



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**CALIBRACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA OBTENIDA A PARTIR DE
ENSAYOS CPT_u Y DMT EN UN SUELO FINO CARACTERÍSTICO DE CONCEPCIÓN, REGIÓN
DEL BIOBÍO**

**POR
Luca Antonio Piano Muñoz**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al
título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Mario Valenzuela Oportus

Profesional supervisor
Ignacio Ebensperger Beckermeyer

Abril 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Luca Antonio Piano Muñoz

© 2025 Luca Antonio Piano Muñoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia Marco, Erika, Rafael y Franco los cuales me han entregado amor y cariño durante toda mi formación, en donde todos mis logros han sido fruto de su apoyo. Mi tita con su incondicional felicidad al vernos, y mi nonna que me contagio con su alegría. A la Maca y mis amigos que han estado conmigo dándome animo a seguir adelante y lograr mis objetivos. Los quiero mucho a todos.

Además, nombrar a los hermanos Ebensperger que me recibieron con los brazos abiertos, haciéndome sentir uno más de su familia. Agradezco su apoyo, las conversaciones, las risas y los buenos momentos que tuve por formar parte de su equipo como practicante y memorista. Más que como jefes, los considero mis amigos. Agradezco haberlos conocido.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a EMPRO Ltda por facilitar sus instalaciones y equipos para el desarrollo total de la Memoria de Titulo y a MSTD Ingeniería, por dar a disposición su equipo Triaxial. He de destacar el rol de Eduardo Ebensperger e Ignacio Ebensperger por su asesoría en los diferentes ensayos, y su gran disposición. Agradecer a mi profesor patrocinante Mario Valenzuela por guiarme a lo largo del trabajo, y a mi comisión Daniella Escribano y Rodrigo Silva. Muchas gracias a todos.

RESUMEN

La caracterización de suelos finos y cohesivos tradicionalmente requieren programas de ensayos que incluyen pruebas de laboratorio para determinar la resistencia al corte no drenada S_u , preponderantemente ensayo Triaxiales no drenado UU y CIU. Sin embargo, gracias a la incorporación de nuevos métodos de prospección, es posible determinar la resistencia al corte no drenado a partir de ensayos practicados directamente insitu. Para mejorar la precisión de estas expresiones, la literatura especializada recomienda realizar calibraciones para una mejor caracterización mecánica de depósitos de suelo fino característicos de una zona en particular.

Este estudio tuvo como objetivo calibrar el parámetro N_{kt} del ensayo CPTu y el factor de modificación Δ para el ensayo DMT, utilizando como referencia los resultados de ensayos triaxiales UU en un limo característico del subsuelo de Concepción. El limo estudiado corresponde a depositaciones aluviales y coluvio de suelos residuales de la Formación Cosmito y se clasifica como limo de baja compresibilidad (ML) con un índice de plasticidad medio de 7.

Al comparar los resultados de tres ensayos triaxiales realizados a diferentes cotas con los ensayos in situ, se encontró que, para el ensayo CPTu, la variabilidad media fue de $-9,32 \pm 0,35\%$ utilizando un valor de N_{kt} igual a 14. Con base en estos resultados, se determinó un factor N_{kt} de 12,7, lo que reduce la variabilidad media a $-0,05 \pm 0,36\%$ para la estimación de la resistencia al corte no drenado en suelos finos de la zona evaluada.

En cuanto al ensayo DMT, se obtuvo una variabilidad media de $-8,15 \pm 1,25\%$ en comparación con los resultados de laboratorio. Se determinó un factor de modificación Δ igual a 1,089, que ajusta la variabilidad media a $-0,02 \pm 1,37\%$.

Los resultados de este estudio contribuyen a mejorar la confiabilidad de los métodos in situ evaluados, permitiendo una estimación más precisa de la resistencia al corte no drenado en suelos cohesivos presentes en la zona evaluada. Sin embargo, dada la baja cantidad de ensayos que se disponen, no se puede asegurar que estos sean válidos para toda la zona de Concepción. Por lo tanto, se recomienda continuar con programas de ensayos destinados a la calibración de estos métodos de prospección insitu, como el CPTu y/o DMT.

ABSTRACT

The characterization of fine and cohesive soils traditionally requires testing programs that include laboratory tests to determine the undrained shear strength S_u , predominantly using undrained triaxial tests (UU and CIU). However, with the incorporation of new prospecting methods, undrained shear strength can now be determined based on in-situ tests. To improve the accuracy of these estimates, specialized literature recommends performing calibrations for better mechanical characterization of fine soil deposits typical of a specific region.

The objective of this study was to calibrate the Nkt parameter for the CPTu test and the incorporation of a factor Δ for the DMT test, using the results of undrained triaxial UU tests as a reference, on a silt typical of the subsurface of Concepción. The studied silt corresponds to alluvial and colluvial deposits of residual soils from the Cosmito Formation and is classified as low-compressibility silt (ML) with a plasticity index of 7.

When comparing the results of three triaxial tests conducted at different depths with in situ tests, it was found that, for the CPTu test, the average variability was $-9.32 \pm 0.35\%$ using an Nkt value of 14. Based on these results, an Nkt factor of 12.7 was determined, which reduced the average variability to $-0.05 \pm 0.36\%$ for the estimation of undrained shear strength in fine soils from the evaluated area.

Regarding the DMT test, an average variability of $-8.15 \pm 1.25\%$ was obtained in comparison with laboratory results. A correction factor Δ equal to 1.089 was determined, which adjusted the average variability to $-0.02 \pm 1.37\%$.

The results of this study contributed to improving the reliability of the evaluated in situ methods, allowing for a more accurate estimation of undrained shear strength in the cohesive soils present in the studied area. However, due to the limited number of available tests, it could not be confirmed that these findings are valid for the entire Concepción area. Therefore, it was recommended to continue testing programs aimed at the calibration of these in situ exploration methods, such as CPTu and/or DMT.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE ECUACIONES	vii
CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.-Motivación.....	1
1.2.- Objetivos.....	2
1.2.1.- Objetivos generales.....	2
1.2.2.- Objetivos Específicos	2
1.3.- Alcance del estudio.....	3
1.4.- Plan de trabajo	3
1.7.- Principales resultados	4
1.8.- Organización de la memoria de título.....	4
CAPÍTULO 2 : ANTECEDENTES ACADÉMICOS.....	5
2.1.- Introducción.....	5
2.2.- Investigaciones previas.....	5
2.3.- Conclusiones.....	6
CAPÍTULO 3 : ANTECEDENTES NORMATIVOS Y LITERATURA ESPECIALIZADA	7
3.1.- Introducción.....	7
3.2.- Resistencia al Corte No Drenado S_u	7
3.3.- Extracción de muestras por medio muestreador de pared delgada o tubo Shelby	8
3.4.- Caracterización de Muestras en Laboratorio	10
3.5.- Ensayo Triaxial UU	10
3.6.- Ensayo de Penetración de Cono CPTu	14

3.7.- Ensayo de Dilatómetro Plano DMT	19
3.8.- Conclusiones.....	24
CAPÍTULO 4 : ANÁLISIS DE ANTECEDENTES DE TERRENO.....	25
4.1.- Introducción.....	25
4.2.- Ubicación.....	25
4.3.- Antecedentes Geológicos	26
4.4.- Antecedentes Geotécnicos.....	29
4.5.- Equipos Utilizados.....	30
4.5.1.- Equipo de Sondaje por medio de Tubos Shelby	30
4.5.2.- Equipo Triaxial	30
4.5.3.- Equipo de Penetración de Cono CPTu y DMT	31
4.5.5.- Equipo para caracterización de suelo	32
4.6.- Conclusiones.....	32
CAPÍTULO 5 : RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO E IN-SITU	33
5.1.- Introducción.....	33
5.2.- Resultados.....	33
5.2.1.- Resultados caracterización de muestras	33
5.2.2.- Resultados ensayos triaxiales UU.....	34
5.2.3.- Resultados ensayo CPTu	38
5.2.3.- Resultados ensayo DMT.....	39
5.3.- Conclusiones.....	40
CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA S_u	41
6.1.- Introducción.....	41
6.2.- Análisis	41
6.2.1.- Análisis de resistencia al corte no drenado peak obtenida a partir de ensayo CPTu.....	42
6.2.2.- Análisis de resistencia al corte no drenado peak obtenida a partir de ensayo DMT	44
6.3.- Conclusiones.....	46

CAPÍTULO 7 : CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.....	47
GLOSARIO	49
REFERENCIAS.....	51
ANEXOS	54
ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible.....	54
ANEXO 3.4: PROCEDIMIENTOS CARACTERIZACION DE MUESTRAS	55
Anexo 3.4.1.- Determinación curva granulométrica.....	55
Anexo 3.4.2.- Determinación humedad natural	57
Anexo 3.4.3.- Determinación de la densidad de partículas sólidas	60
Anexo 3.4.4.- Determinación Limites de Consistencia	62
ANEXO 5.2: REPORTE ENSAYO CPTu	69
ANEXO 5.3: REPORTE ENSAYO DMT.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Listado de normas chilenas para caracterización.....	10
Tabla 4.1 Coordenadas Sondaje UTM WGS84 Huso 18S	29
Tabla 5.1 Caracterización de muestras	33
Tabla 5.2 Resistencia Su de muestras extraídas a partir de Triaxial UU	34
Tabla 5.3 Resultados Su ensayo CPTu	38
Tabla 5.4 Resultados Su ensayo DMT	39
Tabla 6.1 Análisis parámetro Su a partir de ensayo CPTu	42
Tabla 6.2 Análisis parámetro Su a partir de ensayo CPTu modificado	44
Tabla 6.3 Análisis parámetro Su a partir de ensayo DMT	44
Tabla 6.4 Análisis parámetro Su a partir de ensayo DMT modificado	45
Tabla A.1 Dimensiones tamices NCh 1022	56
Tabla A.2 Tamaños mínimos de muestra para determinación de la humedad	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Círculos de Mohr para esfuerzos totales y envolvente de falla obtenidos a partir de pruebas triaxiales UU.....	7
Figura 3.2 (a) Sistema de carga ensayo Triaxial (b) Aparatos principales ensayo Triaxial	11
Figura 3.3 (a) Cono mecánico, Holanda (b) Cono de Begemann con “fricción sleeve”	15
Figura 3.4 (a) Unidad de CPT anclada al suelo; (b) CPT montado en Camión de 25T	16
Figura 3.5 Dilatómetro Plano - Frente y Costado	20
Figura 4.1 Delimitación Área de Estudio	25
Figura 4.2 Mapa Geológico del Área de Estudio.....	28
Figura 4.3 Mapa Geológico del Área de Estudio.....	28
Figura 4.4 Ubicación Sondaje realizado	29
Figura 4.5 Imagen de terreno-Equipo de Sondaje por medio de Tubo Shelby.....	30
Figura 4.6 Equipo triaxial Tritech50 W/F de MSTD ingeniería.....	31
Figura 4.7 Equipo CPTu / DMT elaborado por EMPRO Ltda.....	31
Figura 4.8 (a) Cono CPTu 10cm ² ;(b) Paleta DMT	32
Figura 5.1 Curva Esfuerzo - Deformación Muestra N°1 (Cota: 11,6 m).....	35
Figura 5.2 Muestra N°1 (Cota: 11,6m) Ensayo Triaxial UU.....	35
Figura 5.3 Curva Esfuerzo - Deformación Muestra N°2 (Cota: 12,6m).....	36
Figura 5.4 Muestra N°2 (Cota: 12,6) Ensayo Triaxial UU	36
Figura 5.5 Curva Esfuerzo - Deformación Muestra N°3 (Cota: 15,6 m).....	37
Figura 5.6 Muestra N°2 (Cota: 15,6m) Ensayo Triaxial UU.....	37
Figura 5.7 Perfil de Resistencia Su - CPTu	38
Figura 5.8 Perfil de Resistencia Su - DMT.....	39
Figura 6.1 Resistencia al corte no drenado, Su, CPTu (Nkt=14) v/s CPTu (Nkt=12,7).....	43
Figura 6.2 Resistencia al corte no drenado, Su, DMT v/s DMT Corregido	45
Figura A.1 Aparato de Limite Liquido NCh1517.....	63
Figura A.2 Sección de la ranura en la pasta de suelo antes y después del ensayo.....	65

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1 Parámetro B de Skempton	13
Ecuación 3.2 Resistencia al corte no drenado peak a partir de ensayo triaxial UU	14
Ecuación 3.3 Resistencia al corte no drenado peak a partir de ensayo CPTu	19
Ecuación 3.4 Resistencia al corte no drenado peak a partir de ensayo DMT	23
Ecuación 3.5 Índice de esfuerzo horizontal ensayo DMT	23
Ecuación 7.1 Determinación de Media aritmética	41
Ecuación 7.2 Determinación de Desviación estándar para una población	41
Ecuación 7.3 Porcentaje de variabilidad Su de terreno respecto a triaxial UU.....	42
Ecuación A.1 Determinación de la humedad natural	59
Ecuación A.2 Determinación densidad de partículas sólidas	62
Ecuación A.3 Determinación índice de plasticidad	68

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN

1.1.-Motivación

La caracterización adecuada del comportamiento geotécnico de los suelos es fundamental para la ingeniería civil, particularmente en lo que respecta al diseño de obras. En este contexto, la resistencia al corte no drenado es uno de los parámetros más relevantes para evaluar la capacidad de los suelos de comportamiento cohesivo para soportar estas cargas sin sufrir fallas inesperadas. Tradicionalmente, la resistencia al corte no drenado se determina mediante ensayos de laboratorio, como es el caso de los ensayos triaxiales, los cuales permiten obtener una medición precisa de esta propiedad. Sin embargo, para lograr la precisión que estos métodos permiten, es fundamental que se manejen de manera cuidadosa las muestras, las cuales deben ser extraídas con la mínima alteración posible. Con el fin de disminuir los factores que afecten la representatividad de los resultados a la situación en terreno, diferentes investigadores han desarrollado métodos de prospección que determinan diferentes características del subsuelo, como es el caso del ensayo CPTu y DMT.

El ensayo CPTu (*Cone Penetration Test with pore pressure measurement*) y el DMT (*Dilatometer Test*) han emergido como técnicas ampliamente utilizadas en la práctica geotécnica debido a su capacidad para proporcionar información rápida y en tiempo real sobre las propiedades del suelo a distintas profundidades. Sin embargo, la relación entre las mediciones obtenidas a través de estos ensayos y la resistencia al corte no drenado no siempre es directa ni precisa, especialmente cuando se aplican en suelos con características particulares o cuando se busca una calibración más específica a condiciones locales.

Este estudio tiene como objetivo fundamental calibrar las expresiones empíricas utilizadas para estimar la resistencia al corte no drenado "Peak" (resistencia máxima) a partir de los datos obtenidos en ensayos CPTu y DMT, ajustándolas a los valores obtenidos de ensayos triaxiales realizados sobre muestras de un suelo local presentes en la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío. La selección de esta región responde a la necesidad de comprender el comportamiento geotécnico de suelos de origen local y la posibilidad de mejorar la aplicabilidad de estos métodos para suelos con características geotécnicas similares a las presentadas en el trabajo llevado a cabo.

El ajuste y calibración de las fórmulas empíricas permitirá no solo obtener una estimación más precisa de la resistencia al corte no drenado en suelos locales, sino también mejorar la eficiencia y confiabilidad de los estudios geotécnicos realizados a través de técnicas de penetración, reduciendo tiempos y costos en proyectos de ingeniería. Al mismo tiempo, esta investigación busca aportar una base más sólida y adaptada al contexto local para la interpretación de los resultados de los ensayos CPTu y DMT, contribuyendo al desarrollo de metodologías más precisas para el diseño de obras de infraestructura en la región.

En definitiva, el presente trabajo busca contribuir al conocimiento local mejorando las expresiones empíricas que correlacionan los resultados de los ensayos in situ (CPTu y DMT) con la resistencia al corte no drenado obtenida a partir de ensayos de laboratorio (Triaxial UU), ajustándolas a las condiciones específicas determinadas del suelo local. Esta mejora permitirá optimizar las prácticas de la ingeniería geotécnica, lo cual redundará en una optimización de recursos al momento de explorar y determinar las propiedades de los terrenos de obras civiles en la zona de Concepción, Chile.

1.2.- Objetivos

1.2.1.- Objetivos generales

Calibrar localmente expresiones existentes para la estimación de la resistencia al corte no drenado obtenidas a partir de los ensayos CPTu y DMT, utilizando como referencia los valores medidos en ensayos triaxiales UU realizados en laboratorio sobre muestras inalteradas extraídas con muestreador Shelby, de suelo fino normalmente consolidado de la Formación Cosmito.

1.2.2.- Objetivos Específicos

- Caracterizar muestras extraídas de terreno según propiedades geotécnicas.
- Ejecutar e interpretar ensayos triaxiales UU.
- Determinar el porcentaje de variabilidad de la resistencia al corte no drenado peak estimada a partir de correlaciones existentes para el ensayo CPTu, en comparación con la obtenida mediante ensayos triaxiales UU.

- Determinar el porcentaje de variabilidad de la resistencia al corte no drenado peak estimada a partir de correlaciones existentes para el ensayo DMT, en comparación con la obtenida mediante ensayos triaxiales UU.
- Determinar el factor N_{kt} óptimo para la estimación de la resistencia al corte no drenado peak a partir de ensayos CPTu en suelo fino perteneciente a la Formación Cosmito.
- Determinar un factor de corrección para la estimación de la resistencia al corte no drenado peak a partir de ensayos DMT en suelo fino perteneciente a la Formación Cosmito.

1.3.- Alcance del estudio

Este estudio se limita a calibrar localmente expresiones existentes para la estimación de la resistencia al corte no drenado obtenidas a partir de los ensayos CPTu y DMT, utilizando como referencia los valores medidos en ensayos triaxiales UU realizados en laboratorio sobre muestras inalteradas extraídas con muestreador Shelby, de suelos finos pertenecientes a la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío.

1.4.- Plan de trabajo

El plan de trabajo se dividió en ocho etapas: (i) revisión de normativas nacionales e internacionales vigentes a la fecha, guías de diseño, y trabajos de investigación; (ii) estudio de antecedentes geológicos de la Formación Cosmito, en Concepción, Región del Biobío; (iii) programación y supervisión de la exploración geotécnica del lugar de interés; (iv) caracterización del suelo a partir de ensayos de laboratorio; (v) determinación de la resistencia al corte no drenado peak a partir de ensayos triaxiales no consolidados no drenados de muestras inalteradas extraídas con muestreadores de pared delgada; (vi) estimación de resistencia al corte no drenado peak a partir de ensayos en terreno CPTu y DMT (vii) análisis de variabilidad en la estimación in-situ en relación a valores obtenidos a partir de los ensayos triaxiales respecto a la resistencia al corte no drenado peak, utilizando medidas de tendencia central; (viii) calibración local de expresiones utilizadas en la estimación de la resistencia al corte no drenado obtenida a partir de los ensayos in-situ.

1.7.- Principales resultados

Tomando en consideración los resultados obtenidos a partir de ensayos Triaxiales UU, se obtuvo un $-9,32 \pm 0,42\%$ de variabilidad para el ensayo CPTu al estimar la resistencia al corte no drenado peak de suelos finos normalmente consolidados presentes en la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío, utilizando las expresiones y factores recomendados por los especialistas. De la misma manera, para el ensayo DMT se obtuvo un factor de variabilidad igual a $-8,150 \pm 1,25\%$. Es por ello, que para el ensayo CPTu se recomienda utilizar un factor Nkt igual a 12,7 al estimar la resistencia al corte no drenado peak de suelos finos normalmente consolidados presentes en la Formación Cosmito, y un factor de corrección de 1,089 para el ensayo DMT

1.8.- Organización de la memoria de título

El informe de memoria de título se estructura en ocho capítulos. El Capítulo 2 presenta una revisión bibliográfica de trabajos similares previamente realizados, y relevancia del estudio llevado a cabo. El Capítulo 3 define y describe los conceptos primordiales del trabajo realizado, junto a los ensayos que serán abordados en él. El Capítulo 4 presenta los antecedentes geológicos y geotécnicos del lugar de interés, además de mostrar los equipos utilizados en la exploración geotécnica y ensayos de laboratorio. El Capítulo 5 muestra los resultados de caracterización geotécnica de las tres muestras de estudio. El Capítulo 6 muestra la resistencia al corte no drenado peak obtenida a partir de los tres tipos de ensayos llevados a cabo. En el Capítulo 7 se realiza un análisis comparativo y la determinación de los factores de corrección locales. Por último, en el Capítulo 8 se muestran las conclusiones y comentarios finales del trabajo.

CAPÍTULO 2 : ANTECEDENTES ACADÉMICOS

2.1.- Introducción

En este capítulo se presentan los estudios previos realizados en relación a la calibración de la resistencia al corte no drenado peak de un suelo cohesivo obtenidos a partir de ensayos CPTu y DMT, en donde se destacan algunos de los avances más relevantes y los principales hallazgos en el campo. A partir de esta revisión, se identifican diversas recomendaciones de los especialistas del campo, justificando el presente estudio.

2.2.- Investigaciones previas

Históricamente, ha existido la necesidad en determinar la resistencia al corte no drenado peak (S_u) de suelos finos, dado que este parámetro es fundamental al momento de proponer soluciones a problemas geotécnicos, como la capacidad de soporte de una fundación, la estabilidad de taludes, entre otros. La resistencia al corte no drenado peak, S_u , puede ser determinada a través de una variedad de ensayos tanto en terreno como en laboratorio. En cuanto a los ensayos de campo, algunos de los métodos más utilizados para estimar la resistencia al corte no drenado peak son el ensayo de penetración estándar SPT (Sowers, 1979; Terzaghi y Peck, 1996; Stroud, 1974), el ensayo de penetración de cono con medición de presión de poros CPTu (Lunne et al., 2002; Robertson et al., 2022), el ensayo de dilatómetro plano DMT (Marchetti, 1980; Tanaka y Tanaka, 1996; Mlynarek et al., 2018) y el ensayo de presiómetro PBT (Gibson y Anderson, 1961; Marshland y Randolph, 1977). Por otro lado, el parámetro S_u también puede ser determinado mediante una gama de ensayos de laboratorio, que van desde los ensayos de compresión no confinada hasta los ensayos triaxiales de cilindro hueco, siendo los más comunes los ensayos triaxiales, TX, y los de compresión no confinada, UC.

En los últimos años, el ensayo de penetración de cono y el de dilatómetro plano (CPT, CPTu, DMT) han experimentado un aumento en su uso debido a su capacidad para estimar características físicas, mecánicas y dinámicas de los suelos, gracias a su rápida ejecución y la habilidad de captar perfiles de suelos de manera continua. En relación con la resistencia S_u , se han realizado investigaciones para mejorar las correlaciones existentes, comparando los resultados obtenidos en terreno con los valores determinados a partir de ensayos de laboratorio. Para el ensayo CPTu, destacan las investigaciones

llevadas a cabo por Aas et al. (1986), Powell y Querterman (1988), Karlsrud (1996), Almeida et al. (2010), entre otras.

Por otro lado, para el ensayo DMT se han propuesto diferentes expresiones, destacando la formulación de Marchetti (1980) por su incorporación en los softwares geotécnicos más utilizados. Estas expresiones han sido calibradas para distintos suelos finos, encontrándose que los valores obtenidos mediante la expresión propuesta se sitúan en una posición intermedia respecto a los valores de referencia determinados a partir de ensayos de laboratorio (e.g., Lacasse & Lunne, 1988; Powell & Uglow, 1988). Respecto a las expresiones calibradas, es relevante mencionar los estudios realizados por Marchetti (1980), Marchetti (2015), Roque et al. (1988), Smith y Houlsby (1995), y Galas (2013).

A raíz de los avances presentados de investigaciones previas, se ha enfatizado en la importancia de calibrar localmente los ensayos realizados in situ, como los ensayos CPTu y DMT, al determinar la resistencia al corte no drenado en un sitio de interés. Aunque los estudios no fueron realizados en la zona de estudio de la memoria de título, sus investigaciones proporcionan una base sólida para adaptar estos ensayos a suelos con alta concentración de finos y su aplicación en zonas geotécnicamente complejas, como la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío.

2.3.- Conclusiones

A partir de los estudios presentados en el capítulo, junto a las recomendaciones de diversos académicos respecto a la calibración local de los ensayos CPTu y DMT al estimar la resistencia al corte no drenado peak, S_u , se justifica la necesidad de llevar a cabo un programa de ensayos destinado a calibrar estos métodos en suelos de la zona, en particular, los suelos finos normalmente consolidados presentes en la Formación Cosmito, ubicada en Concepción, Región del Biobío

CAPÍTULO 3 : ANTECEDENTES NORMATIVOS Y LITERATURA ESPECIALIZADA

3.1.- Introducción

En el presente capítulo se define el parámetro de resistencia al corte no drenado, de que depende y su utilidad en la práctica ingenieril. En segundo lugar, se describen los ensayos realizados para caracterizar el suelo según sus propiedades geotécnicas. Por último, se describen los ensayos CPT_u y DMT, y como estos estiman la resistencia al corte no drenado S_u .

3.2.- Resistencia al Corte No Drenado S_u

La resistencia al corte no drenado peak, S_u , es la resistencia máxima que un suelo cohesivo puede ofrecer al esfuerzo cortante bajo una condición de carga rápida, en la cual no ocurre disipación de presiones de poro, es decir donde no sea posible generar cambios volumétricos. Bajo este supuesto, y dado que no se permite el drenaje del agua, cualquier esfuerzo desviador que es aplicado en el suelo significa un aumento de la presión de poros a la misma magnitud, resultado un parámetro único del suelo fino evaluado. Al esquematizar lo descrito anteriormente, utilizando los círculos de Mohr, resulta en una envolvente de falla con pendiente plana, es decir, una recta horizontal tal como es presentado en la Figura 3.1.

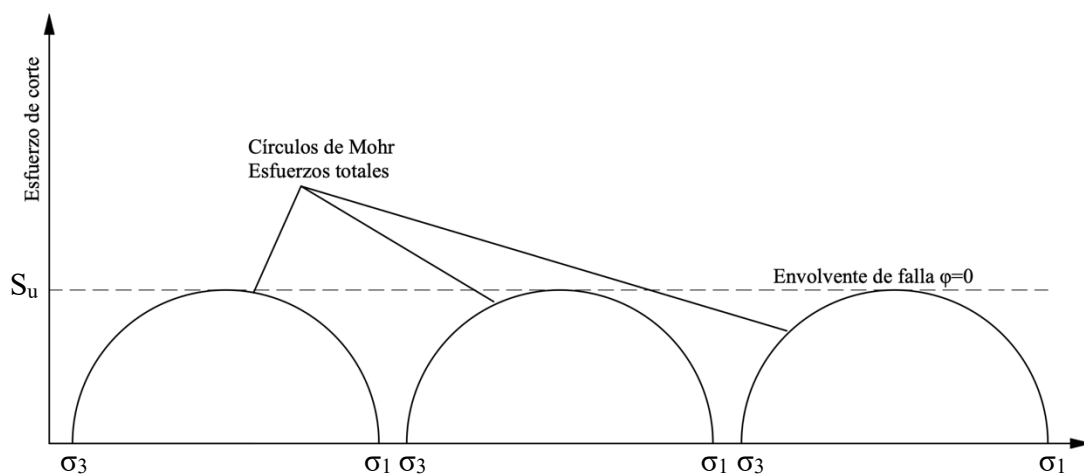


Figura 3.1 Círculos de Mohr para esfuerzos totales y envolvente de falla obtenidos a partir de pruebas triaxiales UU.

3.3.- Extracción de muestras por medio muestreador de pared delgada o tubo Shelby

Al momento de realizar un sondaje SPT, por lo general se tiene como criterio que al presentarse un estrato de suelo en donde el número de golpes observados es igual o inferior a 10 golpes, y este se desplazó 30 cm o más, el muestreo se debe realizar a partir de Tubos Shelby o de pared delgada. Se considera que la alteración de este es lo suficientemente baja para considerarla una muestra inalterada. A partir de estas muestras se pueden ensayar sus propiedades geomecánicas en laboratorio.

Descripción Sondaje con muestreador de pared delgada o tubo Shelby

El sondaje con muestreador de pared delgada es una de las técnicas más utilizadas para obtener muestras inalteradas de suelos cohesivos en el ámbito geotécnico. Se entiende que, dado el procedimiento llevado a cabo para la extracción de esta muestra, es inevitable generar cierto grado de alteración a la muestra.

El muestreador de pared delgada o tubo Shelby es un tubo de acero de pared delgada, tiene una forma cilíndrica y boca afilada, permitiendo penetrar de manera eficiente en suelos cohesivos con una mínima alteración de las propiedades originales de la muestra.

Componentes Sondaje con Sonda de Muestreo Shelby

El sistema de sondaje Shelby, usualmente utilizado en conjunto del Ensayo de Penetración estándar SPT, está compuesto por los siguientes elementos.

- Tubo de pared delgada o Tubo Shelby: Es un tubo de acero de 63,5 mm de diámetro, y una longitud de 60 cm. Posee una forma cilíndrica con bordes afilados, facilitando la penetración en suelos cohesivos.
- Perforadora: El proceso de perforación puede realizarse de manera rotativa o de percusión, ya sea manual o mecánica. Por lo general, este ensayo es acompañado de un ensayo de penetración estándar SPT.

- Dispositivo de extracción: Para extraer el tubo de muestreo con la muestra intacta, es utilizado algún sistema de arrastre, ya sea un cable o un sistema hidráulico, que asegure que esta se extraiga de manera que no se altere.
- Equipo de protección: Dado que el objetivo de este tipo de muestreo es la obtención de una muestra lo menos alterada posible, es necesario usar algún método de sellado que evite la pérdida de humedad de la muestra, además de una carcasa protectora que evite daños por movimientos bruscos o golpes.

Procedimiento Sondaje con muestreador de pared delgada o tubo shelby

El procedimiento para realizar un Sondaje por medio de muestreadores de pared delgada se puede describir en varias etapas

- Preparación del Pozo de perforación: Se realiza un pozo a un costado del punto de perforación, en donde se excava, por medio de algún método de preferencia, un pozo que reciba el agua utilizada en el sondaje.
- Perforación previa al muestreo: Previo a utilizar el tubo de pared delgada o tubo shelby, se debe realizar un sondaje estándar hasta la profundidad de interés. Se entiende que el sondaje por medio de tubo de pared delgada solo es adecuado de realizar en el caso de suelos cohesivos de consistencia blanda, que presente un número bajo de golpes SPT, menores o igual a 10 golpes. De lo contrario, el tubo sufre daños significativos al perforar el suelo.
- Incorporación de muestreador de pared delgada: Una vez el sondaje ha alcanzado la profundidad de interés, se retiran los tubos previamente utilizados para colocar el muestreador en su respectivo lugar. Se debe asegurar que este no se vaya a desprender al momento de retirar la muestra. Importante que el borde con filo se encuentre alineado con la vertical del pozo con el fin que este borde sea el primero en entrar en contacto con el suelo.

- Hincado del muestreador: El tubo se inserta en el terreno de manera controlada, siendo de preferencia que este se incorpore sin la necesidad de realizar golpes al sistema de inserción. Alcanzada la profundidad de interés, se detiene el proceso de inserción.
- Extracción de la muestra: Una vez que el tubo Shelby ha penetrado el estrato de interés se extrae cuidadosamente del suelo, asegurando que la muestra se mantenga intacta dentro del Tubo.
- Sellado y Transporte: Ya extraída la muestra, esta se retira del tubo sondeado para posteriormente sellarla con alguna bolsa de plástico evitando la pérdida de humedad al transportarla al laboratorio en donde posteriormente esta será retirada cuidadosamente.

3.4.- Caracterización de Muestras en Laboratorio

Extraídas las muestras de terreno por medio del sondaje se procede a realizar una caracterización de ellas en laboratorio. En el siguiente punto se presentarán los diferentes parámetros que serán determinados en laboratorio, junto a su respectiva norma vigente. El detalle de los procedimientos llevados a cabo se describe en el Anexo 3.4

Tabla 3.1 Listado de normas chilenas para caracterización

PARÁMETRO	NORMA
Granulometría	NCh 3236 Of.2010
Humedad natural	NCh 1515 Of.1979
Densidad de partículas sólidas	NCh 1532 Of.1980
Límites de Consistencia	NCh 1517 Of.1979

3.5.- Ensayo Triaxial UU

El Ensayo triaxial es un ensayo de laboratorio en donde se somete una probeta de suelo cilíndrica, ya sea inalterada o remoldeada, de determinadas dimensiones a un esfuerzo de confinamiento y a una carga axial hasta que la muestra falle o se deforme de forma significativa. Por lo general, el objetivo

del ensayo es determinar la resistencia al corte del suelo ante determinadas condiciones de ensaye, en donde se destaca la adaptabilidad de este al poder otorgar diferentes condiciones externas, ya sea variando los esfuerzos de confinamiento, tipo de drenaje, o incorporando otros elementos al equipo. El sistema de carga se presenta en la Figura 3.2 se identifican los principales elementos del equipo.

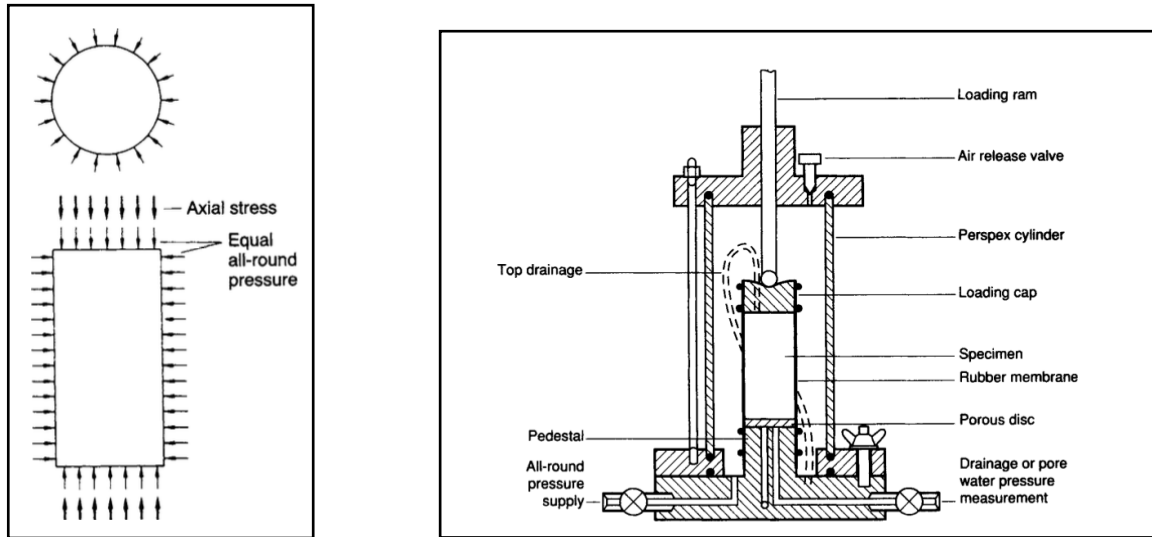


Figura 3.2 (a) Sistema de carga ensayo Triaxial (b) Aparatos principales ensayo Triaxial

Fuente: *Craig's Soil Mechanics (Seventh edition)*, Craig (2004)

Tipos de ensayos triaxiales

Dadas las condiciones que se deseen simular en el ensayo, el equipo se configura de diferentes maneras en donde se varían las condiciones y/o etapas del ensayo. Comúnmente se identifican 3 tipos de configuración, ensayo no drenado – no consolidado, UU; ensayo consolidado – no drenado, CIU; y ensayo consolidado drenado, CID. Dado que en el presente trabajo hizo uso de la primera configuración nombrada, esta será descrita a continuación.

- Ensayo No drenado - No consolidado, UU: La probeta es sometida a la presión de confinamiento especificada por el operador, para luego aplicar el esfuerzo desviador de manera inmediata. Durante este ensayo no se permite el drenaje.

Procedimiento Ensayo Triaxial UU

El procedimiento llevado a cabo en el ensayo triaxial no consolidado – no drenado es descrito a continuación.

- Preparación de la muestra: Como primer paso, se debe escoger una muestra representativa de suelo el cual será ensayado. Cabe nombrar que, para el caso de muestras inalteradas, estas se deben manipular con cuidado con el fin de no alterar sus propiedades. Por lo general, la muestra es tallada, o remoldeada, en forma cilíndrica con un diámetro de 38 mm y un largo de 76 mm. Realizado aquello, la probeta es encapsulada dentro de una membrana de látex para evitar que el agua de este escape durante el ensayo.
- Montaje del aparato Triaxial: Con la probeta confeccionada, esta es ubicada en el aparato triaxial bajo la placa de carga. Cabe destacar que la probeta es ubicada en el centro de la base, en donde se posee una cámara de presión. Esta cámara permite la incorporación de fluidos con el fin de incorporar una presión de confinamiento en la muestra, simulando condiciones deseadas por el encargado.

Fase de saturación, si corresponde: Al saturar las muestras se incorpora un esfuerzo de confinamiento, en conjunto a un *back pressure* con un diferencial de presión pequeño, con el fin de facilitar el flujo de agua en la probeta. La duración de esta fase depende de la naturaleza de la probeta, en donde en suelos con mucho contenido de finos el proceso puede tardar días. Del mismo modo, al presentarse suelos muy cohesivos, los esfuerzos aplicados son incrementados, manteniendo constante la diferencia entre ellos, con el fin de disminuir el tamaño de las burbujas de aire presentes en la probeta.

- *B pressure Test*: Con el fin de asegurar que la probeta se encuentre saturada, se debe realizar una serie de test los cuales se denominan *B pressure Test*. Estas pruebas consisten en aplicar un esfuerzo desviador pequeño, de manera que se incremente la presión de poros en la probeta. Para corroborar que la muestra se encuentre saturada, se verifica que el incremento de la presión de poros sea mayor al 95% del esfuerzo desviador, de lo contrario, el proceso de saturación debe continuar. Es importante destacar que al momento de realizar esta prueba es

posible generar pequeñas deformaciones, por lo cual es necesario ajustar el equipo triaxial al finalizar esta etapa. El parámetro utilizado se presenta en la Ecuación 3.1

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (3.1)$$

Donde Δu corresponde la variación de presión de poros en la probeta; $\Delta \sigma_3$ corresponde a la variación en el confinamiento.

- Aplicación de esfuerzo: Se debe configurar el equipo para las condiciones de drenaje establecidas previo a la aplicación del esfuerzo. Luego se aplica el confinamiento deseado según la profundidad donde fue extraída la muestra, o la que se desee caracterizar. Ya ajustado el equipo para las condiciones de ensayo, se aplica la carga axial de manera controlada, ya sea de forma escalonada o continua. Esto provoca que el suelo se deforme y genere esfuerzos internos. A lo largo de este proceso se pueden medir la deformación axial, la presión de poros y la deformación volumétrica. Las deformaciones son monitoreadas utilizando extensómetros o medidores de desplazamiento.
- Fase de ruptura: A medida que se sigue incrementando la carga, el suelo eventualmente alcanza un punto en el que no puede soportar más carga axial, lo que se traduce en un fallo o ruptura de material. La carga máxima soportada y la deformación asociada a esta ruptura son parámetros importantes que se utilizan para calcular la resistencia al corte del suelo.
- Análisis de resultados: Una vez finalizado el ensayo, se procede al análisis de los datos obtenidos, tales como los esfuerzos principales, la curva esfuerzo-deformación y la resistencia al corte. Es importante mencionar que, al analizar los resultados, se requieren ciertos ajustes, como la incorporación de la membrana de látex en la probeta, el aumento del área de la probeta, entre otros.

Determinación Resistencia al corte no drenado peak, S_u

Para suelos con alto contenido de finos, su capacidad de soporte se ve caracterizada por el parámetro S_u . Esta resistencia caracteriza el comportamiento al corto plazo del suelo frente a una carga, en donde, dadas las características del suelo, no se tiene la capacidad de disipar el exceso de presiones de poro, ni de generar cambios volumétricos. Por lo tanto, para simular las condiciones de terreno para una situación como la descrita anteriormente, se debe realizar un ensayo no drenado teniendo como opción el Ensayo No drenado No consolidado (UU), o el Ensayo Consolidado No Drenado (CIU).

A partir de la relación de esfuerzo deformación-desviador, corregidos por sus respectivos factores, se desprende el esfuerzo desviador máximo aplicado en la muestra. Con ello la resistencia al corte no drenado, S_u , queda definido según la Ecuación 3.2 presentada a continuación.

$$S_u = \frac{\sigma_{dmax}}{2} \quad (3.2)$$

Donde S_u corresponde a la resistencia al corte no drenado peak; σ_{dmax} es el esfuerzo desviador máximo medido

3.6.- Ensayo de Penetración de Cono CPTu

El ensayo de penetración de cono, CPTu por sus siglas en ingles *Cone Penetration Test with pore pressure measurement*, es una prueba de campo utilizada ampliamente en la ingeniería de suelos para determinar las propiedades del suelo in-situ. Este ensayo se basa en introducir un cono de dimensiones y características estandarizadas en el suelo y registrar la resistencia a la penetración y otros parámetros relevantes.

Dentro de las mediciones que realiza el instrumento, las principales se presentan a continuación

- Resistencia del cono (q_c): Es la resistencia a la penetración que el cono encuentra en la punta, un indicador de la densidad o consistencia del suelo.

- Fricción lateral (f_s): Es la resistencia de fricción en la superficie lateral del cono, útil para distinguir entre tipos de suelos.
- Presión de poros (u_2): Corresponde a la presión de poros medida por el cono piezómetro.

Historia Ensayo CPTu

El primer ensayo realizado de este tipo fue en Holanda en 1935, en donde se utilizó una tubería de gas con un diámetro exterior de 35 mm junto a una varilla de acero de 15 mm para empujar el cono hacia el suelo. La punta del cono se proyectaba con un área de 10 cm² con un Apex de 60°, como se ve en la Figura 3.3 (a) .

Luego en 1953 fue incorporado el *fricción sleeve* por Begemann, el cual hace referencia a la porción del cono que su resistencia yace de la fricción entre el equipo y el suelo ensayado. Mediciones eran realizadas cada 20 cm, y por primera vez la razón de fricción fue utilizada para la clasificación de suelos. En la Figura 3.3 (b) se presenta el esquema del equipo diseñado por Begemann.

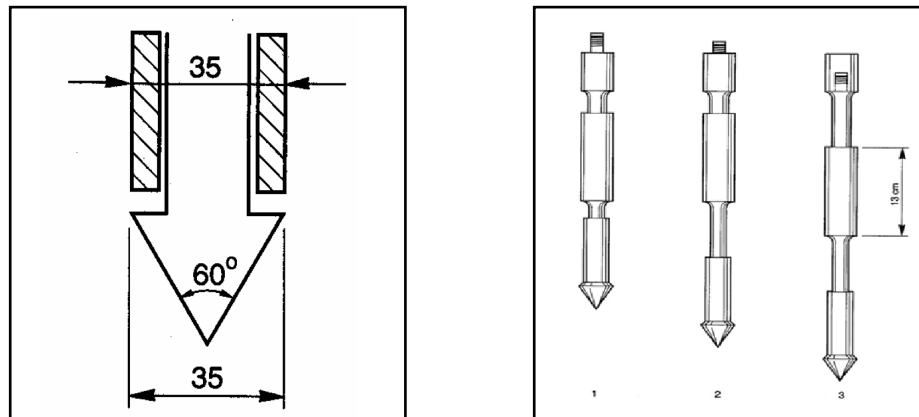


Figura 3.3 (a) Cono mecánico, Holanda (b) Cono de Begemann con “fricción sleeve”

Fuente: *Cone penetration testing* (7ª ed.), Robertson (2022)

En 1965 Fugro desarrollo un cono eléctrico, en donde se desarrollaron aparatos que actualmente forman la base de los conos modernos y del procedimiento internacional y ASTM. Por último, en 1974 se incorporaron los piezómetros, haciendo posible la medición de presiones de poro, llegando a lugar el ensayo CPTu (Robertson, 2022).

Sensores adicionales que fueron introducidos luego de la incorporación del cono eléctrico desarrollado por Fugro se encuentran.

- Temperatura
- Geófonos y acelerógrafos (V_s y V_p)
- Presiometros
- Cámaras
- Resistencias eléctricas

Tipos de equipos CPT

Respecto a los tipos de equipos que se encuentran en el mercado, existe una gama de posibilidades que se adecuan de mejor manera según los requerimientos que se tengan en terreno. Se han confeccionado equipos capaces de realizar los ensayos en tierra y en mar. En la Figura 3.4 se presentan ejemplos de unidades CPT. Respecto a las dimensiones de los conos, estos vienen en una variedad de tamaños, siendo las sondas de 10 cm^2 y 15 cm^2 las más comunes y las especificadas en la mayoría de las normas



Figura 3.4 (a) Unidad de CPT anclada al suelo; (b) CPT montado en Camión de 25T

Fuente: *Cone penetration testing* (7ª ed.), Robertson (2022)

Profundidad ensayo CPT

En un inicio el ensayo de Penetración de cono fue inventado con el fin de ensayar suelos blandos, en donde es posible llegar a profundidades mayores a 100 metros si se tiene una reacción adecuada. Al desarrollar el equipo, se vio su utilidad en suelos granulares, sin embargo, este ensayo se puede ver limitado al presentarse suelos muy rígidos, capas de gravas o rocas. Es por ello, que frente a situaciones en donde se presenten suelos de rigidez elevada se prefiere utilizar conos de mayor área dado que estos son más robustos, permitiendo así la penetración del suelo. Sumado aquello, existe la posibilidad de utilizar coronas de perforación con el fin de pasar un estrato muy rígido, o una roca presente en el lugar. En resumen, la profundidad de penetración es dependiente de la rigidez del suelo, y de la naturaleza de este.

Procedimiento ensayo CPT

El procedimiento del ensayo de penetración de cono depende de la información que se busca obtener. A continuación, se hará una descripción del procedimiento llevado a cabo en un ensayo CPTu.

- Pre-perforación: Cuando el ensayo es realizado en suelo granular, o rígido, puede ser necesario la incorporación de un equipo de perforación que permita sobrepasar estas capas para luego continuar de manera normal el ensayo. Es importante identificar los puntos en donde se realizar estas perforaciones, para luego en el procesamiento de datos se tenga un perfil representativo del caso real.
- Verticalidad: Gracias a la incorporación de inclinómetros en el equipo, es posible determinar el grado de verticalidad que posee el equipo en todo momento. Al momento de instalar el equipo en terreno, la desviación de la vertical no debe exceder los 2 grados, y las barras deben encontrarse en un estado óptimo para la realización del ensayo. Durante el ensayo, a medida que el cono penetra el suelo, se debe asegurar que la inclinación no supere los 10 grados, con el fin de evitar modelos alterados y dañar el equipo.
- Parámetros de referencia: Dadas las variaciones que se producen al utilizar el equipo reiteradas veces, es necesario grabar los parámetros de referencias del equipo en un inicio. Estas

variaciones se pueden dar por diferentes factores, como la temperatura, desgaste del equipo, entre otros. En el software utilizado se graban estos parámetros previos a comenzar la penetración, y finalizado el ensayo.

- Velocidad de penetración: La velocidad de penetración estándar utilizada en el ensayo CPT corresponde a 2 cm/s.
- Intervalo de medición: Los conos eléctricos, utilizados en los ensayos de CPT modernos, permiten realizar una medición continua a medida que se realiza el ensayo. Sin embargo, esta medición se realiza en un rango de desplazamiento que no debe ser superior a 200 mm. Los valores que estos graban corresponden a la resistencia por punta, resistencia friccional, temperatura, inclinación, profundidad, y en el caso del CPTu, la presión de poros. La toma de datos se realiza por medio de un software.
- Ensayo de Disipación: A medida que se realiza la penetración, es posible determinar el tiempo que toma en disminuir el exceso de presiones de poro generado por el mismo ensayo. Para realizar aquello se hace una pausa en la profundidad de interés, midiendo de manera continua el exceso de presión de poros. En suelos granulares esta disipación de exceso de presiones de poro ocurre de manera rápida, en cambio, en suelos cohesivos esta disipación ocurre de manera lenta. El ensayo de disipación se realiza hasta que no se registre una variación en la presión de poros.
- Calibración y Mantenimiento: Las calibraciones al equipo se deben realizar a medida que se identifican variaciones considerables en los parámetros iniciales del equipo. Para proyectos de gran importancia, se recomienda calibrar estos previo a realizar alguno de estos ensayos.
- Procesamiento de datos: Dado por finalizado el ensayo, los resultados son procesados por medio de un software.

Estimación de resistencia no drenada S_u a partir de CPTu

Dada la gran variabilidad que presentan los suelos, es inevitable la necesidad de incorporar experiencia empírica al momento de determinar la resistencia no drenada, para así incorporar tanto el factor de anisotropía, como otros que afecten el resultado. Soluciones teóricas han sido propuestas, donde la mayoría, por medio de la resistencia del cono corregida por presión de poros q_t y el esfuerzo vertical, se ha determinado la resistencia no drenada de la manera presentada en la Ecuación 3.3.

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v'}{N_{kt}} \quad (3.3)$$

Donde q_t corresponde a la resistencia del cono por punta corregida por presión de poros; σ_v' equivale al esfuerzo vertical efectivo; N_{kt} parámetro adimensional.

Por lo general, el parámetro N_{kt} varía entre 10 y 18, donde el valor común es 14 (Robertson, 2022). Robertson (2012), Lunne et al. (1997), Mayne y Peuchen (2022) han presentado expresiones que relacionan diferentes parámetros obtenidos in-situ por medio del ensayo CPTu con el valor estimado de N_{kt} . Según Robertson en su guía “CPT Guide-2022”, es recomendable realizar correlaciones locales para los suelos si se trata de una obra de gran importancia.

3.7.- Ensayo de Dilatómetro Plano DMT

El ensayo denominado Dilatómetro Plano consiste en la inserción de una hoja de acero inoxidable con una membrana circular en el centro de una cara. La hoja se encuentra conectada a la unidad de control por medio de un tubo pseudoneumático-eléctrico que pasa a través de los tubos de inserción. Por medio de un estanque de gas conectado a la unidad de control, por medio de un cable neumático, se le incorpora el gas necesario para que esta membrana se expanda.



Figura 3.5 Dilatómetro Plano - Frente y Costado

Fuente: TC16 DMT Report, Marchetti (2001)

El principio de funcionamiento de este equipo consiste en principio en incorporar gas presurizado al sistema que conecta la membrana con la unidad de control hasta contrabalancear la presión generada por el suelo. La presión que logra generar tal efecto es denominada “A-pressure”, la cual en el procesamiento de datos se corrige, obteniendo p_0 . Realizado aquello, sin haber restringido el flujo de gas presurizado, el operador continúa inflando la membrana hasta llegar a una deformación total de 1.1 mm. Cuando se llega a esta deformación, se registra una presión, denominado “B-pressure”, la cual en el procesamiento de datos se corrige a p_1 . Por último, y de manera opcional, se puede medir una presión de cerrada (“C pressure”). Esta se mide despresurizando la membrana cuando se logra llegar a la deformación de 1.1mm

Componentes Ensayo DMT

El equipamiento básico que se requiere para realizar este ensayo nombra a continuación.

- *Dilatometer blade*: Hoja de acero inoxidable con una membrana móvil en el centro, de 60 mm de diámetro con un espesor de 0.2 mm, al ras de la superficie. Tiene un ancho y espesor nominal de 95 mm y 15 mm, respectivamente. El Ápex de la hoja puede variar entre 24° a 32°

- Unidad de control: La unidad de control consisten en un conjunto de diales los cuales permiten medir las diferentes presiones en cada etapa del ensayo (A, B y C), junto a una señal audiovisual. Además, posee una válvula de despiche que permite liberar la presión ingresada a los tubos. Sin entrar en mayor detalle, los componentes de esta unidad de control son: Diales de presión, Válvulas de control de gases, Circuitos eléctricos.
- Cable pseudoneumatico-electrico: Consisten en cables confeccionados por acero inoxidable, cubiertos por nylon, con un conector de metal específicos, los cuales permiten la continuidad eléctrica y neumática entre la unidad de control y el dilatómetro plano.
- Fuente de gas presurizado: Consiste en un estanque equipado con un regulador de presión, válvulas y tubos neumáticos conectados a la unidad de control
- Cable eléctrico conectado a tierra.

Por otra parte, al igual que el ensayo CPT, se requiere de un mecanismo de perforación que posea la energía y reacción suficiente que permita penetrar el suelo. Este equipo consiste en un equipo de empuje, las barras de empuje y un adaptador. Este mecanismo de perforación se recomienda que sea ajeno al operador, para así no producir alteraciones en los resultados.

Calibración de la membrana

Como fue nombrado en el anterior, el ensayo DMT mide las presiones necesarias para contrarrestar el esfuerzo del suelo sin generar deformaciones (A-pressure), y la presión necesaria para generar una deformación de 1.1 mm (B pressure). Es por ello, que previo a realizar los ensayos, es necesario calibrar la membrana. Se entiende que, si la membrana tuviese un espesor infinitesimal, no sería necesario realizar estas correcciones. (Marchetti, 2001). Se definen los factores de corrección de la siguiente manera

- ΔA : Presión externa que debe ser aplicada a la membrana, al aire libre, para colapsar en contra el asiento de esta.

- ΔB : Presión interna en donde, al aire libre, el centro de la membrana sube a 1,1 mm respecto a su asiento.

Estas correcciones son posibles realizarlas de manera sencilla antes del ensayo por medio de una jeringa que permita realizar vacío o presión en el sistema.

Profundidad de perforación Ensayo DMT

Al igual que el ensayo CPT, la profundidad máxima que logra este equipo depende de la energía de perforación que se posea, junto a la reacción máxima que puede generar el equipo. Para suelos granulares o muy rígidos, el equipo tiende a sufrir un desgaste mayor que al utilizarlo en suelos blandos.

Procedimientos de ensayo DMT

El procedimiento llevado a cabo para el ensayo DMT consiste en la penetración del suelo por medio de la hoja descrita anteriormente. A continuación, se describe el procedimiento de manera general.

- Verificaciones preliminares: Previo a comenzar la perforación es de suma importancia realizar una revisión completa de los diferentes componentes que serán utilizados en el ensayo. Se verifica la continuidad eléctrica entre la unidad de control con la paleta, corroborando que esta no haga continuidad con el componente de tierra. Luego se verifica la paleta, en donde debe cumplir los parámetros nombrados anteriormente. Como últimos pasos, se verifica el suministro de gas presurizado, el cual debe ser cercano a 3 MPa, y el funcionamiento de las válvulas de regulación de la unidad de control.
- Procedimiento paso a paso: El ensayo DMT consiste, descrito de manera general, de la inserción de la paleta en el suelo, en donde en determinado rango de penetración se ingresa presión al sistema con el fin de obtener las presiones de equilibrio con el suelo, presión A, y posteriormente, la presión que genera una expansión de 1.1 mm en la membrana de la paleta, presión B. De manera opcional es posible obtener una tercera presión, la cual permite generar

un mayor detalle de la presión de poros de equilibrio u_0 . Este procedimiento es repetido en los estratos de interés, hasta la profundidad deseada.

- Procesamiento de datos: Dado por finalizado el ensayo, posteriormente los resultados son procesados por medio del software DMT SDMT ELAB desarrollado por los fabricantes del equipo.

Estimación de resistencia no drenada S_u

Al igual que en el ensayo CPTu es necesario incorporar experiencia empírica con el fin de incorporar la gran cantidad de factores que influyen en el comportamiento del suelo. Como solución teórica presentada por el autor de este ensayo se presenta a continuación en la Ecuación 3.4.

$$S_u = 0.22 \sigma_{v0} (0.5 K_D)^{1.25} \quad (3.4)$$

Donde σ_{v0} corresponde al esfuerzo vertical in-situ antes de la inserción; K_D equivale al índice de esfuerzo horizontal (Véase Ecuación 3.5)

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma_{v0}} \quad (3.5)$$

Donde σ_{v0} corresponde al esfuerzo vertical in-situ antes de la inserción; p_0 equivale a la presión A corregido; u_0 equivale a la presión de poros antes de la inserción

Esta expresión, según investigadores como Lacasse & Lunne (1988), Powell & Uglow (1988), suele posicionarse en un valor intermedio entre parámetros de referencia obtenidos por ensayos de laboratorio. Es por ello, y gracias a la experiencia, se ha visto que el ensayo DMT entrega valores útiles para el diseño cotidiano. (TC16-DMT, 2001)

3.8.- Conclusiones

En este capítulo se abordaron conceptos primordiales que serán tratados en la presente Memoria de Título. Comenzando con la definición de la resistencia no drenada del suelo, se describió cuando es pertinente su uso, donde las condiciones in situ son fundamentales al momento de analizar un proyecto. En segundo lugar, se describieron los procedimientos llevados a cabo al caracterizar el suelo, presentando las ecuaciones utilizadas para determinar los diferentes parámetros. Finalmente, abordando la obtención de la resistencia al corte no drenado peak de los suelos, se describieron los tres ensayos que fueron utilizados en el trabajo, los cuales corresponden al ensayo Triaxial UU, CPTu, y DMT. Es importante identificar las limitaciones que poseen los diferentes ensayos, y como estas pueden afectar los resultados obtenidos. Queda en criterio del profesional a cargo en determinar si el ensayo que proyecta realizar es acorde a los requerimientos del caso.

CAPÍTULO 4 : ANÁLISIS DE ANTECEDENTES DE TERRENO

4.1.- Introducción

El presente capítulo tiene como finalidad analizar e identificar los distintos antecedentes geológicos y geotécnicos del lugar de estudio, así como también delimitar el área de estudio del trabajo llevado a cabo. Además, se presentan los equipos utilizados los cuales fueron utilizados según el procedimiento descrito en el Capítulo 3.

4.2.- Ubicación

El terreno de estudio se encuentra en la Ruta 150, en la comuna de Concepción, Región del Biobío. En la Figura 4.1 se presenta la ubicación del área de estudio.



Figura 4.1 Delimitación Área de Estudio

4.3.- Antecedentes Geológicos

La Formación Cosmito, definida inicialmente por Galli (1967), tiene como localidad tipo la Estación de Ferrocarril Cosmito, situada a 5 kilómetros al norte de Concepción, en la Región del Biobío, Chile. Sus afloramientos representativos están ampliamente distribuidos en la zona noroeste de la provincia de Concepción, siguiendo un patrón costero característico. Las exposiciones más destacadas se encuentran en Villa Cocholgüe, con secuencias sedimentarias bien preservadas; en la entrada a Cocholgüe, donde se observan claros contactos estratigráficos; en Punta Montecristo, que presenta secuencias completas de la formación; en Miramar, con afloramientos que evidencian ambientes deposicionales; en Cosmito, localidad tipo con secuencias representativas; y en Penco, con relaciones estratigráficas significativas. Estos afloramientos están principalmente expuestos a lo largo de la carretera Inter-portuaria, ocupando diversas posiciones geomorfológicas como colinas, laderas y planicies, lo que facilita la observación de la variabilidad lateral y vertical de la unidad.

La composición litológica de la Formación Cosmito esta definida por la presencia de lutitas de tonalidad variable, desde gris oscuro hasta negro, con alta compactación, laminación fina y frecuente contenido de materia orgánica, presentando estructuras sedimentarias primarias bien preservadas. Las areniscas, de color pardo característico, presentan granulometría variable, desde fina hasta gruesa, con estratificación cruzada bien desarrollada y la presencia diagnóstica de glauconita como mineral accesorio. Los conglomerados tienen una matriz arenosa con clastos redondeados a subredondeados de composición polimíctica, esto funcionando como indicadores de retrabajo en estos clastos, mostrando gradación normal en algunos niveles. Los mantos de carbón, con espesores variables, muestran un alto contenido de materia orgánica e intercalaciones lutíticas, evidenciando procesos de compactación diferenciada y ambientes reductores. La estructura estratigráfica presenta una inclinación leve pero consistente, resultado de procesos tectónicos post-depositacionales, basculamiento regional, deformación local asociada a tectónica regional. El espesor total de la secuencia es de aproximadamente 130 metros, con variaciones laterales significativas que reflejan la paleotopografía del sustrato y las condiciones de sedimentación.

En cuanto a sus relaciones estratigráficas, la Formación Cosmito presenta un contacto inferior concordante con la Formación Quiriquina del Cretácico Superior, evidenciando una transición gradual en la mayoría de las localidades, con continuidad sedimentaria y preservación de estructuras

sedimentarias en la zona de contacto. Su contacto superior es discordante, tanto con la Formación Andalién como con los depósitos cuaternarios, presentando superficies de erosión y un hiato sedimentario significativo. La edad de la formación se ha asignado al Eoceno mediante correlaciones litoestratigráficas regionales, evidencias paleontológicas, relaciones con la Formación Curanilahue y dataciones relativas basadas en fósiles índice.

El ambiente deposicional de la Formación Cosmito se caracteriza por un sistema de baja energía, con ambientes lagunares que presentan depósitos de grano fino, estructuras sedimentarias de baja energía y alta preservación de materia orgánica, lo que indica fluctuaciones en el nivel del agua. Los ambientes costaneros se asocian con pantanos y dunas litorales, con estructuras sedimentarias influenciadas por mareas y una zonación característica de ambientes transicionales. Las condiciones reductoras, evidenciadas por la presencia de mantos de carbón, la preservación de materia orgánica y ambientes anóxicos, sugieren un entorno de sedimentación en condiciones anaeróbicas. La presencia diagnóstica de glauconita indica ambientes marinos someros con condiciones de baja energía y sedimentación lenta, desarrollándose en plataformas continentales o estuarios, favoreciendo la acumulación de minerales ricos en hierro y potasio bajo condiciones reductoras.

Finalmente, la Formación Cosmito presenta importantes correlaciones regionales con otras unidades. La Formación Curanilahue, en la provincia de Arauco, alcanza espesores de hasta 500 metros y contiene niveles marinos fosilíferos, con litologías similares que incluyen areniscas, lutitas, conglomerados y mantos de carbón, así como ambientes deposicionales transicionales análogos y una edad correlativa del Eoceno. La Formación Cerro Alto, en la Isla Quiriquina, se compone de cuatro miembros bien definidos, predominantemente areniscas líticas, con niveles conglomeráticos característicos e intercalaciones carbonosas, representando un ambiente margino-litoral similar. Estas correlaciones sugieren un sistema sedimentario regional integrado, caracterizado por variaciones en la energía del ambiente, diferentes tasas de subsidencia, diversas fuentes de sedimentos y condiciones paleoambientales comunes, evidenciando una continuidad lateral de facies y una evolución tectónica regional compartida.

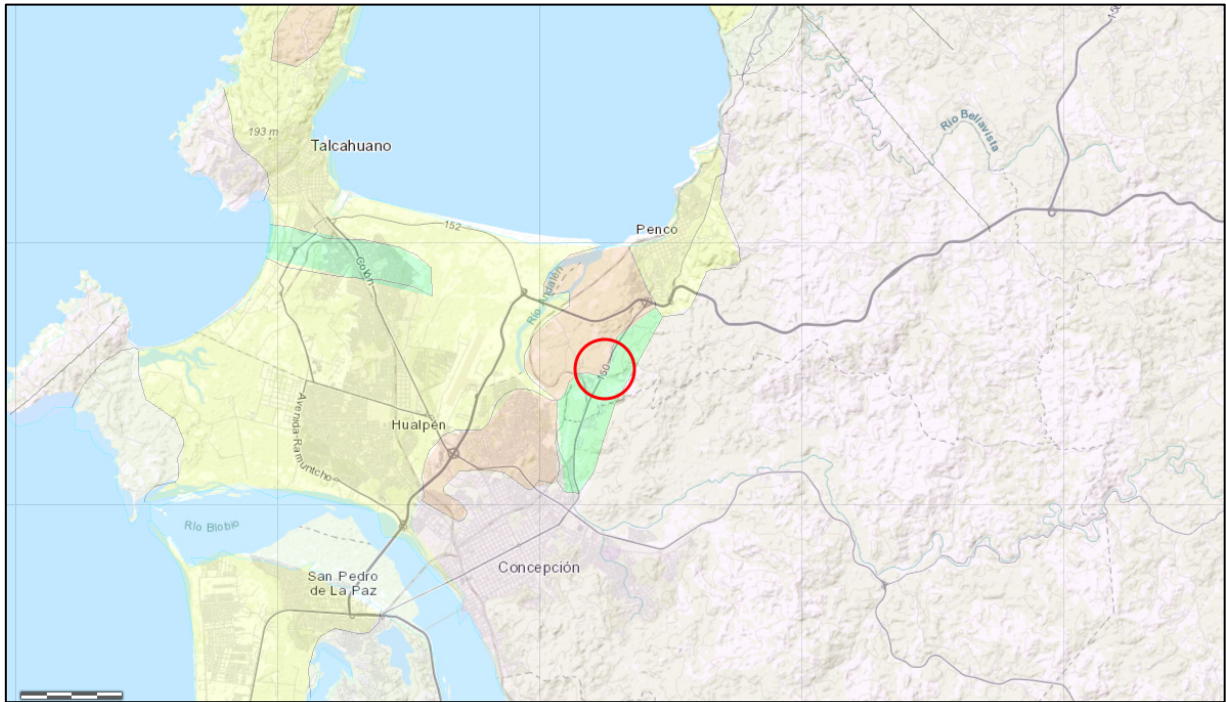


Figura 4.2 Mapa Geológico del Área de Estudio.

Fuente: SERNAGEOMIN

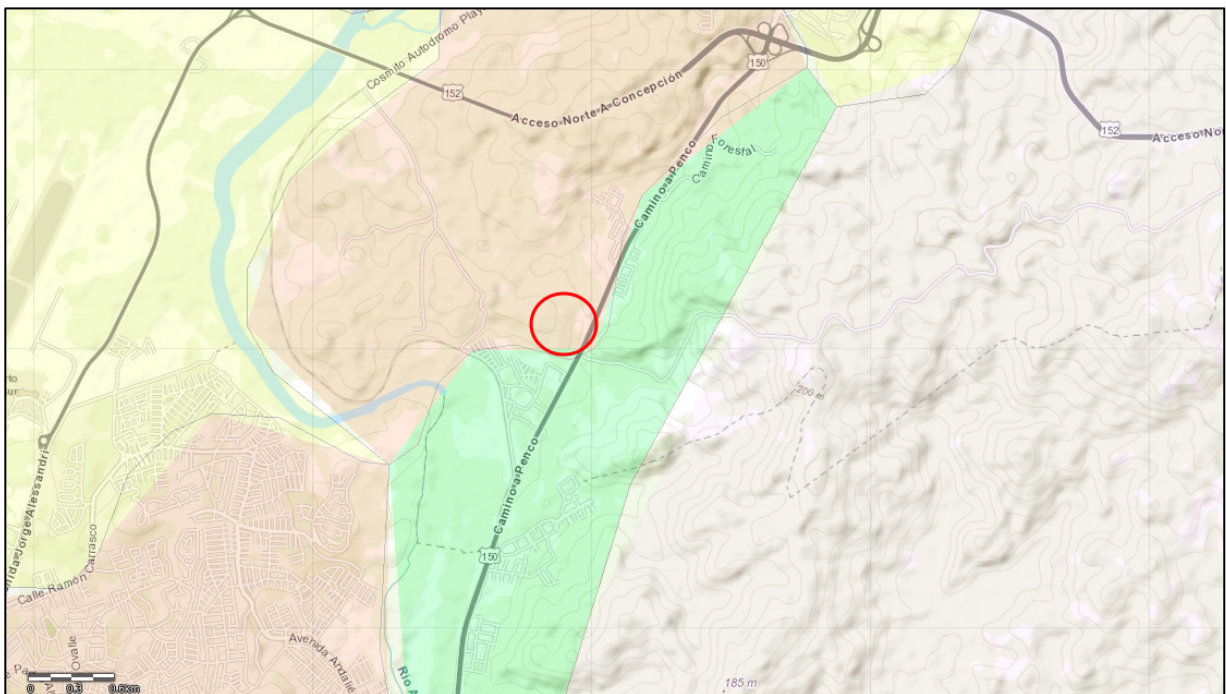


Figura 4.3 Mapa Geológico del Área de Estudio.

Fuente: SERNAGEOMIN

4.4.- Antecedentes Geotécnicos

Respecto a la caracterización del suelo, se realizó un programa de ensayos en terreno en donde se obtuvieron muestras inalteradas, las cuales posteriormente fueron ensayadas en laboratorio. En diciembre del año 2024 se realizó un sondaje, en donde se extrajeron muestras por medio de Tubos Shelby y Cuchara Normal. En la Figura 4.4 y la Tabla 4.1 se presenta la ubicación del sondaje realizado y su coordenada según la UTM WGS84, respectivamente.



Figura 4.4 Ubicación Sondaje realizado

Tabla 4.1 Coordenadas Sondaje UTM WGS84 Huso 18S

ENSAYO	COORDENADAS		PROFUNDIDAD [m]
	NORTE	ESTE	
Sondaje	5928248	676910	24

4.5.- Equipos Utilizados

En el siguiente apartado se presentan los diferentes equipos utilizados en el presente trabajo. El equipamiento fue facilitado por las empresas EMPRO Ltda y MSTD Ingeniería.

4.5.1.- Equipo de Sondaje por medio de Tubos Shelby

Facilitado por la empresa EMPRO LTDA, el equipo utilizado para realizar el sondaje y posteriormente extraer las probetas consistió en un trípode operado de manera manual con cuerda. En la Figura 4.5 se presenta el equipo utilizado. Respecto los tubos Shelby o de pared delgada, estos son de 63.5 mm de diámetro, 1.5 mm de espesor y 60 cm de largo.



Figura 4.5 Imagen de terreno-Equipo de Sondaje por medio de Tubo Shelby

4.5.2.- Equipo Triaxial

El equipo utilizado para realizar los ensayos triaxiales UU corresponde al equipo TRITECH50 de Wykeham Farrance. Este equipo fue facilitado por MSTD ingeniería, que tiene como características principales la capacidad de ensayar muestras de 105 mm de diámetro como máximo, una carga máxima de 50 kN, velocidad mínima de 1×10^{-5} mm por minuto, y una velocidad máxima de 9.9 mm por minuto. A continuación, en la Figura 4.6 se presenta el equipo utilizado



Figura 4.6 Equipo triaxial Trittech50 W/F de MSTD ingeniería

4.5.3.- Equipo de Penetración de Cono CPTu y DMT

El equipo utilizado para realizar tanto el ensayo de penetración de cono CPTu y el ensayo de dilatómetro plano DMT corresponde a un camión modificado de 25 T. Este camión fue construido por la empresa EMPRO Ltda. Para el ensayo se utilizó un cono de 10 cm² unido a barras AW. El cono fue confeccionado por la empresa Lauda-Geo. Para el ensayo DMT se utilizó la paleta fabricada por Marchetti, unido a barras AW, junto a un estanque de aire comprimido de 12L equipado con dial de presión.

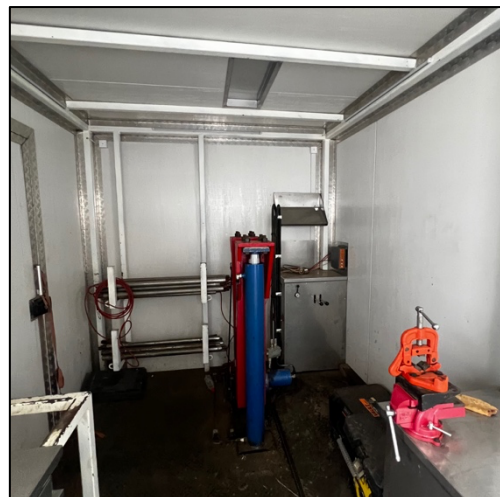


Figura 4.7 Equipo CPTu / DMT elaborado por EMPRO Ltda



Figura 4.8 (a) Cono CPTu 10cm²; (b) Paleta DMT

Respecto a los softwares utilizados, para capturar los datos en terreno del ensayo CPTu se utilizó el software CPTu Explorer. Realizado el ensayo, los datos fueron procesados utilizando el software de Geologismiki CPeT-IT v3.0. Por otro lado, para capturar y procesar los datos del ensayo DMT se utilizó el programa SDMT Pro.

4.5.5.- Equipo para caracterización de suelo

El equipamiento utilizado para caracterizar el suelo consistió en las instalaciones de EMPRO Ltda. Estas instalaciones se encuentran certificadas según la INN NCh - ISO 17025:2017.

4.6.- Conclusiones

En este capítulo se presentaron los antecedentes respecto al trabajo realizado. Dentro de ellos, se mostró la descripción geológica del lugar, dando una idea de las características presentes en el terreno de estudio, logrando así delimitar el estudio a suelos presentes en la zona. Además, se identificaron los diferentes equipos facilitados por EMPRO Ltda y MSTD Ingeniería, permitiendo realizar el programa de ensayos programados para el desarrollo del trabajo.

CAPÍTULO 5 : RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO E IN-SITU

5.1.- Introducción

En el presente capítulo se presentan las caracterizaciones obtenidas a partir de los ensayos de laboratorio para las muestras utilizadas en la determinación de la resistencia al corte peak no drenada de suelos finos, normalmente consolidados, provenientes de la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío. Seguido de ello, se presentan los resultados respecto a la resistencia al corte no drenado obtenidos a partir de los ensayos triaxiales, ensayo de penetración de cono con medición de presión de poros, CPT_u , y ensayo de dilatómetro plano, DMT. Respecto a las correlaciones utilizadas, estas fueron descritas en el capítulo cuatro del presente informe.

5.2.- Resultados

5.2.1.- Resultados caracterización de muestras

En el sitio se realizó un sondaje de 24 metros de profundidad, en donde se obtuvieron 3 muestras por medio de Tubo Shelby o Tubo de pared delgada, a tres profundidades diferentes. A partir de ello, se realizó la clasificación respecto granulometría, peso específico, humedad natural, límites de consistencia, y clasificación USCS. A continuación, se presentan las caracterizaciones de cada muestra de suelo.

Tabla 5.1 Caracterización de muestras

PARÁMETRO	UNIDAD	N° DE MUESTRA			
		N°1	N°2	N°3	
Profundidad	Cota	m	11,6	12,6	15,6
Curva Granulométrica	¾"	%	100	—	—
	3/8"	%	98	—	—
	N°4	%	98	—	—
	N°10	%	98	—	100
	N°20	%	98	100	99
	N°40	%	97	99	99

Tabla 5.1 Caracterización de muestras

			N° DE MUESTRA		
PARÁMETRO		UNIDAD	N°1	N°2	N°3
	N°60	%	96	98	98
	N°200	%	94	93	70
Límites de Consistencia	Limite Líquido	%	35,0	32,0	31,0
	Limite Plástico	%	27,3	25,2	23,4
	Índice de Plasticidad	—	7,7	6,8	7,6
	Peso específico	—	2,721	2,773	2,720
	Humedad natural	%	55,8	53,5	32,3
	Clasificación USCS	—	ML	ML	ML

5.2.2.- Resultados ensayos triaxiales UU

Ajustando el equipo triaxial para simular condiciones no drenadas, en donde se cerraron las válvulas de drenaje, se realizaron tres ensayos no drenados no consolidados a tres diferentes muestras. Todas las muestras fueron obtenidas a partir del mismo sondaje, sin embargo, estas fueron extraídas a diferentes cotas. A continuación, en la Tabla 5.2 se presenta un resumen de los resultados obtenidos. Seguido de ello, de la Figura 5.1 a 5.6 se tiene el detalle de los ensayos realizados.

Tabla 5.2 Resistencia Su de muestras extraídas a partir de Triaxial UU

		NÚMERO DE MUESTRA (profundidad)		
PARÁMETRO	UNIDAD	N°1 (11,6 m)	N°2 (12,6 m)	N°3 (15,6 m)
Resistencia no Drenada S_u	kPa	32,7	34,0	61,9

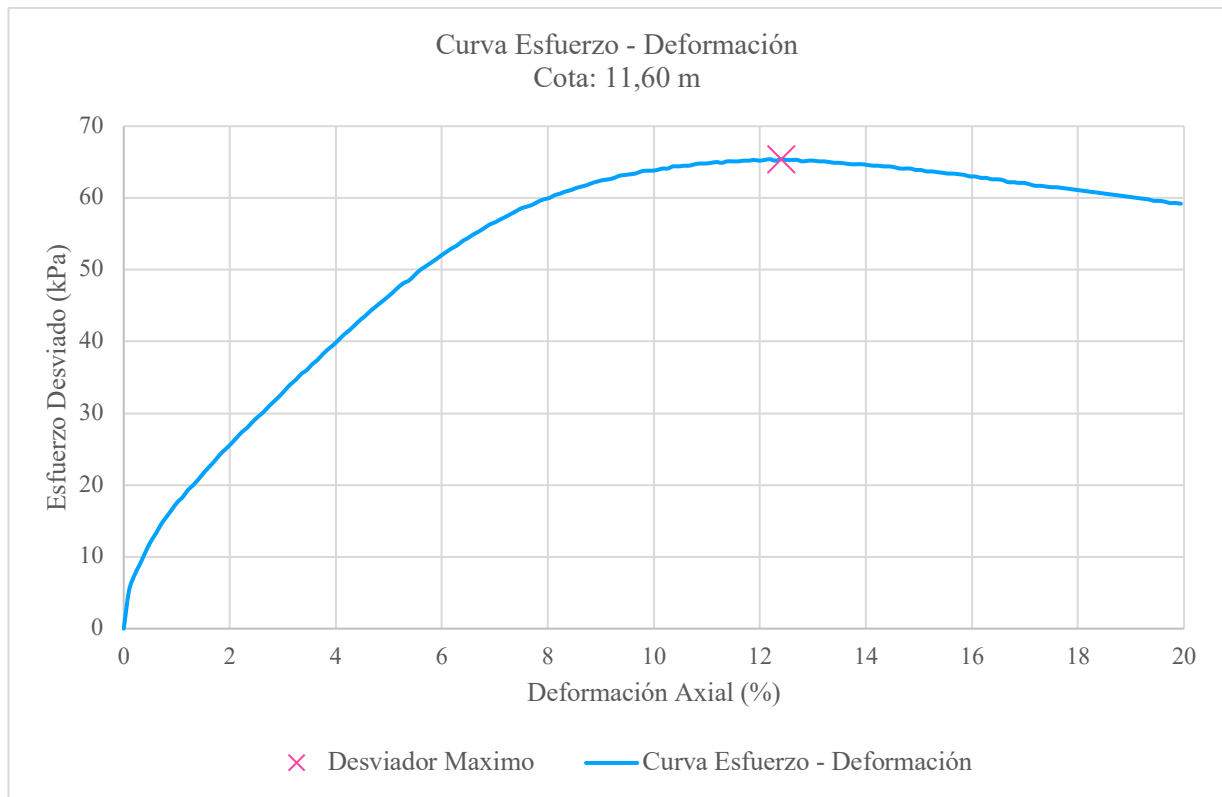


Figura 5.1 Curva Esfuerzo - Deformación Muestra N°1 (Cota: 11,6 m)



Figura 5.2 Muestra N°1 (Cota: 11,6m) Ensayo Triaxial UU

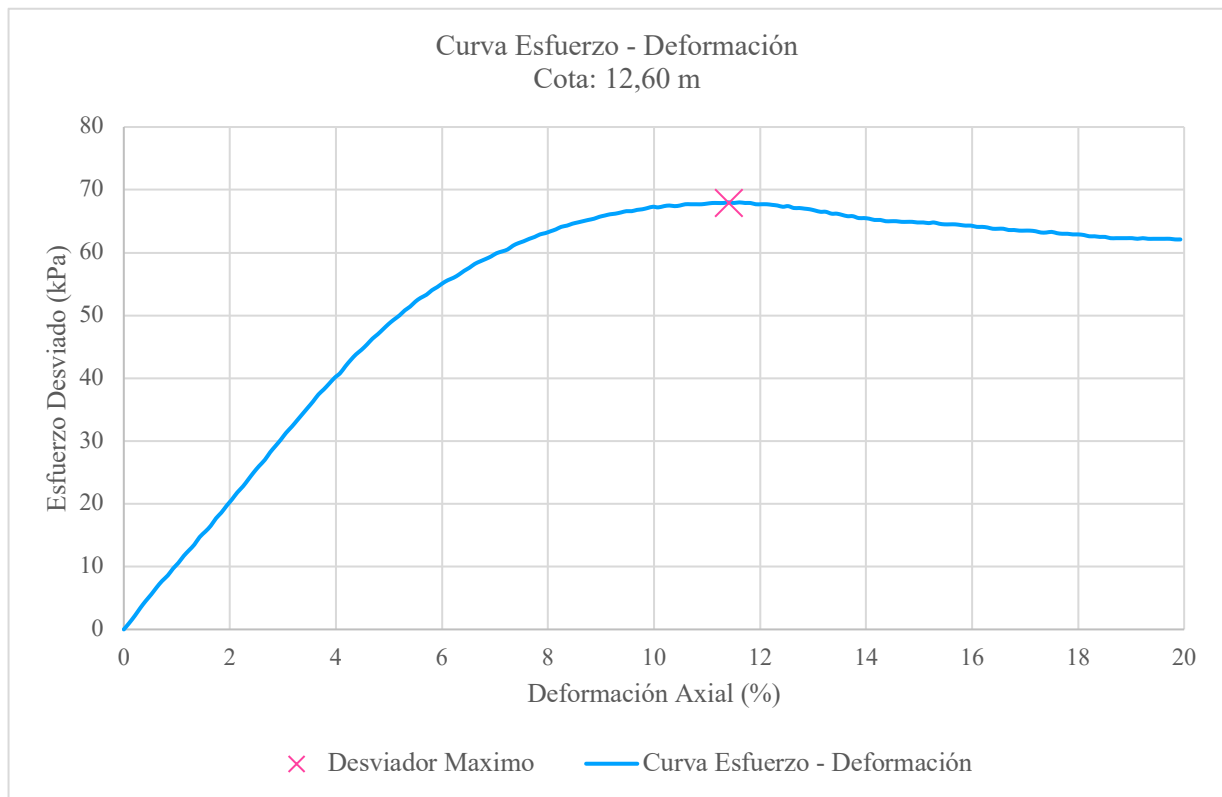


Figura 5.3 Curva Esfuerzo - Deformación Muestra N°2 (Cota: 12,6m)



Figura 5.4 Muestra N°2 (Cota: 12,6) Ensayo Triaxial UU

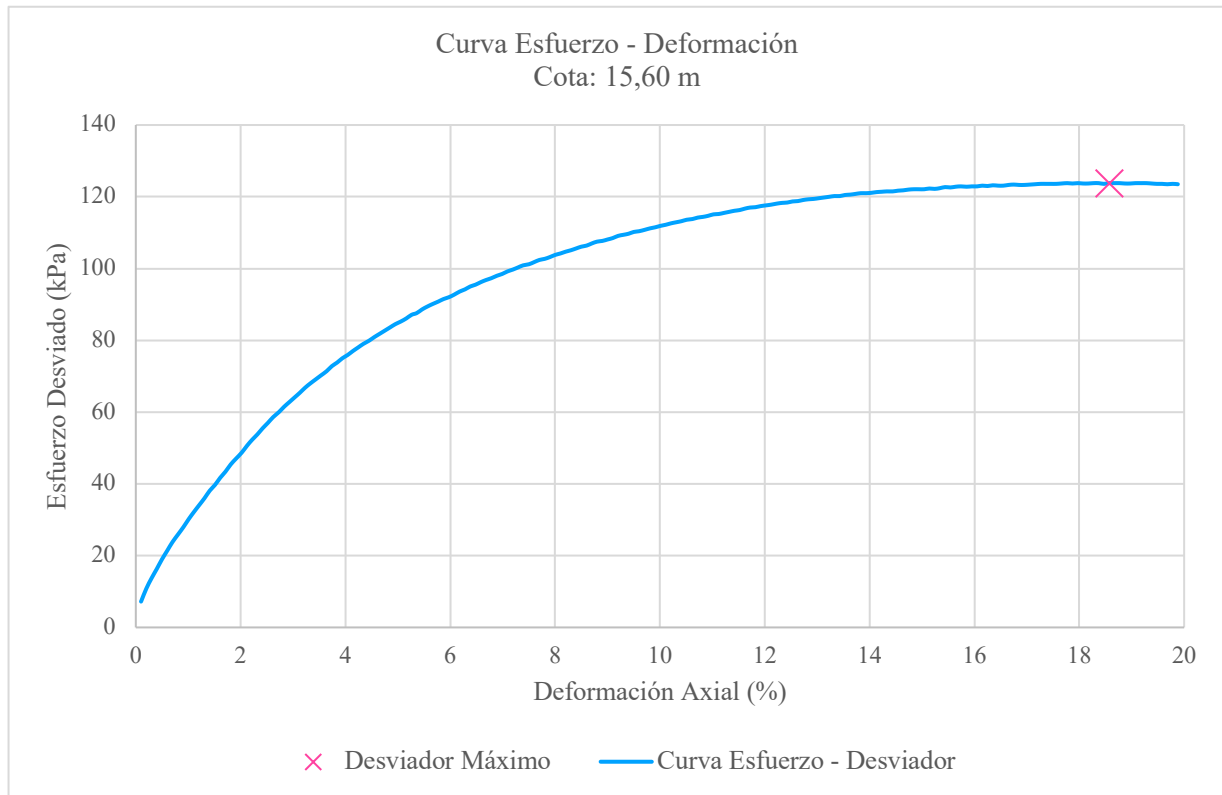


Figura 5.5 Curva Esfuerzo - Deformación Muestra N°3 (Cota: 15,6 m)



Figura 5.6 Muestra N°2 (Cota: 15,6m) Ensayo Triaxial UU

5.2.3.- Resultados ensayo CPTu

Tomando en cuenta la Ecuación 3.3, considerando un factor N_{kt} igual a 14, y el nivel freático a una profundidad de 2.2 m, se obtiene el perfil presentado en la Figura 5.7. En la Tabla 5.3 se presentan los resultados de S_u a partir del ensayo CPTu. En el Anexo 5.2 se presenta el detalle completo del ensayo.

Tabla 5.3 Resultados S_u ensayo CPTu

PARÁMETRO	UNIDAD	NÚMERO DE MUESTRA (profundidad)		
		Nº1 (11,6 m)	Nº2 (12,6 m)	Nº3 (15,6 m)
Resistencia no Drenada S_u	kPa	29,8	30,7	56,1

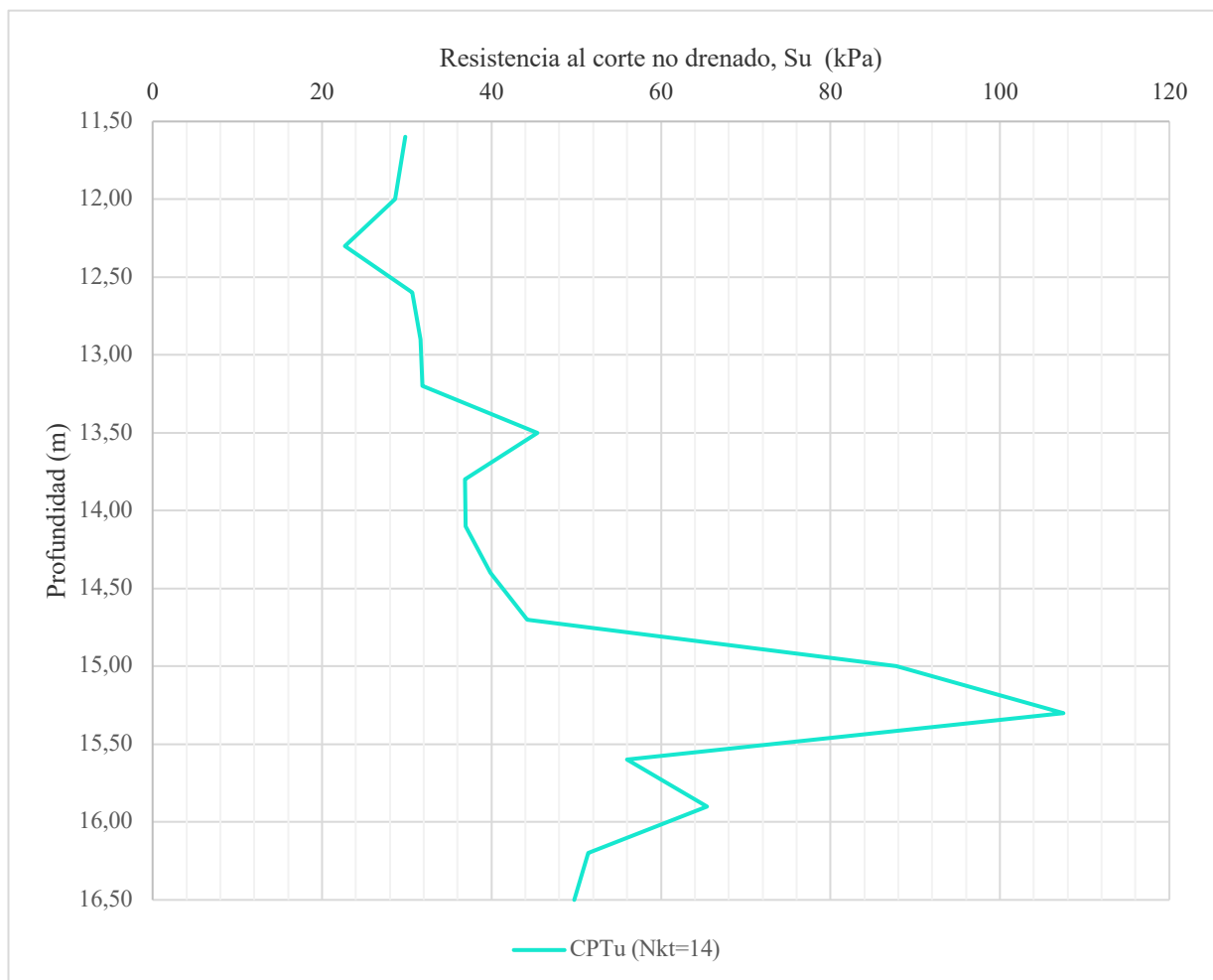


Figura 5.7 Perfil de Resistencia S_u - CPTu

5.2.3.- Resultados ensayo DMT

Tomando en cuenta la Ecuación 3.4, y considerando la Napa freática a una profundidad de 2.2 m, en la Tabla 5.4 se presentan los resultados de S_u a partir del ensayo DMT. Respecto al ensayo completo, en el Anexo 5.3 se presenta el perfil obtenido en terreno.

Tabla 5.4 Resultados S_u ensayo DMT

		NÚMERO DE MUESTRA (profundidad)		
PARÁMETRO	UNIDAD	Nº1 (11,6 m)	Nº2 (12,6 m)	Nº3 (15,6 m)
Resistencia no Drenada S_u	kPa	29,5	31,7	58,0



Figura 5.8 Perfil de Resistencia S_u - DMT

5.3.- Conclusiones

A partir de los resultados presentados en el capítulo se lograron determinar los diferentes parámetros característicos de las muestras de interés, en donde se evidencian muestras de suelo con un alto contenido de finos, limosos de baja plasticidad, saturadas. Dada esta información, se logró justificar la determinación de la resistencia al corte no drenado peak, ya que esta controla su comportamiento al corto plazo al ser un suelo de alto contenido de partículas finas. Luego se presentaron los resultados obtenidos de los ensayos Triaxiales UU, CPTu y DMT respecto a la resistencia al corte no drenado peak de las muestras de suelo fino extraídas del lugar de estudio. Gracias a la información presentada es posible analizar las correlaciones propuestas por expertos en el campo para los ensayos CPTu y DMT, seguido de una calibración local de las correlaciones utilizadas, contribuyendo así al avance del conocimiento geotécnico en la región.

CAPÍTULO 6 : ANÁLISIS DE RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA S_u

6.1.- Introducción

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados presentados en el capítulo cinco, en donde se tiene como foco la evaluación de las correlaciones para la obtención de la resistencia al corte no drenado peak, S_u , a partir de los ensayos CPTu y DMT. Este análisis considera una evaluación de la variabilidad que presenta el uso de estas estimaciones con relación a los resultados obtenidos a partir de los ensayos triaxiales UU para las tres muestras ensayadas. Realizado aquello, se estiman los parámetros de corrección respectivos a cada ensayo, para así incrementar la confiabilidad de los ensayos CPTu y DMT al momento de estimar el comportamiento de suelos finos presentes en la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío.

6.2.- Análisis

A partir de los resultados presentados en el capítulo cinco, se llevó a cabo un análisis estadístico haciendo uso de las medidas de tendencia central, media aritmética y desviación estándar, en donde se determinó el porcentaje de variabilidad promedio del parámetro S_u obtenido in-situ, con respecto a los obtenidos en ensayos Triaxiales UU. Dicho análisis estadístico hace uso de la Ecuación 6.1, 6.2, y 6.3, presentadas a continuación.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.1)$$

Donde μ corresponde a la media aritmética; x_i corresponde al valor ubicado en la posición i ; n corresponde al número de datos.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (6.2)$$

Donde σ corresponde a la desviación estándar; x_i corresponde al valor ubicado en la posición i ; n corresponde al número de datos; μ corresponde a la media aritmética de la población.

$$\delta = \frac{S_{u(insitu)} - S_{u(TxUU)}}{S_{u(TxUU)}} * 100\% \quad (6.3)$$

Donde δ corresponde al porcentaje de variabilidad que presente el valor S_u medido in-situ, ya sea CPTu o DMT, en relación al valor obtenido a partir del ensayo Triaxial UU; $S_{u(insitu)}$ corresponde al valor de S_u obtenido a partir del ensayo CPTu o DMT; $S_{u(TxUU)}$ corresponde al valor obtenido de S_u a partir del ensayo Triaxial UU.

Como primer procedimiento, se determina el porcentaje de variación de cada muestra a partir de los resultados presentados en el Capítulo 6. Finalizado ello, se determina la media aritmética y la desviación estándar de los resultados obtenidos. Por último, tomando en cuenta la media aritmética, se ajustan los parámetros de corrección según los valores obtenidos de los ensayos Triaxiales UU.

6.2.1.- Análisis de resistencia al corte no drenado peak obtenida a partir de ensayo CPTu

En el siguiente punto se presentan los porcentajes de variabilidad del ensayo CPTu de cada muestra al estimar el valor de S_u de suelos finos presentes en la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío, en contraste a los resultados obtenidos en ensayos Triaxiales UU realizados en laboratorio. A partir de ello, se determina el porcentaje de variabilidad medio del ensayo CPTu al estimar el parámetro S_u en suelos finos presentes en la formación geológica en particular, junto a su desviación estándar. A continuación, en la Tabla 6.1 se presenta lo descrito anteriormente.

Tabla 6.1 Análisis parámetro S_u a partir de ensayo CPTu

N° DE MUESTRA	S_u TRIAXIAL UU (kPa)	S_u CPTu (Nkt= 14) (kPa)	VARIABILIDAD (%)
1	32,7	29,8	-8,87
2	34,0	30,7	-9,71
3	61,9	56,1	-9,37

La media aritmética y la desviación estándar de los resultados presentados en la Tabla 6.1 corresponden a $-9,32 \pm 0,35\%$, respectivamente.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 6.1, se sugiere el uso de un valor de N_{kt} igual a 12,7 en la Ecuación 3.6 para suelos finos presentes en la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío. A partir de esta modificación, se presenta la modificación recomendada, junto a un resumen en la Figura 6.1 y Tabla 6.2, respectivamente.

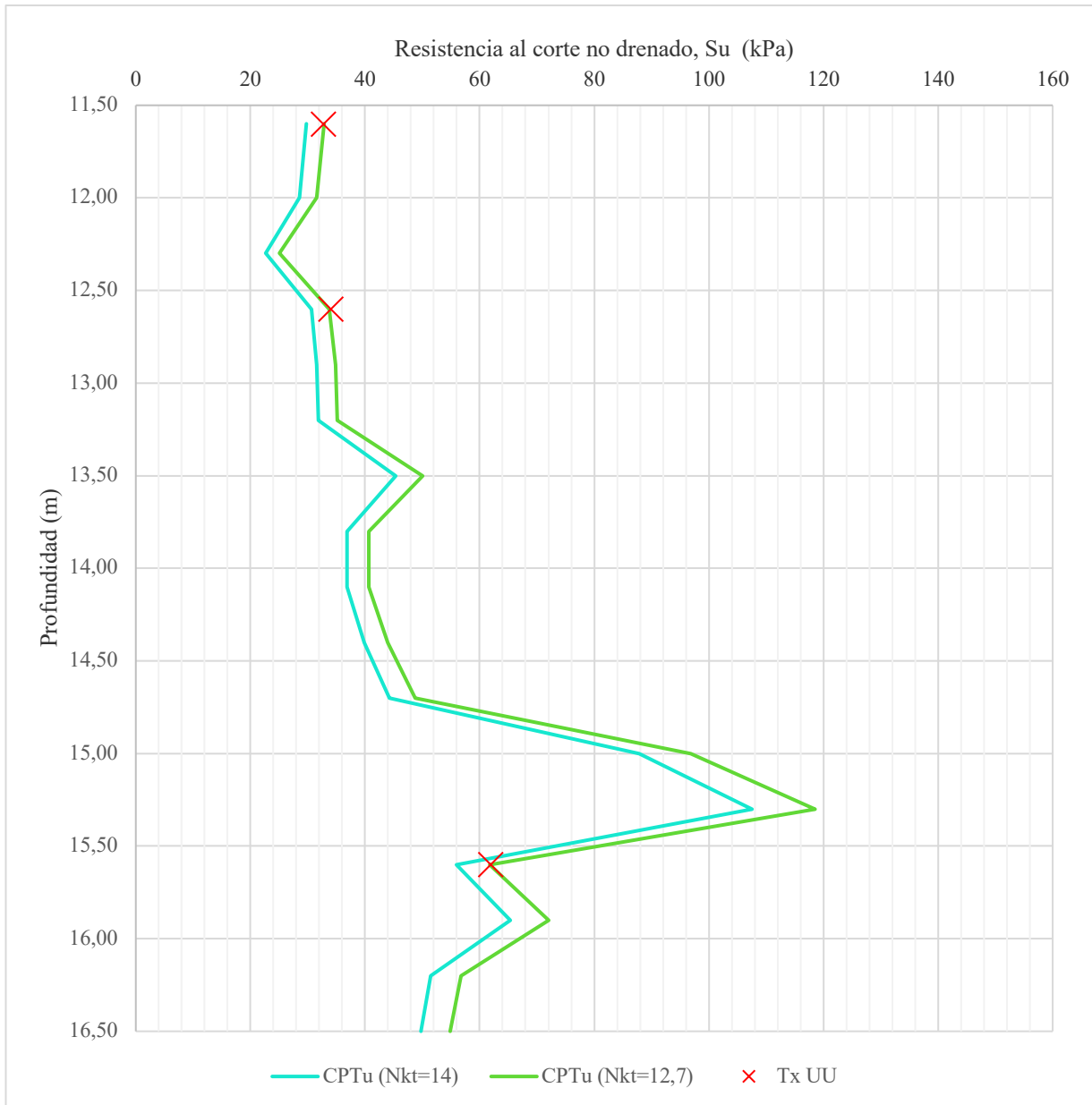


Figura 6.1 Resistencia al corte no drenado, S_u , CPTu ($N_{kt}=14$) v/s CPTu ($N_{kt}=12,7$)

Tabla 6.2 Análisis parámetro S_u a partir de ensayo CPTu modificado

N° DE MUESTRA	S_u TRIAXIAL UU (kPa)	S_u CPTu ($N_{kt}=12,7$) (kPa)	VARIABILIDAD (%)
1	32,7	32,9	0,61
2	34,0	33,8	-0,59
3	61,9	61,8	-0,16

Dado este cambio, el porcentaje de variabilidad media para el ensayo CPTu disminuye a $-0,05 \pm 0,36\%$.

6.2.2.- Análisis de resistencia al corte no drenado peak obtenida a partir de ensayo DMT

De igual forma que en el punto anterior, a continuación se presentan los porcentajes de variabilidad del ensayo DMT de cada muestra al estimar el valor de S_u de suelos finos presentes en la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío, en contraste a los resultados obtenidos en ensayos Triaxiales UU realizados en laboratorio. A continuación, en la Tabla 6.3 se presenta lo descrito anteriormente.

Tabla 6.3 Análisis parámetro S_u a partir de ensayo DMT

N° DE MUESTRA	S_u TRIAXIAL UU (kPa)	S_u DMT (kPa)	VARIABILIDAD (%)
1	32,7	29,5	-9,79
2	34,0	31,7	-6,76
3	61,9	57,0	-7,92

A partir de los resultados presentados en la Tabla 6.3, se tiene que la variabilidad media y la desviación estándar que tuvo el ensayo DMT, en relación a los valores obtenidos en laboratorio, fue de $-8,15 \pm 1,25\%$, respectivamente. A partir de este resultado, se sugiere el uso de un factor de corrección que multiplique la Ecuación 3.7 por 1,089 para suelos finos normalmente consolidados presentes en la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío. A partir de esta modificación, se presenta la modificación recomendada, junto a un resumen en la Figura 6.2 y Tabla 6.4, respectivamente.

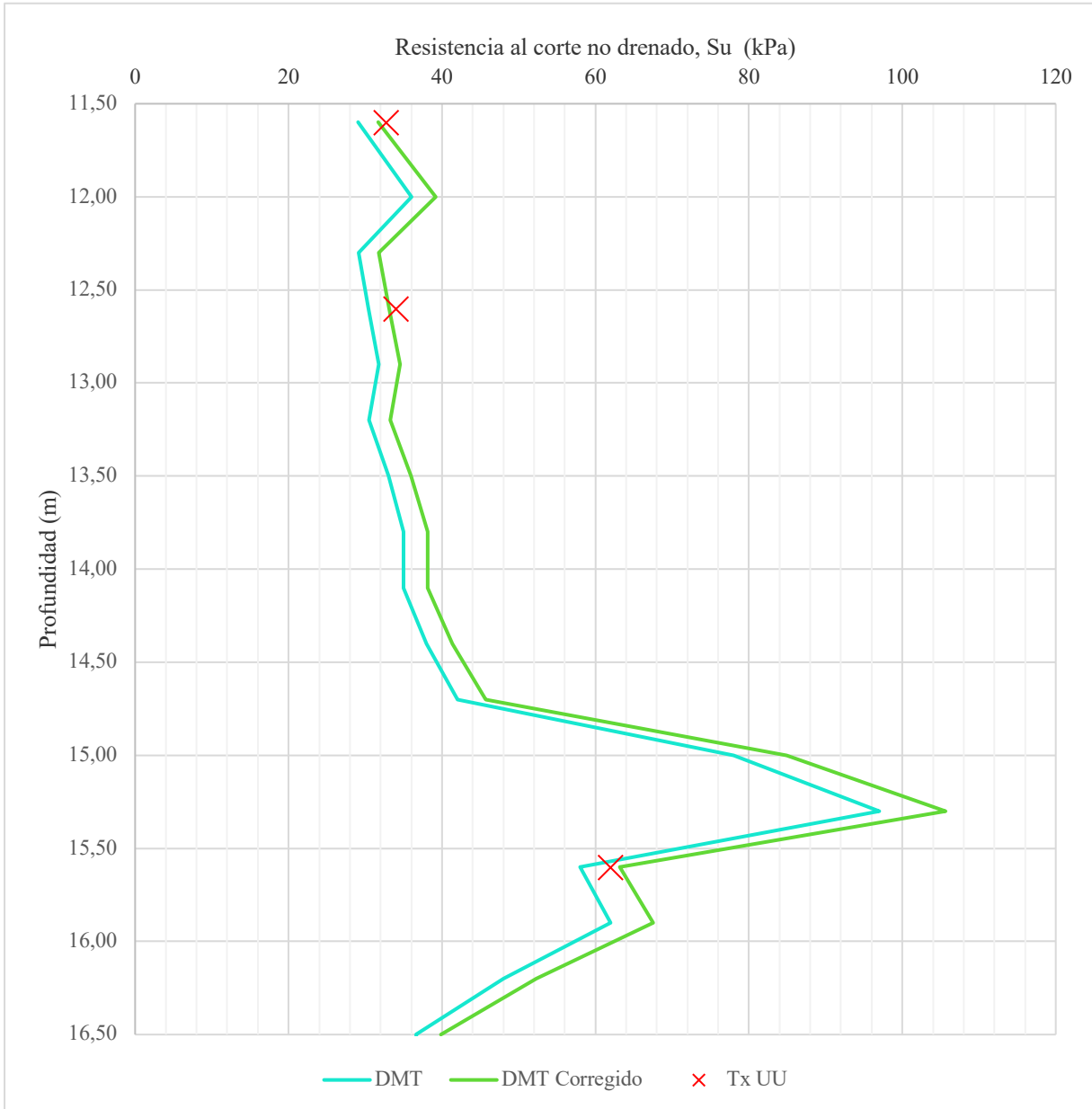


Figura 6.2 Resistencia al corte no drenado, S_u , DMT v/s DMT Corregido

Tabla 6.4 Análisis parámetro S_u a partir de ensayo DMT modificado

Nº DE MUESTRA	S_u TRIAXIAL UU (kPa)	S_u DMT CORREGIDO (kPa)	VARIABILIDAD (%)
1	32,7	32,1	-1,84
2	34,0	34,5	1,47
3	61,9	62,1	0,32

Dado este cambio, el porcentaje de variabilidad media para el ensayo DMT disminuye a $-0,02 \pm 1,37\%$.

6.3.- Conclusiones

En este capítulo se analiza la variabilidad de los métodos de terreno en relación con los resultados obtenidos en laboratorio mediante ensayos Triaxiales UU. A partir de este análisis, se determinaron factores de corrección para las expresiones utilizadas en la determinación de la resistencia al corte no drenada peak, S_u , tanto para el ensayo CPTu como para el DMT. Esto permite mejorar la confiabilidad en la estimación de las propiedades mecánicas de los suelos finos presentes en la Formación Cosmito en Concepción, Región del Biobío.

CAPÍTULO 7 : CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

La finalidad del estudio llevado a cabo en la Memoria de Título consistía en calibrar, para un suelo fino característico de Concepción, Región del Biobío, la resistencia al corte no drenado peak S_u , obtenido a partir de ensayos de terreno CPTu y DMT tomando como parámetro de referencia los resultados obtenidos a partir de ensayos Triaxiales UU realizados sobre muestras inalteradas obtenidas por muestreadores de pared delgada. Para ello, se llevó a cabo un programa de hitos que fueron desarrollados a lo largo de la Memoria de Título.

Siendo un sector en desarrollo, vecino a la Ruta 150 Camino Concepción, a partir del sondaje realizado se lograron identificar los diferentes estratos del lugar, en donde se identificaron limos correspondientes a depósitos aluviales y coluviales, con fuerte influencia del Estero Landa. Extraídas las muestras, se caracterizaron según granulometría, densidad de partículas sólidas, humedad natural y límites de consistencia. De esta manera se logró generar un marco referencial al material con el que se trabajó.

En relación a los ensayos Triaxiales UU realizados en muestras inalteradas de limo de baja compresibilidad, se determinó un porcentaje de variabilidad media, junto a su desviación estándar, de $-9,32 \pm 0,35\%$ para el ensayo CPTu, dando así un factor de Nkt corregido igual a 12.7, disminuyendo la variabilidad media a $-0,05 \pm 0,36\%$. Por otro lado, se obtuvo un porcentaje de variabilidad media y desviación estándar igual a $-8,15 \pm 1,25\%$ para el ensayo DMT, dando como resultado un factor de corrección igual a 1,089, disminuyendo la variabilidad media a $-0,02 \pm 1,37\%$.

A partir de los resultados obtenidos, se logró incrementar la confiabilidad de los ensayos CPTu y DMT al momento de estimar la resistencia al corte no drenado de un suelo fino característico de Concepción, Región del Biobío. Sin embargo, dado que no se posee una cantidad grande de ensayos, no se puede asegurar que los parámetros de corrección presentados responden a todos los suelos finos presentes en la zona. Dicho lo anterior, se recomienda llevar a cabo nuevos programas de ensayos en la zona destinados a calibrar el parámetro abordado en la memoria de título con el fin de continuar con la contribución al conocimiento de los ensayos CTPu y DMT al estimar la resistencia al corte no drenado, S_u , dadas la ventajas que estos métodos presentan frente al tradicional SPT en este tipo de suelo

Por último, es importante destacar que en el presente estudio se permitió la participación del suscrito en la preparación y ejecución de los ensayos de terreno y triaxiales en laboratorio, lo que representa una importante experiencia profesional en la formación geotécnica del alumno.

GLOSARIO

A continuación, se presenta el glosario de términos utilizados en la Memoria de Título. En caso de presentarse otra definición para el término referido, primará la definición expuesta en este instrumento, salvo la excepción de términos contenidos en textos legales.

- “*A pressure*”: Presión necesaria para igual el esfuerzo inducido por el suelo en la membrana de la paleta del ensayo DMT.
- “*B pressure*”: Presión necesaria para deformar 1.1 mm la membrana de la paleta del ensayo DMT.
- Composición litológica: Corresponde a la combinación de los diferentes tipos de rocas y minerales que forman una unidad geológica o una muestra de suelo. Esta composición describe la naturaleza de los materiales presentes, como rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas, y los minerales que las componen.
- Densidad de partículas sólidas: Densidad del material sólido de un suelo normalizado por la densidad del agua.
- Ensayo CPTu: *Cone penetration test with pore pressure measurement*, corresponde a un ensayo de penetración de cono en donde se mide de manera continua la presión de poroso en la cota evaluada. A partir de este se determinan de manera indirecta las características geotécnicas del suelo
- Ensayo DMT: Dilatómetro Plano de Marchetti. Ensayo de terreno en donde se evalúan de manera indirecta las características geotécnicas del suelo.
- Ensayo SPT: *Standard Penetration Test*. Ensayo de penetración estándar que consiste en medir la resistencia del suelo a la penetración de una barra de perforación golpeado por un martinete de determinado peso. Sumado a ello, se hace extracción de muestras por medio de muestreador de cuchara o de pared delgada.
- Ensayo Triaxial UU: *Undrained Unconsolidated Triaxial Test*. Corresponde a un ensayo triaxial en donde no se realiza una etapa de consolidación en la muestra, ni se permite el drenaje de esta durante la aplicación del esfuerzo desviador.
- Esfuerzo desviador: Corresponde a la diferencia entre los esfuerzos principales en un material o masa de suelo.
- Factor de corrección Δ : Factor adimensional propuesto en la Memoria de Título que multiplica la expresión de Marchetti utilizada para estimar la resistencia al corte no drenado a partir del ensayo DMT.
- Granulometría: Distribución de tamaños de granos presentes en una muestra de suelo

- Humedad natural: Porcentaje de volumen utilizado por agua, respecto al volumen total de una muestra.
- K_d : Coeficiente de empuje lateral estimado al insertar la paleta del ensayo DMT. Este coeficiente relaciona esfuerzos horizontales con esfuerzos verticales.
- Límites de Consistencia: Límites de humedad en donde el suelo cambia su comportamiento. Mide presencia de partículas de arcilla
- Material Fino: Partículas de suelo que posean un tamaño inferior a $75\mu\text{m}$.
- Muestreador Shelby o de Pared Delgada: Tubo de acero de 1,5 mm de espesor máximo, con un diámetro de 63,5 mm, y un largo de 60 cm. Posee un borde plano, mientras que otro posee un canto afilado.
- p_0 : “*A pressure*” corregido por presión hidrostática.
- p_1 : “*B pressure*” corregido por presión hidrostática.
- Parámetro N_{kt} : Factor adimensional empírico utilizado en la estimación de la resistencia al corte o drenado a partir del ensayo CPTu. Este parámetro es obtenido a partir de calibraciones realizadas en diferentes suelos, en donde se toman como referencia usualmente ensayos triaxiales.
- Piezocono: Dispositivo utilizado en ensayo CPTu, el cual corresponde a un cono tradicional del ensayo que cuenta con un sensor que mide la presión del agua en los poros del suelo.
- Presión de poros: Corresponde a la presión que ejerce el agua en determinada profundidad.
- q_t : Resistencia en punta del ensayo de penetración de cono, CPTu
- Saturación: Porcentaje de volumen de agua presente en una muestra de suelo, respecto al volumen de vacíos.
- S_u : Corresponde a la Resistencia al Corte no drenado de un suelo o muestra de suelo. Usualmente utilizado para caracterizar resistencia al corto plazo en suelos con alto contenido de material fino
- δ : Corresponde al porcentaje de variabilidad que se tuvo entre los resultados obtenidos de los ensayos CPTu y DMT, respecto a los obtenidos a partir de ensayos triaxiales UU.

REFERENCIAS

Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T., & Hoeg, K. (1986). *Use of in situ tests for foundation design on clay. En Proceedings of IN-SITU'86 (pp. 1–30). Blacksburg.*

ASTM E100: *Specification for ASTM Hydrometers*

Craig, R. F. & Department of Civil Engineering, University of Dundee UK. (2004). *Craig's Soil Mechanics (Seventh edition).*

Galas, P. (2013). *Determination of undrained shear strength based on seismic dilatometer test SDMT* (Tesis de doctorado, Warsaw University of Life Sciences—SGGW, Varsovia, Polonia).

Gibson, R. E. (1961). In situ measurement of soil properties with the pressuremeter. *Civil Engineering and Public Works Review*, 56(568), 615–618.

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1022: Tamices de ensayo, de tela de alambre y de plancha perforada - Dimensiones nominales de abertura.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1117: Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad real y neta, y la absorción de agua de las gravas.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1508: Mecánica de suelos - Guía para la investigación y el muestreo de suelos y rocas.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1509: Mecánica de suelos - Preparación de muestras en estado seco.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1515: Mecánica de suelos - Determinación de la humedad.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1517/1.Of79: Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1532: Mecánica de suelos - Determinación de partículas sólidas.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1533: Mecánica de suelos - Determinación de la granulometría.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 179: Mecánica de suelos - Símbolos, unidades y definiciones.*

Instituto Nacional de Normalización. *NCh 3236: Mecánica de suelos - Tamizado y determinación de la granulometría.*

Lacasse, S., & Lunne, T. (1988). *Calibration of dilatometer correlations.* En *Proceedings of ISOPT-I* (Vol. 1, pp. 539–548). Orlando, FL.

- Lunne, T., & Kleven, A. (1981). *Role of CPT in North Sea foundation engineering*. En *Symposium on Cone Penetration Engineering Division, ASCE* (pp. 49–75).
- Lunne, T., Powell, J. J., & Robertson, P. K. (2002). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. CRC Press.
- Marchetti, S. (1980). In situ tests by flat dilatometer. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106*(3), 299–321.
- Marchetti, S. (1975). A new in situ test for the measurement of horizontal soil deformability. En *Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE* (Vol. 2, pp. 255–259). Raleigh, NC, USA.
- Marchetti, S. (2015). Some 2015 updates to the TC16 DMT report 2001. En *Proceedings of the 3rd International Conference on the Flat Dilatometer (DMT'15)* (pp. 43–65). Roma, Italia.
- Marshland, A., & Randolph, M. F. (1977). *Comparisons of the results from pressuremeter tests and large in situ plate tests in London Clay*. *Géotechnique, 27*(2), 217–243.
- Mayne, P. W., et al. (2007). NCHRP Project 20-05; Task 37-14: *Synthesis on cone penetration test*. Transportation Research Board.
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J., & Stefaniak, K. (2018). *Interrelationship between undrained shear strength from DMT and CPTU tests for soils of different origin*. *Geotechnical Testing Journal*.
- Powell, J. J. M., & Uglow, I. M. (1988). *The interpretation of the Marchetti dilatometer test in UK clays*. En *Proceedings of the Conference on Penetration Testing in the UK* (pp. 269–273). University of Birmingham, July.
- Robertson, P. K., Cabal, K., & Gregg Drilling LLC. (2022). *Cone penetration testing* (7^a ed.).
- Roque, R., Janbu, N., & Senneset, K. (n.d.). Basic interpretation procedures of flat dilatometer tests. En *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing*.
- Smith, M. G., & Houlsby, G. T. (1995). Interpretation of the Marchetti dilatometer in clay. En *Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 1,247–1,253). Copenhagen, Dinamarca.
- Sowers, G. F. (1979). *Introductory soil mechanics & foundations: Geotechnical engineering, 92*, 114–117.
- Stroud, M. A. (1974). The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks. En *Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing* (Vol. 2, pp. 367–375).
- Tanaka, H., & Tanaka, M. (1996). A site investigation method using cone penetration and dilatometer tests. *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan, 837*, 1–52.

TC16 DMT Report (2001). “*The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations*”. *A Report by the ISSMGE Committee TC16*. 41 pp. Reprinted in Proc. DMT 2006, Washington D.C.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3^a ed.). John Wiley & Sons.

ANEXOS

ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☒ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☐ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☐ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☐ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☐ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

Tradicionalmente al momento de caracterizar suelos de características cohesivas, de alto contenido de finos, se llevan a cabo programas de ensayos que hacen uso de equipos de laboratorio, generalmente ensayos triaxiales. Gracias a la implementación de nuevos métodos de prospección en terreno, se ha logrado determinar de manera indirecta características fundamentales del suelo como es el caso de la resistencia al corte no drenado, siendo estos métodos más económicos y rápidos. Sin embargo, los especialistas han recomendado llevar a cabo calibraciones de las expresiones utilizadas para ajustar los factores empíricos utilizados a las condiciones locales. De esta manera, se incrementa la velocidad y reduce los costos al momento de determinar la resistencia al corte no drenado de suelos cohesivos presentes en la zona.

ANEXO 3.4: PROCEDIMIENTOS CARACTERIZACION DE MUESTRAS

En este anexo se presentaran los procedimientos llevados a cabo al momento de caracterizar las muestras según sus propiedades geotécnicas.

Anexo 3.4.1.- Determinación curva granulométrica.

Considerando la norma chilena NCh 3236 Of. 2010, este ensayo permite determinar de manera cuantitativa la distribución de tamaños de partículas en suelos. En el siguiente punto se expone el procedimiento llevado a cabo para el análisis granulométrico por tamizado.

Aparatos utilizados para la determinación de granulometría por tamizado

En el siguiente apartado se nombraran, junto a su respectiva descripción, los aparatos utilizados para la determinación de la granulometría de una muestra de suelo ya sea por tamizado o por hidrometría.

- Balanzas: Balanza de un 1 g de sensibilidad para el pesaje del material sobre la malla 4,75 mm; 0,1 g de sensibilidad para el material que pasa por el tamiz de 4,75 mm , y de 0,01 g de sensibilidad para el material utilizado en el ensayo de hidrometría.
- Deposito receptor y tapa: Consiste en un recipiente que se ajuste con el juego de tamices respectivo. El primero para recolectar el residuo que pasa, y el segundo, para evitar las pérdidas de material.
- Herramientas y accesorios: Espátulas, brochas, recipientes para secado, recipientes para pesaje.
- Horno: Este debe contar con un sistema de circulación de aire y que sea capaz de mantener una temperatura uniforme en el rango en que se esta trabajando.
- Tamices: Corresponden a una serie de tamices de malla cuadrada tejida de alambre de acuerdo a NCh 1022. Las dimensiones de los tamices se presentan en la Tabla A.1

Tabla A.1 Dimensiones tamices NCh 1022

ABERTURA DEL TAMIZ mm (pulgadas)
75 mm (3 pulgadas)
63 mm (2 1/2 pulgadas)
50 mm (2 pulgadas)
37,5 (1 1/2 pulgadas)
25,0 mm (1 pulgadas)
19,0 mm (3/4 pulgadas)
9,5 mm (3/8 pulgadas)
4,75 mm (ASTM N°4)
2 mm (ASTM N°10)
425 μ m (ASTM N°40)
75 μ m (ASTM N°200)

- Termómetro: Se debe tener un termómetro de 0,5 °C de precisión.

Preparación de la muestra para análisis granulométrico por tamizado

Para partículas de suelo más grandes que 75 μ m la granulometría se determina a partir de un análisis por tamizado. Como límite superior se tiene que las partículas deben poseer un tamaño inferior a 4,75 mm. La muestra de suelo es secada hasta masa constante a una temperatura no mayor que $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Luego, esta es desmenuzada de manera minuciosa, evitando golpes bruscos que vayan a alterar el tamaño de las partículas. Finalmente, se registra a la masa de suelo que será ensayada para posteriormente lavarla bajo una malla N°200 hasta que la coloración del agua que desprenda sea transparente, en definitiva, lo que se está realizando es eliminar las partículas finas que posea la muestra de suelo. Finalizado el procedimiento, la muestra de suelo es secada nuevamente a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y registrada como la masa de la fracción lavada.

Procedimiento para el análisis granulométrico por tamizado

Se debe separar la porción de la fracción gruesa lavada en los tamices indicados anteriormente, hasta el tamiz de 4,75 mm (ASTM N°4), y por otra parte la fracción fina desde el tamiz de 4,75 mm (ASTM N°4). Realizado aquello, se debe realizar la operación de tamizado por medio de un movimiento lateral y vertical del tamiz, acompañado por un movimiento circular, que permita mantener al material continuamente en movimiento sobre la superficie de la malla. Esta completamente prohibido manipular o girar fragmentos de la muestra con la mano. Este procedimiento debe continuar hasta que la masa que pasa por el tamiz sea menor que el 1% de la masa retenida en el mismo, durante aproximadamente 1 min de tamizado. La masa retenida por el tamiz utilizado se registra.

Para el tamizado de la fracción gruesa, se debe recoger en un depósito el material que pasa por la malla 4,75 mm (ASTM N°4) y registrarla como masa residual. Por otro lado, para el tamizado de la fracción fina se debe recoger, en un depósito, el material que pasa por la malla 75 μm (ASTM N°200) y registrarla como masa residual.

Al final del pesaje, la suma de las masas retenidas por todos los tamices utilizados, más la masa residual para la fracción gruesa debe tener una diferencia, con respecto a la masa de la fracción gruesa lavada, menor que 0,5%. Y para la fracción fina, la suma del material retenido en los tamices utilizados, más la masa residual debe tener una diferencia, con respecto a la masa de la porción de la fracción fina lavada, menor que 3%.

Anexo 3.4.2.- Determinación humedad natural

Para efectos de la caracterización del suelo de la Memoria de Título se presenta a continuación el procedimiento llevado a cabo, basado en la norma NCh 1515.Of79, para la determinación de la humedad del suelo cuyas partículas son menores a 50 mm.

Aparatos para determinar la humedad natural

Los artefactos utilizados para determinar la humedad natural en laboratorio se describen a continuación

- Balanza: Balanza con precisión de 0,01 g para muestras menores que 100 g, de 0,1 g para muestras entre 100 g y 1000 g, y de 1 g para muestras mayores que 1000 g
- Horno: Horno con circulación de aire y temperatura regulable
- Recipientes: Recipientes de material resistente a la corrosión y que no altere su masa ni se desintegre ante sucesivos cambios de temperatura. Debe contar con tapas herméticas que prevengan pérdidas y absorción de humedad de las muestras
- Herramientas y accesorios: Herramientas tales como espátulas, brochas, entre otras

Preparación de la muestra para determinación de la humedad

Como recomendación se tiene la Tabla A.2 en donde se tienen los tamaños mínimos de muestra necesarios para la determinación de la humedad del suelo según el tamaño máximo de las partículas presentes en la muestra de suelo.

Tabla A.2 Tamaños mínimos de muestra para determinación de la humedad

TAMAÑO MÁXIMO DE PARTICULAS (mm)	TAMAÑO MINIMO DE MUESTRA (g)
50	3000
25	1000
12,5	750
5	500
2	100
0,5	10

Es de suma importancia que las muestras extraídas en terreno sean almacenadas de tal manera que estas no pierdan humedad al ser transportadas. Para aquello se suelen utilizar bolsas de plástico identificadas con su procedencia.

Procedimiento para la determinación de la humedad

Como primer paso se obtiene la muestra de suelo, considerando la Tabla 9.2. Obtenida la muestra, se determina y registra la masa en un recipiente limpio y seco con su tapa. Realizado aquello, se registra la masa del recipiente más la muestra húmeda. Luego, se coloca el recipiente con la muestra en un horno a 110 ± 5 °C, secando la muestra a masa constante. Finalizado este proceso, es retirado del horno, tapando el recipiente y dejándolo enfriar a temperatura ambiente. Por último, se registra la masa del recipiente más la muestra seca.

Análisis de resultados para la determinación de humedad

Realizado el procedimiento descrito en el punto anterior, se tiene la siguiente expresión la cual determina la humedad como la pérdida de masa de la muestra. A continuación, en la Ecuación A.1, se presenta la formula

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s - m_r} * 100\% \quad (A.1)$$

Donde w corresponde a la humedad del suelo en porcentaje; m_h la masa del recipiente más la muestra húmeda en gramos; m_s la masa del recipiente más la muestra seca en gramos; m_r la masa del recipiente en gramos.

Anexo 3.4.3.- Determinación de la densidad de partículas sólidas

Siguiendo el proceso de caracterización del suelo, en el siguiente apartado se describirá el procedimiento llevado a cabo para determinar la densidad de partículas sólidas de una muestra de suelo. Se toma en consideración la norma chilena NCh 1532.Of80, la cual establece el procedimiento para determinar la densidad de partículas sólidas de muestras de suelo que se componen de partículas menores que 5 mm, mediante un picnómetro. Cabe nombrar que para partículas mayores a 5 mm se debe aplicar el método de determinación de densidad real de las gravas. Y como última situación, en el caso de presentarse partículas menores y mayores a 5 mm en la misma muestra de suelo, estas deben ser separadas en el tamiz de 5 mm (ASTM N°4), luego determinar y registrar el porcentaje en masa seca de ambas fracciones y ensayarlas por separado con el método correspondiente. El resultado del ensayo corresponde al promedio ponderado en ambas fracciones.

Aparatos para determinar la densidad de partículas solidas

En el siguiente apartado se presentan los artefactos utilizados al momento de determinar la densidad de partículas solidas del suelo.

- Picnómetro: Frasco volumétrico con una capacidad igual o mayor que 100 ml o una botella con tapón con una capacidad igual o mayor que 50 ml; el tapón debe ser del mismo material que la botella, de forma y tamaño tales que pueda ser insertado fácilmente a una profundidad marcada en el cuello de la botella, y debe tener una perforación central que permita la eliminación de aire y agua sobrante. Cabe destacar que el picnómetro debe ser calibrado respecto a la temperatura a la cual es realizado el ensayo, para mayor detalle dirigirse a la normativa respectiva.
- Balanza: Se debe contar con una balanza con precisión de 0,01 g si se emplea el frasco o con precisión de 0,001 g si se emplea la botella.
- Reductor de presión: Aspirador o bomba de vacío y sus accesorios.
- Herramientas y accesorios: Recipiente para las muestras, brochas, poruña, embudo, termómetro, estufa, secador, entre otros.
- Materiales: Se debe contar con agua destilada o desmineralizada desairada, kerosene, soluciones disolvente de grasas, entre otros.

Preparación de la muestra para la determinación de densidad de partículas solidas

Tomando en consideración las recomendaciones de la norma vigente chilena, la muestra de ensayo compuesta por partículas menores que 5 mm debe tener un tamaño mínimo, referido a su masa seca, de 25 g cuando se usa el frasco y de 10 g cuando se usa la botella con tapón. Estas muestras pueden ser tanto con su humedad natural, como secadas en horno. En el caso de utilizar la muestra con su humedad natural, se debe determinar su masa seca al final del ensayo, evaporando el agua en un horno a 101 ± 5 °C. Por otro lado, si se utiliza una muestra seca, la masa se registra en un comienzo, luego esta se deja sumergida en agua destilada por al menos 12 hr. En el caso de presentarse alguna pérdida de material a lo largo del ensayo, esta deberá ser informada.

Procedimiento ensayo para la determinación de densidad de partículas solidas

Se coloca la muestra en el picnómetro, evitando pérdidas del material cuando ya se ha determinado su masa seca. Se agrega agua destilada cuidadosamente, evitando la formación de burbujas, hasta alcanzar aproximadamente 3/4 de la capacidad del frasco, o la mitad de la capacidad de la botella. Realizado aquello se debe remover el aire atrapado, la norma presenta tres alternativas para lograr aquello, siendo una de ellas someter el contenido a un vacío parcial (a una presión de aire igual o menor que 13,3 kPa). Para evitar un burbujeo excesivo el vacío es aplicado de manera gradual hasta llegar a la presión deseada, el cual deberá ser mantenido durante 15 min como mínimo para conseguir un desairado completo. A su vez, el picnómetro debe agitársela suavemente para ayudar a la remoción del aire.

Removido el aire de la muestra, se tapa el picnómetro, dejándolo enfriar si corresponde. Luego se agrega agua destilada hasta llenar el recipiente, se lava con un paño húmedo y posteriormente se determina y registra la masa de este con la muestra y el agua. Finalmente, se determina y registra la temperatura de ensayo del contenido, aproximado a 1 °C.

Análisis de resultados para la determinación de densidad de partículas sólidas

Realizado el procedimiento descrito, se tiene la Ecuación A.2 para determinar la densidad de partículas sólidas.

$$\rho_s = \frac{m_s}{(m_s + M_a) - M_m} \cdot \rho_{w_{tx}} \quad (A.2)$$

Donde ρ_s corresponde a la densidad de partículas sólidas en g/cm^3 ; m_s la masa seca de la muestra de ensayo en gramos; M_a la masa del picnómetro más el agua a la temperatura de ensayo en gramos, según calibración del picnómetro; M_m masa del picnómetro más la muestra y el agua a la temperatura de ensayo en gramos; $\rho_{w_{tx}}$ densidad relativa del agua a la temperatura de ensayo.

Anexo 3.4.4.- Determinación Límites de Consistencia

En el siguiente punto se presenta el procedimiento llevado a cabo para determinar los límites de consistencia. Se tiene como referencia la norma chilena NCh 1517.Of79.

Los Límites de Consistencia son parámetros que permiten caracterizar el comportamiento físico y la capacidad de un suelo para responder a diferentes niveles de humedad. Estos se detienen como los puntos críticos en los cuales las propiedades de consistencia del suelo, como su plasticidad, rigidez y capacidad de deformación, cambian significativamente.

Límite Líquido

El Límite Líquido se refiere a la cantidad mínima de agua necesaria para que un suelo pase de un estado sólido a un estado de fluidez. Siguiendo la NCh 1517/1 Of.79, este término se define como “la humedad, expresada en porcentaje de la masa de suelo seco en estufa, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico”. A continuación, se describirá el procedimiento llevado a cabo.

Aparatos para la determinación del Limite Liquido

Para la determinación del Limite Liquido de un suelo se requiere de una serie de aparatos, los cuales será presentados a continuación.

- Plato de evaporación: De porcelana, con un diámetro de aproximadamente 120 mm.
- Espátula: Debe poseer una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Aparato de limite liquido: Corresponde a una taza de bronce con una masa de 200 ± 20 montada en un dispositivo de apoyo fijado a una base de plástico duro de una resiliencia tal que una bolita de acero de 8 mm de diámetro, dejada caer libremente desde una altura de 25 cm rebote entre 75 % y un 90%.

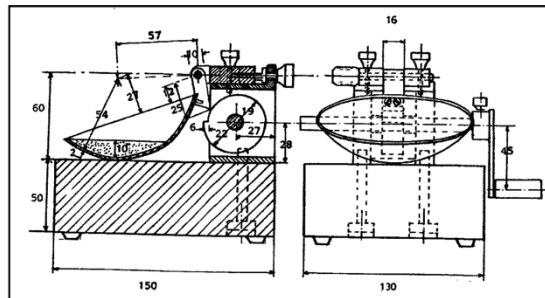


Figura A.1 Aparato de Limite Liquido NCh1517

Fuente: Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1517/1.Of79*

- Acanalador: Debe respetar las dimensiones establecidas por Casagrande o la norma internacional ASTM D4318.
- Recipientes: Recipientes herméticos para la muestra de contenido de humedad, tales como juegos de vidrio reloj.
- Balanza: Debe poseer una precisión de 0,01 g.
- Probeta: Debe tener una capacidad de 25 ml.

Preparación de la muestra para la determinación de Limite Liquido

Previo a comenzar el ensayo, el aparato de limite liquido debe ser ajustado de tal manera que la distancia entre el punto de percusión la base sea de 10 mm exactamente cuando la taza este en su mayor altura. De no cumplirse, esto debe ser corregido.

La muestra de ensayo debe tener un tamaño igual o mayor a 100 g del material que pasa por el tamiz de 0,5 mm (ASTM N°40) obtenido de acuerdo con la norma NCh1509. Para acondicionar la muestra, esta se coloca en el plato de evaporación, en donde se mezcla la muestra agregando el agua destilada necesaria, finalizando el proceso cuando se obtiene una mezcla homogénea. Luego, la muestra se deja curar el tiempo necesario para que la fase liquida y solida se mezclen homogéneamente, en donde en suelos de alta plasticidad el plazo de curado no puede ser menor a 24 hr.

Procedimiento para la determinación del Limite liquido

A continuación, se describirá el procedimiento llevado a cabo al momento de determinar el límite liquido de la muestra. Cabe destacar que el método expuesto se denomina “Método mecánico”, complementariamente se tiene el “Método Puntual”. Este último método usualmente es aplicable en control de faenas, cuando se ha determinado previamente la curva de flujo por el método mecánico y cuando las especificaciones particulares para el suelo a ensayar así lo indiquen.

En primer lugar, se debe colocar el aparato de limite liquido sobre una base firme. Cuando se ha mezclado suficiente agua para obtener una consistencia que requiera de 15 a 20 golpes para cerrar la ranura tomar una porción de la mezcla ligeramente mayor a la cantidad que se someterá a ensayo. Esta porción se coloca en la taza con la espátula, centrada sobre el punto de apoyo de la taza con la base; comprimirla y extenderla mediante la espátula evitándose las incorporar burbujas de aire en la mezcla. Finalmente se enrasa y nivela a 10 mm en el punto de máximo espesor. Devuelto el material excedente al plato de evaporación, se divide la pasta de suelo con el acanalador de manera cuidadosa a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza de modo que se firme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas como es especificado en el Figura A.2.

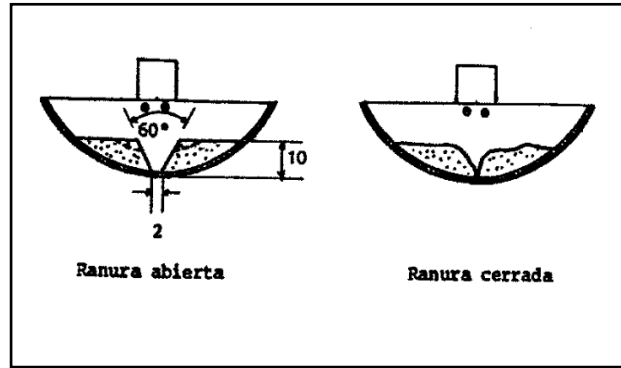


Figura A.2 Sección de la ranura en la pasta de suelo antes y después del ensayo

Fuente: Instituto Nacional de Normalización. *NCh 1517/1.Of79*

Es importante que el acanalador de Casagrande siempre se mantenga perpendicular a la superficie interior de la taza al momento de pasarlo. Además, en ningún caso se debe aceptar el desprendimiento de la pasta del fondo de la taza, y en el caso de suceder, todo el material debe ser removido y reiniciar el procedimiento. Por último, la formación de la ranura debe ser efectuada con el menor número de pasadas posibles, limpiando el acanalador después de cada pasada.

Ya realizada la ranura, se coloca el aparato sobre una base firme, haciendo girar la manivela levantándolos y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm. En el caso de presentarse un cierre de la ranura de manera irregular debido a las burbujas de aire, este resultado se debe descartar. El proceso se debe repetir hasta encontrar dos valores sucesivos que no difieran en más de un golpe. Registrar el número de golpes requerido. Luego se debe retirar aproximadamente 10 g del material que se junta en el fondo del surco. Se coloca en un recipiente hermético y se determina su humedad de acuerdo con la norma chilena NCh 1515 Of79. Finalmente, el material es transferido al plato de evaporación, lavando y secando la taza y el ranurador. El procedimiento descrito anteriormente es repetido por lo menos en dos pruebas adicionales empleándomelos el material reunido en el plato de evaporación.

Análisis de resultados para la determinación de limite liquido

Tomando en consideración el procedimiento descrito en el punto A.3.4.2, se tiene que la humedad del suelo, cuando este cumple los requerimientos expuestos anteriormente corresponde al límite líquido del suelo, w_{LL} .

Limite Plastico

El Limite Plástico corresponde a la humedad en donde el suelo cambia de un comportamiento plástico a semisólido. Siguiendo la NCh 1517/2 Of.79, este término se define como “la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en estufa, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido”. A continuación, se describirá el procedimiento del ensayo.

Aparatos para la determinación del Limite Plástico

Para la determinación del Limite Plástico de un suelo se requiere de una serie de aparatos, los cuales será presentados a continuación.

- Plato de evaporación: Plato de porcelana, con un diámetro de aproximadamente 120 mm.
- Espátula: Debe poseer una hoja flexible de aproximadamente 75 mm de largo y 20 mm de ancho.
- Superficie de amasado: Placa de vidrio esmerilado
- Recipientes: Herméticos para la muestra de contenido de humedad, tales como juegos de vidrio reloj.
- Balanza: Debe poseer una precisión de 0,01 g
- Probeta: Debe poseer una capacidad de 25 ml
- Patrón de comparación: Alambre o plastico de 3 mm de diametro.

Preparación de la muestra para la determinación del Limite plástico

La muestra del ensayo debe tener un tamaño en masa de aproximadamente 20 g. Esta muestra de ensayo se toma del material completamente homogeneizado que pasa por el tamiz de 0,5 mm obtenido de acuerdo con NCh 1509. Colocar en el plato de evaporación y mezclar completamente con agua destilada mediante la espátula hasta que la pasta se vuelva suficientemente plástica para moldearla como una esfera. Se debe dejar curando la muestra durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente, donde para suelos de alta plasticidad este plazo no debe ser menor que 24 hr.

Con la muestra acondicionada, se toma una porción de la muestra de aproximadamente 1 cm³. Esta muestra se amasa entre las manos y luego se hace rodar con la palma de la mano o la base del pulgar sobre la superficie de amasado conformando un cilindro. La operación debe ser repetida hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm y no pueda ser reamasado ni reconstituido. Llegado a este punto, se deben reunir las fracciones del cilindro disgregado y colocar en un recipiente tarado. Se determina y registra su humedad de acuerdo con NCh 1515 Of79. Luego, se debe repetir el procedimiento con dos porciones más de la muestra de ensayo.

Análisis de resultados para la determinación de Limite Plástico

Tomando en consideración el procedimiento descrito en el punto A.3.4.2 del informe, se tiene que la humedad del suelo, cuando este cumple los requerimientos expuestos anteriormente corresponde al límite plástico del suelo, w_{LP} .

Índice de Plasticidad

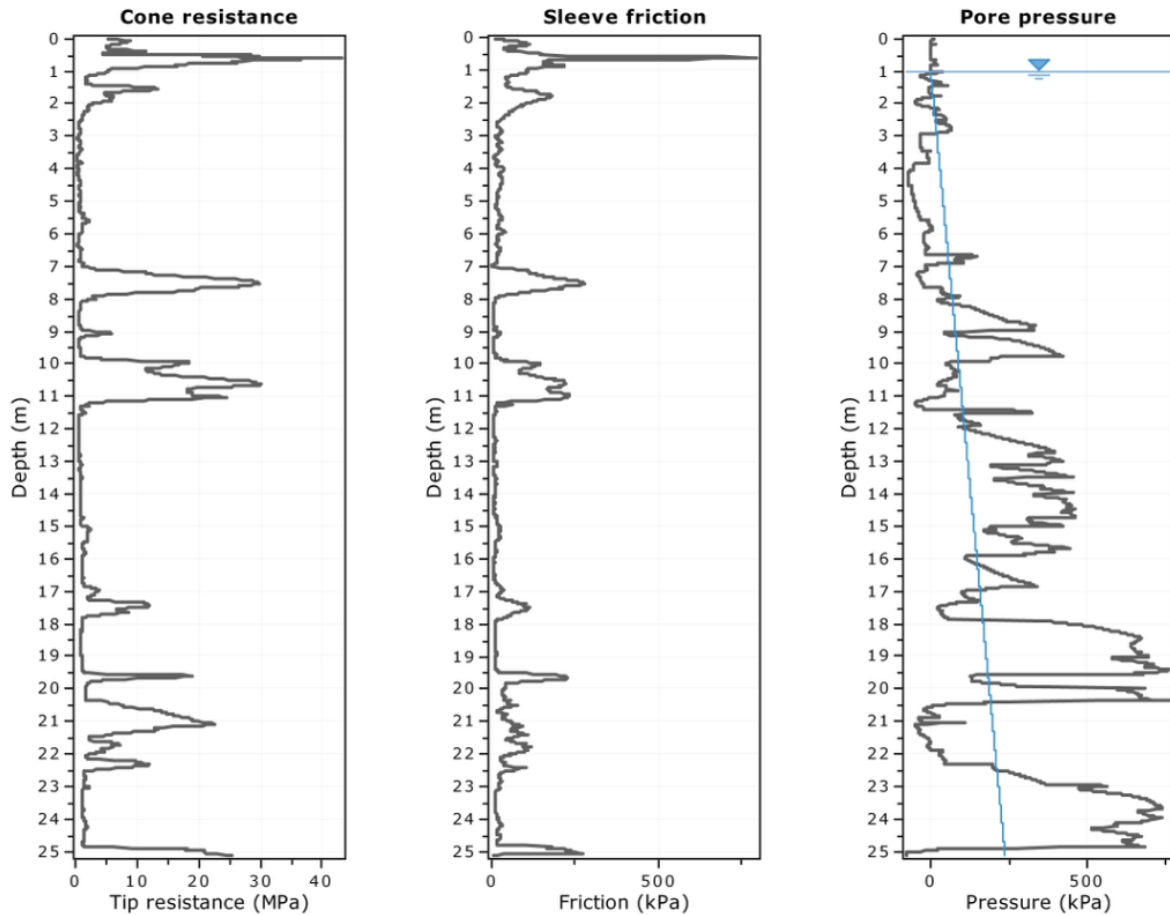
El Índice de Plasticidad, IP, mide el rango de humedad entre el límite plástico y el límite líquido en la cual un suelo puede comportarse de forma plástica, es decir, cambiar de forma sin fracturarse. Es por ello, que este valor proporciona una indicación de la plasticidad del suelo, o su capacidad para deformarse bajo esfuerzo sin perder su cohesión. La manera de determinar el índice de plasticidad se presenta en la Ecuación A.3

$$IP = w_{LL} - w_{LP} \quad (A.3)$$

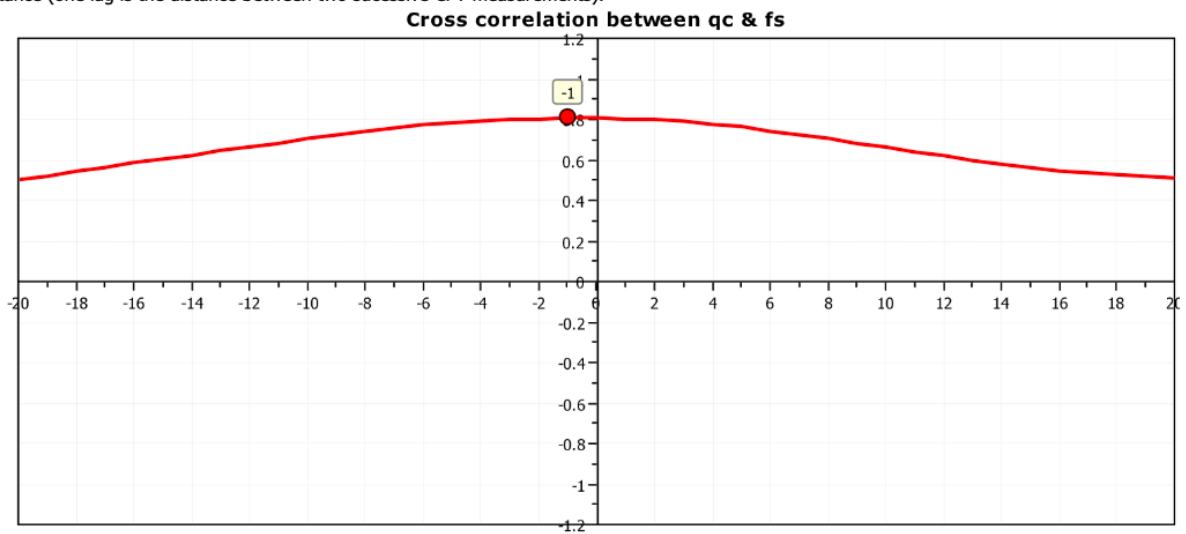
Donde IP corresponde al índice de plasticidad; w_{LL} corresponde al límite líquido; w_{LP} corresponde al límite plástico.

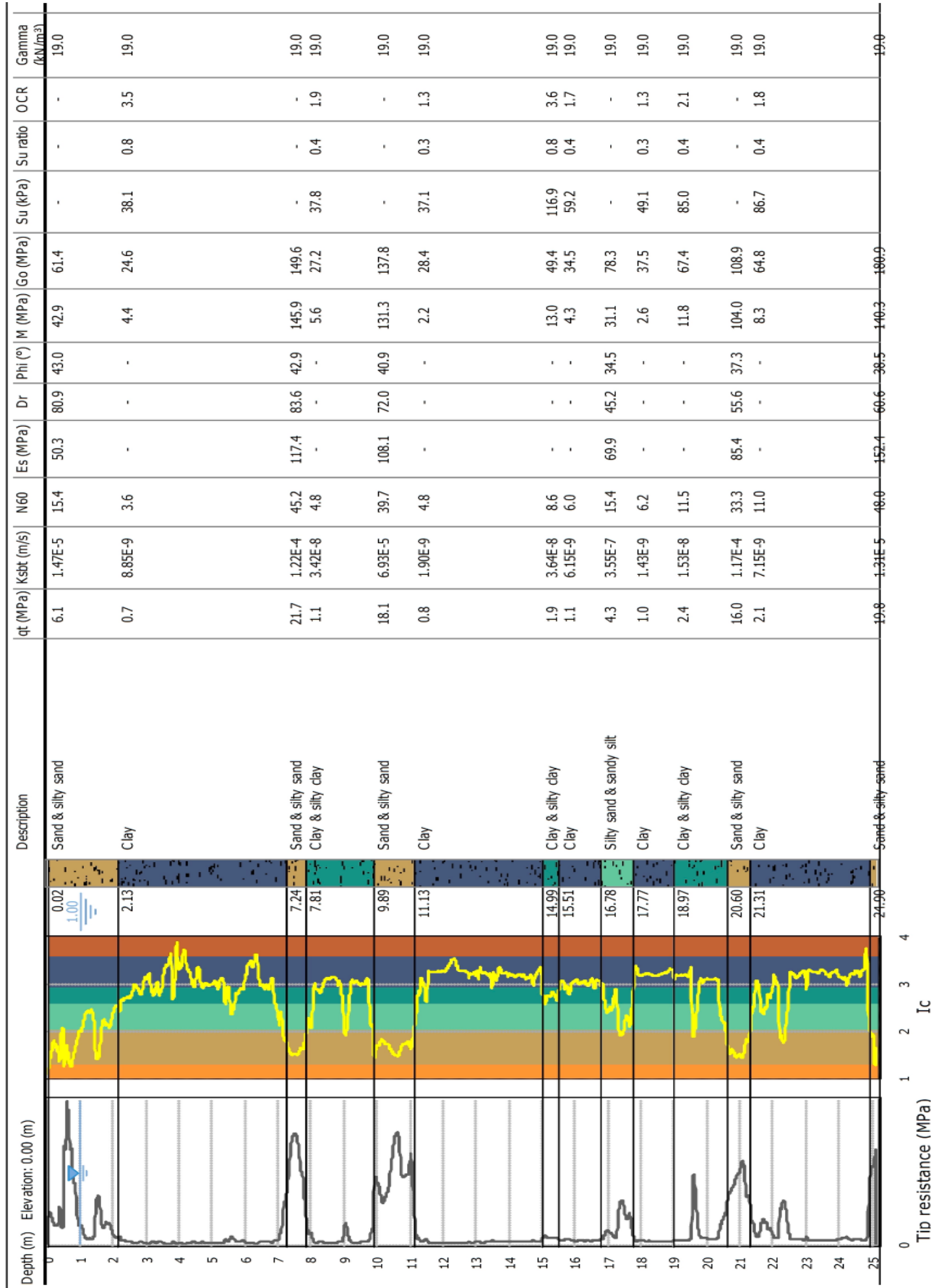
ANEXO 5.2: REPORTE ENSAYO CPTu

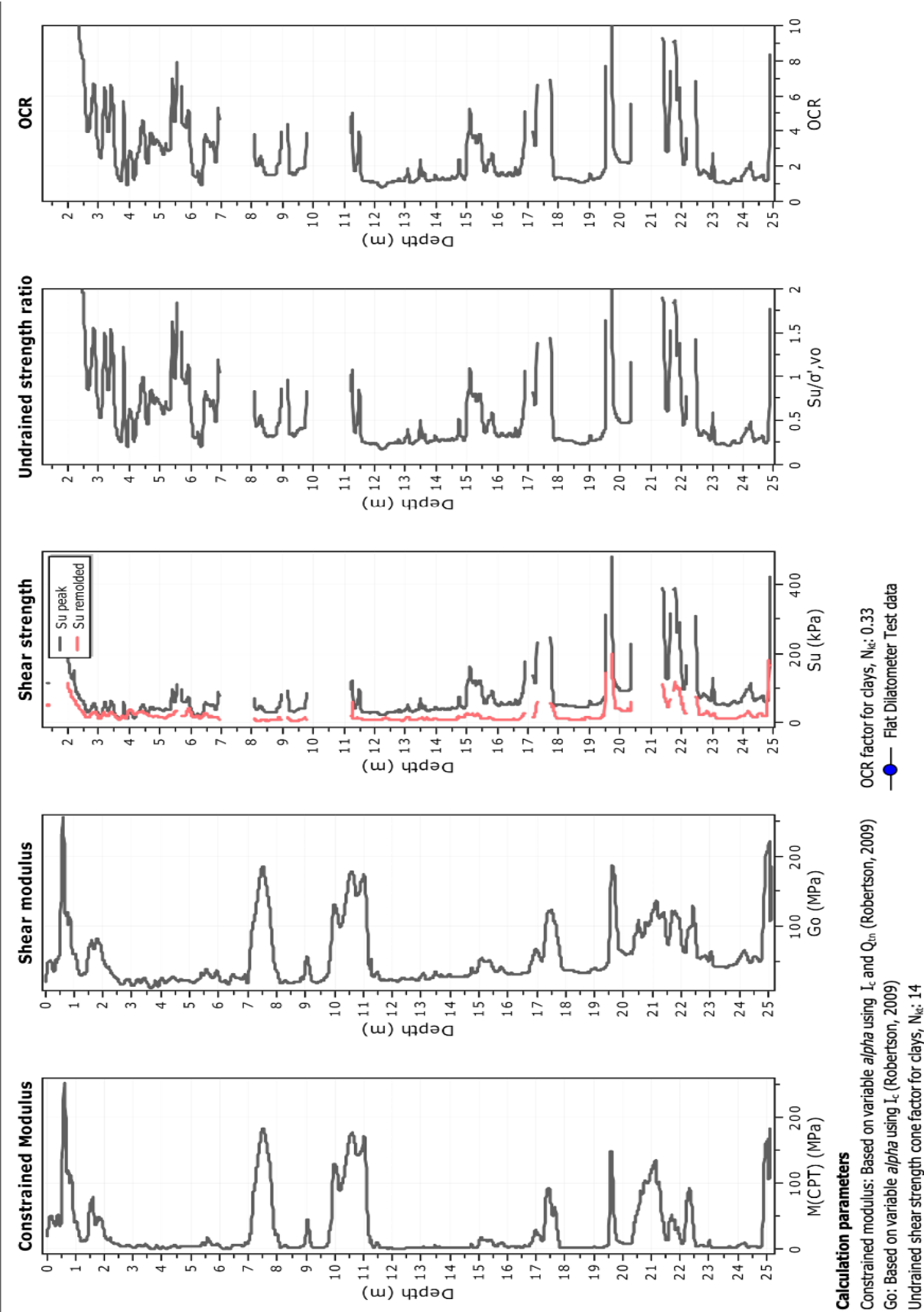
En el siguiente anexo se preseta el reporte del ensayo CPTu entregado por el software CPeT-IT v.3.9.5.1.



The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw qc and fs values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).







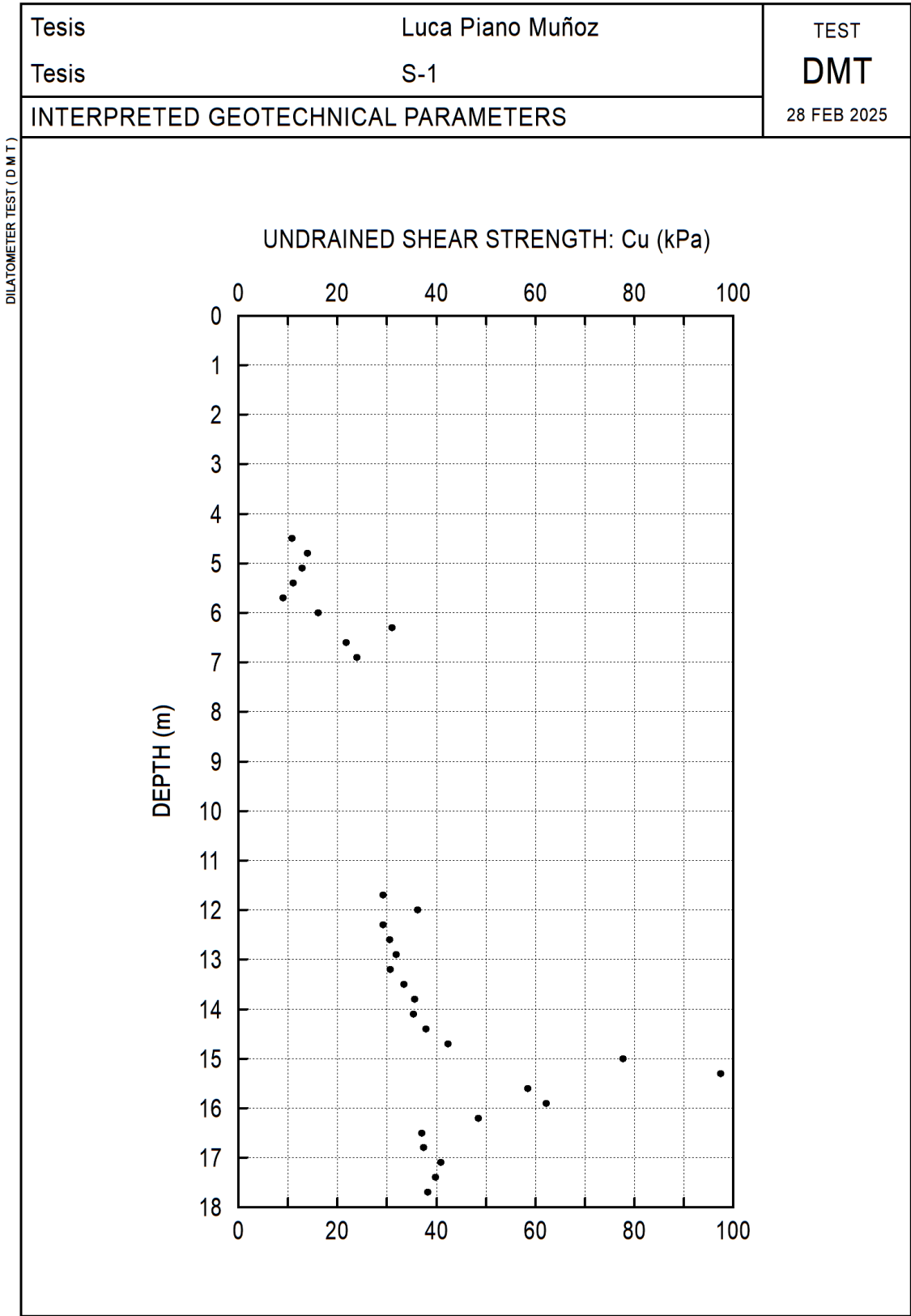
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _o (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
21.31	3.59	7.15E-09 (±5.45E-06)	11.0 (±6.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	8.3 (±24.1)	64.8 (±28.2)	86.7 (±80.4)	0.4 (±0.4)	1.8 (±1.9)	19.0 (±0.0)
24.90	0.22	1.31E-05 (±1.03E-04)	48.0 (±5.5)	152.4 (±20.2)	60.6 (±3.1)	38.5 (±0.7)	140.3 (±24.6)	180.9 (±37.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	19.0 (±0.0)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface

ANEXO 5.3: REPORTE ENSAYO DMT

En el siguiente anexo se preseta el reporte del ensayo DMT entregado por el software SMDT Pro.



Z (m)	A (kPa)	B (kPa)	C (kPa)	Po (kPa)	P1 (kPa)	P2 (kPa)	Gamma (kN/m ³)	Sigma' (kPa)	Uo (kPa)	Id	Kd	Ed (MPa)	Ud	Ko	Ocr	Phi (Deg)	M (MPa)	Cu (kPa)	DMT DESCRIPTION
15.6	570	665		591	615		13.7	129	131	0.05	3.6	0.8		0.90	2.5		1.2	58	MUD AND/OR PEAT
15.9	597	690		618	640		13.7	130	134	0.05	3.7	0.8		0.93	2.6		1.1	62	MUD AND/OR PEAT
16.2	513	610		534	560		13.7	131	137	0.07	3.0	0.9		0.79	1.9		1.2	48	MUD AND/OR PEAT
16.5	439	529		460	479		13.7	132	140	0.06	2.4	0.7		0.65	1.3		0.7	37	MUD AND/OR PEAT
16.8	447	578		466	528		16.7	134	143	0.19	2.4	2.1		0.65	1.3		2.2	37	CLAY
17.1	475	605		494	555		16.7	136	146	0.18	2.6	2.1		0.69	1.5		2.3	41	CLAY
17.4	472	602		491	552		16.7	138	149	0.18	2.5	2.1		0.67	1.4		2.3	40	CLAY
17.7	465	590		484	540		16.7	140	152	0.17	2.4	1.9		0.64	1.3		2.0	38	CLAY
18.0	405	790		411	740		16.7	142	155	1.28	1.8	11.4					9.7		SANDY SILT

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Civil
Carrera	: Ingeniería Civil
Nombre del memorista	: Luca Antonio Piano Muñoz
Título de la memoria	: Calibración de la resistencia al corte no drenado obtenido a partir de ensayos CPTu y DMT en un suelo fino característico de Concepción, Región del Biobío.
Fecha de la presentación oral	:
Profesor(es) Guía	: Mario Valenzuela Oportus
Profesor(es) Revisor(es)	: Rodrigo Silva
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

La caracterización de suelos finos y cohesivos tradicionalmente requieren programas de ensayos que incluyen pruebas de laboratorio para determinar la resistencia al corte no drenada S_u , preponderantemente ensayo Triaxiales no drenado UU y CIU. Sin embargo, gracias a la incorporación de nuevos métodos de prospección, es posible determinar la resistencia al corte no drenado a partir de ensayos practicados directamente insitu. Para mejorar la precisión de estas expresiones, la literatura especializada recomienda realizar calibraciones para una mejor caracterización mecánica de depósitos de suelo fino característicos de una zona en particular.

El propósito de esta memoria de título es calibrar las expresiones utilizadas al determinar la resistencia al corte no drenada, S_u , a partir de los ensayos de penetración de cono con medición de presión de poros, CPTu, y el ensayo de dilatómetro plano, DMT, para un subsuelo característico de la zona de Concepción, Región del Biobío, a partir de ensayos triaxiales no drenados no consolidados, UU, realizados sobre muestras inalteradas obtenidas por medio de muestreadores de pared delgada en terreno. Para ello, se llevó a cabo una serie de ensayos en un sitio ubicado en la Ruta 150, perteneciente a la Formación Cosmito.

Considerando la resistencia al corte no drenada, se obtuvo una variabilidad media de $-9,32 \pm 0,35\%$ en comparación a los resultados de los ensayos triaxiales UU al utilizar un factor N_{kt} igual a 14 en el ensayo CPTu. En base a ello, se determinó un factor N_{kt} igual a 12,7 que reduce la variabilidad media a $-0,05 \pm 0,36\%$. Por otro lado, para el ensayo DMT, se obtuvo una variabilidad media de $-8,15 \pm 1,25\%$ en relación a los resultados de los ensayos triaxiales UU, en donde se determinó un factor de corrección igual a 1,089 el cual reduce la variabilidad media a $-0,02 \pm 1,37\%$. Los resultados de este estudio contribuyen a mejorar la confiabilidad de los métodos in-situ evaluados, sin embargo, dada la baja cantidad de ensayos que se disponen, no se asegura que estos sean válidos para toda la zona de Concepción, ni menos para su uso en el diseño de obras civiles.

