual a la unidad ($I_L = 1$) y para $w = W_p$ se anula ($I_L = 0$)

Como se aprecia en la gráfica de la figura N° 19 donde hemos representado los valores de la cohesión no drenada de varias muestras ensayadas, podemos obtener un valor del parámetro “ R ” definido como la relación entre la cohesión no drenada para una muestra amasada con la humedad del W_L y el mismo parámetro para una humedad del W_p

$$R = \frac{\text{Cohesión (para } I_L = 1)}{\text{Cohesión (para } I_L = 0)} \quad (8)$$

A partir de los resultados que obtuvimos con estas mediciones, vemos que las mismas pueden ser promediadas por la línea negra de la figura 19 que responde a la siguiente ecuación:

$$c_u = \frac{7,2 - I_L}{(I_L + 0,3)^{2,6}} \quad (\text{Donde } c_u \text{ se expresa en kPa)} \quad (9)$$

Otra forma de representar estos valores, es como se muestra en la gráfica de la figura 20, donde se observa la relación entre el valor de la cohesión no drenada (c_u en kPa) en función de la humedad (w %) de la muestra, en una gráfica doble logarítmica, que puede ser aproximada en promedio con la siguiente ecuación:

$$c_u = \frac{W_L \cdot 10^{5,7}}{(w)^{(4,7-0,01 \cdot W_L)}} \quad (\text{Donde } c_u \text{ se expresa en kPa)} \quad (10)$$

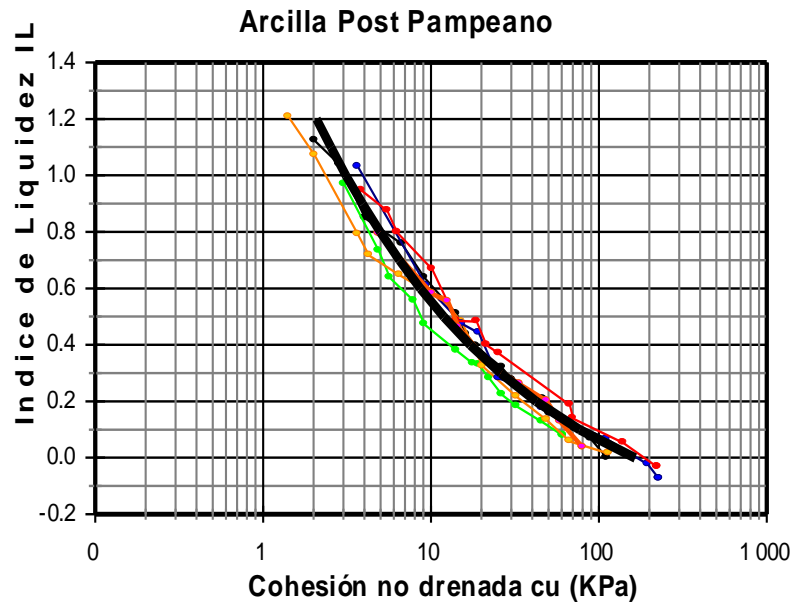


Figura N° 19: Resultados de la medición de la cohesión no drenada sobre muestras amasadas

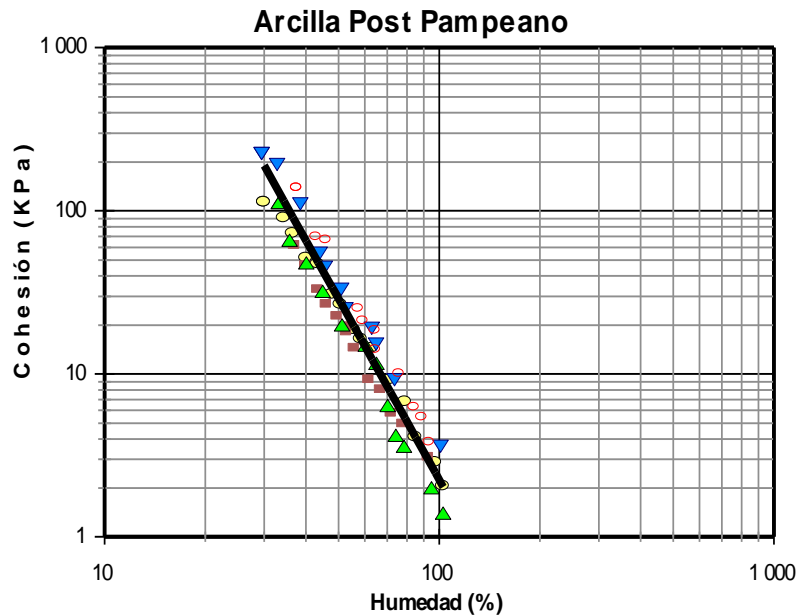


Figura 20: Cohesión no drenada en función de la humedad de arcillas amasadas

De la representación efectuada en la figura 20, obtuvimos un valor promedio de $R = 62$ a partir de la aplicación de la ecuación de $c_u = f(w_L, w_n)$ donde reemplazamos el valor de la humedad de amasado por los valores correspondientes del W_L y del W_p .

Si asumimos que el valor del peso específico de los granos de una arcilla del Post Pampeano se ubica en el entorno de 2,75 gr/cm³ y con el valor calculado de R, podemos calcular λ con la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{Ip \cdot \gamma_s}{Ln(R) \cdot \gamma_w}$$

Que nos permite obtener:

$$\lambda = \frac{Ip \cdot 2,75}{4,13} = 0,66 \cdot Ip$$

$$Cc = 2,3 \cdot \lambda = 1,52 \cdot Ip$$

$$\lambda = 0,66 \cdot Ip$$

$$Cc = 1,52 \cdot Ip$$

(11)

En la figura 21 representamos los valores de Cc en función del Ip, calculados con esta última ecuación y de los valores de Cc medidos en los ensayos ejecutados.

Se aprecia en esta figura que los resultados de la aplicación de la ecuación dan una tendencia similar a la determinada tanto para las muestras amasadas como para las inalteradas.

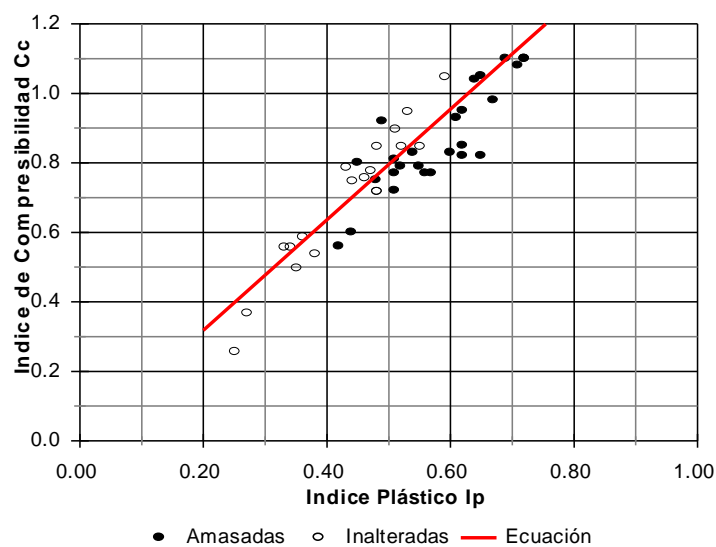


Figura N° 21: Comparación de resultados medidos de “Cc” con los calculados sobre muestras amasadas y sobre muestras naturales

Teniendo en cuenta la ecuación que nos vincula el índice de compresibilidad “Cc” en función del límite líquido que obtuvimos a partir de los resultados graficados en las figuras

12 podemos obtener una ecuación que nos vincule el índice de plasticidad con el límite líquido, ambos expresados en decimales, haciendo:

$$Cc = 1,45.W_L - 0,55 \quad (2)$$

$$Cc = 1,52.Ip \quad (11)$$

$$Ip = 0,95.W_L - 0,36 \quad (12)$$

Representada con la línea roja en la gráfica de la figura N° 22 que nos permite también escribir a partir de $\lambda = 0,66.Ip$

$$\lambda = 0,63.W_L - 0,24 \quad (13)$$

Si comparamos la expresión que nos vincula a $Ip = f(W_L)$ con la ecuación de la línea "A" de la carta de plasticidad de Casagrande, veremos que no hay grandes diferencias entre ambas ya que la ecuación de la línea A es:

$$Ip = 0,73.(W_L - 0,2)$$

En la figura 22 se representan ambos resultados.

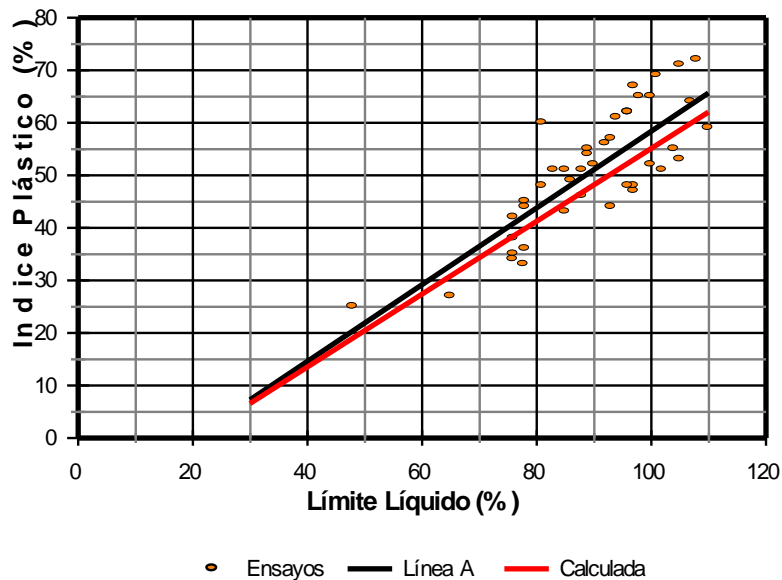


Figura N° 22: Carta de plasticidad

Estos parámetros serán de fundamental importancia al momento de manejar la sedimentación o consolidación de las arcillas refuladas y su comportamiento dentro del recinto.

9.- PARÁMETROS DE CORTE

Para analizar los parámetros de corte de estas arcillas caracterizadas como “muy blandas”, hemos recortado probetas de las muestras indisturbadas con las que contábamos y sometido a las mismas a tres ensayos de compresión de distintas características en la cámara triaxial de ensayo.

Básicamente estos ensayos consistieron en:

- Ensayos de compresión triaxial consolidados, drenados.
- Ensayos de compresión triaxial consolidados no drenados con medición de presión de poros.
- Ensayos de compresión triaxial consolidados drenados, según un camino de tensiones $k = \sigma'_3/\sigma'_1 = \text{cte.}$

De estos ensayos hemos podido obtener a partir de las consolidaciones isotrópicas ejecutadas en las primeras etapas de los dos tipos señalados en primer lugar, el índice de compresión “Cc” en consolidación bajo una presión hidrostática y a partir de este valor tener luego el valor del mismo índice cuando cambiamos la escala del eje de las presiones medias efectivas que en principio representamos en logaritmo decimal $\text{Log}(p')$ y luego la cambiamos para analizar los resultados desde la óptica del Cam Clay, a la de los logaritmos naturales $\text{Ln}(p')$ y que identificamos con la letra “ λ ”

$$\lambda = Cc/2,3$$

Debemos decir además que en la primera etapa de estos ensayos, (consolidación isotrópica) hemos aplicado una técnica que nos permitió medir no solamente el cambio volumétrico de la probeta, sino también la deformación vertical de la misma y nos permitiera medir el descenso vertical de la probeta al consolidarse isotrópicamente, figura N° 23.

Se adjuntan a modo de ejemplo, una gráfica de resultados de este tipo de ensayo, donde se puede apreciar además que en todos los casos, la deformación vertical máxima expresada como una variación de la relación de vacíos, es una tercera parte de la variación total de la relación de vacíos experimentada por la probeta. Lo que confirma lo expresado por la teoría y valida el método y las mediciones efectuadas.

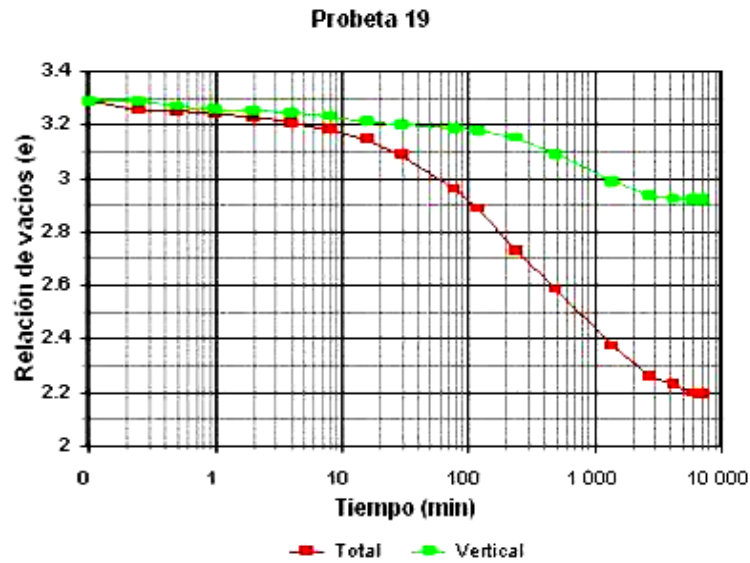


Figura N° 23: Consolidación isotrópica de probetas en la cámara triaxial, con medición de la deformación total y en el sentido longitudinal

Una vez asegurada la finalización de la consolidación primaria de la muestra, algunas probetas fueron ensayadas en forma drenada y otras en forma no drenadas con medición de las presiones neutras.

Otras probetas fueron ensayadas también en forma drenada pero a carga controlada de forma de poder llevarlas a la rotura según un camino de tensiones constante “K”, de acuerdo al montaje que se puede apreciar en la foto de la izquierda que se adjunta en la figura N° 24

Otras probetas fueron ensayadas también en estados triaxiales en las que una vez terminada la consolidación isotrópica inicial, le aplicábamos la tensión desviante con una velocidad muy pequeña, por lo general inferior a 10 micrones/minutos, mientras se medía la presión de poros, con un transductor de presiones colocado directamente a la salida de la cámara triaxial, tal como se aprecia en la foto de la figura N° 24 (derecha).

Como conclusión, de los resultados de estos ensayos, hemos resumido en el gráfico de la figura N° 25, los valores del parámetro “M” que nos da la pendiente de la línea de falla en el gráfico $p - q'$.

Se deduce de estos resultados que los valores de “M” varían entre un valor máximo de $M = 1,15$ y un valor mínimo de $M = 0,89$

Con lo cuál el valor del ángulo de fricción interna del material lo podemos calcular utilizando la ecuación 17:

$$\phi' = \arcsen\left(\frac{3M}{6+M}\right) \quad (14)$$

Que nos da un valor máximo de $\phi' = 28^\circ$ y un valor mínimo de $\phi' = 23^\circ$



Figura N° 24: Cámara triaxial en ensayo consolidados, drenado, con carga controlada.

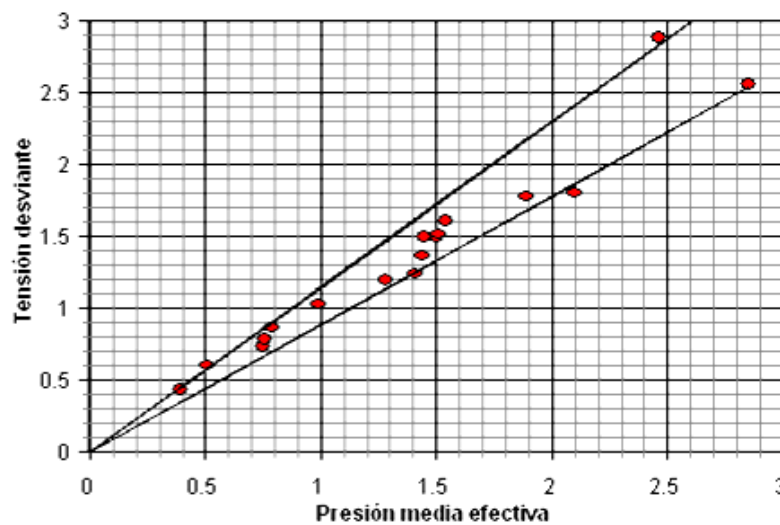


Figura N° 25: Resultados de los ensayos triaxiales drenados y no drenados ejecutados para distintas presiones de confinamiento

Con los ensayos triaxiales consolidados, drenados, se ha calculado la variación de la relación de vacíos a los largo de toda la ejecución del ensayo y también a la correspondiente al final del mismo. Es decir que tenemos la relación de vacíos el final de la consolidación hidrostática y el valor que le corresponde al momento de la falla de la probeta.

Esto nos permite, graficando los valores en función de la presión media efectiva media, obtener las línea normal de consolidación (NCL) y la correspondiente al la falla o al estado crítico, Línea de estado crítico CSL como se muestra en la figura N° 26.

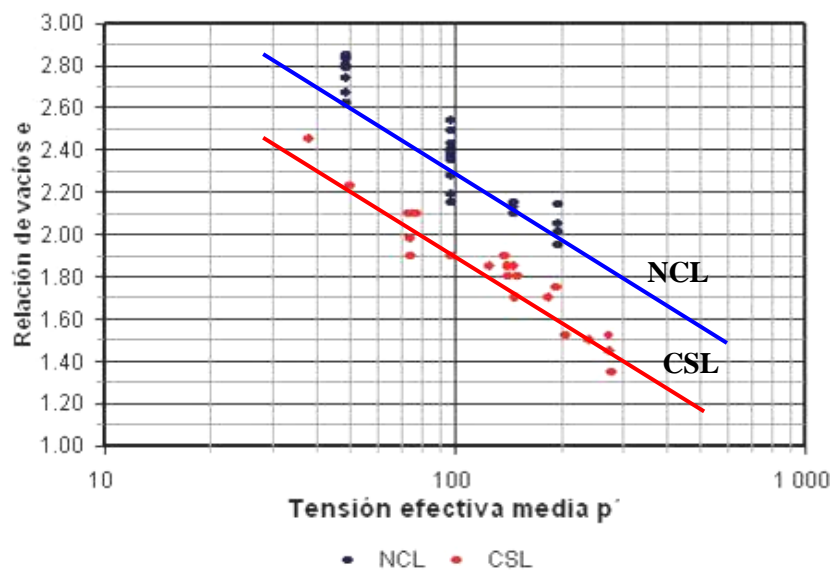


Figura N° 26: Relación de vacíos al final de la consolidación hidrostática y en la rotura

De estas gráficas podemos calcular los valores de λ que en este caso se ubican en el entorno de

$$C_c = 1,00 \text{ por lo que } \lambda = C_c/2,3 = 0,434.$$

También podemos calcular a partir de la ecuación 46 la distancia entre las líneas de NCL y CSL haciendo:

$$\Delta e = (\lambda - \kappa) \cdot \ln(2)$$

Si asumimos que las muestras tiene un valor de $\lambda = 0,434$ y $\kappa = 0,06$ tendremos:

$$\Delta e = 0,26$$

Si observamos la figura 51, notaremos que la distancia entre las dos líneas se ubica a una distancia un poco mayor y en el entorno de $\Delta e = 0,30$.

9.1.- DETERMINACIÓN DE K_0

Como etapa final del programa de ejecución de ensayos de laboratorio abocados a la obtención de parámetros de las arcillas de la Fm. Post Pampeano (Atalaya) que estábamos analizando, planificamos la ejecución de ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente y drenados, con el método de carga controlada, en los cuales se mantenía un camino de tensiones según una relación constante de “K”.

$$K = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

En el proceso de carga de estos ensayos se medía la deformación vertical de la probeta y el cambio de volumen de la misma a través del agua que drenaba en una pipeta graduada, tal como se muestra en la Figura 24 (izquierda).

Este proceso de carga nos permite conocer las relaciones de vacíos que experimenta la probeta para distintas sollicitaciones de la presión efectiva media “p”.

Estos valores se muestran en la figura 27 donde la pendiente de la nube de puntos nos da la pendiente C_c en escala de los logaritmos decimales que reducida a la escala de los logaritmos naturales no da la pendiente “ λ ”

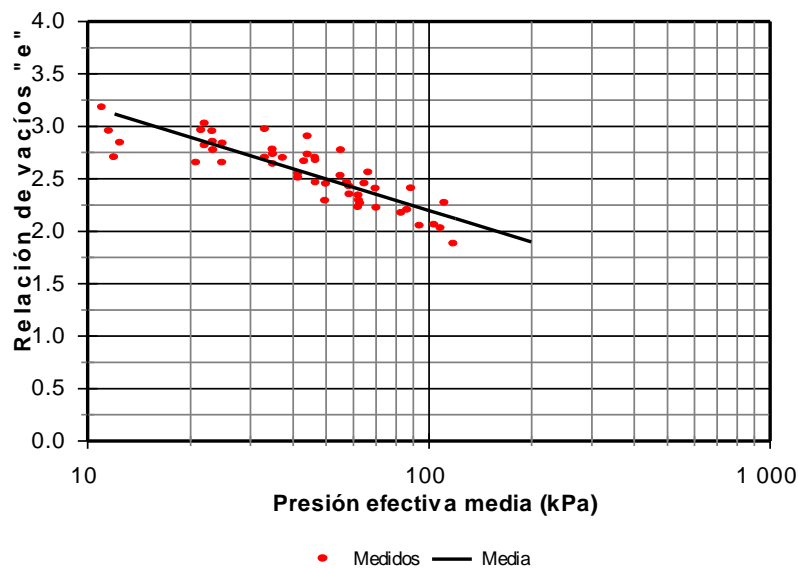


Figura N° 27: Relaciones de vacíos de los ensayos triaxiales drenados en camino de tensiones con $K = \text{cte.}$

De esta ecuación se deduce que la ordenada de la misma para un valor unitario de la presión media efectiva p' vale $\Gamma = 4,20$ y que $Cc = 1,00$ lo que equivale decir que

$$\lambda = Cc/2,3 = 0,435.$$

De esta gráfica se observa que la ecuación de la recta dibujada como promedio de la nube de puntos tiene la siguiente ecuación:

$$e = \Gamma - \lambda.Ln(p')$$

$$e = 4,20 - 0,435.Ln(p')$$

Finalmente, con estos ensayos drenados siguiendo un camino de tensiones, podemos evaluar el valor del coeficiente K_0 (coeficiente de empuje en reposo) para los suelos en estudio.

Para ello hemos calculado la variación de la relación de vacíos para la deformación vertical de la probeta " Δe_v " y la hemos comparado con la variación de vacíos total " Δe_t " experimentada por la muestra a lo largo del ensayo, para cada valor de la relación K aplicada.

En la gráfica de la figura 28 hemos representado el cociente entre la variación de vacíos vertical y la variación de vacíos total $\frac{\Delta e_v}{\Delta e_t}$ con los valores correspondientes a la relación de tensiones " K ".

Obviamente, el valor de K_0 coincidirá con la relación de tensiones K que genere un cociente $\frac{\Delta e_v}{\Delta e_t} = 1$ es decir que el cambio en la relación de vacíos vertical, coincida con el cambio total de la relación de vacíos de la muestra.

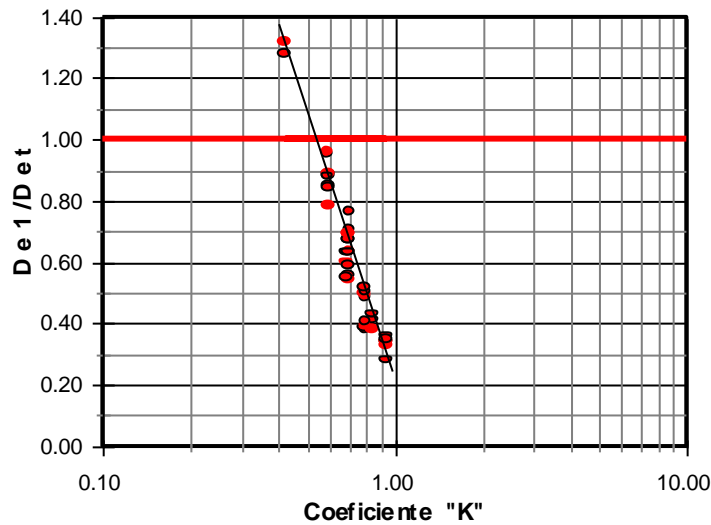


Figura N° 28: Coeficiente de empuje en reposo, calculado a partir de mediciones directas de ensayos triaxiales, ejecutados con distintas relaciones σ'_3/σ'_1

Se observa que la tendencia de estas gráficas, marca un valor ubicado en el entorno de $K_o = 0,55$ y que para valores de $K = 1$ que corresponde a una sollicitación hidrostática los valores de la relación entre deformaciones es del tipo:

$$\frac{\Delta ev}{\Delta et} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_v} = \frac{1}{3}$$

Paralelamente e este cálculo y con los parámetros deducidos en los ensayos ejecutados, podemos aplicar las deducciones teóricas analizadas precedentemente, utilizando la ecuación 15 con la solución de la ecuación 16 que nos da el valor de η para la condición de K_o en función de M , λ y κ .

$$K_o = \frac{3 - \eta}{3 + 2\eta} \tag{15}$$

$$\eta = \frac{1}{2} \sqrt{9 \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda}\right)^2 + 4M^2} - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{\kappa}{\lambda}\right) \tag{16}$$

O con la ecuación propuesta por M. Wood

$$\frac{A \cdot B}{3 \cdot C} \cdot \eta^3 - \eta^2 \cdot 2,86 \cdot \eta + 1 = 0 \tag{17}$$

En la que $A = (1 - v')$; $B = (1 - \Lambda)$; $C = (1 - 2 \cdot v')$

Supongamos entonces los siguientes valores para los parámetros a utilizar

$$M = 1; \lambda = 0,435; \kappa = 0,09$$

La solución de la ecuación 16 es:

$$\eta = 0,365$$

Con este valor podemos calcular en valor de K_o aplicando la ecuación 15

$$K_o = \frac{3 - 0,365}{3 + 2 \cdot 0,365} = 0,71$$

Resolviendo la ecuación 17 tendremos:

$$\eta = 0,342 \quad \text{y} \quad K_o = 0,72$$

Observamos que ambos valores son superiores al que encontramos al medir directamente el valor de K_o de los ensayos triaxiales y se verifica lo manifestado por Jiménez Salas en el sentido que esta metodología de cálculo por lo general, da como resultados valores mayores a los reales.

9.3.- CÁLCULO DE LA COHESIÓN NO DRENADA

A partir de los parámetros que hemos determinado, podemos ahora proceder al cálculo de la cohesión no drenada siguiendo los siguientes pasos:

a) Calcularemos la variación de la relación de vacíos en función del límite líquido y de la presión efectiva media, para distintas profundidades, utilizando la ecuación 18.

$$e = (1,40.W_L - 0,55) \cdot [2,75 - 1,25 \cdot \text{Log}(p') + 0,018 \cdot [\text{Log}(p')]^3] + (1,79.W_L + 0,065) \quad (18)$$

En la que p' es la presión efectiva media definida por

$$p' = \frac{1}{3} (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')$$

Teniendo la variación de e_o con el W_L y la presión efectiva media p' recordemos las gráficas $p' - q$ de la teoría del estado crítico (fig. 29) para poder obtener la ecuación que nos permita calcular la cohesión no drenada.

Cuando estamos haciendo un ensayo en condiciones de drenaje impedido, sobre una muestra de suelo normalmente consolidada y saturada, sabemos que no habrá cambio de volumen, por lo tanto:

$\Delta V = 0$ y en consecuencia también $\Delta e = 0$ y que conociendo el valor de e_o y de Γ podemos escribir la siguiente ecuación que obtenemos del análisis de la figura:

$$e_o = \Gamma - \lambda \cdot \ln(p_f')$$

De ésta ecuación podemos despejar el valor de la tensión desviante en la falla y obtener:

$$p_f' = \exp\left[\frac{\Gamma - e_o}{\lambda}\right] \quad q_f = M \cdot p_f' \quad q_f' = M \cdot \exp\left[\frac{\Gamma - e_o}{\lambda}\right]$$

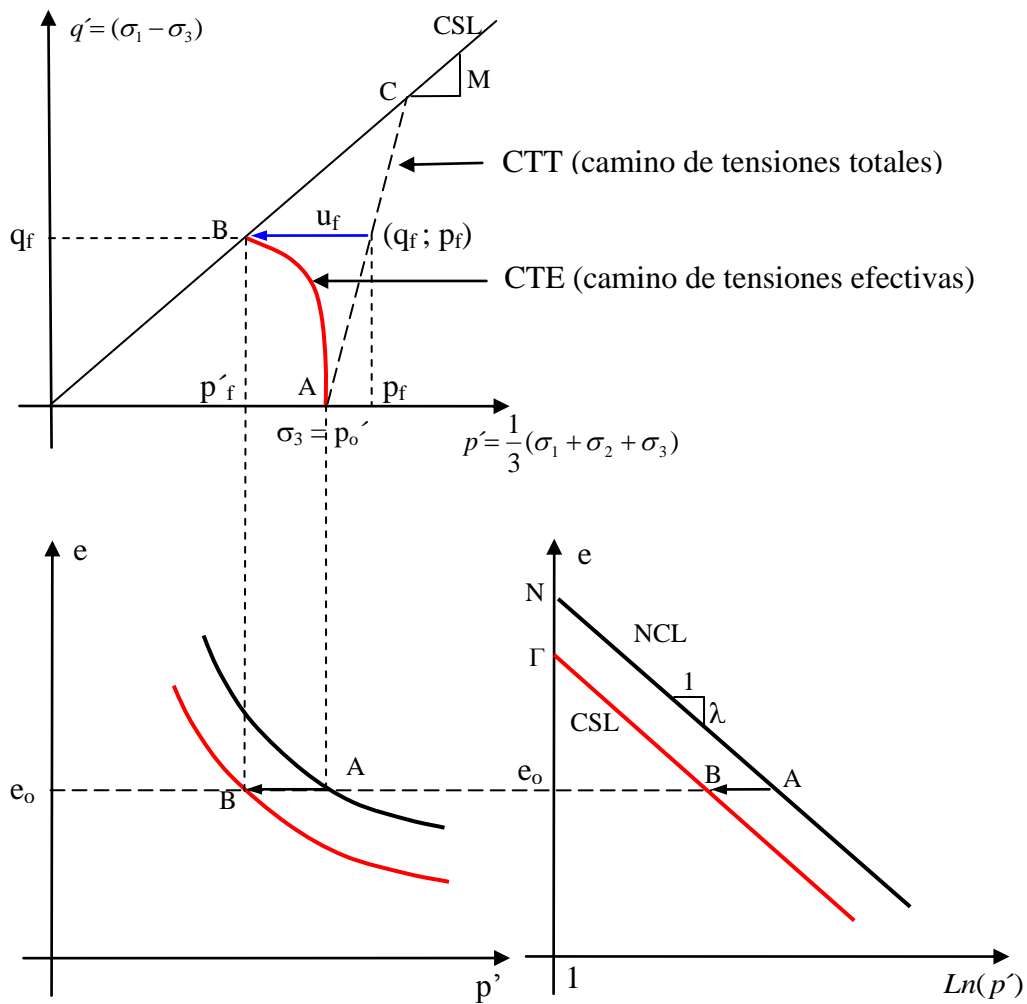


Figura N° 29: Estado crítico en un ensayo no drenado

Por lo tanto el valor de la cohesión no drenada para cada muestra analizada estará dada por la ecuación 19:

$$c_u = \frac{1}{2} \sigma_d = \frac{1}{2} q_f = \frac{1}{2} M \cdot \exp \left[\frac{\Gamma - e_o}{\lambda} \right] \quad (19)$$

Tomando ahora los parámetros medios de los ensayos ejecutados, tendremos

$$M = 1; \quad \Gamma = 4,00; \quad \lambda = 0,435; \quad W_L = 0,90; \quad \gamma' = 0,85 \text{ tn/m}^3; \quad \gamma_s = 2,75 \text{ tn/m}^3$$

Podemos hacer un ejercicio de cálculo en un perfil conformado por este tipo de suelos en un espesor de 20 m y considerando una variación de su límite líquido entre valores de 100 % y de 90 %.

Profundidad (m)	σ_v' KPa	p' KPa	e	$c_u(90\%)$ KPa	$c_u(100\%)$ KPa
2	16.66	11.77	3.07	10.07	4.21
4	33.32	23.55	2.77	17.89	8.37
6	49.98	35.32	2.60	24.78	12.37
8	66.64	47.09	2.49	31.08	16.21
10	83.30	58.87	2.40	36.93	19.93
12	99.96	70.64	2.32	42.42	23.53
14	116.62	82.41	2.26	47.62	27.03
16	133.28	94.18	2.21	52.58	30.43
18	149.94	105.96	2.17	57.32	33.74
20	166.60	117.73	2.13	61.87	36.97

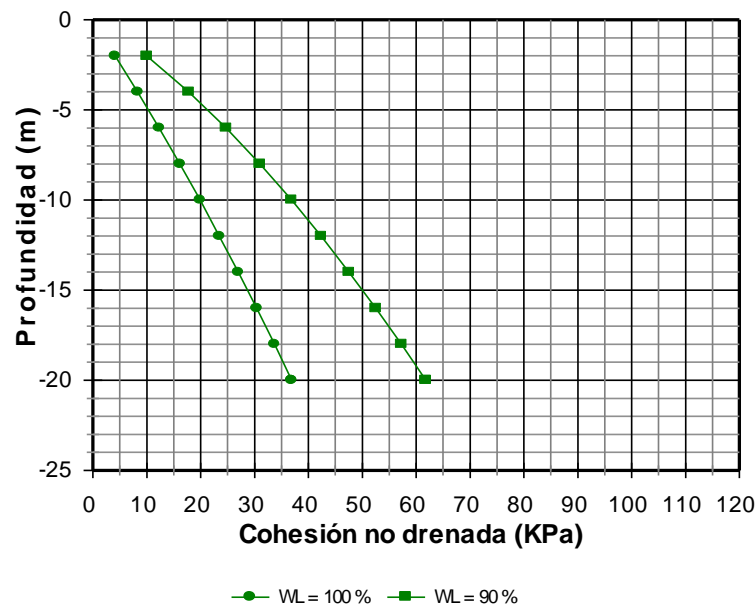


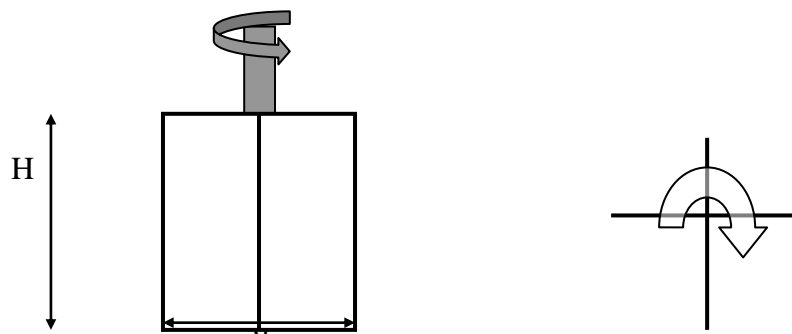
Figura N° 30: Valores de la cohesión no drenada calculada a partir de los parámetros del suelo

En los trabajos de campo que dieron origen a esta investigación también se ejecutaron ensayos in situ con la veleta de corte o de “Vane Test”. Los mismos han sido ejecutados con un equipo de accionamiento manual, marca GEONOR modelo H-10 donde el momento torsor se lee en forma directa en un dial con aguja de arrastre (figura N° 31) que permite obtener el valor máximo y el valor mínimo de la resistencia al corte del suelo ensayado.



Figura N° 31: Veleta de corte desplegada de 113 mm x 65 mm perteneciente a un equipo GEONOR modelo H-10

En estas determinaciones, el cálculo de la cohesión se obtuvo aplicando la siguiente fórmula:



$$C_u = \frac{T_{m\acute{a}x}}{\pi \times d^2 \times \left[\frac{H}{2} + 0,167 \times d \right]} \quad (20)$$

Como en el caso que estamos mencionando se utilizaron veletas de corte donde $H/d = 2$ la ecuación se reduce a la siguiente expresión:

$$C_u = 0,273 \times \frac{T_{m\acute{a}x}}{d^3} \quad (21)$$

Como en estos ensayos la velocidad angular de la veleta es, según norma, de 6°/minuto, se puede considerar que la velocidad de carga es suficientemente rápida, comparada con el coeficiente de permeabilidad del material ensayado, de tal manera que podemos asumir con seguridad que el ensayo se realiza sin drenaje, con lo cuál los parámetros obtenidos pueden ser asimilados a los logrados en un ensayo de corte no drenado (UU).



Figura N° 32: Molinete para la aplicación del momento torsor a la veleta de corte.

Los valores de la resistencia al corte del suelos se midieron en cuatro perforaciones de investigación, con determinaciones ejecutadas desde los –3,00 metros de profundidad hasta los –20,00 m dentro del manto arcilloso del Post Pampeano (Atalaya), los valores medidos se indican en el gráfico de la Figura N° 33, donde además se han representados los valores calculados de la cohesión aplicando las fórmulas 70 para valores del límite líquido “W_L” ubicados entre 90 % y 100%.

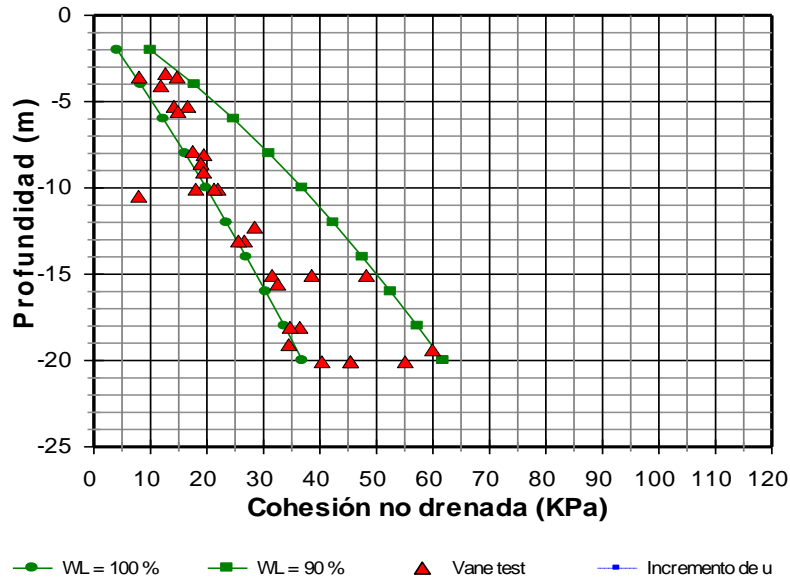


Figura N° 33: Resultados de la cohesión calculada con la Veleta de corte y calculado con los parámetros del suelo.

Finalmente debemos concluir en que los resultados presentados demuestran, claramente, que el manto estudiado no se encuentra en estado “Fluido” y que ésta presunción que persiste a través del tiempo entre algunos ingenieros geotécnicos de la región, se debe a la elevada sensibilidad (St) de estas arcillas, que hacen que los ensayos del SPT que se ejecuten sobre estos suelos, resulten con valores en todos los casos menores a la unidad.

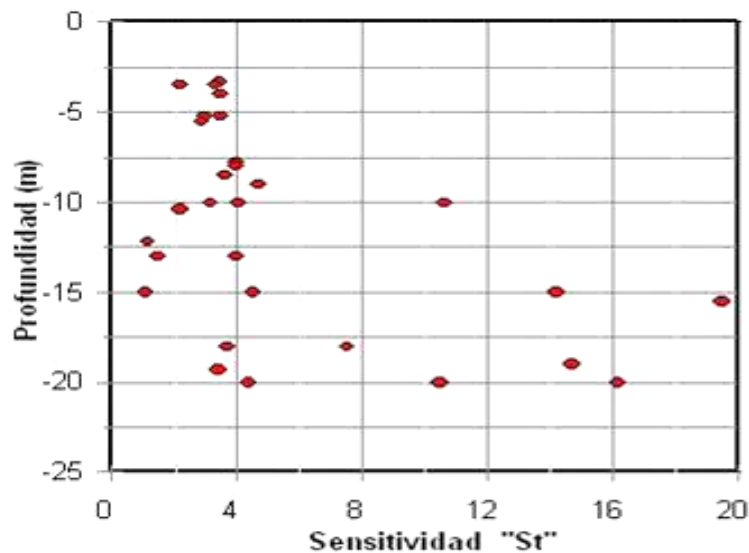


Figura N° 34: Resultados de la Sensibilidad medida en las arcillas blanda normalmente consolidada con la Veleta de Corte.

En la gráfica de la Figura N° 34, se representan los valores de “St” representado por el cociente entre la cohesión máxima medida y el valor de la cohesión residual también medida con el ensayo de la veleta de corte.

$$St = \frac{Cu_{m\acute{a}x.}}{Cu_{residual}} \quad (22)$$

6.- MODULOS DE DEFORMACIÓN

El objetivo final de todo programa de parametrización de materiales, es obtener relaciones que vinculen los valores de las tensiones con las deformaciones asociadas.

A tal efecto, en el presente trabajo hemos determinado a través de los ensayos de compresión triaxial, el módulo de deformación inicial “Ei”, siguiendo la siguiente metodología (Jambo, Núñez, etc)

Si consideramos que la curva tensión – deformación puede ser aproximada por una función hiperbólica, el valor del módulo de deformación inicial “Ei”, puede ser determinado mediante la ejecución de varios ensayos triaxiales en el laboratorio. Para ello tenemos que representar el ensayo poniendo en el eje de ordenadas los valores de la deformación específica dividida por la tensión desviante y en el eje de abscisa los valores de la deformación específica, tal como se observa en la figura 35

En la parte “b” de la figura, se observa que la representación tiene la forma de una recta cuya ecuación se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_d} = a + b\varepsilon \quad (23)$$

Donde $(\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_d$ (tensión desviante)

Cuando en esta ecuación tenemos una muy pequeña deformación ε , el término $b.\varepsilon$ tiende a cero y nos quedará:

$$\text{Para } \varepsilon \rightarrow 0 \text{ tendremos } \frac{\varepsilon}{\sigma_d} = a = \frac{1}{Ei}$$

Con lo cuál, la inversa de la ordenada al origen de los ensayos representados en la figura 35 (b) nos da el módulo de deformación inicial “Ei”

$$Ei = \frac{1}{a} \quad (24)$$

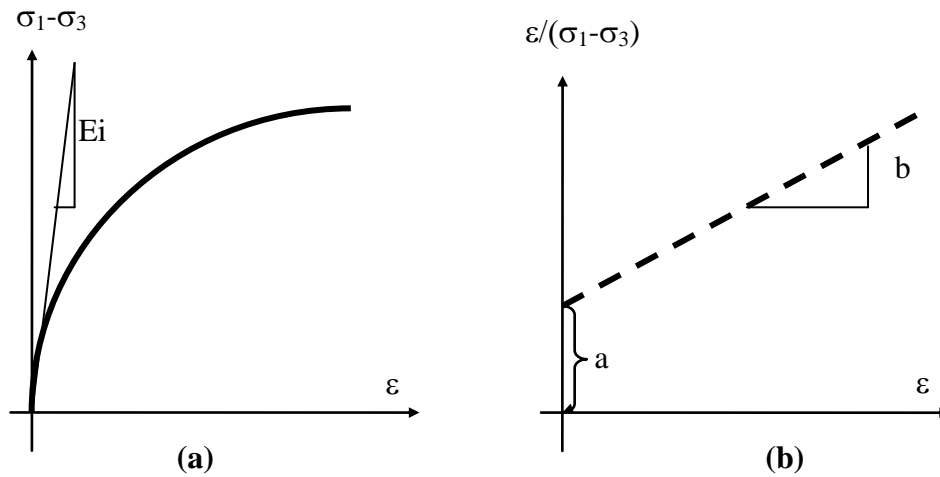


Figura N° 35: Representación de un ensayo triaxial de una arena

De la misma forma podemos decir que cuando se produce una gran deformación, la tensión desviante se aproxima al valor de la tensión última y el cociente a/ε tiende a cero con lo cuál tendremos:

Para $\varepsilon \rightarrow \infty$ tendremos que $\sigma_d \rightarrow \sigma_u$ y $\frac{1}{\sigma_u} = \frac{a}{\infty} + b$ de donde $b = \frac{1}{\sigma_u}$

El valor de la tensión desviante σ_u se corresponde con una deformación infinita, que no podremos obtener, pero si podemos suponer que la relación entre la tensión desviante en rotura σ_R y la tensión desviante última σ_u , queda expresada por una relación que llamaremos “Rf”, y que definimos como:

$$Rf = \frac{\sigma_d^R}{\sigma_d^u} \quad (25)$$

Con estos datos podemos expresar la ecuación anterior como:

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_d} = \frac{\varepsilon}{\sigma_d^u} + \frac{1}{Ei}$$

Que operando nos queda:

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_d} \left[1 - \frac{\sigma_d}{\sigma_d^u} \right] = \frac{1}{Ei}$$

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_d} \left[1 - \frac{\sigma_d}{\sigma_d^R} Rf \right] = \frac{1}{Ei} \quad (26)$$

Según se destaca en los gráficos de la Figura 36, y utilizando el gráfico que representa el cociente entre la deformación específica (ϵ) y la tensión desviante ($\sigma_1 - \sigma_3$), con la deformación específica (ϵ) tal como se detalla en el gráfico de la Figura 37, donde el módulo de deformación inicial se calcula como la inversa de la ordenada al origen.

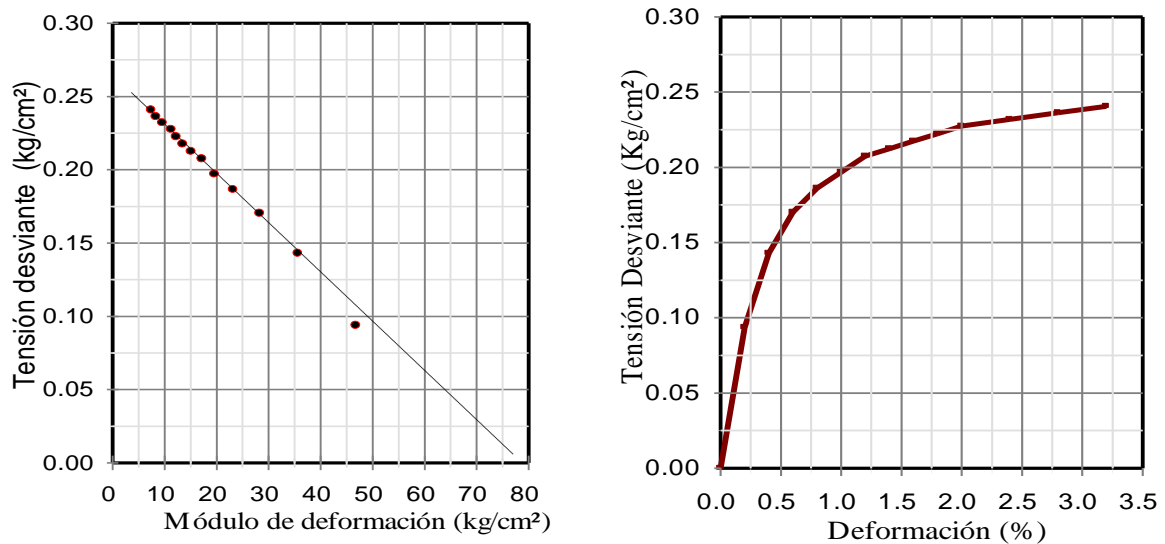


Figura N° 36: Cálculo del módulo de deformación inicial en ensayos de compresión triaxial.

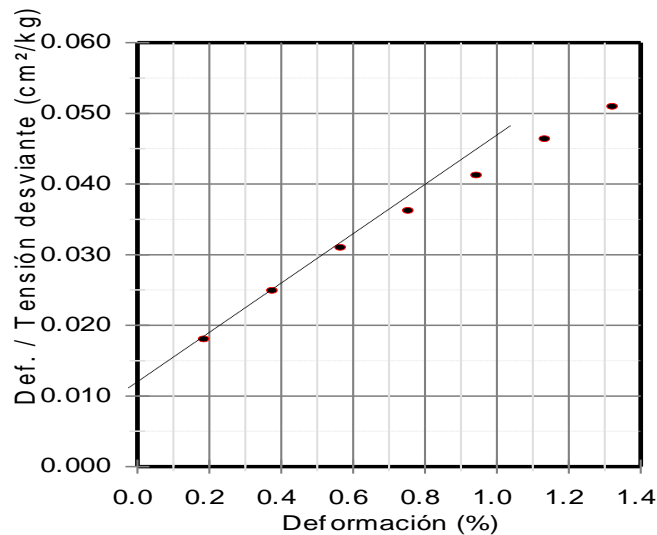


Figura N° 37: Determinación del módulo de deformación inicial "Ei"

Los resultados de las determinaciones efectuadas se graficaron en la Figura N° 38, donde representamos el valor del módulo inicial con la presión vertical de la tapada.

De este gráfico se obtiene una relación que vincula los valores más probables de estas dos variables y que se expresa con la siguiente ecuación:

$$E_i = 84.\sigma'_o + 2.200 \quad (\text{Kpa}) \quad (27)$$

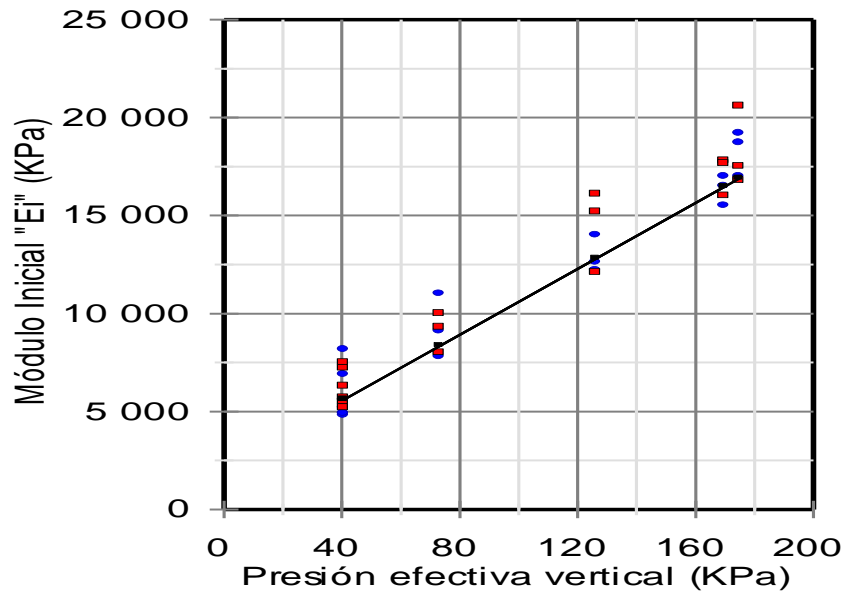


Figura N° 38: Módulo de deformación inicial para las arcillas del Post pampeano.

Vinculando los resultados obtenidos, podemos representar en un nuevo gráfico (Figura 39), los valores medios para la cohesión no drenada y para el módulo de deformación inicial

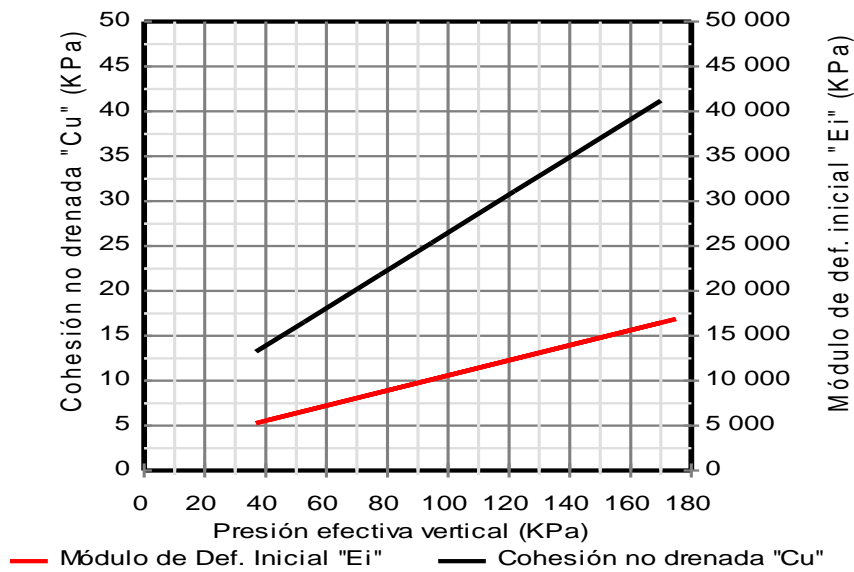


Figura N° 39 Módulo de deformación inicial y cohesión no drenada

En la figura 40 hemos representado los valores del módulo de deformación inicial en función de la cohesión no drenada que obtenida en los estudios efectuados frente a la Ciudad de Buenos Aires (Leoni) y los valores dados por el Ing. Sfriso en sus investigaciones ubicadas frente a la Ciudad de La Plata.

Según lo estipulado por este último, la correlación surgida de sus estudios, se corresponde con la siguiente ecuación:

$$E_i = 580 \cdot c_u$$

Mientras que para el trabajo que se presenta en esta oportunidad, la correlación hallada es:

$$E_i = 400 \cdot c_u$$

Finalmente de todos los resultados obtenidos surge como valor medio la siguiente correlación:

$$E_i = 490 \cdot c_u \quad (28)$$

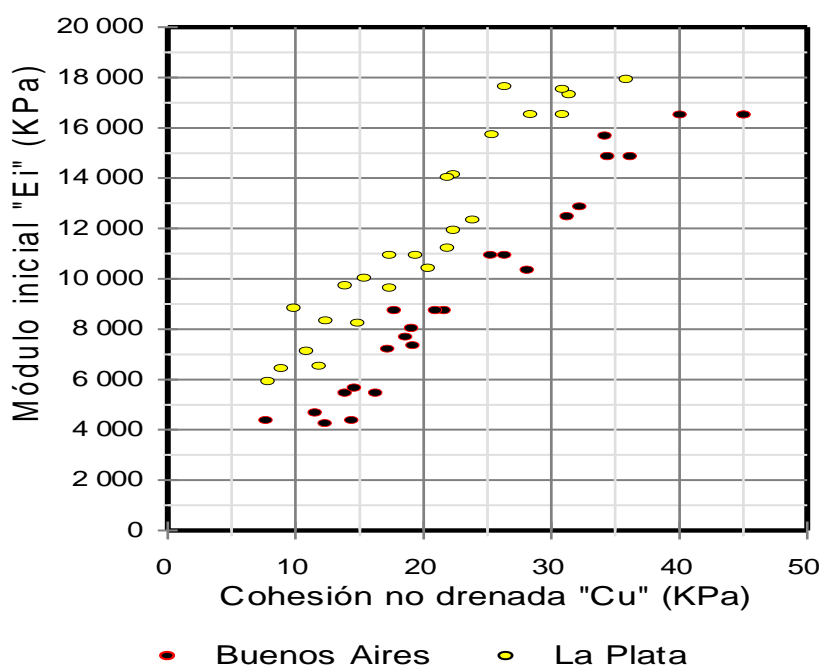


Figura N° 40: Módulo de deformación inicial en función del valor de la cohesión no drenada "Cu" para los ensayos realizados en La Plata y Bs. As..

Se aprecia de la gráfica que los valores extremos del módulo inicial "Ei" con relación a la resistencia a compresión simple "qu" varía entre los siguientes valores:

$$190 q_u < E_i < 330 q_u$$

7.- ENSAYOS PRESIOMETRICOS:

Se ejecutaron también en una perforación ensayos con la sonda Presiométrica de Menard de triple celda y de 63 mm de diámetro externo, dicho sondeo se ejecutó desde la plataforma de trabajo descrita anteriormente, sobre el Río de La Plata y en suelos del Post Pampeano de 26 m de espesor con arenas de la Fm. Puelche en su parte inferior.

Los resultados son los que se muestran en la Figura N° 41, en esta figura se representan los valores de la Presión Límite (P_L) en función de la profundidad.

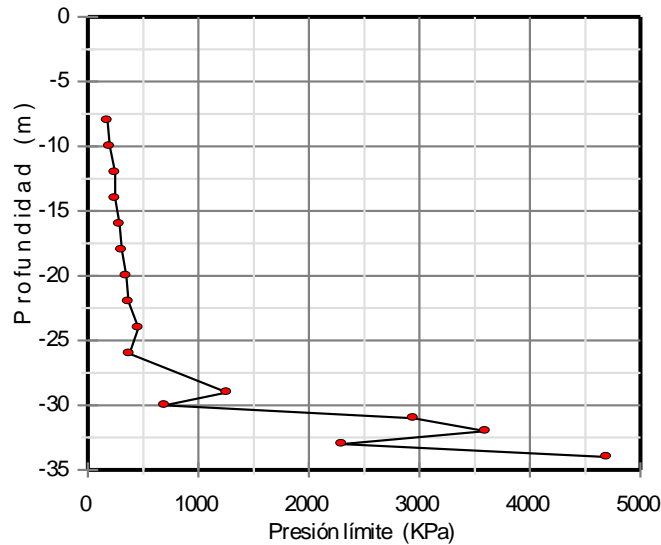


Figura N° 41: Ensayos con la sonda de Menard, resultados de la Presión Límite con la profundidad.

De los resultados de la presión límite medida, se puede obtener la cohesión no drenada aplicando la siguiente correlación:

$$c_u = \frac{P_L}{14} + 4 \quad (\text{KPa}) \quad (29)$$

Que si la representamos, como se observa en el gráfico de la Figura 42, en función de la presión efectiva vertical σ_v' , se obtiene una correlación similar a la obtenida con la veleta de corte, donde se observa que la cohesión tiene una buena correlación con la siguiente ecuación:

$$c_u = 0,21.\sigma_v + 5,5\text{KPa} \quad (30)$$

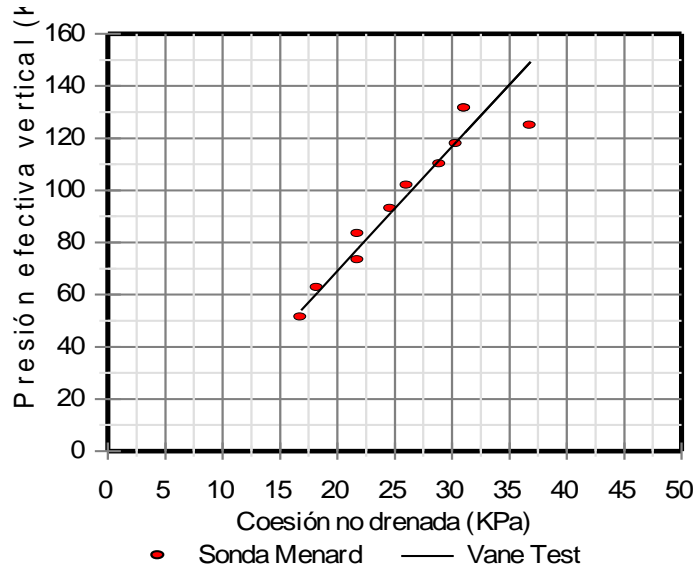


Figura N° 42: Valores de la cohesión no drenada en función de la presión de la tapada deducida de los ensayos presiométricos de Menard.

Como conclusión, en la Figura N° 43 hemos representado punto a punto, los valores de la presión aplicada a la celda y la deformación radial específica de la misma, para tres ensayos ejecutados a las profundidades de 8 m, 10 m y 12 m.

Estos resultados obtenidos in situ, los podemos comparar con los resultados teóricos que podemos determinar con la parametrización obtenida en este mismo trabajo.

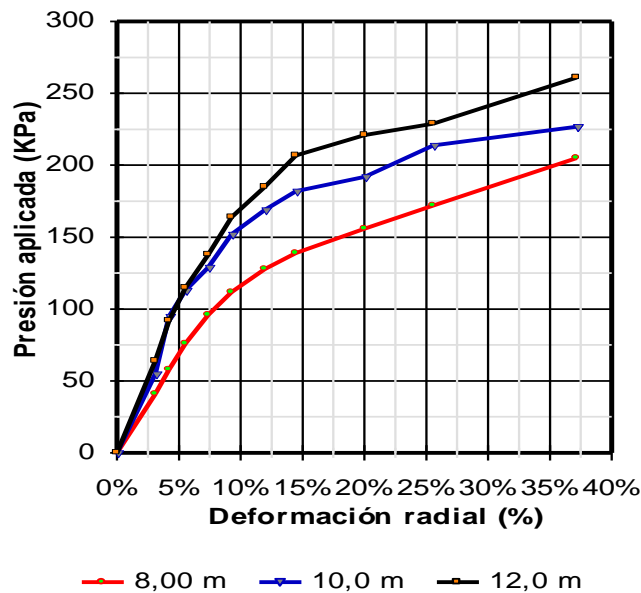


Figura N° 43: Tensión – Deformación, determinada con una sonda Menard a profundidades variables

Para ello calculemos los siguientes parámetros, cuyos valores se indican en el cuadro adjunto.

Pres. tapada: $\sigma_o' = (7 + 0,15 \times z/2) z$

Cohesión: $c_u = \sigma_o' 0,21 + 5,5$

Módulo Inicial: $Ei = 200 \times 2 \times c_u$

Tensión de Rotura $\sigma_R = N_c \times c_u + q \times N_q$

Prof. m	Presión Tapada Kpa	Cohesión KPa	Ei KPa	Tensión Rotura KPa
8	60,8	18,3	7.307	155
10	77,5	21,8	8.710	189
12	94,8	25,4	10.163	225

Con estos valores de la tensión de rotura podemos calcular el incremento de las tensiones en función de las deformaciones a través de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon \cdot Ei} + \frac{dR}{\sigma_R} \right)}$$

Donde al parámetro $d_R = \sigma_R/\sigma_u$ le podemos adjudicar el valor de 0,90 y obtenemos las curvas que se muestran en la Figura N° 44 que comparadas con las de la Figura N° 43 presentan una concordancia más que aceptable.

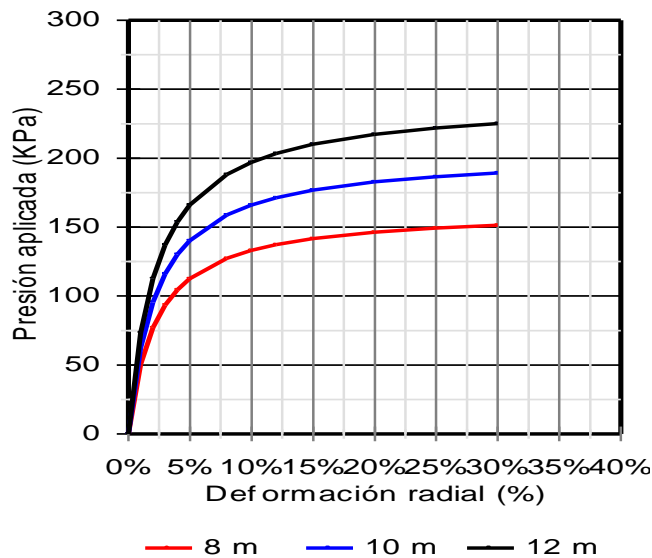


Figura N° 44: Tensión – Deformación, determinada en forma teórica para distintas profundidades en la Formación Post Pampeano

8.- SUELOS DE LA Fm. PLAYA HONDA

Los suelos de la Fm. Playa Honda por su origen fluvial, resultan ser muy heterogéneos, por lo general están conformados por limos de baja plasticidad con un contenido importante de arenas finas, o directamente por arenas finas con un porcentaje importante de finos limosos.

En todos los casos que se trate de suelos finos los mismos tienen una compacidad correspondiente a la de los suelos “muy blandos” a “blandos” son normalmente consolidados, con valores del SPT ejecutados con una energía del 90 % de la teórica que no superan los 5 golpes.

Cuando se trata de suelos arenosos en todos los casos son arenas “muy sueltas” a “seltas” con porcentajes de finos elevados, del tipo “SM” y con valores del SPT, ejecutados con una energía del 90 % de la teórica menores a 10 golpes.

9.- CONCLUSIONES

En la Tabla que se adjunta a continuación, hemos resumido algunos parámetros de importancia correspondientes a las dos formaciones del Post Pampeano y que pueden ser de aplicación directa para el proyecto que nos ocupa.

Lógicamente los parámetros de la Fm. “Playa Honda” son de aplicación selectiva y de mayor complicación por la variabilidad que presentan los suelos que la conforman, mientras que los de la Fm. Atalaya son de aplicación más directa.

Formación	Parámetro	Descripción
Playa Honda (Horizonte de formación Fluvial)	CU	CL, ML y SM
	IP (%)	0 – 20 IP = 0,72 (w _L -14,7)
	LL (%)	20 – 40
	w _n (%)	18 – 50
	γ _d (kN/m ³)	11,5 – 14,5
	γ _s (kN/m ³)	25 - 26
	k (cm/s)	10 ⁻³ – 10 ⁻⁶
	N (SPT)	N < 10
	s _u (kPa)	20 – 40
	φ' (°)	28 -33
	E _u (kPa)	~ 2000
	C _c	0,20 – 0,30
	V _s (m/s)	150 – 200 V _s = 40 (σ _o) ^{0,35}
	ρ (Ohm-m)	12 – 20
Atalaya (Horizonte de formación Marina)	CU	CH y MH
	IP (%)	50 – 70 IP = 0,72 (w _L -14,7)
	LL (%)	60 – 110
	w _n (%)	80 – 90 (generalmente w _n ≥ LL)
	γ' (kN/m ³)	γ' = 7 + 0,15.z
	γ _s (kN/m ³)	27 - 28
	k (cm/s)	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁸
	N (SPT)	N < 5
	s _u (kPa)	10 – 35 S _u = 1,82 z + 3,91
	φ' (°)	22
	E _u (kPa)	1500 – 3000 E _u = 490 C _u
	C _c	0.45 - 1,10 C _c = 0,009 (w _L – 10) C _c = 0,38 e _o – 0,15)
	V _s (m/s)	100 – 150 V _s = 24 (σ _o) ^{0,40} ; σ _o (kPa)
	ρ (Ohm-m)	1.2 – 3