



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

# **ESTUDIO DE CORRELACIONES ENTRE LOS ENSAYOS DE CBR EN TERRENO Y CPT**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JOSÉ MIGUEL MASIHY ZAWADZKI

PROFESOR GUÍA:

RICARDO ANDRÉS MOFFAT COVARRUBIAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

CÉSAR RODRIGO PASTÉN PUCHI

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil.  
**POR:** José Miguel Masihy Zawadzki.  
**FECHA:** 21/10/2020  
**PROFESOR GUÍA:** Ricardo Moffat C.

## **ESTUDIO DE CORRELACIONES ENTRE LOS ENSAYOS DE CBR EN TERRENO Y CPT**

La capacidad soportante de la subrasante es clave en el diseño de pavimentos, para proyectos viales. El ensayo de Razón de Soporte de California (CBR) es una metodología adecuada para este tipo de investigación. Este se realiza tanto en terreno como en laboratorio y entrega un índice de resistencia, que caracteriza la capacidad de la subrasante, con respecto a un material normalizado. Además, el parámetro mencionado corresponde a un valor confiable al momento de evaluar el comportamiento estático del suelo. Por otro lado, existen nuevos ensayos en el área de la geotecnia como, por ejemplo, el Cono Estático (CPT) o también llamado Piezocono. Este obtiene resultados confiables y repetibles, utilizando tecnologías avanzadas, que permiten comprender el comportamiento del subsuelo.

El presente trabajo estudia la existencia de correlaciones entre los parámetros entregados por los ensayos CBR de terreno y CPT. De esta manera, se busca obtener el valor de un índice confiable, para el diseño de pavimentos, a partir de los resultados de una metodología diferente y más rápida como el CPT. Por lo tanto, se llevan a cabo 36 mediciones en terreno, para cada uno de los ensayos mencionados. Estos se realizan en la Laguna Aculeo y en el Puente Águila Norte, ambas zonas pertenecientes a la comuna de Paine, Región Metropolitana. Además, se extraen muestras de suelo para cada lugar ensayado, con motivo de obtener el contenido de agua de este, en terreno.

De los resultados entregados por cada ensayo, se tiene que se encuentra una correlación lineal creciente, entre el índice CBR y el parámetro de resistencia de punta, perteneciente al CPT. Esta tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,6465, indicando un grado de correlación moderado alto. Se propone un intervalo de confianza, en base a herramientas estadísticas, que permite una mayor libertad al momento de utilizar dicha relación empírica. Por otra parte, se obtiene el tipo de suelo según comportamiento (SBT), para cada uno de los datos estudiados. Dicha información es entregada por el software “CPeT-IT” y contextualiza el comportamiento de las mediciones hechas en terreno. Con respecto a los valores de humedad, se tiene que estos son bastante bajos y no pueden ser analizados. Por esto, se recomienda cambiar la metodología implementada. Además, se encuentra que al elegir el CPT por sobre el CBR, el tiempo dedicado a la ejecución de los ensayos disminuye considerablemente. Finalmente, se correlacionan ambas metodologías con el módulo resiliente y se grafican para validar el modelo obtenido.

## DEDICATORIA

*A mi familia,  
con todo mi amor.*

## AGRADECIMIENTOS

Mi familia es y ha sido siempre el pilar más importante de mi vida. Nunca me faltó el apoyo de mi padre ante los problemas que tuve que enfrentar. Sus bromas siempre me sacaban una sonrisa. A pesar de que la mayoría de las veces estas no tuvieran gracia, el amor de mi viejo y las ganas de verme feliz las sentía siempre en cada chiste. Cada sentimiento de pena y soledad, dada la pandemia, fue consolado por mi madre. Siempre se hizo el tiempo de escucharme y aconsejarme. Incluso, me llamaba diariamente para entregarme cariño y compañía. Esas conversaciones eran oro. Había momentos en los que me perdía y mi norte desaparecía. El consejo de mi hermana, mi maestra, siempre me aterriza de vuelta en el camino correcto. Me hablaba desde su sabiduría, me dejaba claro que era importante y que no. Está de más decir que no estaría donde estoy hoy, si no hubiera contado con el amor incondicional de cada uno de ustedes. Por esto y mucho más, les agradezco de corazón.

Quisiera agradecer también al Profesor Ricardo Moffat, quien me orientó durante este largo proceso. Sus consejos siempre fueron un aporte importante, tanto para esta investigación como para mi aprendizaje personal. Valoro mucho la oportunidad que me confió y el tiempo que le dedicó a su labor como Profesor Guía. A don Sergio gracias por la paciencia, por apoyarme en cada ensayo sin importar el calor del verano y también por su amistad. A los Profesores Juan Felipe Beltrán y César Pastén, quisiera darles las gracias por su tiempo y disposición durante este periodo. El compañerismo lo encontré en la Cami, con quien trabajamos codo a codo. Si no fuera por la Catita y Pablo, que me facilitaron transporte, tampoco hubiera podido completar esta tarea. Por esto y mucho más, les agradezco de corazón.

Mis amigos también fueron parte importante de esto. La compañía del Provi y sus consejos, siempre me tranquilizaban. Con mil reuniones y una tesis al hombro, siempre estuvo presente. Las reuniones por Zoom con Pablo y Pancho, me hacían olvidar que estaba solo. Nos molestábamos hasta por si acaso y el humor que compartíamos siempre venía acompañado de una enseñanza. Las video llamadas inesperadas de Srdjan eran el incentivo perfecto para avanzar. Con estas me transportaba a los gratos recuerdos de mi “oficina” en la cafeta, donde trabajábamos juntos. El aburrimiento de pandemia desaparecía en un duo con Julio. A pesar de los muchos retos, las risas no faltaron y eran recuerdos vivos de nuestra amistad durante la infancia. Comentar sobre temas interesantes y reírnos de estos mismos, eran las conversaciones que tenía con Jota. De esas que se tienen con cualquier otro hermano mayor. Las ganas de entregar un buen trabajo y sentir que lo diste todo, fue un gusto adquirido de haber compartido con mi amigo Martín. Quizás nos costó al principio, pero me gusta pensar que ambos aprendimos lo mejor del otro. Relajarme no fue fácil, pero al ver como Waldo transmitía esa confianza con respecto a su trabajo, me hizo buscar lo mismo en el mío. Con Felipe no faltaban las llamadas de hora y media, para ponernos al tanto de nuestras situaciones amorosas. Estas me dejaban en claro que la distancia no separa amistades. Las clásicas preguntas del estilo “¿Cómo va la tesis?” o “¿Cuándo entregas?” daban ganas de bloquear a tales personajes. Pero dejando lado mi idiotez, la preocupación y el interés de muchos amigos se valora de verdad. Por esto y mucho más, les agradezco de corazón.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....                                     | 1  |
| 1.1.    Introducción.....   | 1  |
| 1.2.    Objetivos.....  | 2  |
| 1.2.1.    Objetivo General.....                                   | 2  |
| 1.2.2.    Objetivos Específicos.....                              | 2  |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....                                    | 3  |
| 2.1.    Antecedentes.....   | 3  |
| 2.1.1.    Revisión Bibliográfica.....                             | 3  |
| 2.1.2.    Antecedentes del Terreno.....                           | 4  |
| 2.2.    Bases Teóricas.....                                       | 6  |
| 2.2.1.    Conceptos Básicos de Suelos.....                        | 6  |
| 2.2.1.1.    Definición Suelo.....                                 | 6  |
| 2.2.1.2.    Clasificación de Suelos.....                          | 6  |
| 2.2.1.3.    Humedad.....  | 6  |
| 2.2.1.4.    Tensión Inducida por Cargas en Superficie.....        | 7  |
| 2.2.2.    Pavimento.....  | 8  |
| 2.2.3.    Ensayos de Terreno.....                                 | 9  |
| 2.2.3.1.    Ensayo de Razón de Soporte de California (CBR).....   | 9  |
| 2.2.3.2.    Ensayo de Penetración Estática o Piezocono (CPT)..... | 11 |
| 2.2.4.    Elementos de Estadística.....                           | 14 |
| 2.2.4.1.    Regresión Lineal Simple.....                          | 14 |
| 2.2.4.2.    Criterio de Mínimos Cuadrados.....                    | 14 |
| 2.2.4.3.    Coeficiente de Determinación.....                     | 15 |

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....  | 16 |
| 3.1. Ubicación de Ensayos.....  | 16 |
| 3.2. Extracción de Muestras .....   | 18 |
| 3.3. Ensayo CBR de Terreno .....  | 21 |
| 3.4. Ensayo CPT .....   | 26 |
| CAPÍTULO 4: RESULTADOS .....  | 31 |
| 4.1. Ensayo de Humedad .....  | 31 |
| 4.2. Ensayo CBR.....  | 32 |
| 4.3. Ensayo CPT .....   | 34 |
| CAPÍTULO 5: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....                       | 37 |
| 5.1. Comparación de Tiempos de Ejecución de los Ensayos.....                    | 37 |
| 5.2. Ensayo CBR con respecto a la Humedad .....                                 | 37 |
| 5.3. Ensayo CBR con respecto a CPT .....  | 38 |
| 5.3.1. Índice CBR con respecto a la Resistencia de Punta .....                  | 38 |
| 5.3.2. Índice CBR con respecto al Fuste .....                                   | 42 |
| 5.4. Ensayos CBR y CPT con respecto al Tipo de Suelo según Comportamiento ..... | 46 |
| 5.5. Correlación de Módulo Resiliente .....                                     | 50 |
| CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES .....  | 52 |
| CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES .....   | 54 |
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 55 |
| ANEXOS .....  | 58 |
| ANEXO A: Fotografías .....  | 58 |
| ANEXO B: Ensayo CBR.....  | 64 |
| ANEXO C: Ensayo CPT .....   | 77 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Coordenadas ensayos de terreno. ....   | 17 |
| Tabla 2: Tipo de muestras obtenidas en terreno, su peso y masa de agua.....               | 19 |
| Tabla 3: Resultados de masa de agua presentes en las muestras.....                        | 31 |
| Tabla 4: Resultados ensayo CBR de terreno. ....   | 33 |
| Tabla 5: Profundidades consideradas para resultados de resistencia de punta y fuste. .... | 34 |
| Tabla 6: Resultados de resistencia de punta a distintas profundidades. ....               | 35 |
| Tabla 7: Resultados de fuste a distintas profundidades.....                               | 36 |
| Tabla 8: Comparación de tiempos de ejecución para los ensayos CBR de terreno y CPT. .     | 37 |
| Tabla 9: Zonas de los SBT correlacionados con resultados del ensayo CPT.....              | 47 |
| Tabla 10: Tipo de suelo según comportamiento para cada ensayo a $Z = 20$ [cm]. ....       | 48 |
| Tabla 11: Resultados ensayo CBR N°1 corregido. ....                                       | 64 |
| Tabla 12: Resultados ensayo CBR N°2.....  | 64 |
| Tabla 13: Resultados ensayo CBR N°3.....  | 65 |
| Tabla 14: Resultados ensayo CBR N°4.....  | 65 |
| Tabla 15: Resultados ensayo CBR N°5 corregido. ....                                       | 65 |
| Tabla 16: Resultados ensayo CBR N°6 corregido. ....                                       | 66 |
| Tabla 17: Resultados ensayo CBR N°7.....  | 66 |
| Tabla 18: Resultados ensayo CBR N°8.....  | 66 |
| Tabla 19: Resultados ensayo CBR N°9.....  | 67 |
| Tabla 20: Resultados ensayo CBR N°10 corregido. ....                                      | 67 |
| Tabla 21: Resultados ensayo CBR N°11 corregido. ....                                      | 67 |
| Tabla 22: Resultados ensayo CBR N°12 corregido. ....                                      | 68 |
| Tabla 23: Resultados ensayo CBR N°13.....   | 68 |
| Tabla 24: Resultados ensayo CBR N°14.....   | 68 |
| Tabla 25: Resultados ensayo CBR N°15.....   | 69 |
| Tabla 26: Resultados ensayo CBR N°16.....   | 69 |
| Tabla 27: Resultados ensayo CBR N°17.....   | 69 |
| Tabla 28: Resultados ensayo CBR N°18.....   | 70 |
| Tabla 29: Resultados ensayo CBR N°19.....   | 70 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 30: Resultados ensayo CBR N°20.....            | 70 |
| Tabla 31: Resultados ensayo CBR N°21 corregido. .... | 71 |
| Tabla 32: Resultados ensayo CBR N°22.....            | 71 |
| Tabla 33: Resultados ensayo CBR N°23 corregido. .... | 71 |
| Tabla 34: Resultados ensayo CBR N°24.....            | 72 |
| Tabla 35: Resultados ensayo CBR N°25.....            | 72 |
| Tabla 36: Resultados ensayo CBR N°26.....            | 72 |
| Tabla 37: Resultados ensayo CBR N°27.....            | 73 |
| Tabla 38: Resultados ensayo CBR N°28.....            | 73 |
| Tabla 39: Resultados ensayo CBR N°29.....            | 73 |
| Tabla 40: Resultados ensayo CBR N°30.....            | 74 |
| Tabla 41: Resultados ensayo CBR N°31 corregido. .... | 74 |
| Tabla 42: Resultados ensayo CBR N°32.....            | 74 |
| Tabla 43: Resultados ensayo CBR N°33 corregido. .... | 75 |
| Tabla 44: Resultados ensayo CBR N°34.....            | 75 |
| Tabla 45: Resultados ensayo CBR N°35 corregido. .... | 75 |
| Tabla 46: Resultados ensayo CBR N°36.....            | 76 |
| Tabla 47: Resultados ensayo CPT N°1. ....            | 77 |
| Tabla 48: Resultados ensayo CPT N°2. ....            | 78 |
| Tabla 49: Resultados ensayo CPT N°3. ....            | 78 |
| Tabla 50: Resultados ensayo CPT N°4. ....            | 79 |
| Tabla 51: Resultados ensayo CPT N°5. ....            | 79 |
| Tabla 52: Resultados ensayo CPT N°6. ....            | 80 |
| Tabla 53: Resultados ensayo CPT N°7. ....            | 80 |
| Tabla 54: Resultados ensayo CPT N°8. ....            | 81 |
| Tabla 55: Resultados ensayo CPT N°9. ....            | 81 |
| Tabla 56: Resultados ensayo CPT N°10. ....           | 82 |
| Tabla 57: Resultados ensayo CPT N°11. ....           | 82 |
| Tabla 58: Resultados ensayo CPT N°12. ....           | 83 |
| Tabla 59: Resultados ensayo CPT N°13. ....           | 83 |
| Tabla 60: Resultados ensayo CPT N°14. ....           | 84 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 61: Resultados ensayo CPT N°15. .... | 84 |
| Tabla 62: Resultados ensayo CPT N°16. .... | 85 |
| Tabla 63: Resultados ensayo CPT N°17. .... | 85 |
| Tabla 64: Resultados ensayo CPT N°18. .... | 86 |
| Tabla 65: Resultados ensayo CPT N°19. .... | 86 |
| Tabla 66: Resultados ensayo CPT N°20. .... | 87 |
| Tabla 67: Resultados ensayo CPT N°21. .... | 87 |
| Tabla 68: Resultados ensayo CPT N°22. .... | 88 |
| Tabla 69: Resultados ensayo CPT N°23. .... | 88 |
| Tabla 70: Resultados ensayo CPT N°24. .... | 89 |
| Tabla 71: Resultados ensayo CPT N°25. .... | 89 |
| Tabla 72: Resultados ensayo CPT N°26. .... | 90 |
| Tabla 73: Resultados ensayo CPT N°27. .... | 90 |
| Tabla 74: Resultados ensayo CPT N°28. .... | 91 |
| Tabla 75: Resultados ensayo CPT N°29. .... | 91 |
| Tabla 76: Resultados ensayo CPT N°30. .... | 92 |
| Tabla 77: Resultados ensayo CPT N°31. .... | 92 |
| Tabla 78: Resultados ensayo CPT N°32. .... | 93 |
| Tabla 79: Resultados ensayo CPT N°33. .... | 93 |
| Tabla 80: Resultados ensayo CPT N°34. .... | 94 |
| Tabla 81: Resultados ensayo CPT N°35. .... | 94 |
| Tabla 82: Resultados ensayo CPT N°36. .... | 95 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Carta geológica de las zonas estudiadas. (Zamudio, 2011) .....   | 5  |
| Figura 2: Tensión vertical inducida para carga circular. (Lambe & Whitman, 1969, pág. 102).....  | 7  |
| Figura 3: Ilustración explicativa de la estructura y comportamientos de pavimentos flexibles y rígidos. (Cordo, 2013).....   | 8  |
| Figura 4: Equipo CBR de campo tipo (ASTM D4429-09a, 2009, pág. 3).....   | 10 |
| Figura 5: Gráfico del tipo de suelo según comportamiento estimado por CPT. (P.K. Robertson & K.L. Cabal, 2015, pág. 26).....   | 12 |
| Figura 6: Configuraciones comunes para conos (a) De tipo compresión con celdas de carga de punta y manga, (b) De tipo tensión con diseño de manga y (c) De tipo sustracción. (ASTM D5778-12, 2012, pág. 4) ..... | 13 |
| Figura 7: Ilustración de perfiles en profundidad del CPT para resistencia de punta, fuste, presión de poros, razón de fricción y el tipo de suelo. (P.K. Robertson & K.L. Cabal, 2015, pág. 31).....             | 13 |
| Figura 8: Camión CPT en Laguna Aculeo, Paine, Región Metropolitana. ....   | 16 |
| Figura 9: Muestras secadas al Sol. ....  | 18 |
| Figura 10: Equipo CBR de laboratorio.....  | 21 |
| Figura 11: Equipo CBR preparado en terreno, bajo el camión CPT. ....   | 22 |
| Figura 12: Curva de presión según deformación del ensayo CBR en terreno y curva corregida por irregularidades de superficie. (ASTM D1883-16, 2016, pág. 8) .....   | 23 |
| Figura 13: Suelo deformado media pulgada por ensayo CBR. ....  | 24 |
| Figura 14: Equipo CBR en profundidad preparado en terreno.....   | 25 |
| Figura 15: Camión CPT levantado y nivelado en Puente Águila Norte.....   | 26 |
| Figura 16: Interior de camión CPT.....   | 27 |
| Figura 17: Panel de control prensa hidráulica. ....  | 28 |
| Figura 18: Ejecución de ensayo CPT. ....   | 29 |
| Figura 19: Cono penetrando estrato superficial del suelo. ....   | 30 |
| Figura 20: Diagrama de dispersión de humedad con respecto al CBR. ....   | 38 |
| Figura 21: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a $Z = 5$ [cm]. ....   | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 22: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 10 [cm].   | 39 |
| Figura 23: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 15 [cm].   | 40 |
| Figura 24: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 20 [cm].   | 40 |
| Figura 25: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 25 [cm].   | 41 |
| Figura 26: Regresión lineal para datos de índice CBR y resistencia de punta a Z = 20 [cm].   | 42 |
| Figura 27: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 20 [cm].  | 43 |
| Figura 28: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 25 [cm].  | 43 |
| Figura 29: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 30 [cm].  | 44 |
| Figura 30: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 35 [cm].  | 44 |
| Figura 31: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 40 [cm].  | 45 |
| Figura 32: Regresión lineal para datos de índice CBR y fuste a Z = 30 [cm].  | 46 |
| Figura 33: Tipo de suelo según comportamiento para Z = 20 [cm].  | 47 |
| Figura 34: Intervalo de confianza sujeto a la regresión lineal de los datos de índice CBR y resistencia de punta, para Z = 20 [cm] con su SBT. | 49 |
| Figura 35: Diagrama de dispersión para módulos resilientes correlacionados de ensayos CBR y CPT.   | 50 |
| Figura 36: Diagrama de dispersión para módulos resilientes correlacionados según Newcomb & Birgisson y Mohammad.                               | 51 |
| Figura 37: Plataformas soportantes de madera de camión CPT.  | 58 |
| Figura 38: Camión CPT levantado, visto desde lejos, con equipo CBR de terreno montado.   | 58 |
| Figura 39: Computador integrado camión CPT.  | 58 |
| Figura 40: Sistema GPS tomando coordenadas UTM en terreno.   | 58 |
| Figura 41: Ubicaciones ensayos exterior Laguna Aculeo 1.   | 59 |
| Figura 42: Ubicaciones ensayos exterior Laguna Aculeo 2.   | 60 |
| Figura 43: Ubicaciones ensayos exterior Laguna Aculeo 3.   | 61 |
| Figura 44: Ubicaciones ensayos interior Laguna Aculeo.   | 62 |
| Figura 45: Ubicaciones ensayos Puente Águila Norte.  | 63 |

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción

Los ensayos de terreno que obtienen la capacidad soportante de la subrasante, son una parte importante en los proyectos viales. De estos, se obtienen variables de entrada necesarias para el diseño de pavimentos. Dado que en la actualidad existen nuevos métodos más eficientes para la obtención de parámetros del suelo, surge la posibilidad de aplicar estas tecnologías en el área mencionada anteriormente. Una forma de utilizar estas metodologías más recientes, es correlacionar los resultados de estas con variables entregadas por ensayos más antiguos y conocidos. De esta manera, se obtiene una relación empírica que permite calcular valores de diseño importantes, a partir de instrumentos nuevos, de mejor calidad y de forma más rápida.

En el presente trabajo de investigación, se realiza un estudio de correlaciones entre los resultados de los ensayos de terreno, Razón de Soporte de California (CBR) y el Cono Estático o Piezocono (CPT). Se quiere encontrar un factor de correlación para los valores obtenidos, que permita validar la existencia de una relación entre ambos métodos. Las mediciones se ejecutan en la comuna de Paine, Región Metropolitana, más específicamente en la Laguna Aculeo y el Puente Águila Norte. Se extraen muestras en las zonas de interés, con motivo de medir porcentajes de humedad en terreno. El ensayo CBR es realizado a un metro de distancia del CPT y se obtienen 36 resultados de cada uno. Se analiza el comportamiento de estos datos, por medio de gráficos de dispersión y otras herramientas estadísticas. Para complementar el análisis se identifica el tipo de suelo de cada valor, correlacionando las mediciones del CPT por medio del software “CPeT-IT”.

Este documento está conformado por seis capítulos, incluyendo en el primero la presente introducción junto a los objetivos del trabajo. El segundo corresponde a un marco teórico, en donde se ven los antecedentes y las bases teóricas en las cuales se respalda lo planteado en este estudio. En el tercer capítulo se explica la metodología aplicada para cada uno de los ensayos, su ubicación y los equipos utilizados. En el cuarto se presentan los resultados obtenidos de los ejercicios en terreno. El quinto integra el análisis de los datos pertenecientes al CBR, CPT, humedad, entre otros. Luego, en el sexto y último capítulo, se realizan las conclusiones y recomendaciones más relevantes con respecto a lo abordado en este trabajo. Finalmente, se mencionan las distintas referencias bibliográficas utilizadas en esta investigación.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Estudiar la existencia de una correlación entre los ensayos CBR de terreno y CPT, para el diseño de pavimentos en proyectos viales.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Llevar a cabo revisión bibliográfica con respecto a estudios de correlación previos, de ambos ensayos.
- Preparar el ensayo CBR en terreno.
- Realizar mediciones en terreno, de ensayos CBR y CPT en arenas y limos.
- Clasificar los suelos ensayados.
- Evaluar el efecto de la humedad en el índice CBR.
- Realizar ensayo CBR en profundidad.
- Analizar los resultados de ambos ensayos, por medio de gráficos de dispersión.
- Determinar el grado de correlación entre los ensayos CBR de terreno y CPT.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes**

#### **2.1.1. Revisión Bibliográfica**

Previo a la construcción de obras civiles, se realizan análisis de suelo que permitan garantizar la estabilidad física de la fundación. Esto también aplica para obras viales, en donde se deben estudiar las propiedades soportantes de la subrasante y realizar mejoramientos de esta, en el caso de ser necesario. De esta manera, se generan condiciones aptas para la instalación y mantención del pavimento.

El California Bearing Ratio (CBR) corresponde a un ensayo, que sirve como indicador de la capacidad soportante del suelo. Bowles comenta en su documento “Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil” lo siguiente:

El ensayo de relación de soporte de California se desarrolló por parte de la División de Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como sub-rasante o material base en construcción de carreteras. Durante la segunda guerra mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos. (Bowles, 1981, pág. 190)

Considerando la antigüedad del ensayo y tomando en cuenta que “debido a su simplicidad y costo relativamente bajo, este método ha sido ampliamente utilizado alrededor del mundo...” (Muslih Y. & Nikraz H., 2013, pág. 211); es adecuado pensar que el índice CBR corresponde a un indicador útil y de confianza, al momento de analizar capacidades de soporte en diseños de pavimentos.

En Chile, el procedimiento de este ensayo se encuentra establecido por la Norma Chilena 1852 Oficial del 2010. En esta se detallan los pasos para determinar la razón de soporte de suelos compactados, en laboratorio. Por otro lado, para el CBR realizado en terreno no se tiene una norma nacional que establezca el procedimiento de esta metodología, pero si se cuenta con la norma internacional ASTM D4429-09a (2009), de la Sociedad Americana de Ensayo de Materiales, a pesar de haber sido retirada. Además, se cuenta con la norma ASTM D1883-16 (2016), la cual regula los ensayos CBR de laboratorio, para suelos compactados.

El área geotécnica cuenta con una gran variedad de estudios de correlaciones, entre sus ensayos. Dentro de estos, el índice CBR ha sido analizado en varias ocasiones encontrando, por ejemplo, relaciones empíricas razonables entre este valor y la resistencia de corte, obtenida en ensayos de corte directo, según plantean Yusep Muslih y Hamid Nikraz (2013). También se han hallado, como menciona Farshad Amini (2003), relaciones entre el Dynamic Cone Penetrometer (DCP) y el índice CBR. Además, se han buscado

entre resultados del Standard Cone Penetration (SPT) y el CBR de campo, siendo necesario según plantea Jairo Puentes (2018) el investigar aún más para correlacionar de forma eficaz estos dos ensayos.

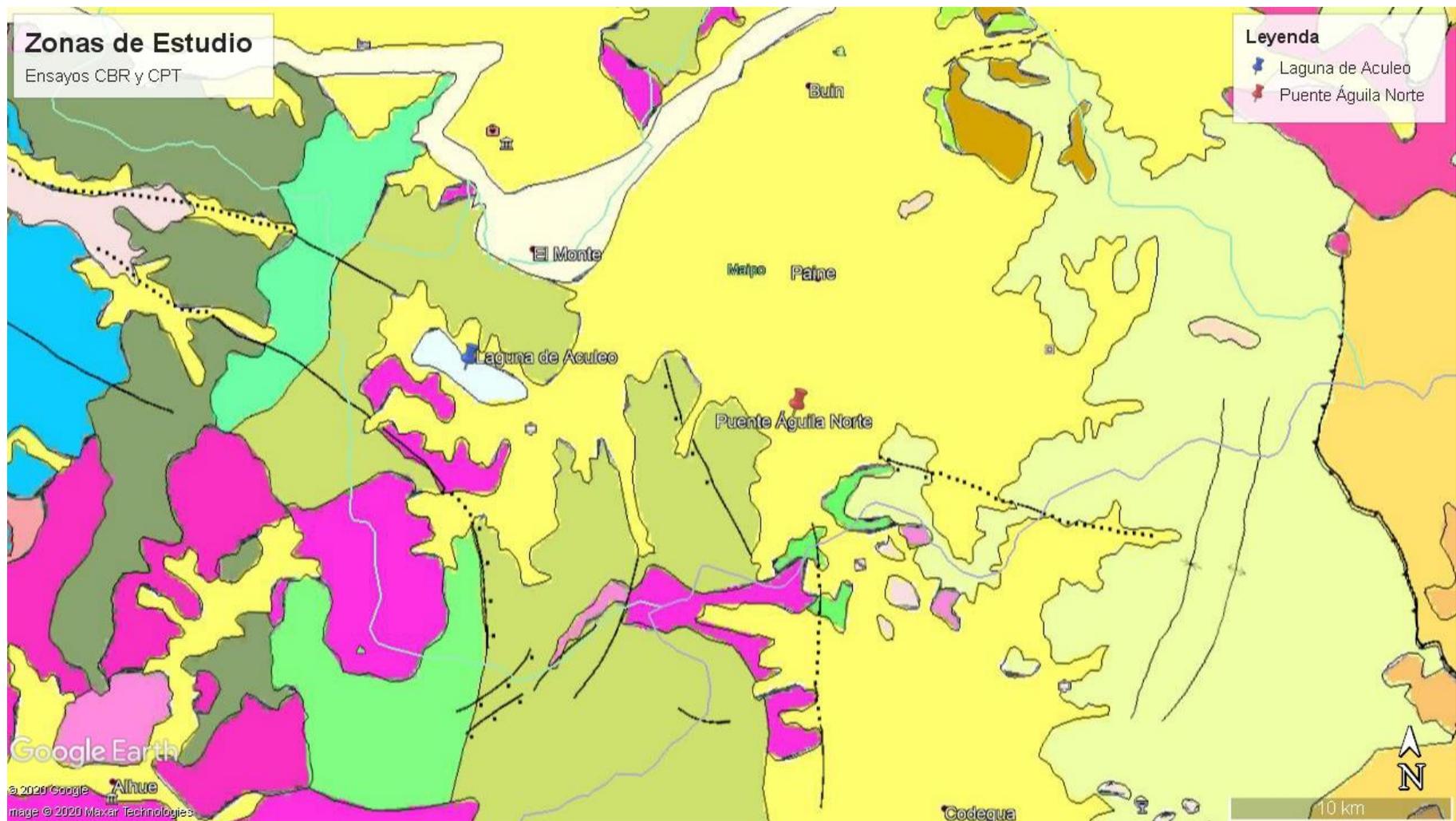
Los constantes avances en la tecnología promueven el uso de nuevos equipos en el ámbito de la geotecnia e ingeniería vial. El Cone Penetration Test (CPT) o Cono Estático, es un reflejo de estos cambios. “Muchos consultores lo usan como su herramienta primaria de exploración, reemplazando el Standard Penetration Test (SPT)” (Dehler W. & Labuz J., 2007, pág. 1). Esto se debe a la calidad de los resultados entregados por el ensayo, dado que registra valores de resistencia de punta, fuste, disipación de presiones de poros, entre otros. Además, según plantea Farshad Amini (2003) el CPT es un ensayo rápido, repetible, confiable y de bajo costo, a pesar de no ser apto gravas.

Actualmente no existe norma que establezca el procedimiento del ensayo CPT en Chile. Aun así, la NCh 1508 Of. 2014 especifica que este método se rige por la ASTM D5778-12 (2012).

Según lo anterior, es adecuado considerar el estudio de una correlación entre el ensayo CBR de terreno y el CPT, como una oportunidad para establecer una herramienta útil en el diseño de pavimentos. De esta manera, se tiene la posibilidad de encontrar y/o estimar la capacidad soportante de la subrasante, por medio un ensayo más rápido y barato, en términos de un índice confiable y útil, como lo es el CBR.

### **2.1.2. Antecedentes del Terreno**

Las zonas investigadas corresponden a la Laguna de Aculeo y sectores aledaños al Puente Águila Norte. Ambos lugares se encuentran ubicados en la comuna de Paine, Región Metropolitana. En la Figura 1, se muestra la carta geológica de Chile (Zamudio, 2011) de los sectores mencionados. La imagen presentada, se obtiene utilizando el software “Google Earth”. De esta, se observa que los suelos estudiados en el presente documento, corresponden a depósitos aluviales y coluviales de tipo Q1, del periodo cuaternario. Estos sedimentos son producto de procesos de relleno de los ríos Maipo y Angostura (Brantt, 2011).



**Figura 1: Carta geológica de las zonas estudiadas. (Zamudio, 2011)**

## 2.2. Bases Teóricas

### 2.2.1. Conceptos Básicos de Suelos

#### 2.2.1.1. Definición Suelo

En su libro “The Engineering of Foundations“, Rodrigo Salgado (2007) postula la siguiente definición para el suelo:

Una simple definición del suelo es que este es un medio particulado, con partículas resultantes de una variedad de procesos geológicos, y es compuesto de una variedad de minerales, con un rango de tamaños de partícula del orden de magnitud de entre 1 nanómetro y 1 metro. El espacio entre las partículas, referido como poros, es llenado con uno o más de los siguientes: aire, algún otro gas, agua, o algún otro líquido. (Salgado, 2007, pág. 63)

#### 2.2.1.2. Clasificación de Suelos

De los suelos ensayados en terreno, se obtienen muestras tanto alteradas como inalteradas. Estas se analizan en laboratorio, para complementar o fundamentar ciertos estudios del área geotécnica. Por medio de este proceso, se pueden obtener parámetros de suelo que permiten identificar las muestras según sus características. En la ingeniería existen distintos sistemas de clasificación de suelos como, por ejemplo, el Unified Soil Classification System (USCS) y el American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

#### 2.2.1.3. Humedad

Felipe Villalobos (2016) menciona que el suelo está compuesto por tres fases, sólida, líquida y gaseosa. De estas, la segunda corresponde en su mayoría a agua dulce, pudiendo estar presentes también otros fluidos. La medición más común en laboratorio es de la masa húmeda y seca, siendo esta última obtenida por medio de un secado al horno a temperaturas de 110°C, aproximadamente. Para determinar la presencia de estos líquidos en el suelo se obtiene la humedad o contenido de agua  $\omega$ . Esta variable se obtiene según la ecuación 2.1., en donde  $W_w$  y  $W_s$  corresponden a la masa de agua y suelo seco, respectivamente.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 [\%] \quad 2.1.$$

Existe otro procedimiento de secado, a parte del realizado por horno en laboratorio, el cual se lleva a cabo en terreno. Este es conocido como método de secado al aire, el cual consiste en exponer la muestra al sol durante un periodo de 48 horas, a temperatura ambiente de 30°C aproximadamente. Christian González (2012), en su memoria para optar al grado de magister de ingeniería geotécnica, recomienda el método anteriormente mencionado, en base a las alteraciones encontradas para los límites de Atterberg y densidades de Proctor de las muestras de suelo de origen volcánico. Estas modificaciones se deben a las altas temperaturas de secado a las que son expuestas los suelos en horno, las cuales pueden modificar la estructura original de este.

#### 2.2.1.4. Tensión Inducida por Cargas en Superficie

T. Lambe & R. Whitman (1969) plantean lo siguiente, con respecto a las tensiones inducidas en el suelo debido a cargas superficiales:

Los resultados de la teoría de la elasticidad a menudo se usan para calcular las tensiones inducidas dentro de las masas de suelo por cargas aplicadas externamente. La suposición de esta teoría es que el estrés es proporcional a la tensión. La mayoría de las soluciones útiles de esta teoría también suponen que el suelo es homogéneo (sus propiedades son constantes de punto a punto) e isotrópico (sus propiedades son las mismas en cada dirección a través de un punto). El suelo rara vez cumple sus supuestos, y con frecuencia viola gravemente estos supuestos. Sin embargo, el ingeniero de suelos no tiene más remedio que usar los resultados de esta teoría junto con el juicio de ingeniería. (Lambe & Whitman, 1969, pág. 100)

Estas tensiones inducidas generan el bulbo de presiones, que explica cómo se distribuyen dichas tensiones en el suelo. Para el caso de cargas distribuidas sobre una superficie circular, se tiene que el bulbo de presiones que se genera es similar al que se muestra en la Figura 2, en donde se aprecia una profundidad máxima influenciada, de aproximadamente cuatro veces el radio de la superficie de carga. Figura 2: Tensión vertical inducida para carga circular. (Lambe & Whitman, 1969, pág. 102)

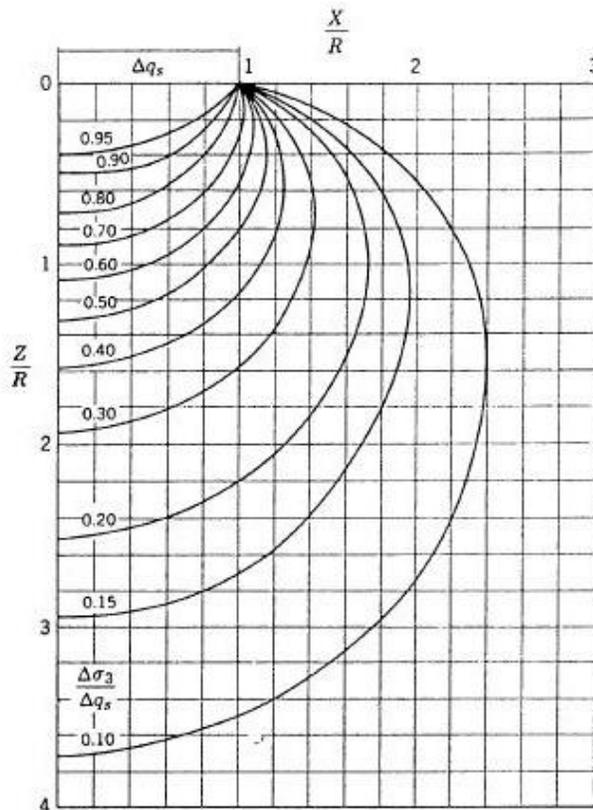


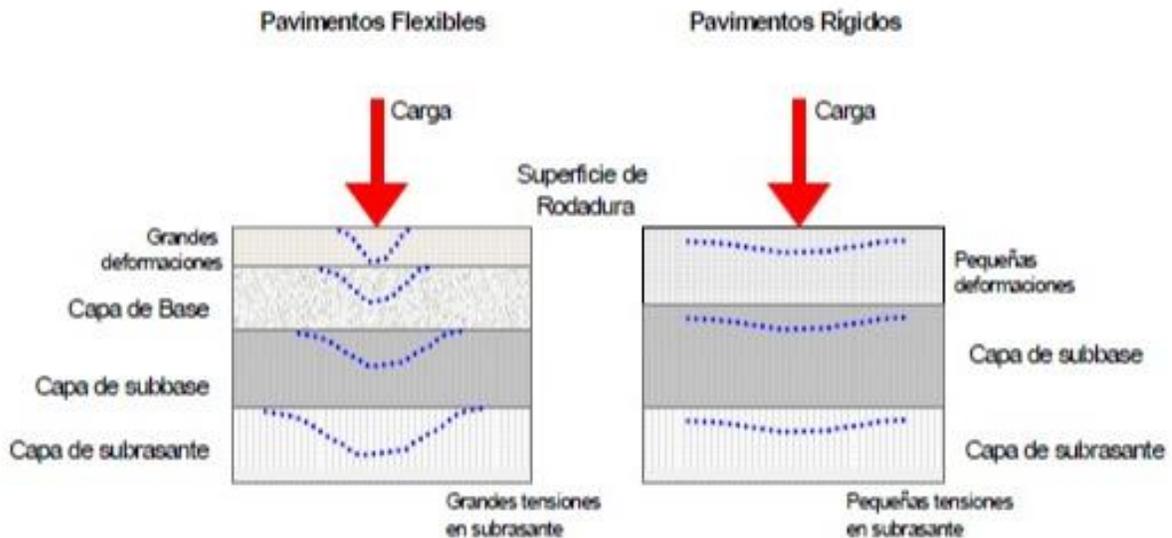
Figura 2: Tensión vertical inducida para carga circular. (Lambe & Whitman, 1969, pág. 102)

### 2.2.2. Pavimento

El pavimento está compuesto por capas de distintos materiales y espesores, las cuales son soportadas por la subrasante del terreno. Según el Volumen 3 del Manual de Carreteras (2018) se afirma que: “El pavimento tiene como objetivo dotar al camino de un sistema estructuralmente resistente a las solicitaciones que impone el tránsito, proporcionando una superficie que permita una circulación cómoda y segura a la velocidad especificada, bajo las variadas condiciones climáticas y por un periodo determinado”. (pág.558) Además, el documento mencionado anteriormente define el diseño de pavimentos, como:

Diseñar consiste en determinar los tipos y espesores de las capas que resultan más económicas para lograr los propósitos enunciados. Las cargas que impone el tránsito son traspasadas por el pavimento hacia la subrasante mediante mecanismos que dependen de las características de los materiales que conforman las diferentes capas; dependiendo de la mecánica por la cual esas cargas alcanzan la subrasante, los pavimentos se clasifican en flexibles y rígidos. Las losas de hormigón son muy rígidas, de manera que las solicitaciones se distribuyen hacia la subrasante en un área más o menos extensa, generándose tensiones relativamente bajas. Por el contrario, por ser más flexible, el concreto asfáltico se deforma más que en una losa de hormigón por lo que la superficie de distribución hacia la subrasante es menor, lo que genera tensiones más altas. Los diferentes comportamientos de unos y otros tienen su origen en esta diferencia de tensiones y en la forma en que ellas se generan. (Ministerio de Obras Públicas, 2018, pág. 558)

Los tipos de pavimento, su estructura y el comportamiento de las tensiones mencionadas en el párrafo anterior, se representan de mejor manera en la Figura 3, que aparece a continuación.



**Figura 3: Ilustración explicativa de la estructura y comportamientos de pavimentos flexibles y rígidos. (Cordo, 2013)**

Dentro del diseño de pavimentos existen diferentes métodos y parámetros para obtener la resistencia de la subrasante, dentro de los cuales se pueden encontrar los siguientes:

- Razón de Soporte de California (CBR)
- Modulo Resiliente ( $M_R$ )
- Ensayo de Placa de Carga (K)
- Penetración de Cono Dinámico (DCP)

### **2.2.3. Ensayos de Terreno**

#### **2.2.3.1. Ensayo de Razón de Soporte de California (CBR)**

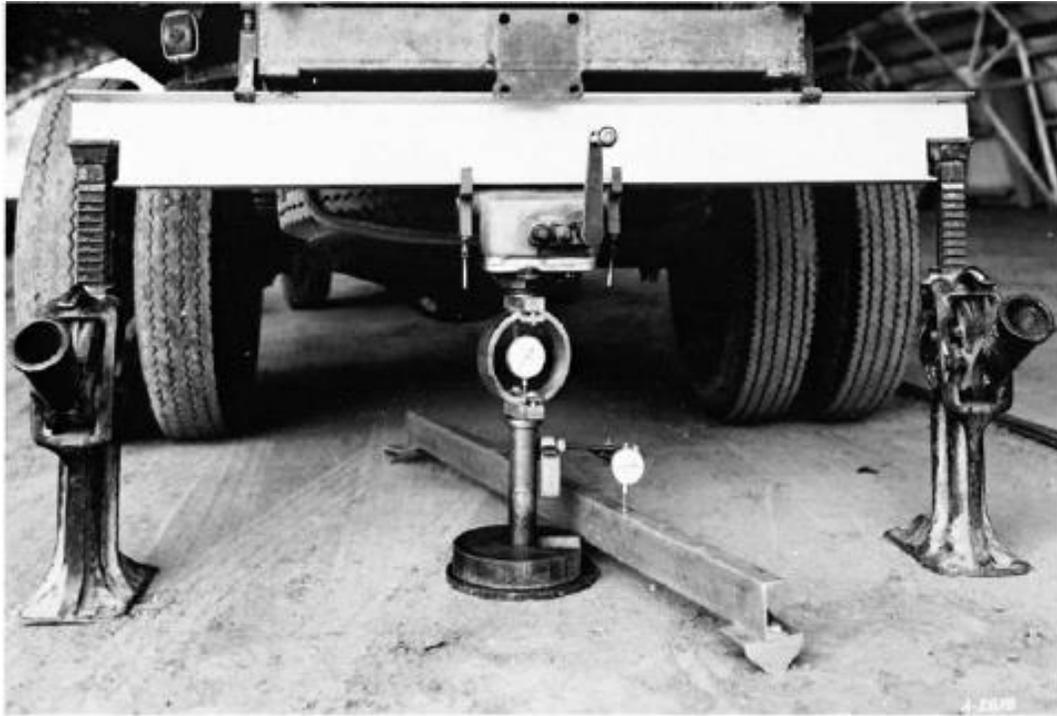
En la norma internacional ASTM D1883-16 (2016) regula el procedimiento del ensayo CBR en laboratorio y lo define como:

El ensayo de Razón de Soporte de California (CBR) es usado en la evaluación del material de la subrasante, subbase y base como una herramienta para el diseño de pavimentos. El ensayo de laboratorio usa un pistón para penetrar el material compactado en un molde a una tasa constante de penetración. El CBR es expresado como la razón de la unidad de carga que el pistón requiere para penetrar 0.1 in (2.5 mm) y 0.2 in (5.1 mm) del material de prueba a la unidad de carga requerida para penetrar un material estándar de piedra triturada bien graduada. (ASTM D1883-16, 2016, pág. 2)

Este ensayo, además de trabajarse en laboratorio, suele realizarse en terreno y según la norma ASTM D4429-09a (2009), se utiliza para evaluar y diseñar los componentes de pavimentos flexibles. Además, el documento plantea lo siguiente:

Si el CBR de campo se va a usar directamente para evaluación o diseño sin tener en cuenta la variación debido al cambio en el contenido de agua, la prueba se debe realizar bajo una de las siguientes condiciones: (a) cuando el grado de saturación (porcentaje de huecos llenos con agua) es 80% o mayor, (b) cuando el material es de grano grueso y sin cohesión para que no se vea afectado significativamente por los cambios en el contenido de agua, o (c) cuando el suelo no ha sido modificado por actividades de construcción durante los dos años anteriores a la prueba. En el último caso mencionado, el contenido de agua en realidad no se vuelve constante, pero generalmente fluctúa dentro de un rango bastante estrecho. Por lo tanto, los datos de la prueba de campo in situ pueden usarse para indicar satisfactoriamente la capacidad media de carga. (ASTM D4429-09a, 2009, pág. 2)

Un equipo CBR de terreno tipo, con su anillo de carga, la prensa mecánica y el resto de los elementos complementarios, se puede apreciar en la Figura 4.



**Figura 4: Equipo CBR de campo típico (ASTM D4429-09a, 2009, pág. 3)**

El Volumen 3 del Manual de Carreteras (2018) establece que para pavimentos flexibles el índice CBR, obtenido en laboratorio, permite estimar el  $M_R$  de los suelos de la subrasante. Por otro lado, en el caso del pavimento rígido, este índice se correlaciona con el módulo de reacción de la subrasante ( $K$ ). Estas relaciones son extraídas del documento anteriormente mencionado y se expresan en las ecuaciones que aparecen a continuación:

$$M_R [\text{MPa}] = 17,6 (\text{CBR})^{0,54} \quad \text{para } \text{CBR} < 12\% \quad 2.2.$$

$$M_R [\text{MPa}] = 22,1 (\text{CBR})^{0,55} \quad \text{para } 12\% \leq \text{CBR} < 80\% \quad 2.3.$$

$$K [\text{MPa/m}] = 69,78 \log_{10}(\text{CBR}) - 10,16 \quad 2.4.$$

Existen otras correlaciones entre el índice CBR y el  $M_R$ . Pérez, Garnica, Rufino, Curiel y Ruiz (2016) presentan diversas relaciones empíricas entre ambos parámetros, con sus respectivos autores. De éstas, se rescatan las que aparecen en las ecuaciones 2.5. y 2.6., pertenecientes a los autores Powell et al. (1984) y Newcomb & Birgisson (1999), respectivamente.

$$M_R [\text{psi}] = 2555 (\text{CBR})^{0,64} \quad 2.5.$$

$$M_R [\text{psi}] = 10^{(0,85 \log(\text{CBR}) + 2,971)} \quad 2.6.$$

### 2.2.3.2. Ensayo de Penetración Estática o Piezocono (CPT)

La norma internacional ASTM D5778-12 (2012) regula el procedimiento del ensayo CPT en terreno y lo define como:

Una punta de penetrómetro con una punta cónica que tiene un ángulo de vértice de  $60^\circ$  y un área base de cono de 10 o 15 cm<sup>2</sup> avanza a través del suelo a una velocidad constante de 20 [mm/s]. La fuerza sobre la punta cónica (cono) requerida para penetrar el suelo es medida por métodos eléctricos, cada 50 [mm] de penetración como mínimo. A menudo se puede obtener una resolución mejorada en lecturas de intervalos de 20 o 10 [mm]. La tensión se calcula dividiendo la fuerza medida (fuerza total del cono) por el área de la base del cono para obtener la resistencia del cono ( $q_c$ ). Existe un mango de fricción en el penetrómetro inmediatamente detrás de la punta del cono, y la fuerza ejercida sobre el manguito de fricción se mide por métodos eléctricos con un mínimo de cada 50 [mm] de penetración. La tensión se calcula dividiendo la fuerza axial medida por el área superficial del manguito de fricción para determinar la resistencia del manguito,  $f_s$ . (ASTM D5778-12, 2012, pág. 3)

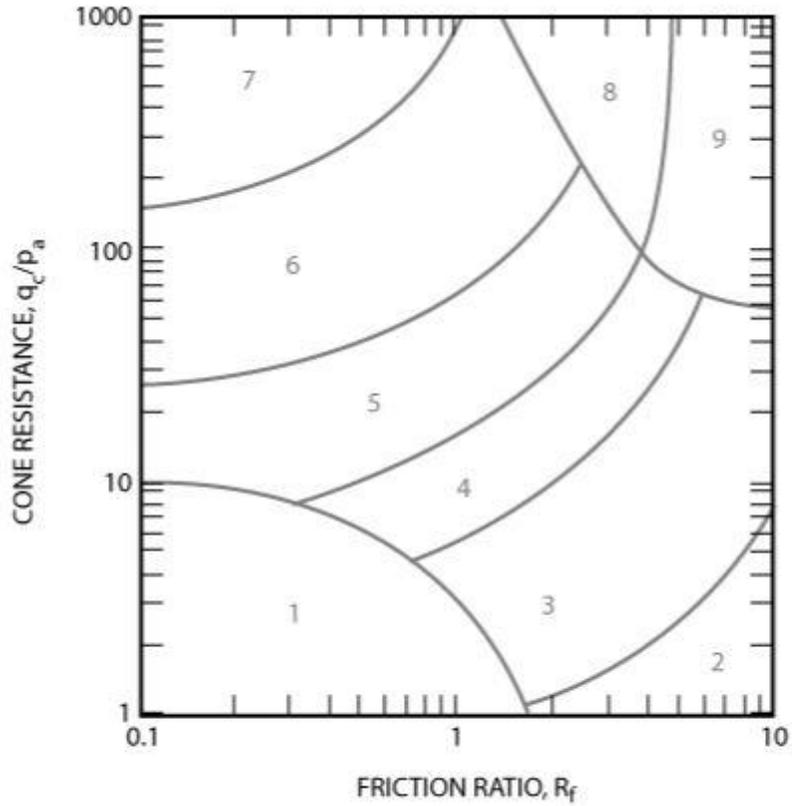
La misma normativa mencionada anteriormente afirma que se pueden obtener “registros detallados de la resistencia de cono que es útil para evaluaciones de estratigrafía del sitio, homogeneidad y profundidad para capas firmes, vacíos o cavidades y otras discontinuidades.” (pág. 3) Además, sostiene que la interpretación de resultados para el CPT entrega estimaciones de los tipos de suelo ensayados. Estas correlaciones con el tipo de material se obtienen según la Figura 5, en donde se utilizan las variables  $q_c$  y la razón de fricción ( $R_f$ ). Este último parámetro se define según la ecuación 2.7., en donde  $q_t$  corresponde a la resistencia de punta corregida por efectos de la presión de poros.

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100\% \quad 2.7.$$

William Dehler y Joseph Labuz (2007) comentan que “la mayoría de los conos actualmente en funcionamiento también están equipados para medir la presión del agua de los poros a través de transductores apropiados y detectar la llegada de ondas sísmicas mediante el uso de geófonos.” (pág. 2) En la Figura 6 se muestran configuraciones de conos comunes, junto al de sustracción de muestras de suelo. Los datos registrados por este método se representan en perfiles de profundidad para cada una de las variables, como se aprecia en la Figura 7.

Existen correlaciones entre los parámetros obtenidos por el ensayo CPT y el módulo resiliente, obtenidas por Louay Mohammad et al (1999). Una de estas considera solo la resistencia de punta y el fuste, además de una constante. Esta relación empírica se muestra en la ecuación que aparece a continuación.

$$M_R = 7,89q_c + 236,88f_s + 14,06 \quad 2.8.$$

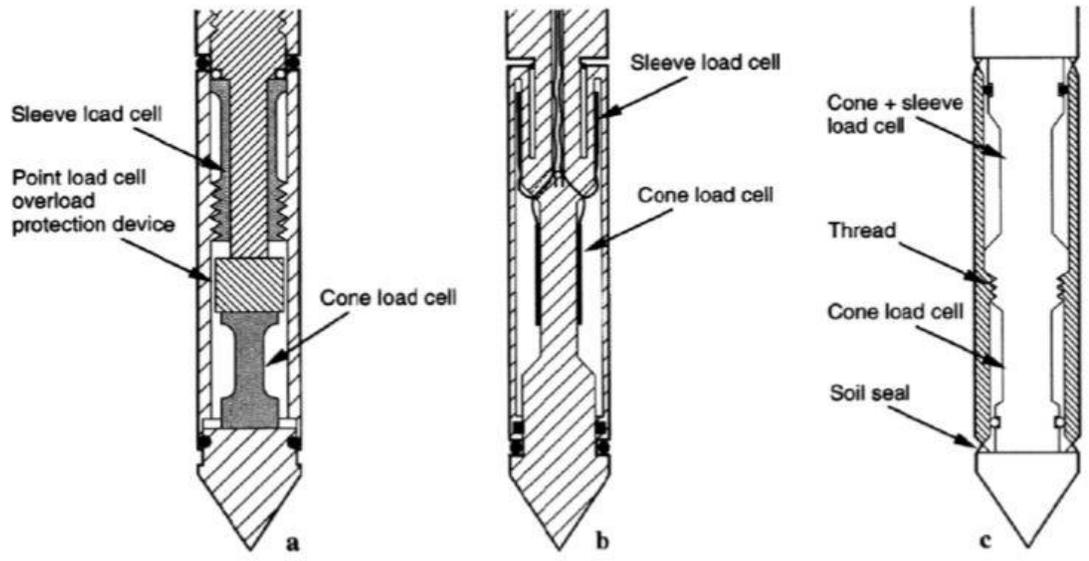


| <i>Zone</i> | <i>Soil Behavior Type</i>                        |
|-------------|--|
| 1           | <i>Sensitive, fine grained</i>                   |
| 2           | <i>Organic soils - clay</i>                      |
| 3           | <i>Clay - silty clay to clay</i>                 |
| 4           | <i>Silt mixtures - clayey silt to silty clay</i> |
| 5           | <i>Sand mixtures - silty sand to sandy silt</i>  |
| 6           | <i>Sands - clean sand to silty sand</i>          |
| 7           | <i>Gravelly sand to dense sand</i>               |
| 8           | <i>Very stiff sand to clayey sand*</i>           |
| 9           | <i>Very stiff fine grained*</i>                  |

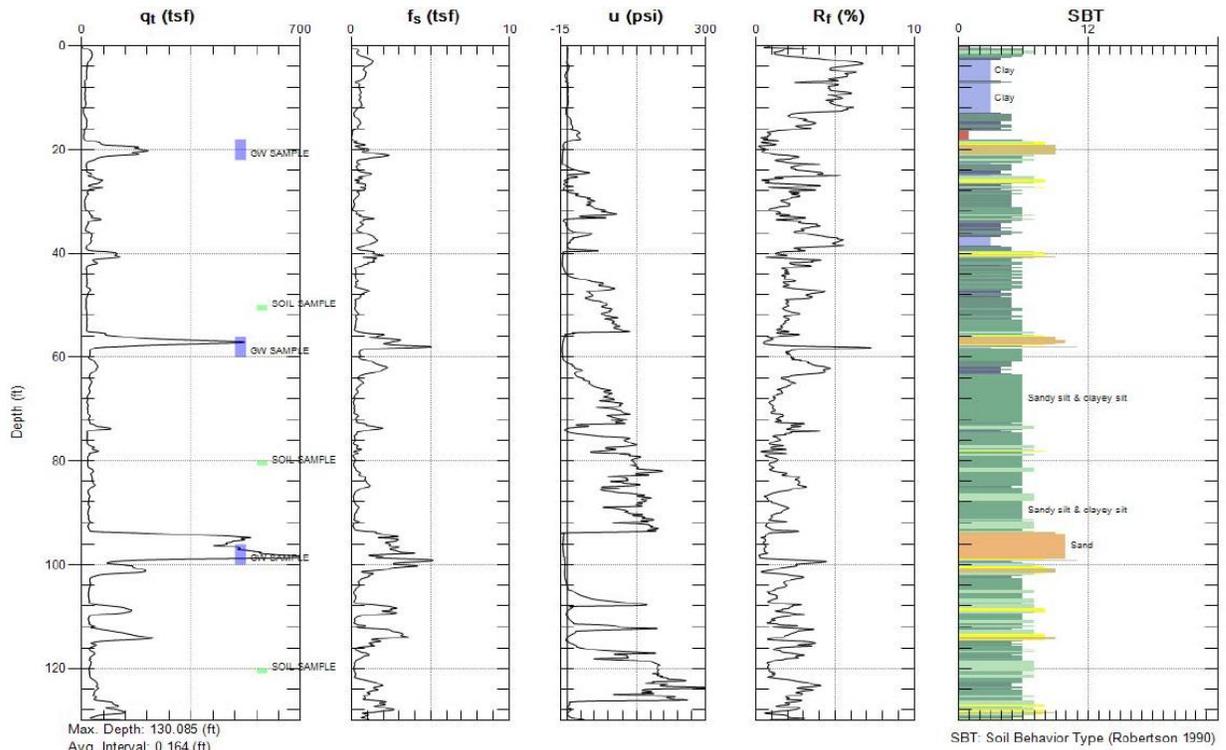
*\* Heavily overconsolidated or cemented*

$P_a = \text{atmospheric pressure} = 100 \text{ kPa} = 1 \text{ tsf}$

**Figura 5: Gráfico del tipo de suelo según comportamiento estimado por CPT. (P.K. Robertson & K.L. Cabal, 2015, pág. 26)**



**Figura 6: Configuraciones comunes para conos (a) De tipo compresión con celdas de carga de punta y manga, (b) De tipo tensión con diseño de manga y (c) De tipo sustracción. (ASTM D5778-12, 2012, pág. 4)**



**Figura 7: Ilustración de perfiles en profundidad del CPT para resistencia de punta, fuste, presión de poros, razón de fricción y el tipo de suelo. (P.K. Robertson & K.L. Cabal, 2015, pág. 31)**

## 2.2.4. Elementos de Estadística

### 2.2.4.1. Regresión Lineal Simple

Según Dennis Wackerly (2009) existen muchas funciones para modelar la respuesta de una variable independiente X y una dependiente Y. Se puede realizar esto por medio de un modelo matemático determinístico, utilizando una base de datos para ambas variables, sin considerar errores para predecir Y en función de X. Por otro lado, existe el método probabilístico en el cual se considera, a parte de la base de datos conocida, una componente aleatoria de error, la cual se ve reflejada en Y. Esto se puede representar como una línea recta, tal como se muestra en la ecuación 2.9.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad 2.9.$$

Donde  $x_i$  e  $y_i$  corresponden a la variable independiente y dependiente  $i$ , respectivamente. También  $\beta_0$  corresponde a la ordenada en el origen,  $\beta_1$  a la pendiente de la recta y  $\varepsilon_i$  a la variable aleatoria de error  $i$ .

### 2.2.4.2. Criterio de Mínimos Cuadrados

Montgomery (2006) plantea “Para estimar  $\beta_0$  y  $\beta_1$  se usa el método de mínimos cuadrados. Esto es, se estiman  $\beta_0$  y  $\beta_1$  tales que la suma de los cuadrados de las diferencias entre las observaciones  $y_i$  y la línea recta sea mínima.” (pág. 14). Por consiguiente, se definen los estimadores de estos parámetros como  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  y se obtienen de la ecuación 2.10. y 2.11., respectivamente.

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad 2.10.$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad 2.11.$$

En donde  $n$  corresponde a la cantidad de datos de muestra,  $\bar{y}$  y  $\bar{x}$  son los promedios de  $y_i$  y  $x_i$ , definidos en la ecuación 2.12. y 2.13., respectivamente.

$$\bar{y} = \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)}{n} \quad 2.12.$$

$$\bar{x} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)}{n} \quad 2.13.$$

De factorizar y simplificar la ecuación 2.11., se obtiene otra expresión para el estimador  $\hat{\beta}_1$ , como se muestra en 2.14.

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 2.14.$$

El modelo ajustado de regresión lineal simple se muestra en la ecuación 2.15., consistente en un estimado puntual de la media de  $y$  para un  $x$  determinado.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad 2.15.$$

La diferencia entre el valor  $y_i$  y el ajustado  $\hat{y}$  es llamado residual y se define en la siguiente ecuación:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad 2.16.$$

Finalmente, se obtiene que la suma de cuadrados total corresponde a:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad 2.17.$$

Lo cual es equivalente a:

$$SS_T = SS_R - SS_{Res} \quad 2.18.$$

Donde  $SS_T$  corresponde a la suma de cuadrados total que considera la variación de todos los datos,  $SS_R$  a la suma de cuadrados de la regresión y  $SS_{Res}$  a la suma de cuadrados residual correspondiente a la dispersión de los datos con respecto a la recta.

### 2.2.4.3. Coeficiente de Determinación

Dennis Wackerly (2009) define que “ $R^2$  se puede interpretar como la proporción de la variación total en las  $y_i$  que es explicada por la variable  $x$  en un modelo de regresión lineal simple.” (pág. 601). Este coeficiente se representa según la ecuación 2.19., mostrada a continuación:

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_{Res}}{SS_T} \quad 2.19.$$

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1. Ubicación de Ensayos

Los ensayos CBR de terreno y CPT, se llevan a cabo en la Laguna de Aculeo y en el Puente Águila Norte, ambos encontrados en la comuna de Paine, Región Metropolitana. Se realiza un total de 36 mediciones para cada uno de estos, separados a un metro de distancia y distribuidos en los lugares anteriormente mencionados. A modo de ejemplo, en la Figura 8 se muestra una fotografía del camión CPT trabajando en las orillas de la laguna. Las coordenadas de los lugares ensayados se presentan en la Tabla 1. Estas están referenciadas por el sistema Universal Transversal de Mercator (UTM).



**Figura 8: Camión CPT en Laguna Aculeo, Paine, Región Metropolitana.**

**Tabla 1: Coordenadas ensayos de terreno.**

| N° | Fecha      | Ubicación         | Coordenadas UTM   |         |         |
|----|------------|-------------------|-------------------|---------|---------|
|    |            |                   | Huso              | Norte   | Este    |
| 1  | 28-11-2019 | Laguna Aculeo     | 19                | 6251553 | 325189  |
| 2  | 06-12-2019 |                   | 19                | 6251747 | 325073  |
| 3  |            |                   | 19                | 6251745 | 325064  |
| 4  | 13-12-2019 |                   | 19                | 6251790 | 325037  |
| 5  | 03-01-2020 |                   | 19                | 6251909 | 325023  |
| 6  |            |                   | 19                | 6251913 | 325028  |
| 7  | 14-01-2020 | Pte. Águila Norte | 19                | 6250805 | 338033  |
| 8  | 15-01-2020 | Laguna Aculeo     | 19                | 6252004 | 324927  |
| 9  | 16-01-2020 |                   | 19                | 6252004 | 324927  |
| 10 | 22-01-2020 |                   | 19                | 6251785 | 325069  |
| 11 |            |                   | 19                | 6251815 | 325112  |
| 12 | 23-01-2020 |                   | 19                | 6251903 | 325009  |
| 13 | 11-03-2020 |                   | 19                | 6252070 | 325016  |
| 14 |            |                   | 19                | 6252084 | 324971  |
| 15 |            |                   | 19                | 6252195 | 324973  |
| 16 |            |                   | 19                | 6251937 | 324896  |
| 17 | 13-03-2020 |                   | 19                | 6252257 | 325173  |
| 18 |            |                   | 19                | 6251876 | 326196  |
| 19 | 18-04-2020 |                   | 19                | 6251783 | 325076  |
| 20 |            |                   | 19                | 6251758 | 325089  |
| 21 |            |                   | 19                | 6251749 | 325088  |
| 22 |            |                   | 19                | 6252000 | 324859  |
| 23 |            |                   | 19                | 6251838 | 324769  |
| 24 |            |                   | 19                | 6252123 | 325021  |
| 25 |            |                   | 19                | 6251786 | 325090  |
| 26 | 23-04-2020 |                   | 19                | 6252071 | 324915  |
| 27 |            |                   | 19                | 6252182 | 324991  |
| 28 |            |                   | 19                | 6252132 | 325017  |
| 29 |            |                   | 19                | 6251912 | 325012  |
| 30 |            |                   | 19                | 6251957 | 324999  |
| 31 |            |                   | 19                | 6251797 | 325054  |
| 32 |            |                   | 19                | 6251781 | 325100  |
| 33 | 08-05-2020 |                   | Pte. Águila Norte | 19      | 6250799 |
| 34 |            | 19                |                   | 6250794 | 338267  |
| 35 |            | 19                |                   | 6250811 | 338265  |
| 36 |            | 19                |                   | 6250805 | 338310  |

### 3.2. Extracción de Muestras

En cada uno de los sitios ensayados se toman dos muestras de suelo. Estas son de tamaño grande y pequeño denominadas por las letras G y P, respectivamente. La de mayor masa está pensada para ser analizada y clasificada en laboratorio, mientras que la otra es extraída para encontrar la masa de agua del suelo. Para esto, se deja secando la muestra al Sol durante 48 horas, a temperaturas de 30°. De esta manera se obtiene el peso seco del material, para así contrastarlo con el húmedo.

En la Figura 9 se presenta una fotografía de muestras tipo, durante el proceso de secado al Sol. Además, en la Tabla 2 se encuentran los pesos húmedos de las muestras



**Figura 9: Muestras secadas al Sol.**

**Tabla 2: Tipo de muestras obtenidas en terreno, su peso y masa de agua.**

| N° | Fecha      | Ubicación     | Tipo Muestra      | Peso Húmedo [grs] |     |
|----|------------|---------------|-------------------|-------------------|-----|
| 1  | 28-11-2019 | Laguna Aculeo | P                 | 615               |     |
|    |            |               | G                 | 670               |     |
| 2  | 06-12-2019 |               | P                 | 485               |     |
|    |            |               | G                 | 555               |     |
| 3  |            |               | P                 | 495               |     |
|    |            |               | G                 | 635               |     |
| 4  | 13-12-2019 |               | P                 | 600               |     |
|    |            |               | G                 | 675               |     |
| 5  | 03-01-2020 |               | P                 | 460               |     |
|    |            |               | G                 | 535               |     |
| 6  |            |               | P                 | 560               |     |
|    |            |               | G                 | 600               |     |
| 7  | 14-01-2020 |               | Pte. Águila Norte | P                 | 662 |
|    |            |               | G                 | 610               |     |
| 8  | 15-01-2020 |               | Laguna Aculeo     | P                 | 500 |
|    |            |               |                   | G                 | 725 |
| 9  | 16-01-2020 |               |                   | P                 | 424 |
|    |            |               |                   | G                 | 488 |
| 10 | 22-01-2020 | P             |                   | 458               |     |
|    |            | G             |                   | 629               |     |
| 11 |            | P             |                   | 412               |     |
|    |            | G             |                   | 565               |     |
| 12 | 23-01-2020 | P             |                   | 518               |     |
|    |            | G             |                   | 805               |     |
| 13 | 11-03-2020 | P             |                   | 447               |     |
|    |            | G             |                   | 751               |     |
| 14 |            | P             |                   | 425               |     |
|    |            | G             |                   | 607               |     |
| 15 |            | P             |                   | 311               |     |
|    |            | G             |                   | 607               |     |
| 16 |            | P             |                   | 364               |     |
|    |            | G             |                   | 854               |     |
| 17 | 13-03-2020 | P             | 571               |                   |     |
|    |            | G             | 790               |                   |     |
| 18 |            | P             | 560               |                   |     |
|    |            | G             | 993               |                   |     |

**Tabla 2: Tipo de muestras obtenidas en terreno, su peso y masa de agua. (Continuación)**

|    |            |               |                   |      |
|----|------------|---------------|-------------------|------|
| 19 | 18-04-2020 | Laguna Aculeo | P                 | 532  |
| 20 |            |               | G                 | 645  |
|    |            |               | P                 | 438  |
| 21 |            |               | G                 | 704  |
|    |            |               | P                 | 623  |
| 22 |            |               | G                 | 726  |
|    |            |               | P                 | 339  |
| 23 |            |               | G                 | 513  |
|    | P          |               | 277               |      |
| 24 | G          |               | 441               |      |
|    | P          |               | 361               |      |
| 25 | G          |               | 588               |      |
|    | P          |               | 310               |      |
| 26 | 23-04-2020 |               | G                 | 561  |
|    |            |               | P                 | 161  |
| G  |            |               | 398               |      |
| 27 |            | P             | 200               |      |
|    |            | G             | 737               |      |
| 28 |            | P             | 199               |      |
|    |            | G             | 875               |      |
| 29 |            | P             | 245               |      |
|    |            | G             | 1178              |      |
| 30 |            | P             | 210               |      |
|    |            | G             | 943               |      |
| 31 |            | P             | 281               |      |
|    |            | G             | 1223              |      |
| 32 |            | P             | 219               |      |
|    |            | G             | 711               |      |
| 33 |            | 08-05-2020    | Pte. Águila Norte | P    |
|    | G          |               |                   | 1329 |
| 34 | P          |               |                   | 781  |
|    | G          |               |                   | 1267 |
| 35 | P          |               |                   | 775  |
|    | G          |               |                   | 1796 |
| 36 | P          |               |                   | 585  |
|    | G          |               |                   | 1207 |

### 3.3. Ensayo CBR de Terreno

El equipo CBR es propiedad del Laboratorio de Sólidos, Medios Particulados y Estructuras, de la Universidad de Chile. Los implementos brindados corresponden a:

- Anillo de Carga
- Dial de Deformación
- Pistón de Penetración
- Prensa Mecánica
- Pesos
- Soporte de Probeta
- Manilla de la Prensa



**Figura 10: Equipo CBR de laboratorio.**

Los materiales restantes y el procedimiento del ensayo CBR en terreno, se detallan en las páginas 2 y 3, respectivamente, de la norma internacional ASTM D4429-09a (2009). Por otro lado, para el cálculo de este índice y el manejo de los datos, se recurre a la página 8 de la ASTM D1883-16 (2016). Los ensayos realizados para este trabajo se registrarán en base a estos documentos.

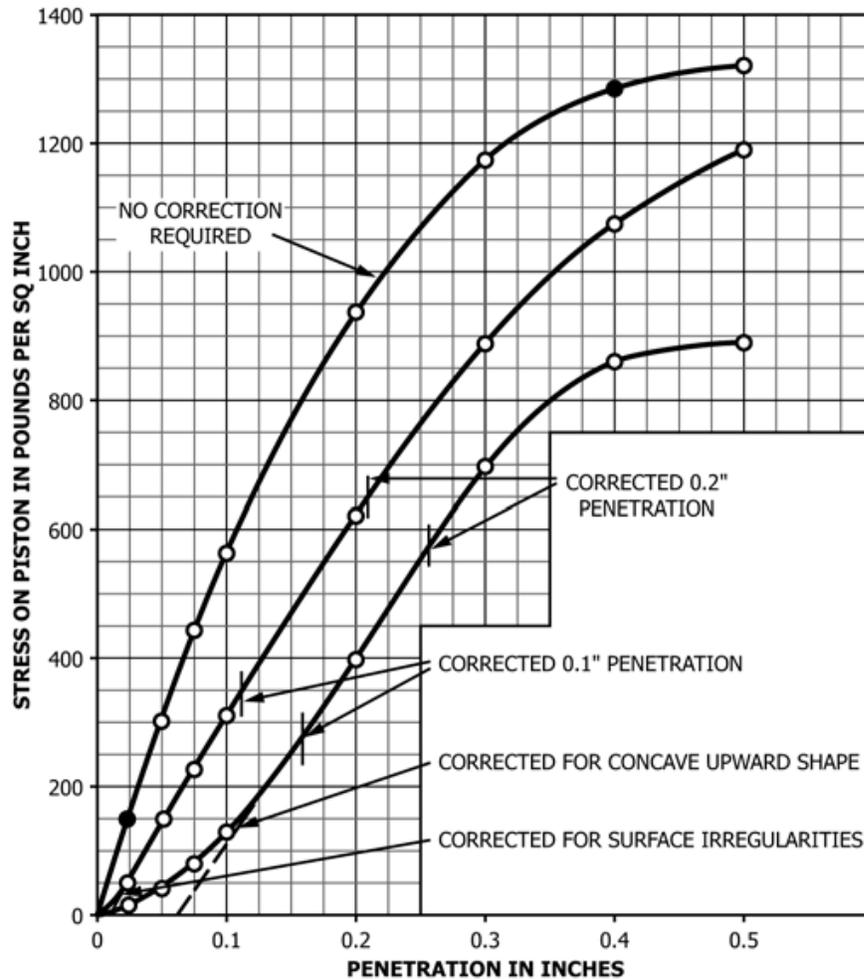
Al preparar el equipo CBR en el camión CPT, este se levanta a una altura de aproximadamente 70 centímetros y se asegura de estar nivelado en ambas direcciones. La prensa mecánica se amarra, mediante eslingas, a la viga sísmica. Luego se nivela el terreno y la superficie de contacto con el pistón de penetración. Los pesos son colocados en esta, para evitar el punzonamiento del suelo. Se acomoda el anillo de carga en el lugar de ensayo y el soporte de probeta sobre este. Mediante este último implemento se asegura un contacto efectivo entre la prensa mecánica y el anillo. Se ajusta y nivela la barra triangular de apoyo, para el dial de deformación adosado al pistón. La manilla se instala en la prensa y se precarga el anillo a 0,05 toneladas aproximadamente, para asegurar la transmisión de esfuerzos entre el camión y el suelo. En la Figura 11, en donde se encuentra el equipo CBR en terreno, en donde se ilustra de forma más detallada lo explicado anteriormente.



**Figura 11: Equipo CBR preparado en terreno, bajo el camión CPT.**

Una vez ya instalado el equipo CBR, se procede con el ensayo. Este se realiza a deformación controlada y a una velocidad constante. Para asegurar esto último, se hace uso de un cronómetro verificando que cada 30 segundos se logre una deformación de 0,025 [“]. Para cada uno de estos intervalos se debe registrar la lectura del dial incorporado en el anillo de carga. Una vez que se alcanza una deformación de 0,2 [“], el rango de tiempo aumenta a dos minutos. De la misma manera, las variaciones en la deformación aumentan a 0,1 [“], hasta llegar a media pulgada en un total de 10 minutos.

La Figura 12 “debe utilizarse como ejemplo de corrección de curvas carga-penetración solamente. Esta no pretende implicar que la tensión del pistón en 0,2 [“] es siempre mayor que la tensión aplicada en 0,1 [“] de penetración.” (ASTM D1883-16, 2016, pág. 8) Esta modificación de los datos es aplicada a 11 ensayos CBR del presente trabajo dado que, para estas curvas, la parte inicial es cóncava hacia arriba en su parte inicial. Esto sucede dado que en el terreno existen irregularidades u otras causas que alteran el comportamiento de esta. Para estos casos, se corrige el gráfico trazando una recta tangente a la mayor pendiente y trasladando al origen el punto en el que esta recta corta el eje de las abscisas.



**Figura 12: Curva de presión según deformación del ensayo CBR en terreno y curva corregida por irregularidades de superficie. (ASTM D1883-16, 2016, pág. 8)**

Se aprecia la deformación producida, de media pulgada, al momento de descargar el anillo y retirar los equipos del lugar. Se ven también algunas grietas, debido a fallas por corte en el suelo, como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13: Suelo deformado media pulgada por ensayo CBR.**

Este método también es realizado en profundidad. Por lo tanto, en terreno se excavan 50 centímetros de suelo, para preparar el equipo CBR en el camión CPT y realizar el ensayo. El procedimiento corresponde al mismo que se realiza en superficie. En la Figura 14 se muestra la configuración del equipo en profundidad.

Los datos registrados en terreno son lecturas del dial incorporado en el anillo de carga. Este es calibrado en el centro tecnológico IDIEM por la Sección de Geotecnia. La ecuación de ajuste utilizada en este trabajo corresponde a la ecuación 3.1., donde X corresponde a la lectura del instrumento e Y a la ajustada en kilo Newton.

$$Y = 0,0452 X + 0,1136 \quad 3.1.$$



**Figura 14: Equipo CBR en profundidad preparado en terreno.**

Con los datos de fuerza entregados por la calibración y considerando el área del pistón de penetración, se pueden obtener las tensiones para las deformaciones registradas en el ensayo. Con estos valores se procede de la siguiente manera, según lo planteado en la ASTM D1883-16 (2016):

Utilizando los valores corregidos de tensión tomados de la curva de tensión de penetración para las penetraciones de 0,100 pulgada (2,54 mm) y de 0,200 pulgada (5,08 mm), calcule las razones de soporte para cada uno dividiendo las tensiones corregidas por las tensiones estándar de 1000 psi (6,9 MPa) y 1500 psi (10 MPa), respectivamente, y multiplicar por 100. La razón de soporte entregada por el suelo es normalmente la de 0.100 pulgada (2.5 mm). Cuando la razón de 0,200 pulgada (5,08 mm) de penetración es mayor, vuelva a ejecutar la prueba. Si la prueba de verificación da un resultado similar, utilice la razón de soporte a una penetración de 0,200 pulgada (5,08 mm). (ASTM D1883-16, 2016, pág. 8)

### 3.4. Ensayo CPT

El camión CPT es facilitado por la empresa LMMG. Este está totalmente equipado para la realización del ensayo. Los instrumentos utilizados más importantes son:

- Cono
- Prensa Hidráulica
- Tubos perforación
- Pieza unión cono
- Bases soportantes de madera
- Nivel de burbuja
- Llave Stillson
- Caimán
- GPS
- Computador Integrado

El resto de los materiales, el procedimiento de este ensayo y los cálculos involucrados en este, se encuentran en las páginas 3-8, 10-12 y 12-15 de la norma ASTM D5778-12 (2012), respectivamente. Los ensayos CPT realizados para este trabajo se registrarán en base a esta normativa.



**Figura 15: Camión CPT levantado y nivelado en Puente Águila Norte.**

Luego de haber realizado el CBR se baja el camión y se desplaza hasta que el orificio por donde sale el cono, quede a un metro de distancia de donde se ensayó. Se ubican las cuatro bases de madera en cada soporte del camión, para nuevamente levantar y nivelar y así proceder con el ensayo, como se muestra en la Figura 15.

El camión cuenta con un amplio interior, como se puede ver en la Figura 16. En su centro se encuentra una prensa hidráulica, la cual permite al cono penetrar los distintos estratos, utilizando el peso del camión. Esta se utiliza mientras el camión se encuentra encendido y revolucionado. Cuenta con un panel de control, como se muestra en la Figura 17. En este se encuentran 3 palancas, una para movimientos rápidos de la prensa, otra para lentos y una para soltar y apretar los tubos del cono. De estas, solo la de velocidad lenta registra los datos de profundidad y resistencias del suelo, en el software. Además, en el panel se encuentra un botón rojo para detener el funcionamiento de la prensa en casos de emergencia.



**Figura 16: Interior de camión CPT.**

El cono es incorporado en la prensa hidráulica, donde se instala una pieza de unión, se conecta el cable de adquisición de datos y se adosan los tubos, atornillándolos con una llave Stillson. Luego el cono es bajado por la prensa hasta que la punta llega a la superficie del terreno sin hacer contacto con esta. Esto se verifica directamente de manera visual o utilizando la cámara presente en el camión.

El camión tiene integrado en su interior un computador, para registrar los datos del ensayo. Para encender este, primero debe encenderse el panel de corriente junto a un ventilador interno del mismo. Luego se debe dar la energía en el computador y encenderlo. Una vez listo, se abre el software “DREGG.Daq”, el cual consiste en un sistema de adquisición de datos para

ensayos CPT. Como primer paso debe verificarse la conexión entre el cono, sus sensores y el programa. Cuando la respuesta es positiva, se procede a rellenar la información del ensayo a realizar, donde debe registrar el nombre del proyecto, el lugar, fecha, hora, número de ensayo y carpeta de almacenamiento. Luego, se definen las unidades para las variables a medir, tales como mega pascales para la resistencia de punta, kilo pascales para el fuste y metros para la presión de poros. Además, es muy importante registrar la línea base en la superficie, para definir el punto cero de medición. Finalmente, el software está listo para registrar los datos.



**Figura 17: Panel de control prensa hidráulica.**

Se comienza el ensayo utilizando la manilla de movimiento lento ya que, como se mencionó anteriormente, el programa está diseñado para registrar datos solo al descender con esta velocidad. Es importante no subir esta manilla ya que a pesar de que el cono asciende, el programa continúa tomando datos como si este bajara. Al momento en que la prensa llega a tope, se debe instalar un nuevo tubo. Luego la prensa sube y vuelve a apretar el tubo superior a una altura apropiada, permitiendo continuar con el descenso del cono. El proceso descrito anteriormente, se repite las veces necesarias hasta llegar a la profundidad deseada. Este se encuentra ilustrado en la Figura 18. Es importante tener en cuenta, durante la realización de este ensayo, que a medida que el cono desciende se deben verificar dos aspectos importantes. La inclinación del cono no puede superar en ningún momento los  $7,5 [^\circ]$  y la presión de bajada no puede sobrepasar los  $15000 [KPa]$ . En la Figura 19 es posible ver como los tubos descienden por el orificio bajo la prensa hidráulica y como el cono penetra los estratos de suelo del terreno.

Una vez alcanzada la profundidad buscada, correspondiente a dos metros aproximadamente, se procede a subir el cono sin utilizar la manilla de velocidad lenta ya que no se requiere registrar más datos. Cuando la prensa asciende a una altura apropiada, se debe sujetar el tubo inferior con una abrazadera utilizando un caimán, para así permitir que la prensa suelte el tubo y pueda bajar, sin que este se caiga. Los tubos son retirados con la llave Stillson, para luego ser guardados y acomodados con cuidado y así no dañar el cable que se encuentra en su interior. Al momento que la punta del cono sale y queda al nivel de la superficie, se debe registrar nuevamente la línea base, tal como se hizo previo al comienzo del ensayo para definir el punto cero de medición. Finalmente se cierra el programa, se guardan los archivos en un pendrive, se apaga el computador y se desconecta la corriente. El cono es retirado y guardado. El camión es bajado al nivel del terreno y se guardan las bases soportantes de madera.



**Figura 18: Ejecución de ensayo CPT.**

Los datos obtenidos en terreno son lecturas de voltaje, registradas por los sensores Strain Gage incorporados en la punta y manga del cono. Las ecuaciones de ajuste utilizadas para la resistencia de punta y el fuste corresponden a la ecuación 3.2. y 3.3., respectivamente.

$$q_c = (z - z_{off}) \cdot 6,895 \frac{[cm]}{[\" ]} \cdot \Delta_q / (A_c \cdot 10^6) \quad 3.2.$$

$$f_s = (z - z_{off}) \cdot 6,895 \frac{[cm]}{["]} \cdot \Delta_f / (A_m \cdot 10^3) \quad 3.3.$$

Donde,  
 $q_c$ : Resistencia de punta [MPa].  
 $f_s$ : Fuste [KPa].  
 $\Delta_q$ : Factor de calibración de punta.  
 $\Delta_f$ : Factor de calibración de fuste.  
 $A_c$ : Área cono [ $^2$ ].  
 $A_m$ : Área manga [ $^2$ ].  
 $z$ : Profundidad [m].  
 $z_{off}$ : Offset [m].



**Figura 19: Cono penetrando estrato superficial del suelo.**

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS

### 4.1. Ensayo de Humedad

Como se mencionó anteriormente, las muestras de suelo de tamaño grande están pensadas para ser clasificadas en laboratorio, mientras que la de tamaño pequeño son extraídas para obtener la humedad del suelo. La masa de agua y la humedad presente en las de tamaño inferior se muestra a continuación en la Tabla 3.

**Tabla 3: Resultados de masa de agua presentes en las muestras.**

| N° | Ubicación         | Peso Húmedo [grs] | Peso Seco [grs] | Peso Agua [grs] | Humedad $\omega$ [%] |
|----|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| 1  | Laguna Aculeo     | 615               | 615             | 0               | 0,0                  |
| 2  |                   | 485               | 480             | 5               | 1,0                  |
| 3  |                   | 495               | 485             | 10              | 2,1                  |
| 4  |                   | 600               | 600             | 0               | 0,0                  |
| 5  |                   | 460               | 455             | 5               | 1,1                  |
| 6  |                   | 560               | 555             | 5               | 0,9                  |
| 7  | Pte. Águila Norte | 662               | 660             | 2               | 0,3                  |
| 8  | Laguna Aculeo     | 500               | 490             | 10              | 2,0                  |
| 9  |                   | 424               | 411             | 13              | 3,2                  |
| 10 |                   | 458               | 456             | 2               | 0,4                  |
| 11 |                   | 412               | 410             | 2               | 0,5                  |
| 12 |                   | 518               | 516             | 2               | 0,4                  |
| 13 |                   | 447               | 444             | 3               | 0,7                  |
| 14 |                   | 425               | 423             | 2               | 0,5                  |
| 15 |                   | 311               | 310             | 1               | 0,3                  |
| 16 |                   | 364               | 363             | 1               | 0,3                  |
| 17 |                   | 571               | 566             | 5               | 0,9                  |
| 18 |                   | 560               | 554             | 6               | 1,1                  |
| 19 |                   | 532               | 531             | 1               | 0,2                  |
| 20 |                   | 438               | 436             | 2               | 0,5                  |
| 21 |                   | 623               | 622             | 1               | 0,2                  |
| 22 |                   | 339               | 338             | 1               | 0,3                  |
| 23 |                   | 277               | 276             | 1               | 0,4                  |
| 24 |                   | 361               | 361             | 0               | 0,0                  |
| 25 |                   | 310               | 310             | 0               | 0,0                  |
| 26 |                   | 392               | 161             | 0               | 0,0                  |
| 27 |                   | 416               | 199             | 1               | 0,5                  |
| 28 | 544               | 197               | 2               | 1,0             |                      |

**Tabla 3: Resultados masa de agua presente en muestras. (Continuación)**

|    |                   |     |     |   |     |
|----|-------------------|-----|-----|---|-----|
| 29 | Laguna Aculeo     | 780 | 245 | 0 | 0,0 |
| 30 |                   | 777 | 209 | 1 | 0,5 |
| 31 |                   | 885 | 281 | 0 | 0,0 |
| 32 |                   | 583 | 218 | 1 | 0,5 |
| 33 | Pte. Águila Norte | 656 | 656 | 0 | 0,0 |
| 34 |                   | 781 | 778 | 3 | 0,4 |
| 35 |                   | 775 | 772 | 3 | 0,4 |
| 36 |                   | 585 | 583 | 2 | 0,3 |

#### **4.2. Ensayo CBR**

Los ensayos CBR de terreno se encuentran en la Tabla 4, donde se puede apreciar el número de ensayo y el valor del índice CBR. Para este último, se muestran primero los dos valores obtenidos de CBR correspondiente a las deformaciones de 2,54 [mm] y 5,08 [mm], respectivamente. Luego se muestra el índice CBR definitivo, sujeto a los planteado en 3.3.

Como se menciona anteriormente, los ensayos CBR de terreno fueron realizados al nivel de superficie con excepción de uno. Este fue llevado a cabo a una profundidad de 50 centímetros y corresponde al Ensayo N°9. Por otro lado. en el ANEXO B se encuentran los resultados de los 36 ensayos CBR.

**Tabla 4: Resultados ensayo CBR de terreno.**

| N° | Ubicación         | CBR 1 [%] | CBR 2 [%] | CBR [%] |
|----|-------------------|-----------|-----------|---------|
| 1  | Laguna Aculeo     | 41,54     | 55,32     | 55,32   |
| 2  |                   | 25,53     | 22,91     | 25,53   |
| 3  |                   | 20,19     | 17,99     | 20,19   |
| 4  |                   | 14,18     | 16,65     | 16,65   |
| 5  |                   | 68,23     | 60,91     | 68,23   |
| 6  |                   | 46,21     | 50,18     | 50,18   |
| 7  | Pte. Águila Norte | 52,22     | 98,90     | 98,90   |
| 8  | Laguna Aculeo     | 32,87     | 35,87     | 35,87   |
| 9  |                   | 10,18     | 7,71      | 10,18   |
| 10 |                   | 60,89     | 58,67     | 60,89   |
| 11 |                   | 32,20     | 37,22     | 37,22   |
| 12 |                   | 82,58     | 70,74     | 82,58   |
| 13 |                   | 21,52     | 19,34     | 21,52   |
| 14 |                   | 14,85     | 17,99     | 17,99   |
| 15 |                   | 29,53     | 23,36     | 29,53   |
| 16 |                   | 36,20     | 26,93     | 36,20   |
| 17 |                   | 38,54     | 25,59     | 38,54   |
| 18 |                   | 35,54     | 28,28     | 35,54   |
| 19 |                   | 31,87     | 36,32     | 36,32   |
| 20 |                   | 47,55     | 65,38     | 65,38   |
| 21 |                   | 77,57     | 100,02    | 100,02  |
| 22 |                   | 12,85     | 11,74     | 12,85   |
| 23 |                   | 27,53     | 19,34     | 27,53   |
| 24 |                   | 19,19     | 22,91     | 22,91   |
| 25 |                   | 42,54     | 44,14     | 44,14   |
| 26 |                   | 11,85     | 12,18     | 12,18   |
| 27 |                   | 15,85     | 12,85     | 15,85   |
| 28 |                   | 30,86     | 25,82     | 30,86   |
| 29 |                   | 28,20     | 30,29     | 30,29   |
| 30 |                   | 34,87     | 29,17     | 34,87   |
| 31 |                   | 66,90     | 79,90     | 79,90   |
| 32 | 37,20             | 38,56     | 38,56     |         |
| 33 | Pte. Águila Norte | 94,25     | 96,67     | 96,67   |
| 34 |                   | 91,25     | 87,95     | 91,25   |
| 35 |                   | 74,90     | 116,78    | 116,78  |
| 36 |                   | 11,51     | 13,30     | 13,30   |

### 4.3. Ensayo CPT

Los resultados para el ensayo CPT obtenidos en terreno, corresponden a valores de resistencia de punta ( $q_c$ ) y fuste ( $f_s$ ), hasta un metro de profundidad. Para esta primera variable, se debe elegir que datos son adecuados para correlacionar con el índice CBR. La Figura 2 indica una profundidad máxima de influencia de dos veces el diámetro de la superficie desde donde se aplica la carga. Dado que el diámetro del pistón del CBR es de 5 centímetros, la profundidad hasta la cual deberían estar influenciadas las tensiones del suelo, es de 10 centímetros. Sin embargo, como lo planteado anteriormente tiene fundamentos teóricos bajo ciertos supuestos, se decide considerar hasta los primeros 25 centímetros.

Para el fuste se considera desde los 20 hasta los 40 centímetros. Esto último se fundamenta en que la manga del cono al penetrar el suelo, no se encuentra en completo contacto con el material, mientras que para el rango de profundidades indicado, no se genera este problema.

**Tabla 5: Profundidades consideradas para resultados de resistencia de punta y fuste.**

| <i>Profundidad</i> | <i>Resistencia de Punta</i> | <i>Fuste</i> |
|--------------------|-----------------------------|--------------|
| 1                  | 5 [cm]                      | 20 [cm]      |
| 2                  | 10 [cm]                     | 25 [cm]      |
| 3                  | 15 [cm]                     | 30 [cm]      |
| 4                  | 20 [cm]                     | 35 [cm]      |
| 5                  | 25 [cm]                     | 40 [cm]      |

Los resultados del ensayo para las variables resistencia de punta y fuste se encuentran en la Tabla 6 y Tabla 7, respectivamente. En estas se puede apreciar el número de ensayo, su ubicación correspondiente y el valor del dato de interés. En el ANEXO C se encuentran los resultados de los 36 ensayos CPT, para ambas variables.

**Tabla 6: Resultados de resistencia de punta a distintas profundidades.**

| N° | Ubicación         | $q_c$<br>Profundidad 1<br>[MPa] | $q_c$<br>Profundidad 2<br>[MPa] | $q_c$<br>Profundidad 3<br>[MPa] | $q_c$<br>Profundidad 4<br>[MPa] | $q_c$<br>Profundidad 5<br>[MPa] |
|----|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1  | Laguna Aculeo     | 0,53                            | 22,54                           | 23,27                           | 17,89                           | 14,74                           |
| 2  |                   | 0,01                            | 2,85                            | 4,71                            | 7,18                            | 8,51                            |
| 3  |                   | 4,38                            | 11,67                           | 11,42                           | 9,07                            | 8,14                            |
| 4  |                   | 0,02                            | 0,49                            | 2,14                            | 5,32                            | 8,58                            |
| 5  |                   | 0,04                            | 4,01                            | 10,88                           | 11,08                           | 10,18                           |
| 6  |                   | 1,78                            | 8,24                            | 14,43                           | 15,75                           | 16,51                           |
| 7  | Pte. Águila Norte | 0,66                            | 20,01                           | 24,60                           | 30,26                           | 28,48                           |
| 8  | Laguna Aculeo     | 0,02                            | 2,84                            | 5,91                            | 5,30                            | 4,14                            |
| 9  |                   | 3,93                            | 4,14                            | 5,54                            | 6,93                            | 0,91                            |
| 10 |                   | 12,88                           | 16,29                           | 15,14                           | 13,92                           | 12,85                           |
| 11 |                   | 0,98                            | 9,40                            | 9,52                            | 12,12                           | 14,77                           |
| 12 |                   | 1,12                            | 5,73                            | 7,86                            | 11,41                           | 11,73                           |
| 13 |                   | 0,02                            | 1,27                            | 3,98                            | 3,08                            | 2,64                            |
| 14 |                   | 1,39                            | 3,72                            | 3,62                            | 3,02                            | 2,53                            |
| 15 |                   | 0,02                            | 5,43                            | 5,40                            | 4,36                            | 4,69                            |
| 16 |                   | 0,01                            | 5,64                            | 5,08                            | 3,68                            | 2,83                            |
| 17 |                   | 1,05                            | 4,61                            | 4,55                            | 4,11                            | 3,53                            |
| 18 |                   | 0,02                            | 2,35                            | 10,07                           | 15,86                           | 14,92                           |
| 19 |                   | 0,01                            | 12,38                           | 17,94                           | 17,69                           | 14,21                           |
| 20 |                   | 1,76                            | 23,42                           | 24,41                           | 17,53                           | 13,42                           |
| 21 |                   | 0,00                            | 12,42                           | 15,09                           | 24,76                           | 21,76                           |
| 22 |                   | 0,02                            | 2,97                            | 4,07                            | 4,55                            | 3,88                            |
| 23 |                   | 0,82                            | 4,58                            | 4,07                            | 3,88                            | 4,73                            |
| 24 |                   | 0,02                            | 1,94                            | 5,25                            | 6,39                            | 7,08                            |
| 25 |                   | 0,00                            | 6,04                            | 10,15                           | 11,62                           | 11,67                           |
| 26 |                   | 0,01                            | 2,33                            | 3,28                            | 3,09                            | 3,18                            |
| 27 |                   | 0,01                            | 3,43                            | 5,80                            | 8,44                            | 9,61                            |
| 28 |                   | 0,05                            | 2,21                            | 3,91                            | 5,41                            | 6,24                            |
| 29 |                   | 0,70                            | 3,02                            | 11,02                           | 12,55                           | 11,94                           |
| 30 |                   | 0,47                            | 3,48                            | 7,37                            | 7,49                            | 7,11                            |
| 31 |                   | 0,03                            | 1,85                            | 8,63                            | 19,46                           | 17,92                           |
| 32 | 0,03              | 9,22                            | 11,47                           | 12,12                           | 11,81                           |                                 |
| 33 | Pte. Águila Norte | 5,54                            | 21,32                           | 21,45                           | 21,62                           | 17,11                           |
| 34 |                   | 0,09                            | 10,68                           | 17,60                           | 17,10                           | 15,73                           |
| 35 |                   | 8,75                            | 26,41                           | 39,38                           | 46,73                           | 38,04                           |
| 36 |                   | 0,02                            | 2,62                            | 6,54                            | 8,67                            | 9,55                            |

**Tabla 7: Resultados de fuste a distintas profundidades.**

| N° | Ubicación         | $f_s$<br>Profundidad 1<br>[KPa] | $f_s$<br>Profundidad 2<br>[KPa] | $f_s$<br>Profundidad 3<br>[KPa] | $f_s$<br>Profundidad 4<br>[KPa] | $f_s$<br>Profundidad 5<br>[KPa] |
|----|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1  | Laguna Aculeo     | 251,22                          | 424,52                          | 455,73                          | 399,91                          | 390,33                          |
| 2  |                   | 58,11                           | 133,99                          | 257,06                          | 319,32                          | 331,86                          |
| 3  |                   | 381,39                          | 508,30                          | 547,81                          | 452,35                          | 360,98                          |
| 4  |                   | 8,77                            | 17,29                           | 24,00                           | 46,35                           | 89,48                           |
| 5  |                   | 20,29                           | 92,63                           | 185,80                          | 239,95                          | 250,40                          |
| 6  |                   | -0,24                           | 97,61                           | 233,35                          | 331,62                          | 374,37                          |
| 7  | Pte. Águila Norte | 158,69                          | 342,28                          | 485,72                          | 654,40                          | 608,81                          |
| 8  | Laguna Aculeo     | 28,47                           | 35,94                           | 42,77                           | 46,00                           | 46,88                           |
| 9  |                   | 36,30                           | -1,71                           | 59,24                           | 74,89                           | 83,12                           |
| 10 |                   | 180,07                          | 245,37                          | 266,43                          | 279,13                          | 283,66                          |
| 11 |                   | 65,65                           | 73,94                           | 79,36                           | 85,18                           | 85,95                           |
| 12 |                   | 38,35                           | 56,12                           | 97,95                           | 149,60                          | 188,72                          |
| 13 |                   | 29,47                           | 46,47                           | 71,30                           | 78,77                           | 87,59                           |
| 14 |                   | 28,82                           | 38,00                           | 32,24                           | 33,38                           | 31,82                           |
| 15 |                   | 31,01                           | 39,48                           | 44,92                           | 44,56                           | 83,91                           |
| 16 |                   | 28,66                           | 37,42                           | 42,80                           | 36,27                           | 32,83                           |
| 17 |                   | 79,75                           | 138,54                          | 152,56                          | 136,41                          | 113,84                          |
| 18 |                   | 5,11                            | 25,11                           | 106,04                          | 95,33                           | 154,72                          |
| 19 |                   | 22,85                           | 29,14                           | 25,27                           | 25,94                           | 27,75                           |
| 20 |                   | 15,90                           | 24,79                           | 23,52                           | 19,77                           | 42,38                           |
| 21 |                   | 37,36                           | 58,16                           | 47,34                           | 39,72                           | 51,81                           |
| 22 |                   | 3,26                            | 18,08                           | 29,20                           | 35,31                           | 31,38                           |
| 23 |                   | 5,32                            | 22,19                           | 7,07                            | 0,12                            | 0,79                            |
| 24 |                   | 0,24                            | 5,74                            | 8,83                            | 3,14                            | 0,42                            |
| 25 |                   | 2,36                            | 13,36                           | 13,54                           | 9,55                            | 14,27                           |
| 26 |                   | 6,77                            | 16,44                           | 20,80                           | 16,26                           | 23,52                           |
| 27 |                   | 8,28                            | 19,83                           | 39,17                           | 67,83                           | 70,37                           |
| 28 |                   | 0,36                            | 11,55                           | 18,32                           | 12,57                           | 1,99                            |
| 29 |                   | 4,29                            | 49,09                           | 102,29                          | 144,01                          | 152,83                          |
| 30 |                   | 0,18                            | 13,48                           | 32,95                           | 42,98                           | 52,84                           |
| 31 |                   | 0,18                            | 6,89                            | 46,55                           | 72,37                           | 64,81                           |
| 32 | 0,79              | 23,28                           | 42,08                           | 44,01                           | 54,65                           |                                 |
| 33 | Pte. Águila Norte | 163,66                          | 271,26                          | 295,81                          | 257,65                          | 210,59                          |
| 34 |                   | 36,00                           | 48,10                           | 92,06                           | 144,08                          | 152,73                          |
| 35 |                   | 155,13                          | 351,14                          | 690,80                          | 1001,82                         | 1108,36                         |
| 36 |                   | 30,11                           | 23,88                           | 25,21                           | 26,42                           | 29,87                           |

## CAPÍTULO 5: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Comparación de Tiempos de Ejecución de los Ensayos

Del trabajo realizado en terreno se obtiene que el tiempo de ejecución para un ensayo CBR es de 30 minutos, mientras que un ensayo CPT, de un metro de profundidad, toma 10 minutos aproximadamente. Estos periodos consideran desde la preparación de equipos, hasta el desmontaje de estos. Por lo tanto, se obtiene de lo anterior que el CPT demora un tercio del tiempo que toma el CBR en realizarse.

A modo de ejemplo, se supone el caso de un proyecto vial para el cual se necesita obtener el índice CBR del suelo. Este tiene la intención de comparar las diferencias de tiempo que toma realizar el estudio, para cada uno de los ensayos. Se considera una carretera de 100 kilómetros de largo y una distancia de 450 metros entre cada ensayo, según lo planteado por Christopher, Schwartz y Boudreau (2006) en su manual llamado “Geotechnical Aspects of Pavements”. Dado lo anterior, se tiene que son 223 ensayos los que se deben realizar. Utilizando la información entregada por la empresa LMMG, con respecto a la cantidad de ensayos realizados por día, se obtienen los tiempos que toma cada una de las metodologías, tal como se muestra en la Tabla 8.

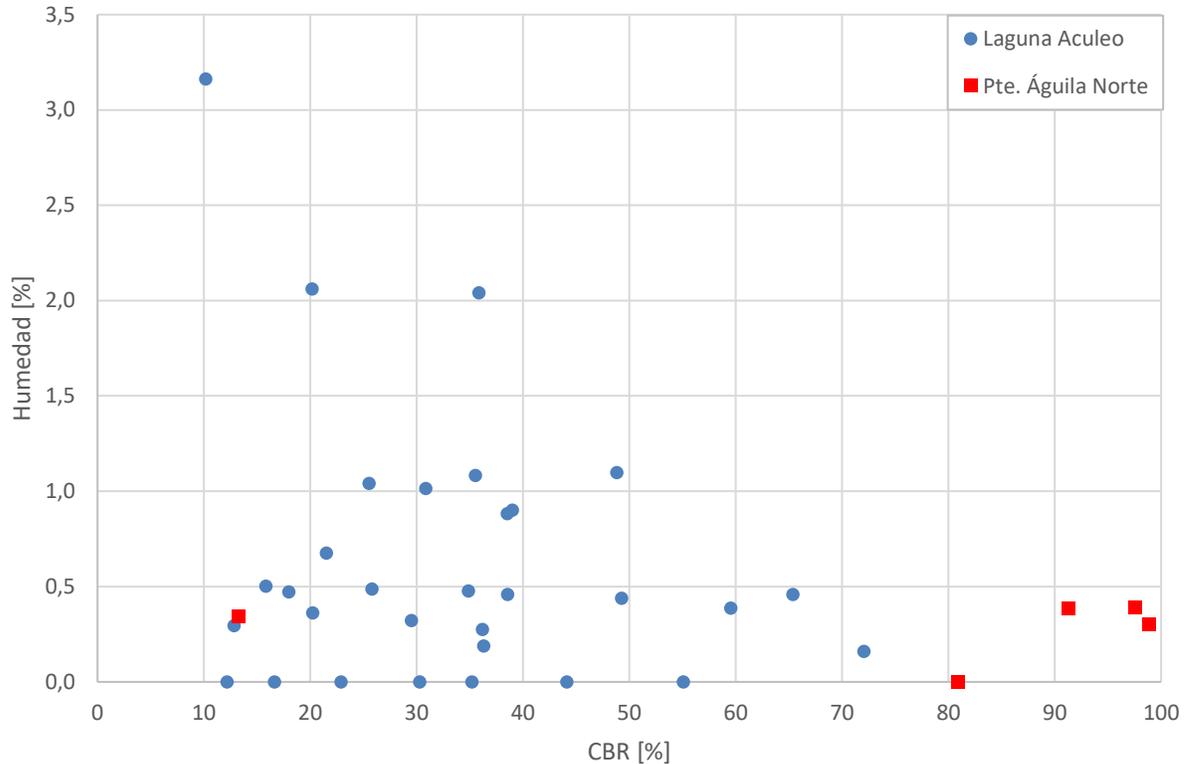
**Tabla 8: Comparación de tiempos de ejecución para los ensayos CBR de terreno y CPT.**

| Ensayo                            | CBR | CPT |
|-----------------------------------|-----|-----|
| Cantidad Ensayos por Día [1/días] | 5   | 20  |
| Tiempo Total [días]               | 45  | 12  |

De lo anterior, se observa que al reemplazar el CBR por el CPT para este caso particular, existe una reducción de un 73 [%] en el tiempo destinado a los ensayos. Si se considera además que estas metodologías están sujetas a la presencia de personal capacitado en el lugar, esta disminución se traduce finalmente en un ahorro de costos directos de la faena.

### 5.2. Ensayo CBR con respecto a la Humedad

Los resultados del índice CBR se grafican con respecto a sus datos de humedad ( $\omega$ ) obtenidos para cada una de las muestras. Esto se aprecia en la Figura 20. Los resultados correspondientes a Puente Águila Norte, tienen contenido de agua similares entre ellos y menores a 0,5 [%]. Por otro lado, para los datos de Laguna Aculeo se aprecia una mayor dispersión entre estos, comprendida entre 0 y 3,5 [%]. Se encuentra también que los índices de CBR más altos tienen menores porcentajes de  $\omega$ , mientras que los CBR menores a 50 [%] tienen un contenido de agua superior.



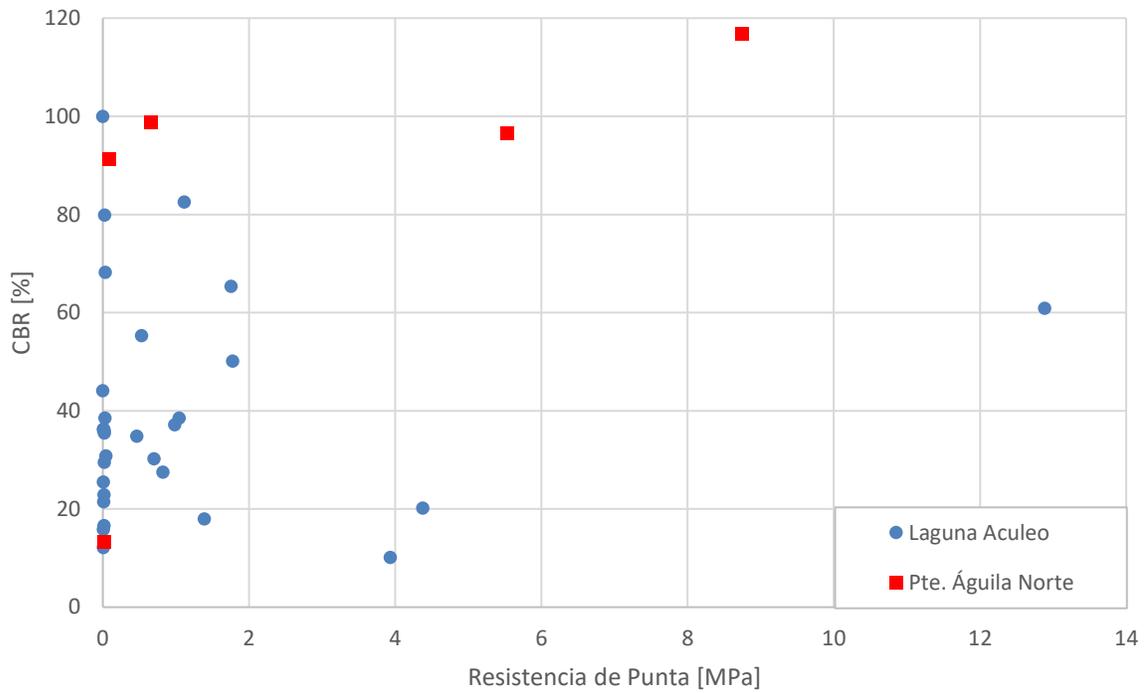
**Figura 20: Diagrama de dispersión de humedad con respecto al CBR.**

Los valores de  $\omega$  apreciados en este diagrama, son bastante bajos con respecto a lo esperado normalmente para este ensayo. El procedimiento de secado al sol es utilizado en suelos de origen volcánico, como se menciona en 2.2.1.3. Dado que ambos lugares de estudio cuentan con suelo de tipo Q1, según la Figura 1, es posible que esta metodología para obtener el contenido de agua no sea la más adecuada.

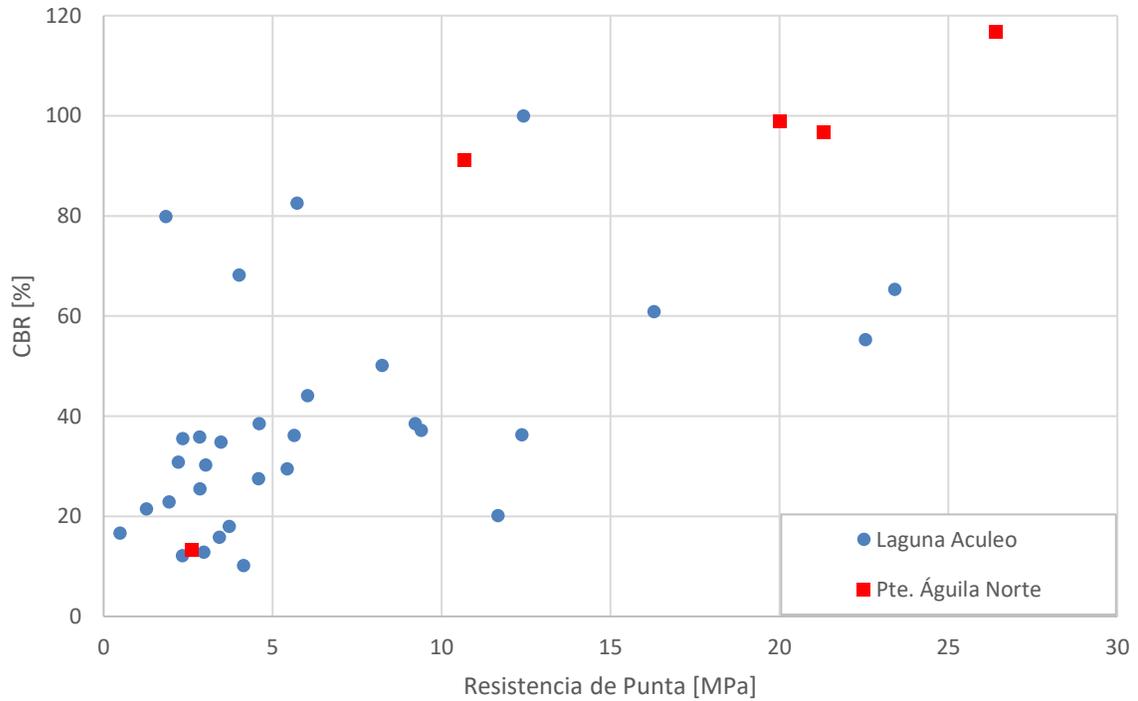
### 5.3. Ensayo CBR con respecto a CPT

#### 5.3.1. Índice CBR con respecto a la Resistencia de Punta

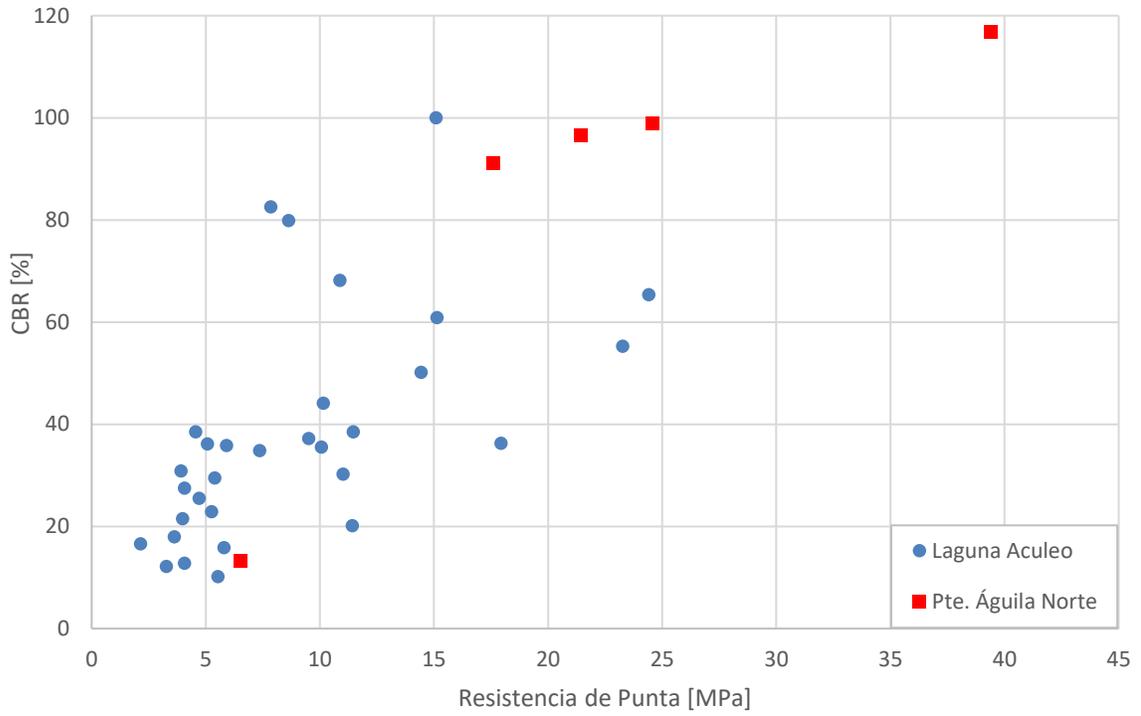
Los datos obtenidos de los ensayos CBR y CPT son graficados en diagramas de dispersión para una mejor interpretación. La variable que se quiere correlacionar primero al índice CBR corresponde a la resistencia de punta ( $q_c$ ). Esta es analizada para las profundidades que aparecen en la Tabla 5. Los resultados mencionados se muestran en los gráficos que se muestran a continuación.



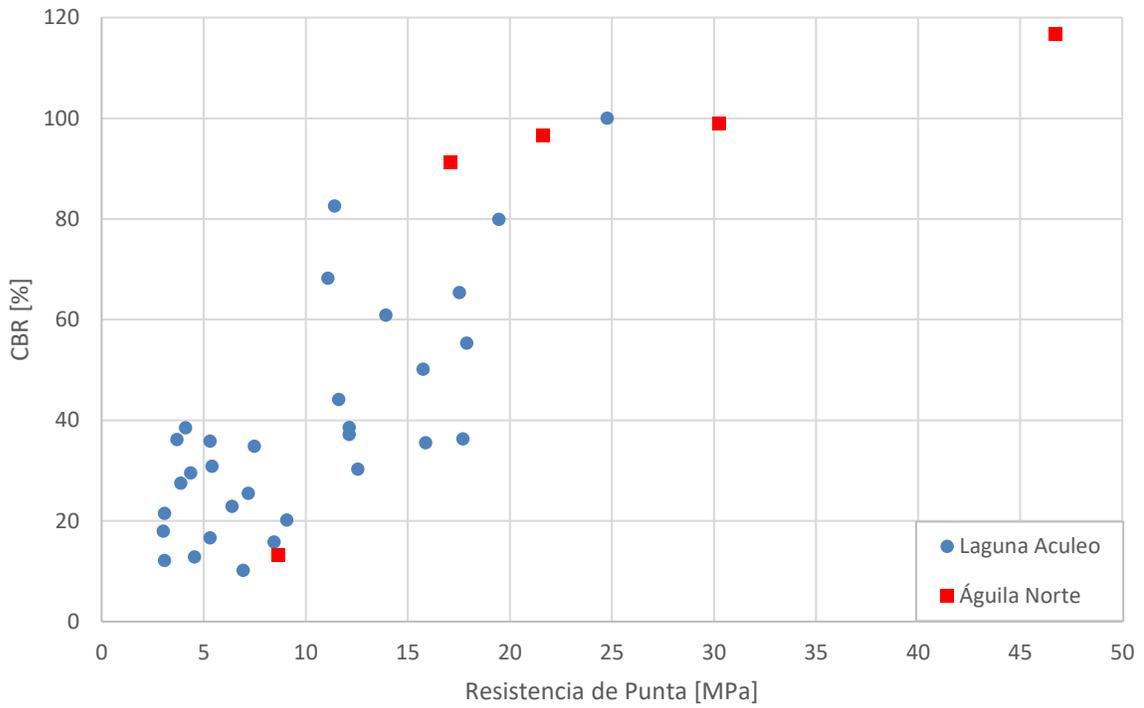
**Figura 21: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 5 [cm].**



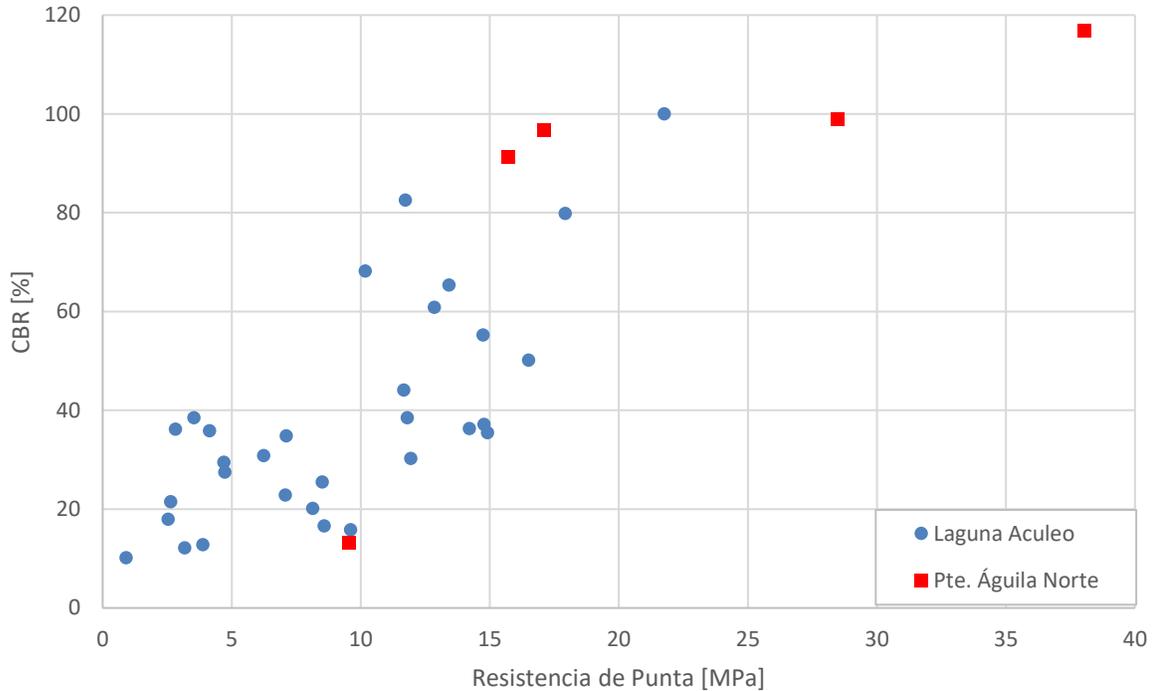
**Figura 22: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 10 [cm].**



**Figura 23: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 15 [cm].**



**Figura 24: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 20 [cm].**



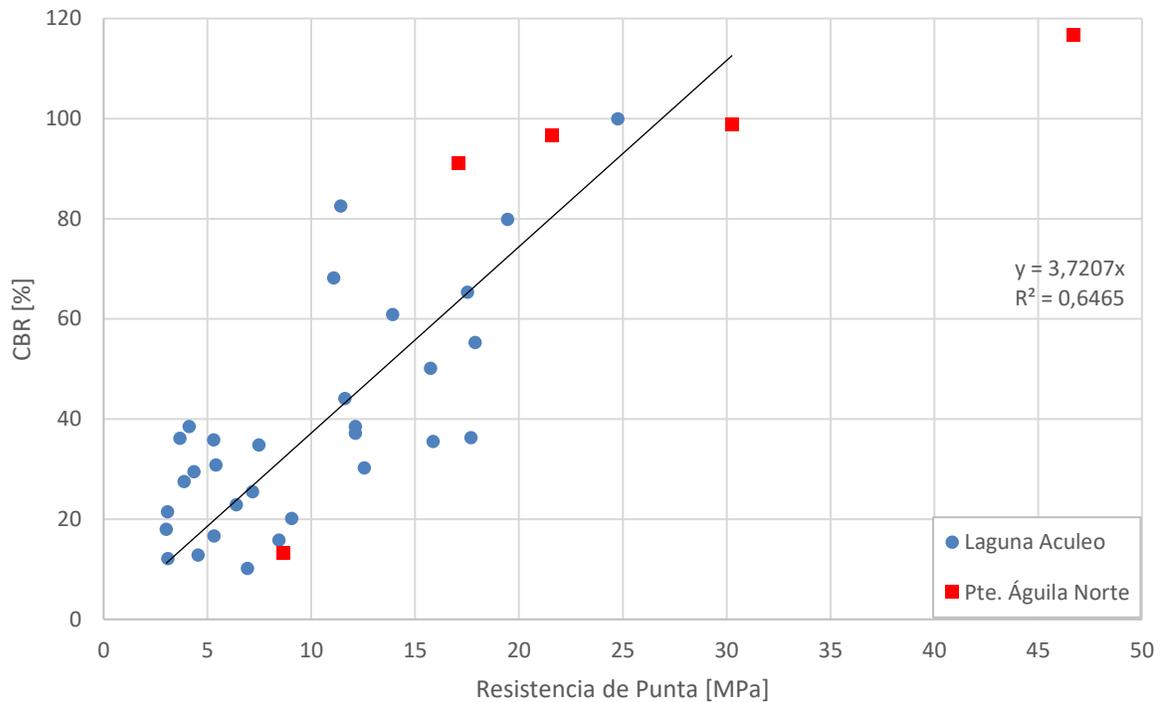
**Figura 25: Diagrama de dispersión para CBR y resistencia de punta a Z = 25 [cm].**

Los gráficos anteriores muestran aparentemente, que a medida que aumenta la profundidad para  $q_c$ , más se evidencia una relación creciente entre las dos variables. De estas, la Figura 24 correspondiente a la Profundidad 4, a 20 centímetros de la superficie, muestra la configuración de datos más relacionados entre sí. Por otro lado, para el gráfico de los 25 centímetros se aprecia una disminución de esta relación.

Los datos correspondientes a la zona del Puente Águila Norte, integran los valores más altos para el índice CBR, superiores a 80% con excepción de uno. Esto puede estar sujeto a la presencia de suelos de gran resistencia en el lugar. Por otro lado, los resultados obtenidos en Laguna Aculeo muestran mayor diversidad en los valores de ambas variables. Esto último puede deberse a la gran cantidad de mediciones, realizadas a mayores distancias entre sí en comparación con la zona de Águila Norte.

Para la Profundidad 4 de  $q_c$ , se encuentra una línea de tendencia de carácter lineal y ajustada al origen. Esta es la que más se ajusta a los datos y se muestra en la ecuación 5.1. Además, cuenta con un  $R^2$  de 0,6465, lo cual indica un grado de correlación importante, ya que los datos del modelo se ajustan en casi un 65 [%] a los obtenidos por los ensayos. Los resultados descritos anteriormente, se muestran a continuación en el siguiente gráfico.

$$\text{CBR [\%]} = 3,7207 q_c \text{ [MPa]} \quad 5.1.$$

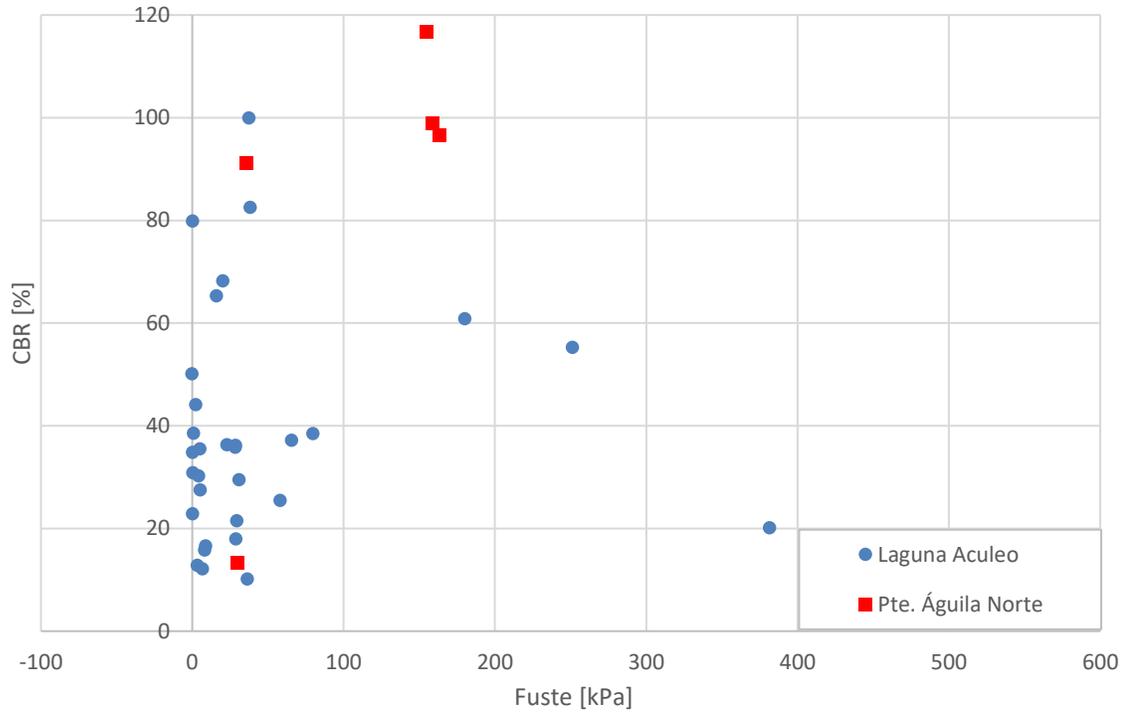


**Figura 26: Regresión lineal para datos de índice CBR y resistencia de punta a Z = 20 [cm].**

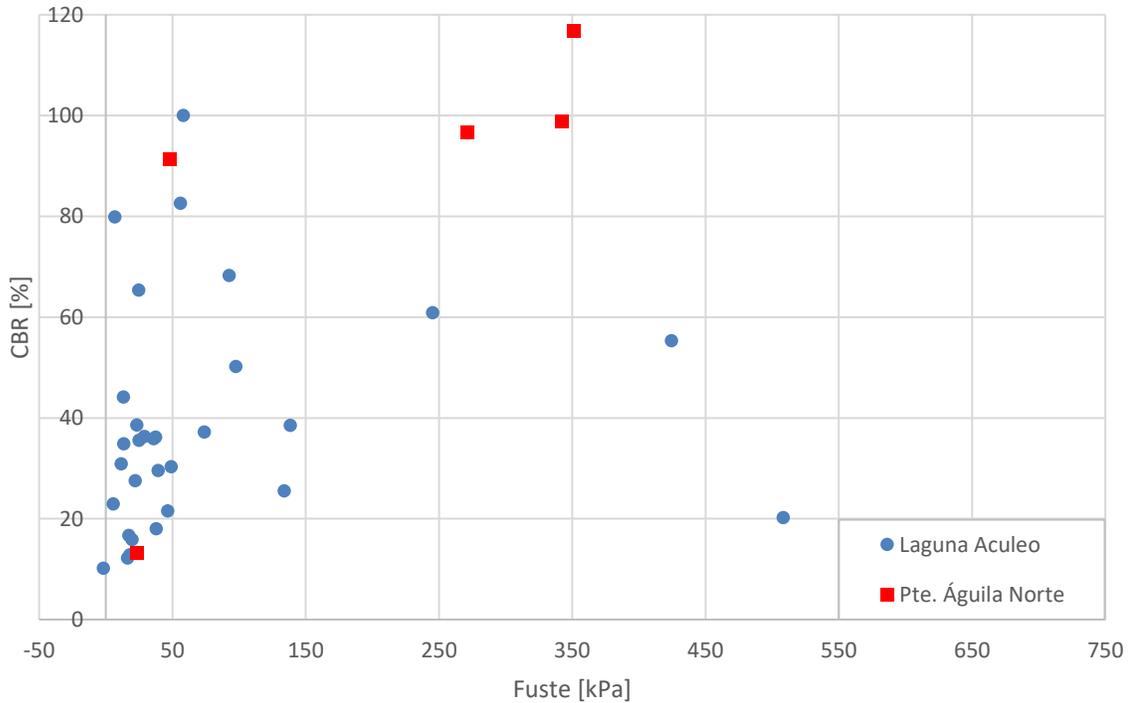
En el diagrama anterior, se encuentra un dato de  $q_c$  superior a 30 [MPa], en la zona de Puente Águila Norte. Este valor es similar a la resistencia de compresión de algunos tipos de hormigón. Dado que en el suelo esta variable no llega a ese rango de resistencia, es que no se considera este dato para los posteriores análisis de  $q_c$ . Esto puede deberse a que, durante la construcción del puente en el lugar, se realizó un relleno estructural de suelo con trozos de hormigón, los cuales pueden verse también en superficie. Es probable que a los 20 centímetros de profundidad el cono se encontró con este material, por lo cual registró este valor inconsistente.

### 5.3.2. Índice CBR con respecto al Fuste

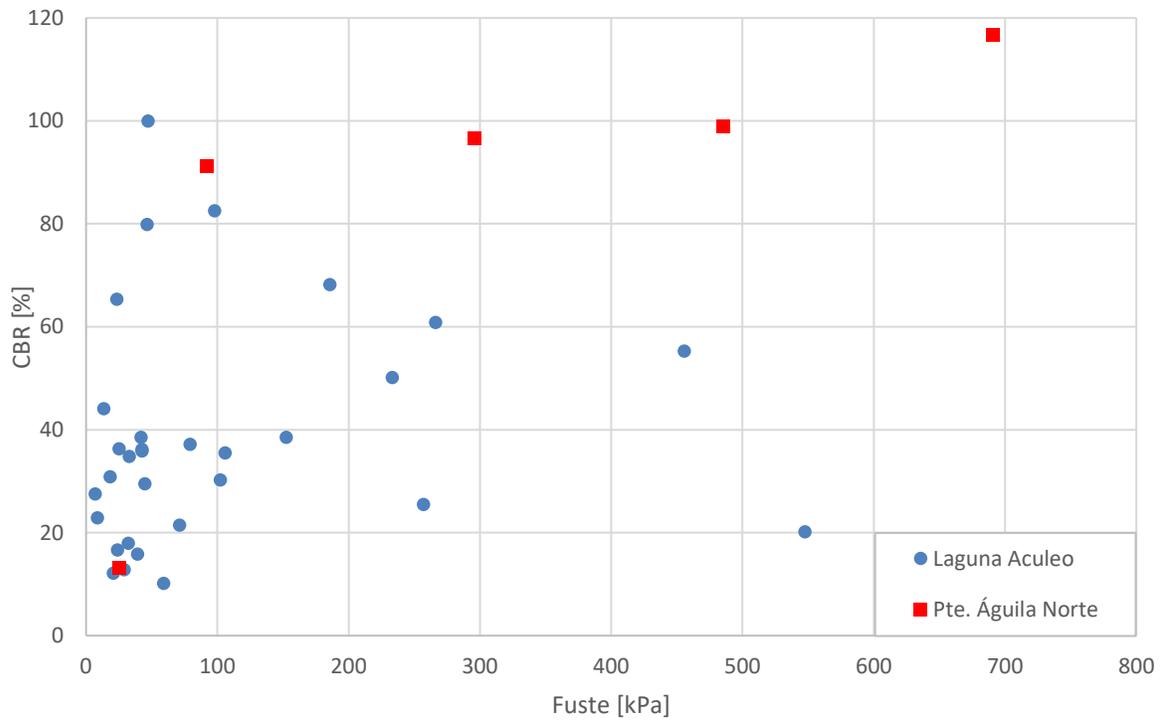
La segunda variable obtenida por el ensayo CPT, que se busca correlacionar en este estudio es el fuste ( $f_s$ ). Se grafican los índices CBR con respecto a esta variable, para las profundidades descritas en la Tabla 5. Estos se pueden apreciar en los diagramas de dispersión de datos, que se muestran a continuación.



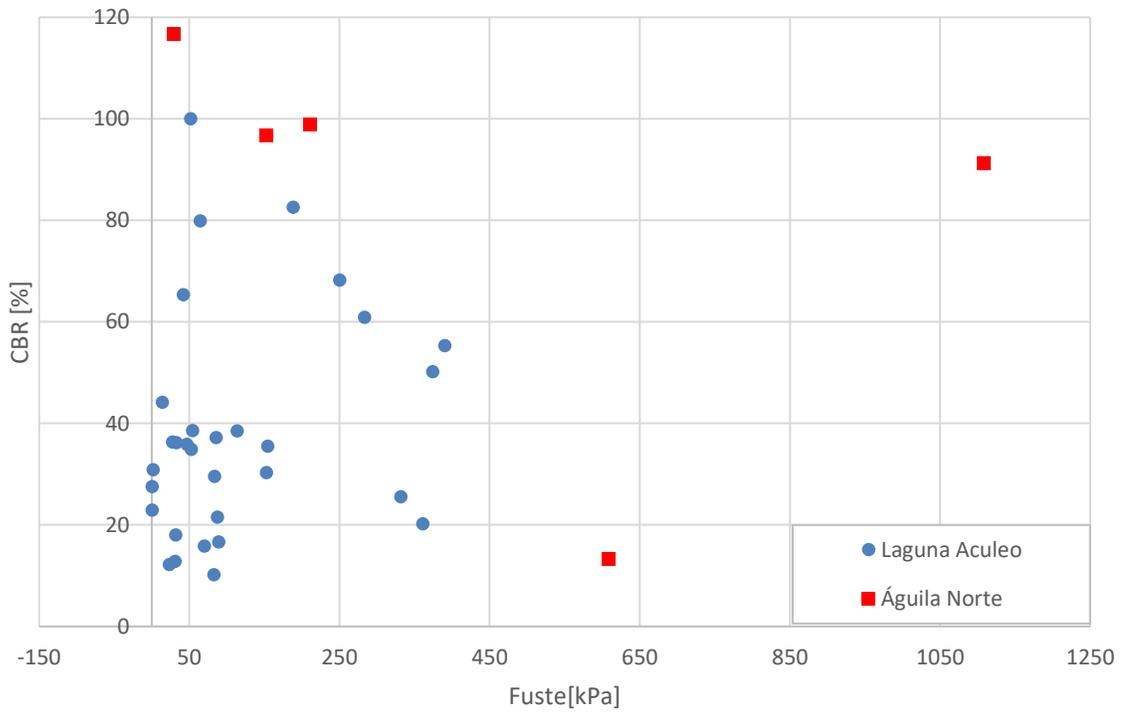
**Figura 27: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 20 [cm].**



**Figura 28: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 25 [cm].**

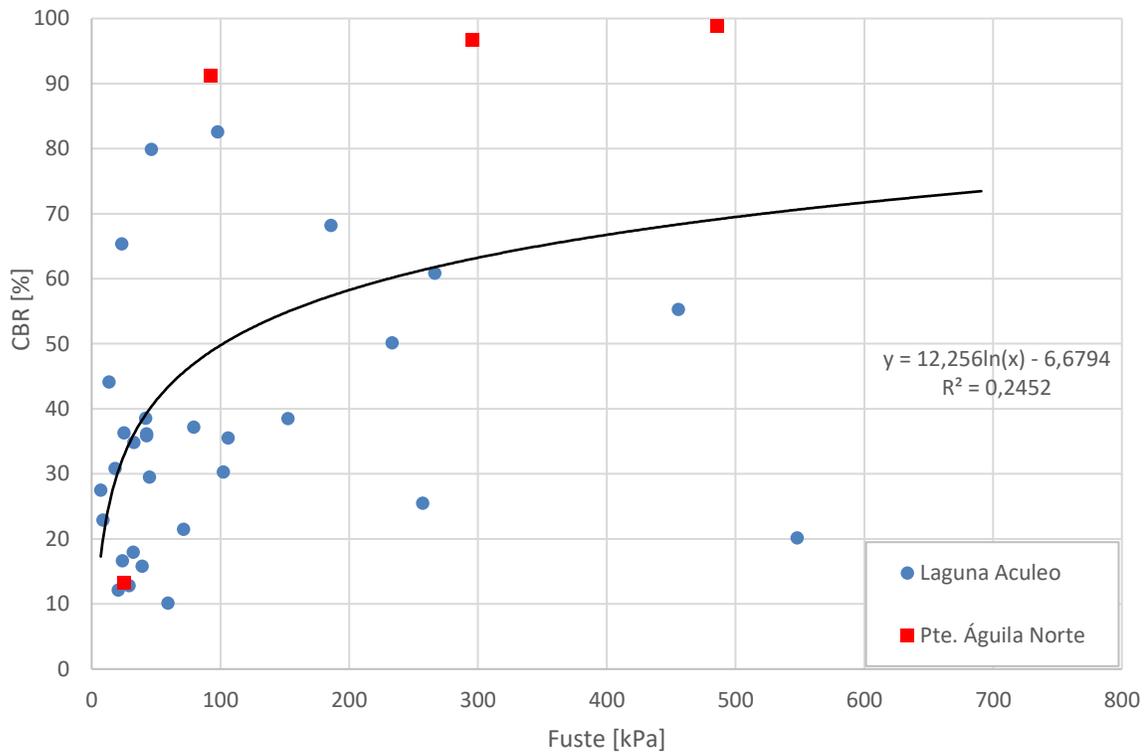


**Figura 29: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 30 [cm].**



**Figura 30: Diagrama de dispersión para CBR y fuste a Z = 35 [cm].**





**Figura 32: Regresión lineal para datos de índice CBR y fuste a Z = 30 [cm].**

#### 5.4. Ensayos CBR y CPT con respecto al Tipo de Suelo según Comportamiento

Los resultados del ensayo CPT son correlacionados con el tipo de suelo según su comportamiento (SBT), por medio del software “CPeT-IT”. Este también permite obtener otras variables útiles para estudios geotécnicos, tales como la densidad relativa, el peso unitario, entre otras. El programa clasifica el material en base a lo establecido en la Figura 5. En esta se definen las zonas correspondientes a los tipos de suelo, las cuales se resumen en la Tabla 9. Se utilizan los colores establecidos según el software, para facilitar la diferenciación de los tipos de suelo.

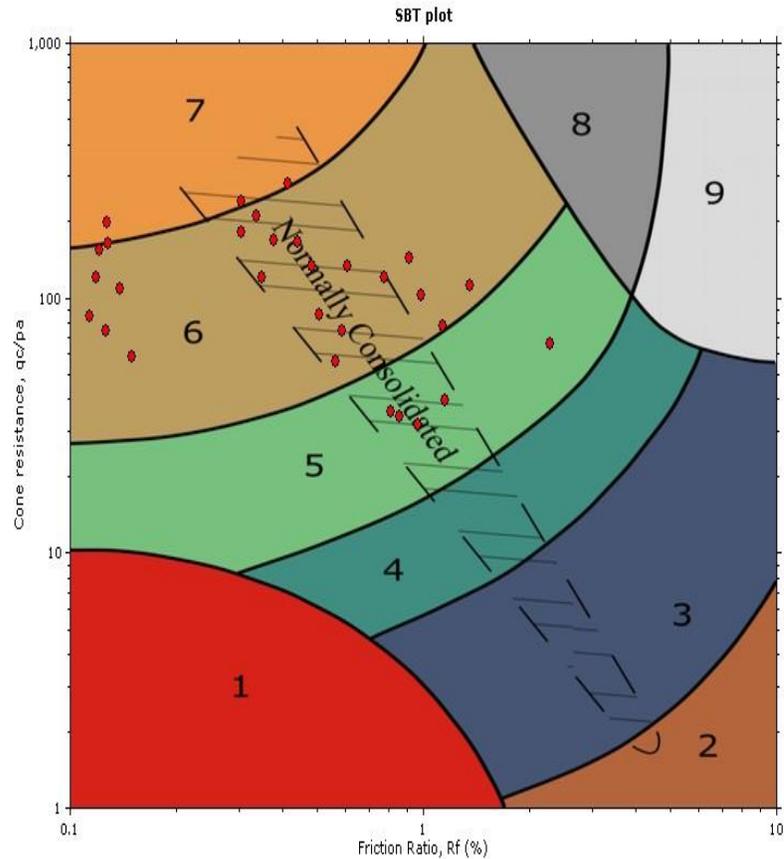
De 5.3.1 se obtiene que el índice CBR presenta una correlación lineal con la variable  $q_c$ , a una profundidad de 20 centímetros. Dado lo anterior, es de interés clasificar el tipo de suelo para cada lugar ensayado, a dicha profundidad. De esta manera, el tipo de material complementa los análisis previos, permitiendo relacionar el SBT con los resultados de los ensayos.

En la Tabla 10 se muestran los resultados entregados por el software anteriormente mencionado. Para algunos de estos ensayos, el SBT no es posible de correlacionar, dado que la  $R_f$  obtenida es menor a 0,1 [%] y por lo tanto, no está dentro de la ilustración presentada en la Figura 4. Esto se debe a que, a los 20 centímetros de profundidad, la manga del cono está en contacto parcial con el suelo, lo que genera valores de  $f_s$  bajos. Por lo tanto, esto se soluciona reemplazando los datos problemáticos de esta variable, por la mínima  $R_f$  del gráfico de SBT. Además, se corrobora lo anterior considerando los SBT de ubicaciones cercanas a las de interés y que se encuentran a la misma profundidad. Esto se puede corroborar en las figuras presentadas en el ANEXO A, en donde se ilustra la distancia entre cada ensayo.

**Tabla 9: Zonas de los SBT correlacionados con resultados del ensayo CPT.**

| Zona | Tipo de Suelo según Comportamiento                |
|------|---|
| 1    | Sensible, de grano fino                           |
| 2    | Suelo orgánico - arcilla                          |
| 3    | Arcilla – arcilla limosa a arcilla                |
| 4    | Mezclas de limo – limo arcilloso a arcilla limosa |
| 5    | Mezclas de arena – arena limosa a limo arenoso    |
| 6    | Arenas – arena limpia a arena limosa              |
| 7    | Arena gravosa a arena densa                       |
| 8    | Arena muy rígida a arena arcillosa                |
| 9    | Muy rígido de grano fino                          |

En la Figura 33 se encuentra el gráfico para la clasificación del tipo de suelo, entregado por el software. En este se aprecia que la mayoría de los SBT obtenidos se encuentran en la zona 6, correspondiente a arena y limo arenoso. Además, se tiene que el suelo con mayor tamaño de partícula corresponde a arena y el de menor a limo arenoso, encontrándose este último solo en la zona de Laguna Aculeo.

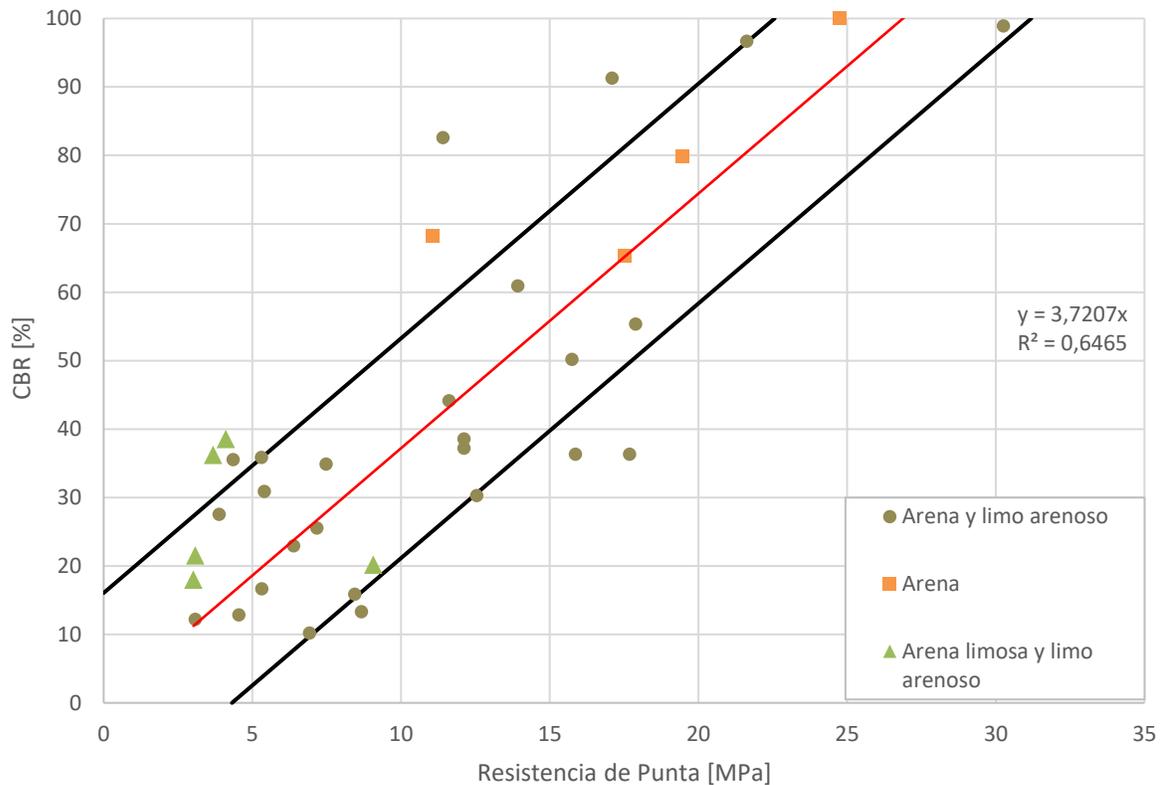


**Figura 33: Tipo de suelo según comportamiento para Z = 20 [cm].**

**Tabla 10: Tipo de suelo según comportamiento para cada ensayo a Z = 20 [cm].**

| N° | Ubicación         | Zona              | Tipo de Suelo según Comportamiento |                      |
|----|-------------------|-------------------|------------------------------------|----------------------|
| 1  | Laguna Aculeo     | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 2  |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 3  |                   | 5                 | Arena limosa y limo arenoso        |                      |
| 4  |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 5  |                   | 7                 | Arena                              |                      |
| 6  |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 7  | Pte. Águila Norte | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 8  | Laguna Aculeo     | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 9  |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 10 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 11 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 12 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 13 |                   | 5                 | Arena limosa y limo arenoso        |                      |
| 14 |                   | 5                 | Arena limosa y limo arenoso        |                      |
| 15 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 16 |                   | 5                 | Arena limosa y limo arenoso        |                      |
| 17 |                   | 5                 | Arena limosa y limo arenoso        |                      |
| 18 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 19 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 20 |                   | 7                 | Arena                              |                      |
| 21 |                   | 7                 | Arena                              |                      |
| 22 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 23 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 24 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 25 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 26 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 27 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 28 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 29 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 30 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 31 |                   | 7                 | Arena                              |                      |
| 32 |                   | 6                 | Arena y limo arenoso               |                      |
| 33 |                   | Pte. Águila Norte | 6                                  | Arena y limo arenoso |
| 34 |                   |                   | 6                                  | Arena y limo arenoso |
| 35 |                   |                   | 7                                  | Arena                |
| 36 | 6                 |                   | Arena y limo arenoso               |                      |

Para la regresión lineal encontrada anteriormente, entre  $q_c$  y el índice CBR a la profundidad 4, se calcula la desviación estándar de los datos entregados por la línea de tendencia, con respecto a los obtenidos por los ensayos, para el eje de la ordenada. Esta tiene un valor de 16,05 [%] y permite graficar un intervalo de confianza de los resultados de ambas variables. De esta manera, se asegura que un gran porcentaje de estos datos se encuentran dentro del área señalada en el gráfico y permite al usuario de dicho diagrama tener libertad al momento de correlacionar. El diagrama descrito se muestra en la Figura 34, en donde cada punto está sujeto a su SBT.

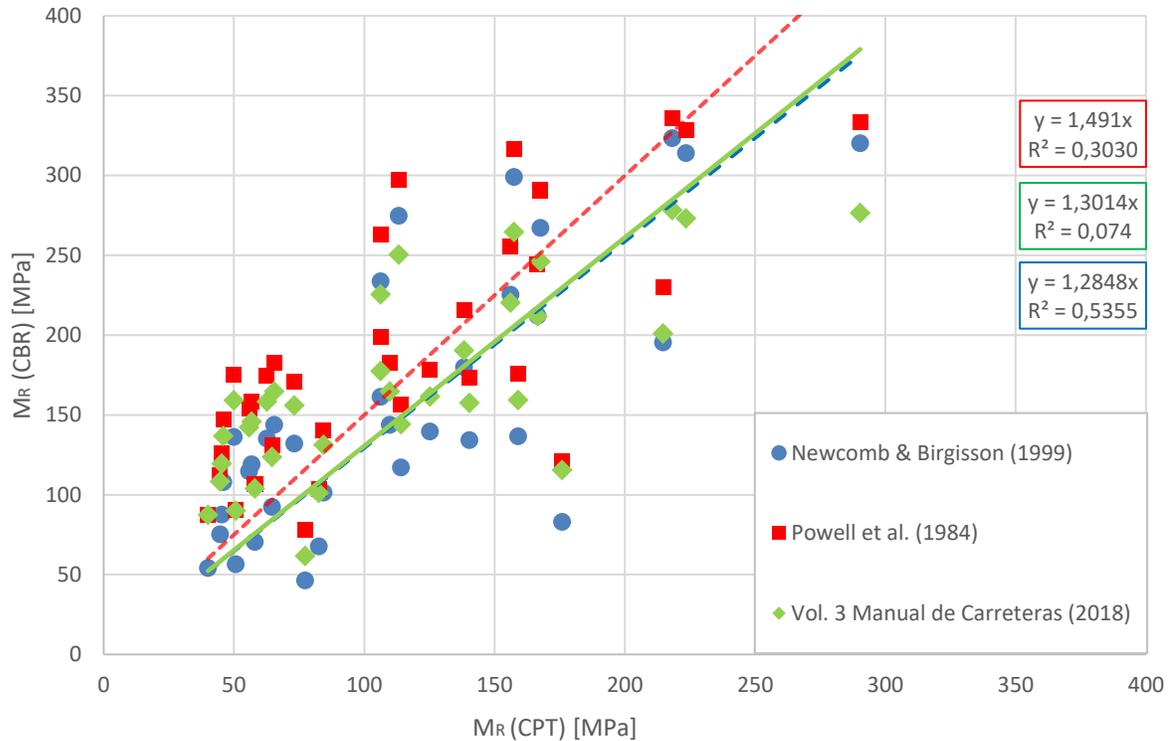


**Figura 34: Intervalo de confianza sujeto a la regresión lineal de los datos de índice CBR y resistencia de punta, para  $Z = 20$  [cm] con su SBT.**

En el diagrama anterior se observa que los resultados correspondientes a arena limosa y limo arenoso, están concentrados en valores de baja resistencia dado que no superan los 10 [MPa] ni tampoco el 40 [%] para el índice CBR. Con respecto a los datos de arena y limo arenoso se aprecia una mayor distribución, ya que están presentes en casi todo el rango de valores de ambas variables. Finalmente, para el caso de las arenas se tiene que los datos se encuentran en valores superiores al 60 [%] del CBR y mayores a 10 [MPa], para el caso de  $q_c$ . De lo anterior, se entiende que el tamaño de partícula se relaciona de forma creciente con la resistencia de los suelos estudiados.

## 5.5. Correlación de Módulo Resiliente

Tanto el CBR como el CPT, cuentan con correlaciones para obtener el  $M_R$  del suelo. Esto se aprecia de lo planteado anteriormente en 2.2.3.1. y 2.2.3.2. Dado lo anterior, es que se obtiene el  $M_R$  de ambos ensayos para comparar los resultados obtenidos, en un diagrama de dispersión. Esto se puede ver de mejor manera en el gráfico de la Figura 35. En este se grafican tres módulos resilientes en el eje de las ordenadas, obtenidos por medio de correlaciones con el índice CBR de distintos autores. Mientras que para el eje de las abscisas, se presenta un  $M_R$  correlacionado para el ensayo CPT, del autor Louay Mohammad et al (1999).

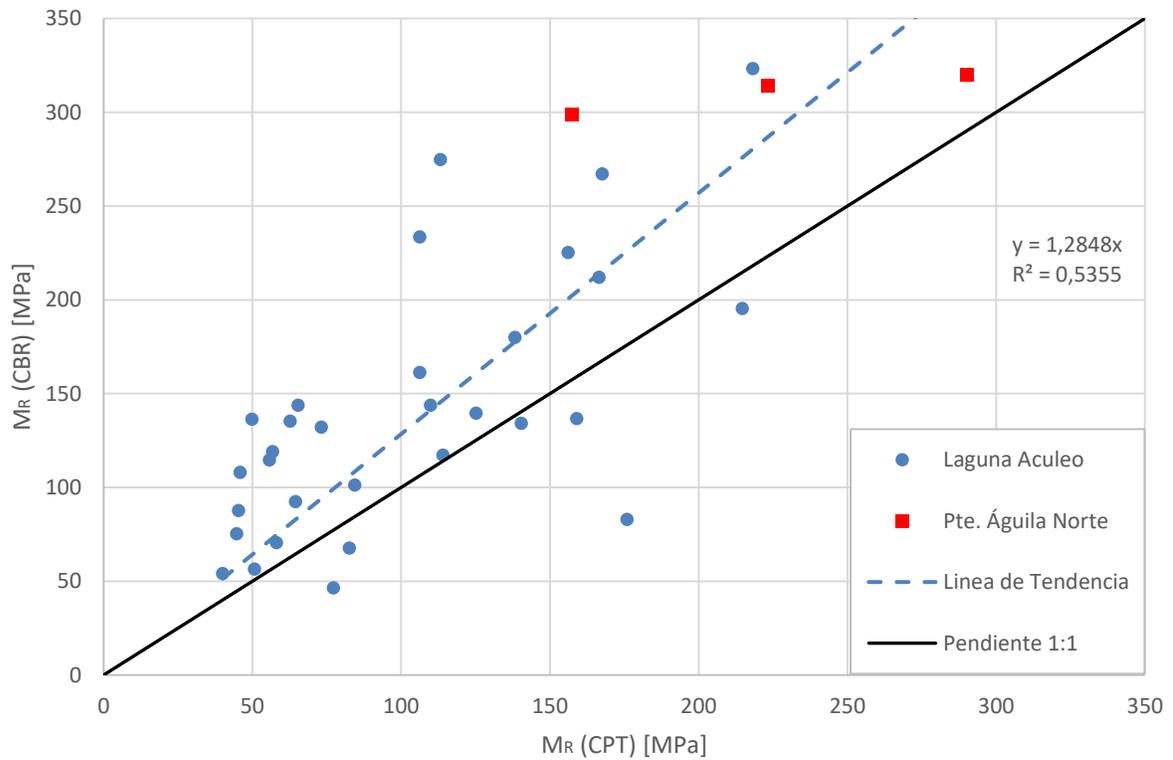


**Figura 35: Diagrama de dispersión para módulos resilientes correlacionados de ensayos CBR y CPT.**

Dado que se está graficando la misma variable en ambos ejes, el resultado debería ser una recta fijada al origen con pendiente igual a uno. Al analizar la Figura 35 se tiene que la ecuación correspondiente a Powell et al. (1984), cuenta con una pendiente diferente a la esperada y un coeficiente de determinación de 0,303, lo que implica un ajuste bajo del modelo. Por otro lado, para el caso de la relación empírica entregada en el Volumen 3 del Manual de Carreteras (2018), se tiene que la pendiente se asemeja más a lo buscado, pero su  $R^2$  de 0,074 indica que el modelo no se ajusta a los datos. Finalmente, la correlación que se asemeja más al comportamiento descrito corresponde a la planteada por Newcomb & Birgisson (1999). Esta se aprecia de mejor manera en la Figura 36, en donde se obtiene que la línea de tendencia corresponde a una recta con pendiente 1,2848 y  $R^2$  igual a 0,5355. Esto indica un grado de correlación regular, ya que los datos del modelo se ajustan aproximadamente en un 54 [%] a los  $M_R$  obtenidos para cada ensayo. Tiene sentido que este coeficiente sea menor al obtenido en la Figura 26, dado que se llega a este indicador por medio de valores de  $M_R$  ya correlacionados. Por lo tanto, se genera una propagación de errores en los datos utilizados. La similitud entre la

pendiente esperada y la obtenida por el modelo lineal, valida la correlación encontrada anteriormente entre el ensayo CBR y el CPT.

La correlación de Newcomb & Birgisson (1999) fue basada en resultados que el estado de Alabama, EE. UU., obtuvo de AASHO Road Test Soils, para ensayos de CBR en terreno. Por otro lado, las otras dos correlaciones presentadas fueron obtenidas en laboratorio. Esto es de gran relevancia, ya que esta coincidencia de las metodologías en terreno, para la obtención del índice CBR, puede explicar porque esta correlación para el  $M_R$  es la que mejor se ajusta a los datos.



**Figura 36: Diagrama de dispersión para módulos resilientes correlacionados según Newcomb & Birgisson y Mohammad.**

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Se encuentra una correlación entre el ensayo CBR de terreno y el CPT. La variable de este último ensayo que se relaciona empíricamente con el índice CBR es la resistencia de punta a los 20 centímetros de profundidad, como se menciona anteriormente. Esta ecuación es de carácter lineal, ajustada al origen y se muestra nuevamente en la ecuación 6.1. Cuenta con un  $R^2$  de 0,6465, indicando un grado de correlación moderado alto, debido a que los datos de la línea de tendencia se ajustan en casi 65 [%] a los observados en los ensayos. Por otro lado, el fuste no presenta ecuación que se acomode adecuadamente a la distribución de los datos del CBR, por lo tanto no se encuentra correlación para este parámetro.

$$\text{CBR [\%]} = 3,7207 q_c \text{ [MPa]} \quad 6.1.$$

Para la línea de tendencia encontrada entre el índice CBR y  $q_c$ , se calcula la desviación estándar en el eje de las ordenadas, de los datos entregados por el modelo con respecto a los observados de los ensayos. Con este parámetro se gráfica un intervalo de confianza sobre la relación empírica ya mencionada. Este aparece en la Figura 34 y asegura que un porcentaje importante de los datos obtenidos, pertenece a este rango de valores. Además, entrega libertad al usuario de esta correlación, ya que al momento de calcular el índice CBR a partir de  $q_c$ , queda a criterio del ingeniero elegir que valor de CBR se adecua mejor al suelo ensayado. Esto está sujeto también a los antecedentes del terreno, la experiencia del profesional y otras variables.

Los SBT obtenidos complementan los resultados de ambos ensayos y contextualizan el comportamiento de resistencia de los materiales. Ejemplo de esto, es como las arenas en este caso son las que presentan los valores más altos de CBR y  $q_c$ . Por otra parte, se tiene que la mayoría de los SBT son clasificados en el intervalo de arena y limo arenoso. En este se encuentra una mayor distribución, ya los datos están presentes en casi todo el rango de valores de resistencia. Además, se caracteriza un rango de suelo más, correspondiente a arena limosa y limo arenoso, el cual cuenta con los menores tamaños de partícula y coincidentemente, los menores valores de resistencia. Con esto, se comprende que los valores de CBR y  $q_c$  están relacionados de manera creciente con respecto al tamaño de partícula. También, se tiene que los suelos analizados corresponden a arena y limo en su mayoría, por lo que los resultados de este estudio son solo adecuados a estos tipos de material.

De los tres  $M_R$  correlacionados con el ensayo CBR, se encuentra que el que más se ajusta al  $M_R$  obtenido por el ensayo CPT, corresponde al planteado por Newcomb & Birgisson (1999). Esto se debe a que la relación encontrada por dichos autores, fue en base a resultados de ensayos CBR de terreno. Esta coincidencia en las metodologías explica por qué los datos observados en este estudio, se ajustan de mejor manera con los entregados por el modelo mencionado, ya que el procedimiento es igual y los errores asociados al ensayo son los mismos. Por otro lado, al comparar el  $M_R$  obtenido por el CBR con el de CPT, se pretende observar un comportamiento similar entre ambos parámetros ya que son la misma variable. Por consiguiente, en la Figura 36 se ajusta un modelo a los datos de  $M_R$ , correspondiente a una recta fijada al origen de pendiente muy similar a uno. Como se está graficando el mismo indicador en ambos ejes, la ecuación lineal esperada es bastante cercana a lo obtenido. De esta manera, la similitud entre las líneas de tendencia y el comportamiento de ambos  $M_R$ , validan la correlación encontrada para el ensayo CBR de terreno y el CPT.

Con respecto a la diferencia del tiempo de ejecución entre el CBR de terreno y el CPT, se tiene que al utilizar este último en reemplazo del otro, disminuyen los periodos que toma realizar el estudio en aproximadamente un 70 [%]. Esto se traduce finalmente en una reducción de costos directos ya que se necesitan menos horas hombre por parte del personal capacitado.

Para la resistencia de punta se obtiene que su mayor grado de relación con el índice de CBR, es a los 20 centímetros de profundidad. Esto se fundamenta según lo planteado en 2.2.1.4, donde se menciona que para una superficie circular, como el pistón del equipo CBR, se ven influenciadas las tensiones a profundidades de hasta cuatro veces el radio de esta. Aunque según lo planteado anteriormente, solo los primeros 10 centímetros de resistencia de punta deberían verse relacionados al CBR, se tiene que esto se basa en supuestos de un suelo homogéneo, isotrópico y elástico, lo cual no se cumple en terreno. Por esto, es razonable ver que a los 20 centímetros se encuentre la mayor correlación entre ambos parámetros.

Para la zona de Puente Águila Norte se aprecian los valores más altos de ambos ensayos. Esto tiene relación con los suelos de alta resistencia presentes en el lugar, dado que durante la construcción de dicha estructura, se llevó a cabo un relleno estructural con gran tamaño de partícula, ya que de esta manera se asegura un buen comportamiento entre las bases del puente y el suelo de fundación. Por otro lado, para la zona de la Laguna Aculeo, se muestra una mayor distribución en los valores de los parámetros de capacidad de la subrasante. Lo anterior, se debe a que existe una mayor cantidad muestral en dicho lugar, permitiendo una mayor diversidad de material. Además, existe una superior separación entre los ensayos de dicha ubicación.

Los datos de humedad obtenidos son inferiores a los esperados normalmente en este tipo de ensayo. Que estos sean en su mayoría menores a uno por ciento, para los 36 ensayos, no son resultados satisfactorios. Con esto, se entiende que el procedimiento de secado al sol, utilizado para este caso, no es el más adecuado al momento de buscar el contenido de agua en estas muestras. Lo anterior se fundamenta en que, dicha metodología es usualmente sugerida para suelos de origen volcánico y las zonas estudiadas cuentan con suelos de tipo Q1, correspondientes a depósitos aluviales y coluviales. Además, de las muestras presentadas en la Figura 9, se da a entender que al dejar el suelo secando dentro de la bolsa este tiene poca interacción con el ambiente, justificando que no se secura bien.

## CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES

Para obtener valores del índice CBR a partir de resultados del ensayo CPT, se recomienda utilizar la Figura 34, correspondiente al gráfico de intervalo de confianza, por sobre la ecuación 6.1. Esto se fundamenta, como se comentó anteriormente, en que la ilustración asegura que una gran cantidad de los datos pertenece a este rango de valores. Además, le da mayor libertad al usuario al momento de correlacionar este índice, dado que permite que la elección de este valor se vea influenciada tanto por la experiencia del profesional, como por los antecedentes del terreno.

Dado que los SBT obtenidos de los materiales analizados corresponden a arena y limo, los resultados de este estudio son solo adecuados para estos tipos de material. Por consiguiente, se sugiere para otras investigaciones en el futuro, abarcar otros suelos que permitan expandir el alcance de esta correlación. Por otro lado, dado que los resultados de SBT corresponden a intervalos de suelos y no a uno en específico, se recomienda también clasificar los materiales en laboratorio según la norma USCS o AASHTO. Se pueden ocupar las muestras de tamaño grande, extraídas para este trabajo, que no pudieron ser utilizadas dada la pandemia.

Como el ensayo CPT cuenta con un tiempo de ejecución menor al CBR en terreno, se sugiere investigar con mayor detalle los precios de estos y compararlos. De esta manera, se puede observar de forma concreta que tanto se ahorra al usar el ensayo CPT, para clasificar la capacidad de la subrasante en el diseño de pavimentos.

Para obtener datos de humedad coherentes en futuras investigaciones, se recomienda realizar ensayos de humedad a las muestras de tamaño grande en laboratorio, según la norma chilena correspondiente. En el caso que se quiera repetir el secado en terreno, se sugiere dejar el suelo expuesto al sol por 48 horas en un recipiente y no en la bolsa de la muestra.

## BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. (2009). *D4429-09a Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Soils in Place*. West Conshohocken, United States.
- American Society for Testing and Materials. (2012). *D5778-12 Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*. West Conshohocken, United States.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *D1883-16 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils*. West Conshohocken, United States.
- Amini, F. (2003). *Potential applications of dynamic and static cone penetrometers in MDOT pavement design and construction*. Jackson, Mississippi.
- Bowles, J. E. (1981). *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Bogotá, Colombia: Libros McGRAW-HILL.
- Brantt Hidalgo, C. E. (2011). *Microzonificación sísmica del sector sur poniente de Santiago, comunas Buin y Paine*. Santiago, Chile.
- Christopher, B. R., Schwartz, C., & Boudreau, R. (2006). *NHI Course No. 132040 Geotechnical Aspects of Pavements*. Washington, D.C., United States.
- Cordo, O. V. (15 de Febrero de 2013). *Libro-pavimentos.blogspot.com*. Obtenido de <https://libro-pavimentos.blogspot.com/2013/02/elementos-de-la-estructura-de-pavimento.html>
- Dehler W., & Labuz J. (2007). *Cone Penetration Testing in Pavement Design*. Minnesota, United States.
- González Pulgar, C. A. (2012). *Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería mención ingeniería geotécnica*. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2010). *NCh 1852.Of 2010 Mecánica de Suelos - Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio*. Santiago, Chile.

- Instituto Nacional de Normalización. (2014). *NCh 1508. Of 2014 Geotecnia - Estudio de mecánica de suelos*. Santiago, Chile.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. Massachusetts, EEUU: JOHN WILEY & SONS.
- Ministerio de Obras Públicas. (2018). *Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño*. Santiago, Chile.
- Mohammad, L. N., Titi, H. H., & Herath, A. (1999). Evaluation of Resilient Modulus of Subgrade Soil by Cone Penetration Test. *Transportation Research Record 1652*, 236-245.
- Montgomey, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). *Introducción al análisis de regresión lineal*. Azcapotzalco, México: CECSA.
- Muslih Y., & Nikraz H. (2013). The Correlation between the CBR and Shear Strength in Unsaturated Soil Conditions. *International Journal of Transportation Engineering*, 211-222.
- Newcomb, D. E., & Birgisson, B. (1999). *Measuring in situ mechanical properties of pavement subgrade soil*. Washington, D.C., United States.
- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., González Rufino, J. L., Curiel Iñiguez, N. P., & Ruiz Sanginez, M. J. (2016). *Modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación*. Sanfandila, México.
- Puentes Morales, J. S. (2018). *Correlación entre los resultados obtenidos del ensayo de CBR de campo y el ensayo de resistencia a la penetración estándar SPT en condiciones normales, en suelos cohesivos localidad de Suba ciudad de Bogotá D.C*. Bogotá, Colombia.
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2015). *Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering*. Signal Hill, California, United States: Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Salgado, R. (2007). *The Engineering of Foundation*. Pensilvania, United States: The McGraw-Hill Education.
- Villalobos, F. (2016). *Mecánica de Suelos*. Concepción Chile: Editorial Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Wackerly, D. D., Mendenhall, W., & Scheaffer, R. L. (2010). *Estadística matemática con aplicaciones*. Ciudad de México, México: CENGAGE Learning.

Zamudio, L. (16 de Mayo de 2011). *Geometadatos.wordpress.com*. Obtenido de <https://geometadatos.wordpress.com/2011/05/16/geologia-de-chile-serveomina-layer-online/>

# ANEXOS

## ANEXO A: Fotografías

En este capítulo se muestran imágenes complementarias para el estudio. Las primeras cuatro fotografías muestran algunos procesos e instrumentos utilizados en terreno. Mientras que las cuatro últimas figuras, consisten en imágenes del software “Google Earth”. Estas permiten visualizar la distancia entre los ensayos, para cada una de las zonas analizadas.



Figura 37: Plataformas soportantes de madera de camión CPT.



Figura 38: Camión CPT levantado, visto desde lejos, con equipo CBR de terreno montado.



Figura 39: Computador integrado camión CPT.



Figura 40: Sistema GPS tomando coordenadas UTM en terreno.



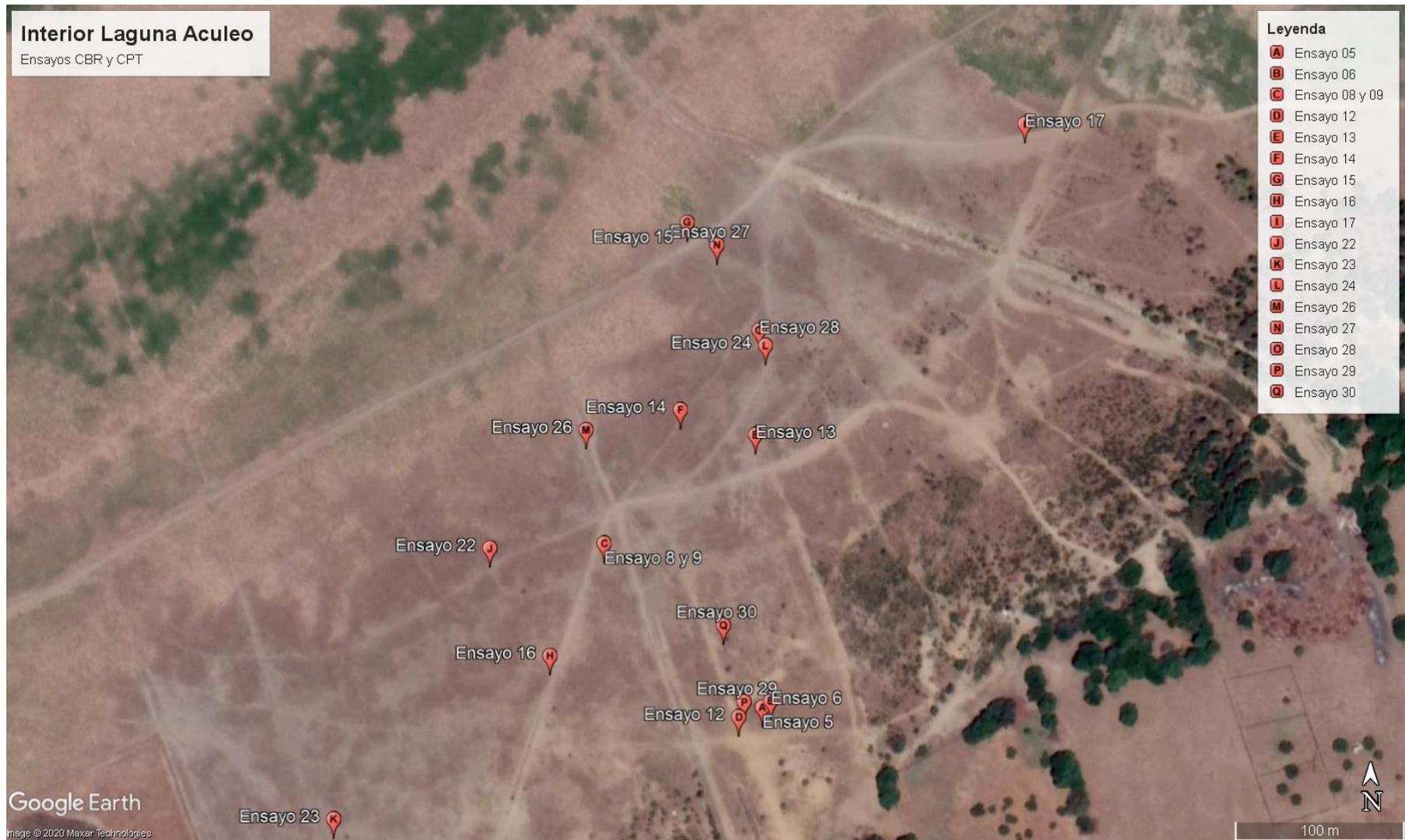
**Figura 41: Ubicaciones ensayos exterior Laguna Aculeo 1.**



**Figura 42: Ubicaciones ensayos exterior Laguna Aculeo 2.**



**Figura 43: Ubicaciones ensayos exterior Laguna Aculeo 3.**



**Figura 44: Ubicaciones ensayos interior Laguna Aculeo.**



**Figura 45: Ubicaciones ensayos Puente Águila Norte.**

## ANEXO B: Ensayo CBR

En este capítulo se presentan los resultados de los 36 ensayos CBR de terreno. Estos se encuentran en tablas, donde se especifica la lectura obtenida por el anillo de carga, con su respectiva deformación en pulgadas. Además, se muestra la carga ejercida según la calibración del instrumento, la presión dada la superficie del pistón y los índices de CBR para las deformaciones de 0,1 y 0,2 pulgadas.

**Tabla 11: Resultados ensayo CBR N°1 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 6       | 0,38       | 0,20          |              |
| 0,050           | -                         | 8       | 0,48       | 0,24          |              |
| 0,075           | 0,025                     | 40      | 1,92       | 0,98          |              |
| 0,100           | 0,050                     | 74      | 3,46       | 1,76          | <b>25,53</b> |
| 0,125           | 0,075                     | 95      | 4,41       | 2,24          |              |
| 0,150           | 0,100                     | 122     | 5,63       | 2,87          | <b>41,54</b> |
| 0,175           | 0,125                     | 140     | 6,44       | 3,28          |              |
| 0,200           | 0,150                     | 155     | 7,12       | 3,63          | <b>35,20</b> |
| 0,300           | 0,175                     | 210     | 9,61       | 4,89          |              |
| 0,400           | 0,200                     | 245     | 11,19      | 5,70          | <b>55,31</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 290     | 13,22      | 6,73          |              |

**Tabla 12: Resultados ensayo CBR N°2.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 40      | 1,92       | 0,98          |              |
| 0,050           | 58      | 2,74       | 1,39          |              |
| 0,075           | 64      | 3,01       | 1,53          |              |
| 0,100           | 74      | 3,46       | 1,76          | <b>25,53</b> |
| 0,125           | 76      | 3,55       | 1,81          |              |
| 0,150           | 82      | 3,82       | 1,95          |              |
| 0,175           | 88      | 4,09       | 2,08          |              |
| 0,200           | 100     | 4,63       | 2,36          | <b>22,91</b> |
| 0,300           | 110     | 5,09       | 2,59          |              |
| 0,400           | 134     | 6,17       | 3,14          |              |
| 0,500           | 144     | 6,62       | 3,37          |              |

**Tabla 13: Resultados ensayo CBR N°3.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 24      | 1,20       | 0,61          |              |
| 0,050           | 40      | 1,92       | 0,98          |              |
| 0,075           | 50      | 2,37       | 1,21          |              |
| 0,100           | 58      | 2,74       | 1,39          | <b>20,19</b> |
| 0,125           | 66      | 3,10       | 1,58          |              |
| 0,150           | 66      | 3,10       | 1,58          |              |
| 0,175           | 70      | 3,28       | 1,67          |              |
| 0,200           | 78      | 3,64       | 1,85          | <b>17,99</b> |
| 0,300           | 88      | 4,09       | 2,08          |              |
| 0,400           | 100     | 4,63       | 2,36          |              |
| 0,500           | 114     | 5,27       | 2,68          |              |

**Tabla 14: Resultados ensayo CBR N°4.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 12      | 0,66       | 0,33          |              |
| 0,050           | 22      | 1,11       | 0,56          |              |
| 0,075           | 32      | 1,56       | 0,79          |              |
| 0,100           | 40      | 1,92       | 0,98          | <b>14,18</b> |
| 0,125           | 52      | 2,46       | 1,25          |              |
| 0,150           | 60      | 2,83       | 1,44          |              |
| 0,175           | 66      | 3,10       | 1,58          |              |
| 0,200           | 72      | 3,37       | 1,72          | <b>16,65</b> |
| 0,300           | 82      | 3,82       | 1,95          |              |
| 0,400           | 108     | 5,00       | 2,54          |              |
| 0,500           | 110     | 5,09       | 2,59          |              |

**Tabla 15: Resultados ensayo CBR N°5 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 56      | 2,64       | 1,35          |              |
| 0,050           | -                         | 74      | 3,46       | 1,76          |              |
| 0,075           | -                         | 100     | 4,63       | 2,36          |              |
| 0,100           | 0,025                     | 136     | 6,26       | 3,19          | <b>46,21</b> |
| 0,125           | 0,050                     | 158     | 7,26       | 3,70          |              |
| 0,150           | 0,075                     | 178     | 8,16       | 4,16          |              |
| 0,175           | 0,100                     | 202     | 9,24       | 4,71          | <b>68,23</b> |
| 0,200           | 0,125                     | 216     | 9,88       | 5,03          | <b>48,83</b> |
| 0,300           | 0,150                     | 280     | 12,77      | 6,50          |              |
| 0,400           | 0,175                     | 310     | 14,13      | 7,19          |              |
| 0,500           | 0,200                     | 270     | 12,32      | 6,27          | <b>60,90</b> |

**Tabla 16: Resultados ensayo CBR N°6 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 16      | 0,84       | 0,43          |              |
| 0,050           | -                         | 38      | 1,83       | 0,93          |              |
| 0,075           | 0,025                     | 64      | 3,01       | 1,53          |              |
| 0,100           | 0,050                     | 90      | 4,18       | 2,13          | <b>30,86</b> |
| 0,125           | 0,075                     | 112     | 5,18       | 2,64          |              |
| 0,150           | 0,100                     | 136     | 6,26       | 3,19          | <b>46,21</b> |
| 0,175           | 0,125                     | 156     | 7,16       | 3,65          |              |
| 0,200           | 0,150                     | 172     | 7,89       | 4,02          | <b>39,00</b> |
| 0,300           | 0,175                     | 208     | 9,52       | 4,85          |              |
| 0,400           | 0,200                     | 222     | 10,15      | 5,17          | <b>50,18</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 210     | 9,61       | 4,89          |              |

**Tabla 17: Resultados ensayo CBR N°7.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 66      | 3,10       | 1,58          |              |
| 0,050           | 94      | 4,36       | 2,22          |              |
| 0,075           | 128     | 5,90       | 3,00          |              |
| 0,100           | 154     | 7,07       | 3,60          | <b>52,22</b> |
| 0,125           | 184     | 8,43       | 4,29          |              |
| 0,150           | 204     | 9,33       | 4,75          |              |
| 0,175           | 285     | 13,00      | 6,62          |              |
| 0,200           | 440     | 20,00      | 10,19         | <b>98,90</b> |
| 0,300           | 520     | 23,62      | 12,03         |              |
| 0,400           | 618     | 28,05      | 14,28         |              |
| 0,500           | 736     | 33,38      | 17,00         |              |

**Tabla 18: Resultados ensayo CBR N°8.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 30      | 1,47       | 0,75          |              |
| 0,050           | 52      | 2,46       | 1,25          |              |
| 0,075           | 72      | 3,37       | 1,72          |              |
| 0,100           | 96      | 4,45       | 2,27          | <b>32,87</b> |
| 0,125           | 116     | 5,36       | 2,73          |              |
| 0,150           | 136     | 6,26       | 3,19          |              |
| 0,175           | 146     | 6,71       | 3,42          |              |
| 0,200           | 158     | 7,26       | 3,70          | <b>35,87</b> |
| 0,300           | 206     | 9,42       | 4,80          |              |
| 0,400           | 206     | 9,42       | 4,80          |              |
| 0,500           | 210     | 9,61       | 4,89          |              |

**Tabla 19: Resultados ensayo CBR N°9.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 14      | 0,75       | 0,38          |              |
| 0,050           | 20      | 1,02       | 0,52          |              |
| 0,075           | 24      | 1,20       | 0,61          |              |
| 0,100           | 28      | 1,38       | 0,70          | <b>10,18</b> |
| 0,125           | 28      | 1,38       | 0,70          |              |
| 0,150           | 30      | 1,47       | 0,75          |              |
| 0,175           | 30      | 1,47       | 0,75          |              |
| 0,200           | 32      | 1,56       | 0,79          | <b>7,71</b>  |
| 0,300           | 38      | 1,83       | 0,93          |              |
| 0,400           | 42      | 2,01       | 1,02          |              |
| 0,500           | 45      | 2,15       | 1,09          |              |

**Tabla 20: Resultados ensayo CBR N°10 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 28      | 1,38       | 0,70          |              |
| 0,050           | -                         | 66      | 3,10       | 1,58          |              |
| 0,075           | 0,025                     | 118     | 5,45       | 2,77          |              |
| 0,100           | 0,050                     | 142     | 6,53       | 3,33          | <b>48,21</b> |
| 0,125           | 0,075                     | 166     | 7,62       | 3,88          |              |
| 0,150           | 0,100                     | 180     | 8,25       | 4,20          | <b>60,89</b> |
| 0,175           | 0,125                     | 210     | 9,61       | 4,89          |              |
| 0,200           | 0,150                     | 218     | 9,97       | 5,08          | <b>49,28</b> |
| 0,300           | 0,175                     | 238     | 10,87      | 5,54          |              |
| 0,400           | 0,200                     | 260     | 11,87      | 6,04          | <b>58,67</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 270     | 12,32      | 6,27          |              |

**Tabla 21: Resultados ensayo CBR N°11 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 25      | 1,24       | 0,63          |              |
| 0,050           | -                         | 42      | 2,01       | 1,02          |              |
| 0,075           | 0,025                     | 63      | 2,96       | 1,51          |              |
| 0,100           | 0,050                     | 73      | 3,41       | 1,74          | <b>25,19</b> |
| 0,125           | 0,075                     | 82      | 3,82       | 1,95          |              |
| 0,150           | 0,100                     | 94      | 4,36       | 2,22          | <b>32,20</b> |
| 0,175           | 0,125                     | 100     | 4,63       | 2,36          |              |
| 0,200           | 0,150                     | 113     | 5,22       | 2,66          | <b>25,82</b> |
| 0,300           | 0,175                     | 142     | 6,53       | 3,33          |              |
| 0,400           | 0,200                     | 164     | 7,53       | 3,83          | <b>37,22</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 191     | 8,75       | 4,45          |              |

**Tabla 22: Resultados ensayo CBR N°12 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 39      | 1,88       | 0,96          |              |
| 0,050           | -                         | 69      | 3,23       | 1,65          |              |
| 0,075           | -                         | 102     | 4,72       | 2,41          |              |
| 0,100           | 0,025                     | 149     | 6,85       | 3,49          | <b>50,55</b> |
| 0,125           | 0,050                     | 181     | 8,29       | 4,22          |              |
| 0,150           | 0,075                     | 213     | 9,74       | 4,96          |              |
| 0,175           | 0,100                     | 245     | 11,19      | 5,70          | <b>82,58</b> |
| 0,200           | 0,125                     | 264     | 12,05      | 6,14          | <b>59,56</b> |
| 0,300           | 0,150                     | 322     | 14,67      | 7,47          |              |
| 0,400           | 0,175                     | 354     | 16,11      | 8,21          |              |
| 0,500           | 0,200                     | 314     | 14,31      | 7,29          | <b>70,74</b> |

**Tabla 23: Resultados ensayo CBR N°13.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 36      | 1,74       | 0,89          |              |
| 0,050           | 50      | 2,37       | 1,21          |              |
| 0,075           | 60      | 2,83       | 1,44          |              |
| 0,100           | 62      | 2,92       | 1,49          | <b>21,52</b> |
| 0,125           | 68      | 3,19       | 1,62          |              |
| 0,150           | 76      | 3,55       | 1,81          |              |
| 0,175           | 78      | 3,64       | 1,85          |              |
| 0,200           | 84      | 3,91       | 1,99          | <b>19,34</b> |
| 0,300           | 98      | 4,54       | 2,31          |              |
| 0,400           | 110     | 5,09       | 2,59          |              |
| 0,500           | 122     | 5,63       | 2,87          |              |

**Tabla 24: Resultados ensayo CBR N°14.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 10      | 0,57       | 0,29          |              |
| 0,050           | 24      | 1,20       | 0,61          |              |
| 0,075           | 34      | 1,65       | 0,84          |              |
| 0,100           | 42      | 2,01       | 1,02          | <b>14,85</b> |
| 0,125           | 54      | 2,55       | 1,30          |              |
| 0,150           | 66      | 3,10       | 1,58          |              |
| 0,175           | 72      | 3,37       | 1,72          |              |
| 0,200           | 78      | 3,64       | 1,85          | <b>17,99</b> |
| 0,300           | 82      | 3,82       | 1,95          |              |
| 0,400           | 86      | 4,00       | 2,04          |              |
| 0,500           | 89      | 4,14       | 2,11          |              |

**Tabla 25: Resultados ensayo CBR N°15.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 66      | 3,10       | 1,58          |              |
| 0,050           | 78      | 3,64       | 1,85          |              |
| 0,075           | 82      | 3,82       | 1,95          |              |
| 0,100           | 86      | 4,00       | 2,04          | <b>29,53</b> |
| 0,125           | 92      | 4,27       | 2,18          |              |
| 0,150           | 96      | 4,45       | 2,27          |              |
| 0,175           | 100     | 4,63       | 2,36          |              |
| 0,200           | 102     | 4,72       | 2,41          | <b>23,36</b> |
| 0,300           | 105     | 4,86       | 2,47          |              |
| 0,400           | 120     | 5,54       | 2,82          |              |
| 0,500           | 130     | 5,99       | 3,05          |              |

**Tabla 26: Resultados ensayo CBR N°16.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 26      | 1,29       | 0,66          |              |
| 0,050           | 64      | 3,01       | 1,53          |              |
| 0,075           | 96      | 4,45       | 2,27          |              |
| 0,100           | 106     | 4,90       | 2,50          | <b>36,20</b> |
| 0,125           | 106     | 4,90       | 2,50          |              |
| 0,150           | 112     | 5,18       | 2,64          |              |
| 0,175           | 116     | 5,36       | 2,73          |              |
| 0,200           | 118     | 5,45       | 2,77          | <b>26,93</b> |
| 0,300           | 126     | 5,81       | 2,96          |              |
| 0,400           | 137     | 6,31       | 3,21          |              |
| 0,500           | 145     | 6,67       | 3,40          |              |

**Tabla 27: Resultados ensayo CBR N°17.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 59      | 2,78       | 1,42          |              |
| 0,050           | 92      | 4,27       | 2,18          |              |
| 0,075           | 108     | 5,00       | 2,54          |              |
| 0,100           | 113     | 5,22       | 2,66          | <b>38,54</b> |
| 0,125           | 118     | 5,45       | 2,77          |              |
| 0,150           | 118     | 5,45       | 2,77          |              |
| 0,175           | 117     | 5,40       | 2,75          |              |
| 0,200           | 112     | 5,18       | 2,64          | <b>25,59</b> |
| 0,300           | 120     | 5,54       | 2,82          |              |
| 0,400           | 125     | 5,76       | 2,94          |              |
| 0,500           | 128     | 5,90       | 3,00          |              |

**Tabla 28: Resultados ensayo CBR N°18.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 21      | 1,06       | 0,54          |              |
| 0,050           | 56      | 2,64       | 1,35          |              |
| 0,075           | 90      | 4,18       | 2,13          |              |
| 0,100           | 104     | 4,81       | 2,45          | <b>35,54</b> |
| 0,125           | 109     | 5,04       | 2,57          |              |
| 0,150           | 115     | 5,31       | 2,71          |              |
| 0,175           | 118     | 5,45       | 2,77          |              |
| 0,200           | 124     | 5,72       | 2,91          | <b>28,28</b> |
| 0,300           | 116     | 5,36       | 2,73          |              |
| 0,400           | 95      | 4,41       | 2,24          |              |
| 0,500           | 89      | 4,14       | 2,11          |              |

**Tabla 29: Resultados ensayo CBR N°19.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 21      | 1,06       | 0,54          |              |
| 0,050           | 45      | 2,15       | 1,09          |              |
| 0,075           | 65      | 3,05       | 1,55          |              |
| 0,100           | 93      | 4,32       | 2,20          | <b>31,87</b> |
| 0,125           | 115     | 5,31       | 2,71          |              |
| 0,150           | 131     | 6,03       | 3,07          |              |
| 0,175           | 148     | 6,80       | 3,46          |              |
| 0,200           | 160     | 7,35       | 3,74          | <b>36,32</b> |
| 0,300           | 204     | 9,33       | 4,75          |              |
| 0,400           | 230     | 10,51      | 5,35          |              |
| 0,500           | 252     | 11,50      | 5,86          |              |

**Tabla 30: Resultados ensayo CBR N°20.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 29      | 1,42       | 0,73          |              |
| 0,050           | 75      | 3,50       | 1,78          |              |
| 0,075           | 101     | 4,68       | 2,38          |              |
| 0,100           | 140     | 6,44       | 3,28          | <b>47,55</b> |
| 0,125           | 186     | 8,52       | 4,34          |              |
| 0,150           | 225     | 10,28      | 5,24          |              |
| 0,175           | 256     | 11,68      | 5,95          |              |
| 0,200           | 290     | 13,22      | 6,73          | <b>65,38</b> |
| 0,300           | 388     | 17,65      | 8,99          |              |
| 0,400           | 438     | 19,91      | 10,14         |              |
| 0,500           | 495     | 22,49      | 11,45         |              |

**Tabla 31: Resultados ensayo CBR N°21 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]       |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|---------------|
| 0,025           | -                         | 21      | 1,06       | 0,54          |               |
| 0,050           | -                         | 55      | 2,60       | 1,32          |               |
| 0,075           | 0,025                     | 99      | 4,59       | 2,34          |               |
| 0,100           | 0,050                     | 140     | 6,44       | 3,28          | <b>47,55</b>  |
| 0,125           | 0,075                     | 186     | 8,52       | 4,34          |               |
| 0,150           | 0,100                     | 230     | 10,51      | 5,35          | <b>77,57</b>  |
| 0,175           | 0,125                     | 276     | 12,59      | 6,41          |               |
| 0,200           | 0,150                     | 320     | 14,58      | 7,42          | <b>72,08</b>  |
| 0,300           | 0,175                     | 395     | 17,97      | 9,15          |               |
| 0,400           | 0,200                     | 445     | 20,23      | 10,30         | <b>100,02</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 490     | 22,26      | 11,34         |               |

**Tabla 32: Resultados ensayo CBR N°22.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 19      | 0,97       | 0,50          |              |
| 0,050           | 28      | 1,38       | 0,70          |              |
| 0,075           | 34      | 1,65       | 0,84          |              |
| 0,100           | 36      | 1,74       | 0,89          | <b>12,85</b> |
| 0,125           | 41      | 1,97       | 1,00          |              |
| 0,150           | 45      | 2,15       | 1,09          |              |
| 0,175           | 48      | 2,28       | 1,16          |              |
| 0,200           | 50      | 2,37       | 1,21          | <b>11,74</b> |
| 0,300           | 53      | 2,51       | 1,28          |              |
| 0,400           | 57      | 2,69       | 1,37          |              |
| 0,500           | 60      | 2,83       | 1,44          |              |

**Tabla 33: Resultados ensayo CBR N°23 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 13      | 0,70       | 0,36          |              |
| 0,050           | -                         | 25      | 1,24       | 0,63          |              |
| 0,075           | 0,025                     | 41      | 1,97       | 1,00          |              |
| 0,100           | 0,050                     | 53      | 2,51       | 1,28          | <b>18,52</b> |
| 0,125           | 0,075                     | 68      | 3,19       | 1,62          |              |
| 0,150           | 0,100                     | 80      | 3,73       | 1,90          | <b>27,53</b> |
| 0,175           | 0,125                     | 88      | 4,09       | 2,08          |              |
| 0,200           | 0,150                     | 88      | 4,09       | 2,08          | <b>20,23</b> |
| 0,300           | 0,175                     | 89      | 4,14       | 2,11          |              |
| 0,400           | 0,200                     | 84      | 3,91       | 1,99          | <b>19,34</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 84      | 3,91       | 1,99          |              |

**Tabla 34: Resultados ensayo CBR N°24.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 18      | 0,93       | 0,47          |              |
| 0,050           | 32      | 1,56       | 0,79          |              |
| 0,075           | 42      | 2,01       | 1,02          |              |
| 0,100           | 55      | 2,60       | 1,32          | <b>19,19</b> |
| 0,125           | 70      | 3,28       | 1,67          |              |
| 0,150           | 81      | 3,77       | 1,92          |              |
| 0,175           | 91      | 4,23       | 2,15          |              |
| 0,200           | 100     | 4,63       | 2,36          | <b>22,91</b> |
| 0,300           | 103     | 4,77       | 2,43          |              |
| 0,400           | 108     | 5,00       | 2,54          |              |
| 0,500           | 119     | 5,49       | 2,80          |              |

**Tabla 35: Resultados ensayo CBR N°25.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 65      | 3,05       | 1,55          |              |
| 0,050           | 85      | 3,96       | 2,01          |              |
| 0,075           | 106     | 4,90       | 2,50          |              |
| 0,100           | 125     | 5,76       | 2,94          | <b>42,54</b> |
| 0,125           | 145     | 6,67       | 3,40          |              |
| 0,150           | 163     | 7,48       | 3,81          |              |
| 0,175           | 180     | 8,25       | 4,20          |              |
| 0,200           | 195     | 8,93       | 4,55          | <b>44,14</b> |
| 0,300           | 228     | 10,42      | 5,31          |              |
| 0,400           | 245     | 11,19      | 5,70          |              |
| 0,500           | 263     | 12,00      | 6,11          |              |

**Tabla 36: Resultados ensayo CBR N°26.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 11      | 0,61       | 0,31          |              |
| 0,050           | 18      | 0,93       | 0,47          |              |
| 0,075           | 26      | 1,29       | 0,66          |              |
| 0,100           | 33      | 1,61       | 0,82          | <b>11,85</b> |
| 0,125           | 39      | 1,88       | 0,96          |              |
| 0,150           | 44      | 2,10       | 1,07          |              |
| 0,175           | 48      | 2,28       | 1,16          |              |
| 0,200           | 52      | 2,46       | 1,25          | <b>12,18</b> |
| 0,300           | 61      | 2,87       | 1,46          |              |
| 0,400           | 61      | 2,87       | 1,46          |              |
| 0,500           | 63      | 2,96       | 1,51          |              |

**Tabla 37: Resultados ensayo CBR N°27.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 15      | 0,79       | 0,40          |              |
| 0,050           | 26      | 1,29       | 0,66          |              |
| 0,075           | 38      | 1,83       | 0,93          |              |
| 0,100           | 45      | 2,15       | 1,09          | <b>15,85</b> |
| 0,125           | 50      | 2,37       | 1,21          |              |
| 0,150           | 51      | 2,42       | 1,23          |              |
| 0,175           | 53      | 2,51       | 1,28          |              |
| 0,200           | 55      | 2,60       | 1,32          | <b>12,85</b> |
| 0,300           | 63      | 2,96       | 1,51          |              |
| 0,400           | 70      | 3,28       | 1,67          |              |
| 0,500           | 76      | 3,55       | 1,81          |              |

**Tabla 38: Resultados ensayo CBR N°28.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 35      | 1,70       | 0,86          |              |
| 0,050           | 56      | 2,64       | 1,35          |              |
| 0,075           | 75      | 3,50       | 1,78          |              |
| 0,100           | 90      | 4,18       | 2,13          | <b>30,86</b> |
| 0,125           | 103     | 4,77       | 2,43          |              |
| 0,150           | 110     | 5,09       | 2,59          |              |
| 0,175           | 112     | 5,18       | 2,64          |              |
| 0,200           | 113     | 5,22       | 2,66          | <b>25,82</b> |
| 0,300           | 115     | 5,31       | 2,71          |              |
| 0,400           | 124     | 5,72       | 2,91          |              |
| 0,500           | 130     | 5,99       | 3,05          |              |

**Tabla 39: Resultados ensayo CBR N°29.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 25      | 1,24       | 0,63          |              |
| 0,050           | 43      | 2,06       | 1,05          |              |
| 0,075           | 63      | 2,96       | 1,51          |              |
| 0,100           | 82      | 3,82       | 1,95          | <b>28,20</b> |
| 0,125           | 98      | 4,54       | 2,31          |              |
| 0,150           | 108     | 5,00       | 2,54          |              |
| 0,175           | 120     | 5,54       | 2,82          |              |
| 0,200           | 133     | 6,13       | 3,12          | <b>30,29</b> |
| 0,300           | 145     | 6,67       | 3,40          |              |
| 0,400           | 110     | 5,09       | 2,59          |              |
| 0,500           | 105     | 4,86       | 2,47          |              |

**Tabla 40: Resultados ensayo CBR N°30.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 34      | 1,65       | 0,84          |              |
| 0,050           | 62      | 2,92       | 1,49          |              |
| 0,075           | 82      | 3,82       | 1,95          |              |
| 0,100           | 102     | 4,72       | 2,41          | <b>34,87</b> |
| 0,125           | 117     | 5,40       | 2,75          |              |
| 0,150           | 125     | 5,76       | 2,94          |              |
| 0,175           | 127     | 5,85       | 2,98          |              |
| 0,200           | 128     | 5,90       | 3,00          | <b>29,17</b> |
| 0,300           | 140     | 6,44       | 3,28          |              |
| 0,400           | 150     | 6,89       | 3,51          |              |
| 0,500           | 159     | 7,30       | 3,72          |              |

**Tabla 41: Resultados ensayo CBR N°31 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 32      | 1,56       | 0,79          |              |
| 0,050           | -                         | 57      | 2,69       | 1,37          |              |
| 0,075           | 0,025                     | 105     | 4,86       | 2,47          |              |
| 0,100           | 0,050                     | 139     | 6,40       | 3,26          | <b>47,21</b> |
| 0,125           | 0,075                     | 170     | 7,80       | 3,97          |              |
| 0,150           | 0,100                     | 198     | 9,06       | 4,62          | <b>66,90</b> |
| 0,175           | 0,125                     | 220     | 10,06      | 5,12          |              |
| 0,200           | 0,150                     | 244     | 11,14      | 5,67          | <b>55,09</b> |
| 0,300           | 0,175                     | 318     | 14,49      | 7,38          |              |
| 0,400           | 0,200                     | 355     | 16,16      | 8,23          | <b>79,90</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 383     | 17,43      | 8,87          |              |

**Tabla 42: Resultados ensayo CBR N°32.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 50      | 2,37       | 1,21          |              |
| 0,050           | 72      | 3,37       | 1,72          |              |
| 0,075           | 92      | 4,27       | 2,18          |              |
| 0,100           | 109     | 5,04       | 2,57          | <b>37,20</b> |
| 0,125           | 125     | 5,76       | 2,94          |              |
| 0,150           | 140     | 6,44       | 3,28          |              |
| 0,175           | 158     | 7,26       | 3,70          |              |
| 0,200           | 170     | 7,80       | 3,97          | <b>38,56</b> |
| 0,300           | 205     | 9,38       | 4,78          |              |
| 0,400           | 340     | 15,48      | 7,88          |              |
| 0,500           | 355     | 16,16      | 8,23          |              |

**Tabla 43: Resultados ensayo CBR N°33 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | -                         | 40      | 1,92       | 0,98          |              |
| 0,050           | -                         | 110     | 5,09       | 2,59          |              |
| 0,075           | 0,025                     | 195     | 8,93       | 4,55          |              |
| 0,100           | 0,050                     | 240     | 10,96      | 5,58          | <b>80,91</b> |
| 0,125           | 0,075                     | 265     | 12,09      | 6,16          |              |
| 0,150           | 0,100                     | 280     | 12,77      | 6,50          | <b>94,25</b> |
| 0,175           | 0,125                     | 305     | 13,90      | 7,08          |              |
| 0,200           | 0,150                     | 320     | 14,58      | 7,42          | <b>72,08</b> |
| 0,300           | 0,175                     | 390     | 17,74      | 9,04          |              |
| 0,400           | 0,200                     | 430     | 19,55      | 9,96          | <b>96,67</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 510     | 23,17      | 11,80         |              |

**Tabla 44: Resultados ensayo CBR N°34.**

| Deformación ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]      |
|-----------------|---------|------------|---------------|--------------|
| 0,025           | 50      | 2,37       | 1,21          |              |
| 0,050           | 160     | 7,35       | 3,74          |              |
| 0,075           | 220     | 10,06      | 5,12          |              |
| 0,100           | 271     | 12,36      | 6,30          | <b>91,25</b> |
| 0,125           | 310     | 14,13      | 7,19          |              |
| 0,150           | 340     | 15,48      | 7,88          |              |
| 0,175           | 370     | 16,84      | 8,58          |              |
| 0,200           | 391     | 17,79      | 9,06          | <b>87,95</b> |
| 0,300           | 428     | 19,46      | 9,91          |              |
| 0,400           | 486     | 22,08      | 11,25         |              |
| 0,500           | 542     | 24,61      | 12,53         |              |

**Tabla 45: Resultados ensayo CBR N°35 corregido.**

| Deformación ["] | Deformación Corregida ["] | Lectura | Carga [kN] | Presión [MPa] | CBR [%]       |
|-----------------|---------------------------|---------|------------|---------------|---------------|
| 0,025           | -                         | 16      | 0,84       | 0,43          |               |
| 0,050           | -                         | 31      | 1,51       | 0,77          |               |
| 0,075           | 0,025                     | 68      | 3,19       | 1,62          |               |
| 0,100           | 0,050                     | 115     | 5,31       | 2,71          | <b>39,21</b>  |
| 0,125           | 0,075                     | 170     | 7,80       | 3,97          |               |
| 0,150           | 0,100                     | 222     | 10,15      | 5,17          | <b>74,90</b>  |
| 0,175           | 0,125                     | 271     | 12,36      | 6,30          |               |
| 0,200           | 0,150                     | 434     | 19,73      | 10,05         | <b>97,56</b>  |
| 0,300           | 0,175                     | 527     | 23,93      | 12,19         |               |
| 0,400           | 0,200                     | 520     | 23,62      | 12,03         | <b>116,78</b> |
| 0,500           | 0,300                     | 675     | 30,62      | 15,60         |               |

**Tabla 46: Resultados ensayo CBR N°36.**

| <b>Deformación ["]</b> | <b>Lectura</b> | <b>Carga [kN]</b> | <b>Presión [MPa]</b> | <b>CBR [%]</b> |
|------------------------|----------------|-------------------|----------------------|----------------|
| 0,025                  | 12             | 0,66              | 0,33                 |                |
| 0,050                  | 20             | 1,02              | 0,52                 |                |
| 0,075                  | 26             | 1,29              | 0,66                 |                |
| 0,100                  | 32             | 1,56              | 0,79                 | <b>11,51</b>   |
| 0,125                  | 39             | 1,88              | 0,96                 |                |
| 0,150                  | 45             | 2,15              | 1,09                 |                |
| 0,175                  | 53             | 2,51              | 1,28                 |                |
| 0,200                  | 57             | 2,69              | 1,37                 | <b>13,30</b>   |
| 0,300                  | 75             | 3,50              | 1,78                 |                |
| 0,400                  | 94             | 4,36              | 2,22                 |                |
| 0,500                  | 120            | 5,54              | 2,82                 |                |

## ANEXO C: Ensayo CPT

En este capítulo se presentan los resultados de los 36 ensayos CPT, a la profundidad de un metro. Estos se encuentran en tablas, donde se especifican las variables de resistencia de punta en mega pascales y fuste en kilo pascales, según su respectiva profundidad.

**Tabla 47: Resultados ensayo CPT N°1.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,53                              | 6,84               |
| 0,10                   | 22,54                             | 16,83              |
| 0,15                   | 23,27                             | 73,76              |
| 0,20                   | 17,89                             | 251,22             |
| 0,25                   | 14,74                             | 424,52             |
| 0,30                   | 13,21                             | 455,73             |
| 0,35                   | 12,26                             | 399,91             |
| 0,40                   | 10,90                             | 390,33             |
| 0,45                   | 10,22                             | 331,35             |
| 0,50                   | 8,77                              | 293,71             |
| 0,55                   | 7,50                              | 231,87             |
| 0,60                   | 6,08                              | 196,57             |
| 0,65                   | 5,00                              | 200,13             |
| 0,70                   | 4,95                              | 201,07             |
| 0,75                   | 7,16                              | 176,99             |
| 0,80                   | 7,93                              | 173,07             |
| 0,85                   | 6,71                              | 179,56             |
| 0,90                   | 6,72                              | 181,84             |
| 0,95                   | 8,54                              | 171,78             |
| 1,00                   | 12,94                             | 22,62              |

**Tabla 48: Resultados ensayo CPT N°2.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,01                              | 0,24               |
| 0,10                   | 2,85                              | 3,12               |
| 0,15                   | 4,71                              | 12,55              |
| 0,20                   | 7,18                              | 58,11              |
| 0,25                   | 8,51                              | 133,99             |
| 0,30                   | 7,50                              | 257,06             |
| 0,35                   | 6,76                              | 319,32             |
| 0,40                   | 6,37                              | 331,86             |
| 0,45                   | 5,76                              | 262,47             |
| 0,50                   | 5,66                              | 251,06             |
| 0,55                   | 6,28                              | 230,11             |
| 0,60                   | 7,20                              | 214,08             |
| 0,65                   | 7,41                              | 221,04             |
| 0,70                   | 7,43                              | 243,32             |
| 0,75                   | 7,46                              | 260,00             |
| 0,80                   | 7,04                              | 276,75             |
| 0,85                   | 6,52                              | 285,70             |
| 0,90                   | 6,60                              | 272,37             |
| 0,95                   | 7,20                              | 240,07             |
| 1,00                   | 7,60                              | 232,57             |

**Tabla 49: Resultados ensayo CPT N°3.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 4,38                              | 0,30               |
| 0,10                   | 11,67                             | 9,79               |
| 0,15                   | 11,42                             | 174,16             |
| 0,20                   | 9,07                              | 381,39             |
| 0,25                   | 8,14                              | 508,30             |
| 0,30                   | 6,78                              | 547,81             |
| 0,35                   | 5,99                              | 452,35             |
| 0,40                   | 5,31                              | 360,98             |
| 0,45                   | 4,59                              | 305,75             |
| 0,50                   | 4,54                              | 253,34             |
| 0,55                   | -18,61                            | 220,98             |
| 0,60                   | 4,10                              | 219,36             |
| 0,65                   | 5,11                              | 162,99             |
| 0,70                   | 5,89                              | 164,73             |
| 0,75                   | 6,44                              | 182,86             |
| 0,80                   | 6,98                              | 207,84             |
| 0,85                   | 7,32                              | 223,02             |
| 0,90                   | 7,24                              | 239,11             |
| 0,95                   | 6,78                              | 264,81             |
| 1,00                   | 6,33                              | 279,16             |

**Tabla 50: Resultados ensayo CPT N°4.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,02                              | 0,00               |
| 0,10                   | 0,49                              | 3,00               |
| 0,15                   | 2,14                              | 4,47               |
| 0,20                   | 5,32                              | 8,77               |
| 0,25                   | 8,58                              | 17,29              |
| 0,30                   | 11,83                             | 24,00              |
| 0,35                   | 10,90                             | 46,35              |
| 0,40                   | 9,79                              | 89,48              |
| 0,45                   | 9,04                              | 117,65             |
| 0,50                   | 7,84                              | 147,42             |
| 0,55                   | 6,63                              | 182,83             |
| 0,60                   | 5,81                              | 221,54             |
| 0,65                   | 0,69                              | 235,95             |
| 0,70                   | 5,03                              | 226,07             |
| 0,75                   | 5,33                              | 203,13             |
| 0,80                   | 6,64                              | 154,54             |
| 0,85                   | 8,03                              | 152,24             |
| 0,90                   | 8,93                              | 170,24             |
| 0,95                   | 9,49                              | 199,48             |
| 1,00                   | 9,30                              | 231,37             |

**Tabla 51: Resultados ensayo CPT N°5.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,04                              | 0,24               |
| 0,10                   | 4,01                              | 0,12               |
| 0,15                   | 10,88                             | 16,87              |
| 0,20                   | 11,08                             | 20,29              |
| 0,25                   | 10,18                             | 92,63              |
| 0,30                   | 9,28                              | 185,80             |
| 0,35                   | 8,24                              | 239,95             |
| 0,40                   | 7,30                              | 250,40             |
| 0,45                   | 5,73                              | 206,22             |
| 0,50                   | 4,90                              | 190,85             |
| 0,55                   | 4,00                              | 175,96             |
| 0,60                   | 3,00                              | 164,19             |
| 0,65                   | 2,26                              | 147,50             |
| 0,70                   | 1,95                              | 121,03             |
| 0,75                   | 1,90                              | 87,05              |
| 0,80                   | 2,08                              | 61,77              |
| 0,85                   | 4,36                              | 41,00              |
| 0,90                   | 6,31                              | 45,57              |
| 0,95                   | 6,37                              | 78,58              |
| 1,00                   | 5,32                              | 114,18             |

**Tabla 52: Resultados ensayo CPT N°6.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 1,78                              | 0,00               |
| 0,10                   | 8,24                              | -0,12              |
| 0,15                   | 14,43                             | 0,12               |
| 0,20                   | 15,75                             | -0,24              |
| 0,25                   | 16,51                             | 97,61              |
| 0,30                   | 16,50                             | 233,35             |
| 0,35                   | 15,68                             | 331,62             |
| 0,40                   | 14,11                             | 374,37             |
| 0,45                   | 12,16                             | 404,69             |
| 0,50                   | 9,47                              | 403,54             |
| 0,55                   | 6,87                              | 378,69             |
| 0,60                   | 4,85                              | 330,78             |
| 0,65                   | 3,84                              | 256,70             |
| 0,70                   | 3,82                              | 173,98             |
| 0,75                   | 5,33                              | 40,94              |
| 0,80                   | 7,61                              | 40,34              |
| 0,85                   | 8,17                              | 65,14              |
| 0,90                   | 6,94                              | 150,44             |
| 0,95                   | 5,99                              | 175,54             |
| 1,00                   | 5,21                              | 147,02             |

**Tabla 53: Resultados ensayo CPT N°7.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,66                              | 0,23               |
| 0,10                   | 20,01                             | 2,45               |
| 0,15                   | 24,60                             | 40,27              |
| 0,20                   | 30,26                             | 158,69             |
| 0,25                   | 28,48                             | 342,28             |
| 0,30                   | 27,33                             | 485,72             |
| 0,35                   | 26,17                             | 654,40             |
| 0,40                   | 36,85                             | 608,81             |
| 0,45                   | 50,24                             | 483,96             |
| 0,50                   | 54,14                             | 526,51             |
| 0,55                   | 46,92                             | 273,78             |
| 0,60                   | 37,66                             | 425,10             |
| 0,65                   | 25,77                             | 636,05             |
| 0,70                   | 18,63                             | 719,11             |
| 0,75                   | 11,62                             | 792,99             |
| 0,80                   | 8,47                              | 636,75             |
| 0,85                   | 6,86                              | 548,55             |
| 0,90                   | 5,52                              | 405,70             |
| 0,95                   | 4,61                              | 331,23             |
| 1,00                   | 4,22                              | 250,16             |

**Tabla 54: Resultados ensayo CPT N°8.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,02                              | 0,24               |
| 0,10                   | 2,84                              | 14,18              |
| 0,15                   | 5,91                              | 22,06              |
| 0,20                   | 5,30                              | 28,47              |
| 0,25                   | 4,14                              | 35,94              |
| 0,30                   | 3,53                              | 42,77              |
| 0,35                   | 3,59                              | 46,00              |
| 0,40                   | 3,79                              | 46,88              |
| 0,45                   | 3,81                              | 56,59              |
| 0,50                   | 4,10                              | 70,47              |
| 0,55                   | 3,93                              | 80,47              |
| 0,60                   | 4,14                              | 77,18              |
| 0,65                   | 5,54                              | 60,12              |
| 0,70                   | 6,93                              | 36,30              |
| 0,75                   | 0,91                              | -1,71              |
| 0,80                   | 8,18                              | 59,24              |
| 0,85                   | 8,77                              | 74,89              |
| 0,90                   | 8,93                              | 83,12              |
| 0,95                   | 8,72                              | 91,71              |
| 1,00                   | 8,32                              | 95,06              |

**Tabla 55: Resultados ensayo CPT N°9.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,50                   | 3,93                              | 80,47              |
| 0,55                   | 4,14                              | 77,18              |
| 0,60                   | 5,54                              | 60,12              |
| 0,65                   | 6,93                              | 36,30              |
| 0,70                   | 0,91                              | -1,71              |
| 0,75                   | 8,18                              | 59,24              |
| 0,80                   | 8,77                              | 74,89              |
| 0,85                   | 8,93                              | 83,12              |
| 0,90                   | 8,72                              | 91,71              |
| 0,95                   | 8,32                              | 95,06              |
| 1,00                   | 7,90                              | 84,36              |
| 1,05                   | 7,36                              | 75,83              |
| 1,10                   | 6,90                              | 69,47              |
| 1,15                   | 6,56                              | 68,42              |
| 1,20                   | 6,67                              | 66,12              |
| 1,25                   | 7,33                              | 64,95              |
| 1,30                   | 7,79                              | 67,30              |
| 1,35                   | 8,50                              | 76,36              |
| 1,40                   | 8,91                              | 88,53              |
| 1,45                   | 10,23                             | 96,24              |

**Tabla 56: Resultados ensayo CPT N°10.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 12,88                             | 30,35              |
| 0,10                   | 16,29                             | 45,24              |
| 0,15                   | 15,14                             | 88,24              |
| 0,20                   | 13,92                             | 180,07             |
| 0,25                   | 12,85                             | 245,37             |
| 0,30                   | 10,74                             | 266,43             |
| 0,35                   | 8,49                              | 279,13             |
| 0,40                   | 7,13                              | 283,66             |
| 0,45                   | 6,98                              | 261,25             |
| 0,50                   | 7,38                              | 227,19             |
| 0,55                   | 8,01                              | 192,54             |
| 0,60                   | 8,34                              | 180,54             |
| 0,65                   | 8,36                              | 180,07             |
| 0,70                   | 8,23                              | 178,48             |
| 0,75                   | 7,93                              | 173,66             |
| 0,80                   | 7,50                              | 147,83             |
| 0,85                   | 7,26                              | 140,89             |
| 0,90                   | 6,85                              | 126,01             |
| 0,95                   | 6,70                              | 121,65             |
| 1,00                   | 6,79                              | 115,12             |

**Tabla 57: Resultados ensayo CPT N°11.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,98                              | 20,00              |
| 0,10                   | 9,40                              | 25,12              |
| 0,15                   | 9,52                              | 28,24              |
| 0,20                   | 12,12                             | 65,65              |
| 0,25                   | 14,77                             | 73,94              |
| 0,30                   | 13,27                             | 79,36              |
| 0,35                   | 11,06                             | 85,18              |
| 0,40                   | 9,50                              | 85,95              |
| 0,45                   | 7,86                              | 86,95              |
| 0,50                   | 6,72                              | 87,36              |
| 0,55                   | 6,21                              | 78,53              |
| 0,60                   | 5,94                              | 59,47              |
| 0,65                   | 5,50                              | 52,06              |
| 0,70                   | 6,09                              | 49,83              |
| 0,75                   | 5,89                              | 57,41              |
| 0,80                   | 5,82                              | 67,89              |
| 0,85                   | 7,07                              | 80,59              |
| 0,90                   | 7,82                              | 86,71              |
| 0,95                   | 7,97                              | 99,12              |
| 1,00                   | 8,47                              | 106,01             |

**Tabla 58: Resultados ensayo CPT N°12.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 1,12                              | 20,18              |
| 0,10                   | 5,73                              | 28,41              |
| 0,15                   | 7,86                              | 28,88              |
| 0,20                   | 11,41                             | 38,35              |
| 0,25                   | 11,73                             | 56,12              |
| 0,30                   | 10,83                             | 97,95              |
| 0,35                   | 9,57                              | 149,60             |
| 0,40                   | 7,98                              | 188,72             |
| 0,45                   | 6,36                              | 200,42             |
| 0,50                   | 4,60                              | 200,13             |
| 0,55                   | 3,67                              | 187,83             |
| 0,60                   | 3,12                              | 163,66             |
| 0,65                   | 2,10                              | 140,71             |
| 0,70                   | 1,93                              | 116,59             |
| 0,75                   | 2,15                              | 106,48             |
| 0,80                   | 3,26                              | 85,24              |
| 0,85                   | 4,65                              | 65,12              |
| 0,90                   | 4,56                              | 87,00              |
| 0,95                   | 4,35                              | 125,77             |
| 1,00                   | 5,35                              | 142,77             |

**Tabla 59: Resultados ensayo CPT N°13.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,02                              | -0,12              |
| 0,10                   | 1,27                              | 16,30              |
| 0,15                   | 3,98                              | 19,94              |
| 0,20                   | 3,08                              | 29,47              |
| 0,25                   | 2,64                              | 46,47              |
| 0,30                   | 2,58                              | 71,30              |
| 0,35                   | 3,05                              | 78,77              |
| 0,40                   | 3,08                              | 87,59              |
| 0,45                   | 3,08                              | 111,36             |
| 0,50                   | 3,28                              | 114,30             |
| 0,55                   | 3,68                              | 110,95             |
| 0,60                   | 4,64                              | 94,89              |
| 0,65                   | 5,90                              | 111,95             |
| 0,70                   | 6,35                              | 140,83             |
| 0,75                   | 7,11                              | 157,89             |
| 0,80                   | 7,53                              | 172,36             |
| 0,85                   | 8,03                              | 173,13             |
| 0,90                   | 8,50                              | 158,89             |
| 0,95                   | 8,64                              | 137,89             |
| 1,00                   | 8,49                              | 127,36             |

**Tabla 60: Resultados ensayo CPT N°14.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 1,39                              | 1,32               |
| 0,10                   | 3,72                              | 17,83              |
| 0,15                   | 3,62                              | 22,45              |
| 0,20                   | 3,02                              | 28,82              |
| 0,25                   | 2,53                              | 38,00              |
| 0,30                   | 2,62                              | 32,24              |
| 0,35                   | 2,90                              | 33,38              |
| 0,40                   | 3,67                              | 31,82              |
| 0,45                   | 3,37                              | 30,50              |
| 0,50                   | 3,62                              | 25,63              |
| 0,55                   | 4,75                              | 22,57              |
| 0,60                   | 5,50                              | 17,65              |
| 0,65                   | 5,73                              | 26,96              |
| 0,70                   | 6,09                              | 47,79              |
| 0,75                   | 5,68                              | 73,60              |
| 0,80                   | 5,78                              | 75,28              |
| 0,85                   | 5,83                              | 61,71              |
| 0,90                   | 5,55                              | 48,93              |
| 0,95                   | 5,52                              | 46,71              |
| 1,00                   | 5,44                              | 47,07              |

**Tabla 61: Resultados ensayo CPT N°15.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,02                              | 0,06               |
| 0,10                   | 5,43                              | 13,18              |
| 0,15                   | 5,40                              | 20,49              |
| 0,20                   | 4,36                              | 31,01              |
| 0,25                   | 4,69                              | 39,48              |
| 0,30                   | 9,58                              | 44,92              |
| 0,35                   | 10,09                             | 44,56              |
| 0,40                   | 9,46                              | 83,91              |
| 0,45                   | 8,39                              | 117,59             |
| 0,50                   | 7,37                              | 125,63             |
| 0,55                   | 6,51                              | 109,12             |
| 0,60                   | 6,15                              | 113,48             |
| 0,65                   | 5,25                              | 92,38              |
| 0,70                   | 4,88                              | 73,21              |
| 0,75                   | 5,28                              | 64,33              |
| 0,80                   | 5,80                              | 52,42              |
| 0,85                   | 6,07                              | 46,19              |
| 0,90                   | 7,31                              | 48,97              |
| 0,95                   | 8,40                              | 57,68              |
| 1,00                   | 8,85                              | 68,74              |

**Tabla 62: Resultados ensayo CPT N°16.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,01                              | 0,12               |
| 0,10                   | 5,64                              | 5,50               |
| 0,15                   | 5,08                              | 19,89              |
| 0,20                   | 3,68                              | 28,66              |
| 0,25                   | 2,83                              | 37,42              |
| 0,30                   | 2,41                              | 42,80              |
| 0,35                   | 2,23                              | 36,27              |
| 0,40                   | 2,11                              | 32,83              |
| 0,45                   | 1,80                              | 23,94              |
| 0,50                   | 1,78                              | 22,37              |
| 0,55                   | 1,96                              | 20,98              |
| 0,60                   | 2,13                              | 20,62              |
| 0,65                   | 2,43                              | 16,87              |
| 0,70                   | 3,24                              | 18,80              |
| 0,75                   | 4,79                              | 27,27              |
| 0,80                   | 4,62                              | 34,10              |
| 0,85                   | 5,70                              | 46,19              |
| 0,90                   | 6,23                              | 58,16              |
| 0,95                   | 6,86                              | 60,15              |
| 1,00                   | 7,28                              | 66,92              |

**Tabla 63: Resultados ensayo CPT N°17.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 1,05                              | -11,94             |
| 0,10                   | 4,61                              | -9,92              |
| 0,15                   | 4,55                              | 19,24              |
| 0,20                   | 4,11                              | 79,75              |
| 0,25                   | 3,53                              | 138,54             |
| 0,30                   | 3,21                              | 152,56             |
| 0,35                   | 3,50                              | 136,41             |
| 0,40                   | 4,20                              | 113,84             |
| 0,45                   | 5,52                              | 96,38              |
| 0,50                   | 7,07                              | 104,70             |
| 0,55                   | 6,64                              | 170,55             |
| 0,60                   | 8,03                              | 237,90             |
| 0,65                   | 7,88                              | 271,63             |
| 0,70                   | 8,22                              | 228,81             |
| 0,75                   | 9,22                              | 177,98             |
| 0,80                   | 9,46                              | 174,95             |
| 0,85                   | 10,40                             | 166,63             |
| 0,90                   | 11,46                             | 155,71             |
| 0,95                   | 11,64                             | 143,53             |
| 1,00                   | 11,38                             | 154,16             |

**Tabla 64: Resultados ensayo CPT N°18.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,02                              | 0,37               |
| 0,10                   | 2,35                              | 0,37               |
| 0,15                   | 10,07                             | 1,05               |
| 0,20                   | 15,86                             | 5,11               |
| 0,25                   | 14,92                             | 25,11              |
| 0,30                   | 12,85                             | 106,04             |
| 0,35                   | 10,63                             | 95,33              |
| 0,40                   | 8,91                              | 154,72             |
| 0,45                   | 5,97                              | 139,02             |
| 0,50                   | 4,73                              | 124,01             |
| 0,55                   | 3,90                              | 102,28             |
| 0,60                   | 2,97                              | 62,34              |
| 0,65                   | 2,63                              | 36,68              |
| 0,70                   | 2,27                              | 29,91              |
| 0,75                   | 2,18                              | 25,48              |
| 0,80                   | 2,23                              | 10,46              |
| 0,85                   | 1,99                              | 12,92              |
| 0,90                   | 2,20                              | 21,36              |
| 0,95                   | 1,80                              | 29,23              |
| 1,00                   | 1,66                              | 21,54              |

**Tabla 65: Resultados ensayo CPT N°19.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,01                              | 0,18               |
| 0,10                   | 12,38                             | 12,63              |
| 0,15                   | 17,94                             | 19,83              |
| 0,20                   | 17,69                             | 22,85              |
| 0,25                   | 14,21                             | 29,14              |
| 0,30                   | 11,24                             | 25,27              |
| 0,35                   | 9,34                              | 25,94              |
| 0,40                   | 8,55                              | 27,75              |
| 0,45                   | 8,39                              | 31,07              |
| 0,50                   | 8,39                              | 36,09              |
| 0,55                   | 8,66                              | 48,79              |
| 0,60                   | 8,71                              | 65,05              |
| 0,65                   | 8,87                              | 69,52              |
| 0,70                   | 9,30                              | 75,57              |
| 0,75                   | 9,40                              | 73,51              |
| 0,80                   | 9,61                              | 71,28              |
| 0,85                   | 9,21                              | 68,50              |
| 0,90                   | 7,73                              | 67,53              |
| 0,95                   | 6,39                              | 65,47              |
| 1,00                   | 6,08                              | 55,74              |

**Tabla 66: Resultados ensayo CPT N°20.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 1,76                              | 0,36               |
| 0,10                   | 23,42                             | 6,77               |
| 0,15                   | 24,41                             | 25,09              |
| 0,20                   | 17,53                             | 15,90              |
| 0,25                   | 13,42                             | 24,79              |
| 0,30                   | 11,79                             | 23,52              |
| 0,35                   | 10,53                             | 19,77              |
| 0,40                   | 9,01                              | 42,38              |
| 0,45                   | 7,67                              | 56,83              |
| 0,50                   | 7,16                              | 58,34              |
| 0,55                   | 7,83                              | 44,92              |
| 0,60                   | 8,09                              | 34,04              |
| 0,65                   | -15,00                            | 35,49              |
| 0,70                   | 7,47                              | 55,92              |
| 0,75                   | 6,40                              | 72,49              |
| 0,80                   | 5,51                              | 82,82              |
| 0,85                   | 5,86                              | 72,85              |
| 0,90                   | 7,34                              | 46,79              |
| 0,95                   | 8,44                              | 28,66              |
| 1,00                   | 8,04                              | 32,53              |

**Tabla 67: Resultados ensayo CPT N°21.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,00                              | -0,12              |
| 0,10                   | 12,42                             | 0,30               |
| 0,15                   | 15,09                             | 0,73               |
| 0,20                   | 24,76                             | 37,36              |
| 0,25                   | 21,76                             | 58,16              |
| 0,30                   | 18,06                             | 47,34              |
| 0,35                   | 14,63                             | 39,72              |
| 0,40                   | 12,57                             | 51,81              |
| 0,45                   | 10,40                             | 74,78              |
| 0,50                   | 9,00                              | 93,10              |
| 0,55                   | 8,07                              | 99,21              |
| 0,60                   | 7,41                              | 88,63              |
| 0,65                   | 7,03                              | 77,87              |
| 0,70                   | 7,69                              | 63,66              |
| 0,75                   | 9,04                              | 53,62              |
| 0,80                   | 10,05                             | 59,91              |
| 0,85                   | 10,21                             | 80,65              |
| 0,90                   | 10,03                             | 101,20             |
| 0,95                   | 9,74                              | 117,47             |
| 1,00                   | 9,50                              | 118,86             |

**Tabla 68: Resultados ensayo CPT N°22.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,02                              | 0,30               |
| 0,10                   | 2,97                              | 0,60               |
| 0,15                   | 4,07                              | 0,79               |
| 0,20                   | 4,55                              | 3,26               |
| 0,25                   | 3,88                              | 18,08              |
| 0,30                   | 3,34                              | 29,20              |
| 0,35                   | 3,09                              | 35,31              |
| 0,40                   | 3,06                              | 31,38              |
| 0,45                   | 2,88                              | 29,14              |
| 0,50                   | 2,95                              | 26,72              |
| 0,55                   | 3,18                              | 28,84              |
| 0,60                   | 0,43                              | 0,24               |
| 0,65                   | 3,77                              | 27,75              |
| 0,70                   | 4,77                              | 24,60              |
| 0,75                   | 7,30                              | 12,88              |
| 0,80                   | 8,73                              | 11,18              |
| 0,85                   | 9,19                              | 22,43              |
| 0,90                   | 9,17                              | 46,85              |
| 0,95                   | 8,85                              | 56,71              |
| 1,00                   | 8,39                              | 60,27              |

**Tabla 69: Resultados ensayo CPT N°23.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,82                              | 0,18               |
| 0,10                   | 4,58                              | 0,12               |
| 0,15                   | 4,07                              | 1,15               |
| 0,20                   | 3,88                              | 5,32               |
| 0,25                   | 4,73                              | 22,19              |
| 0,30                   | 5,24                              | 7,07               |
| 0,35                   | 5,80                              | 0,12               |
| 0,40                   | 7,20                              | 0,79               |
| 0,45                   | 8,24                              | 0,24               |
| 0,50                   | 8,71                              | 0,06               |
| 0,55                   | 9,17                              | 1,51               |
| 0,60                   | 9,38                              | 26,06              |
| 0,65                   | 8,75                              | 62,33              |
| 0,70                   | 9,43                              | 70,01              |
| 0,75                   | 10,50                             | 49,63              |
| 0,80                   | 11,66                             | 26,06              |
| 0,85                   | 11,39                             | 13,97              |
| 0,90                   | 11,91                             | 23,94              |
| 0,95                   | 12,68                             | 37,97              |
| 1,00                   | 12,40                             | 42,80              |

**Tabla 70: Resultados ensayo CPT N°24.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,02                              | 0,24               |
| 0,10                   | 1,94                              | 0,18               |
| 0,15                   | 5,25                              | 0,12               |
| 0,20                   | 6,39                              | 0,24               |
| 0,25                   | 7,08                              | 5,74               |
| 0,30                   | 7,50                              | 8,83               |
| 0,35                   | 7,62                              | 3,14               |
| 0,40                   | 6,37                              | 0,42               |
| 0,45                   | 5,31                              | 22,67              |
| 0,50                   | 4,99                              | 43,83              |
| 0,55                   | 5,88                              | 35,31              |
| 0,60                   | 6,69                              | 7,44               |
| 0,65                   | 6,57                              | -0,06              |
| 0,70                   | 6,13                              | 0,24               |
| 0,75                   | 5,48                              | 12,09              |
| 0,80                   | 5,23                              | 20,56              |
| 0,85                   | 5,75                              | 18,32              |
| 0,90                   | 6,00                              | 13,72              |
| 0,95                   | 6,34                              | 12,57              |
| 1,00                   | 7,56                              | 15,30              |

**Tabla 71: Resultados ensayo CPT N°25.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,00                              | 0,06               |
| 0,10                   | 6,04                              | 0,12               |
| 0,15                   | 10,15                             | 0,06               |
| 0,20                   | 11,62                             | 2,36               |
| 0,25                   | 11,67                             | 13,36              |
| 0,30                   | 11,17                             | 13,54              |
| 0,35                   | 10,79                             | 9,55               |
| 0,40                   | 9,86                              | 14,27              |
| 0,45                   | 8,93                              | 23,22              |
| 0,50                   | 7,68                              | 29,80              |
| 0,55                   | 6,79                              | 29,08              |
| 0,60                   | 6,21                              | 20,37              |
| 0,65                   | 5,65                              | 22,49              |
| 0,70                   | 5,56                              | 34,46              |
| 0,75                   | 6,51                              | 44,80              |
| 0,80                   | 7,16                              | 49,03              |
| 0,85                   | 7,57                              | 55,01              |
| 0,90                   | 7,93                              | 65,29              |
| 0,95                   | 8,49                              | 69,28              |
| 1,00                   | 8,83                              | 70,31              |

**Tabla 72: Resultados ensayo CPT N°26.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,01                              | 0,18               |
| 0,10                   | 2,33                              | 0,42               |
| 0,15                   | 3,28                              | 3,51               |
| 0,20                   | 3,09                              | 6,77               |
| 0,25                   | 3,18                              | 16,44              |
| 0,30                   | 3,28                              | 20,80              |
| 0,35                   | 3,29                              | 16,26              |
| 0,40                   | 3,57                              | 23,52              |
| 0,45                   | 5,12                              | 32,89              |
| 0,50                   | 6,40                              | 38,09              |
| 0,55                   | 5,85                              | 55,86              |
| 0,60                   | 5,61                              | 67,95              |
| 0,65                   | 5,03                              | 84,76              |
| 0,70                   | 4,63                              | 79,32              |
| 0,75                   | 4,40                              | 56,71              |
| 0,80                   | 4,51                              | 42,02              |
| 0,85                   | 4,99                              | 25,03              |
| 0,90                   | 5,51                              | 19,47              |
| 0,95                   | 5,72                              | 19,53              |
| 1,00                   | 5,98                              | 22,79              |

**Tabla 73: Resultados ensayo CPT N°27.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,01                              | 0,18               |
| 0,10                   | 3,43                              | 0,12               |
| 0,15                   | 5,80                              | 0,30               |
| 0,20                   | 8,44                              | 8,28               |
| 0,25                   | 9,61                              | 19,83              |
| 0,30                   | 8,82                              | 39,17              |
| 0,35                   | 8,25                              | 67,83              |
| 0,40                   | 7,57                              | 70,37              |
| 0,45                   | 7,59                              | 65,41              |
| 0,50                   | 8,13                              | 66,50              |
| 0,55                   | 8,47                              | 56,65              |
| 0,60                   | 8,06                              | 42,92              |
| 0,65                   | 8,24                              | 41,35              |
| 0,70                   | 8,50                              | 49,51              |
| 0,75                   | 8,95                              | 50,78              |
| 0,80                   | 9,65                              | 50,48              |
| 0,85                   | 9,73                              | 46,55              |
| 0,90                   | 9,49                              | 46,25              |
| 0,95                   | 9,02                              | 49,45              |
| 1,00                   | 8,45                              | 48,91              |

**Tabla 74: Resultados ensayo CPT N°28.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,05                              | 0,30               |
| 0,10                   | 2,21                              | 0,24               |
| 0,15                   | 3,91                              | 0,12               |
| 0,20                   | 5,41                              | 0,36               |
| 0,25                   | 6,24                              | 11,55              |
| 0,30                   | 5,86                              | 18,32              |
| 0,35                   | 6,43                              | 12,57              |
| 0,40                   | 6,39                              | 1,99               |
| 0,45                   | 6,50                              | 9,85               |
| 0,50                   | 6,35                              | 21,40              |
| 0,55                   | 6,44                              | 42,86              |
| 0,60                   | 6,97                              | 45,76              |
| 0,65                   | 7,28                              | 39,54              |
| 0,70                   | 8,17                              | 28,35              |
| 0,75                   | 8,19                              | 23,82              |
| 0,80                   | 7,87                              | 27,45              |
| 0,85                   | 7,34                              | 38,99              |
| 0,90                   | 6,81                              | 41,71              |
| 0,95                   | 6,19                              | 40,63              |
| 1,00                   | 5,90                              | 35,00              |

**Tabla 75: Resultados ensayo CPT N°29.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,70                              | 0,30               |
| 0,10                   | 3,02                              | 0,24               |
| 0,15                   | 11,02                             | 0,24               |
| 0,20                   | 12,55                             | 4,29               |
| 0,25                   | 11,94                             | 49,09              |
| 0,30                   | 11,00                             | 102,29             |
| 0,35                   | 10,30                             | 144,01             |
| 0,40                   | 9,14                              | 152,83             |
| 0,45                   | 7,52                              | 148,00             |
| 0,50                   | 0,70                              | 0,30               |
| 0,55                   | 5,12                              | 129,62             |
| 0,60                   | 4,27                              | 92,38              |
| 0,65                   | 3,63                              | 46,97              |
| 0,70                   | 4,50                              | 27,20              |
| 0,75                   | 7,00                              | 19,59              |
| 0,80                   | 10,42                             | 14,45              |
| 0,85                   | 12,16                             | 14,75              |
| 0,90                   | 12,41                             | 46,49              |
| 0,95                   | 10,87                             | 102,35             |
| 1,00                   | 8,63                              | 114,32             |

**Tabla 76: Resultados ensayo CPT N°30.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,47                              | 0,18               |
| 0,10                   | 3,48                              | 0,30               |
| 0,15                   | 7,37                              | 0,42               |
| 0,20                   | 7,49                              | 0,18               |
| 0,25                   | 7,11                              | 13,48              |
| 0,30                   | 6,48                              | 32,95              |
| 0,35                   | 5,40                              | 42,98              |
| 0,40                   | 4,58                              | 52,84              |
| 0,45                   | 4,14                              | 53,08              |
| 0,50                   | 4,87                              | 43,35              |
| 0,55                   | 5,08                              | 39,90              |
| 0,60                   | 5,15                              | 30,65              |
| 0,65                   | 6,91                              | 26,48              |
| 0,70                   | 7,06                              | 20,62              |
| 0,75                   | 6,70                              | 20,31              |
| 0,80                   | 6,55                              | 27,39              |
| 0,85                   | 7,55                              | 23,70              |
| 0,90                   | 8,77                              | 14,09              |
| 0,95                   | 9,31                              | 18,44              |
| 1,00                   | 9,84                              | 40,63              |

**Tabla 77: Resultados ensayo CPT N°31.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,03                              | 0,36               |
| 0,10                   | 1,85                              | 0,18               |
| 0,15                   | 8,63                              | 0,36               |
| 0,20                   | 19,46                             | 0,18               |
| 0,25                   | 17,92                             | 6,89               |
| 0,30                   | 14,44                             | 46,55              |
| 0,35                   | 12,75                             | 72,37              |
| 0,40                   | 11,31                             | 64,81              |
| 0,45                   | 10,41                             | 42,26              |
| 0,50                   | 9,81                              | 30,95              |
| 0,55                   | 9,12                              | 33,13              |
| 0,60                   | 9,15                              | 52,11              |
| 0,65                   | 9,91                              | 71,04              |
| 0,70                   | 9,56                              | 87,48              |
| 0,75                   | 9,68                              | 98,12              |
| 0,80                   | 10,12                             | 105,62             |
| 0,85                   | 10,40                             | 101,81             |
| 0,90                   | 10,39                             | 92,01              |
| 0,95                   | 10,20                             | 85,30              |
| 1,00                   | 9,64                              | 87,72              |

**Tabla 78: Resultados ensayo CPT N°32.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,03                              | 0,18               |
| 0,10                   | 9,22                              | 0,30               |
| 0,15                   | 11,47                             | 0,42               |
| 0,20                   | 12,12                             | 0,79               |
| 0,25                   | 11,81                             | 23,28              |
| 0,30                   | 9,49                              | 42,08              |
| 0,35                   | 9,15                              | 44,01              |
| 0,40                   | 7,34                              | 54,65              |
| 0,45                   | 6,36                              | 58,10              |
| 0,50                   | 6,41                              | 55,20              |
| 0,55                   | 6,73                              | 50,72              |
| 0,60                   | 6,55                              | 57,31              |
| 0,65                   | 5,83                              | 70,37              |
| 0,70                   | 5,32                              | 82,40              |
| 0,75                   | 5,37                              | 79,50              |
| 0,80                   | 6,35                              | 66,08              |
| 0,85                   | 6,88                              | 50,78              |
| 0,90                   | 7,37                              | 46,19              |
| 0,95                   | -15,02                            | 52,60              |
| 1,00                   | 7,71                              | 59,61              |

**Tabla 79: Resultados ensayo CPT N°33.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 5,54                              | 0,29               |
| 0,10                   | 21,32                             | 2,63               |
| 0,15                   | 21,45                             | 64,35              |
| 0,20                   | 21,62                             | 163,66             |
| 0,25                   | 17,11                             | 271,26             |
| 0,30                   | 12,87                             | 295,81             |
| 0,35                   | 9,75                              | 257,65             |
| 0,40                   | 7,65                              | 210,59             |
| 0,45                   | 6,15                              | 168,04             |
| 0,50                   | 5,57                              | 138,00             |
| 0,55                   | 5,64                              | 110,47             |
| 0,60                   | 5,53                              | 82,18              |
| 0,65                   | 5,10                              | 70,02              |
| 0,70                   | 4,84                              | 61,14              |
| 0,75                   | 4,86                              | 55,18              |
| 0,80                   | 4,68                              | 53,89              |
| 0,85                   | 4,73                              | 57,11              |
| 0,90                   | 4,74                              | 63,07              |
| 0,95                   | 4,33                              | 62,25              |
| 1,00                   | 4,38                              | 54,88              |

**Tabla 80: Resultados ensayo CPT N°34.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,09                              | 0,64               |
| 0,10                   | 10,68                             | 5,32               |
| 0,15                   | 17,60                             | 23,67              |
| 0,20                   | 17,10                             | 36,00              |
| 0,25                   | 15,73                             | 48,10              |
| 0,30                   | 12,34                             | 92,06              |
| 0,35                   | 9,30                              | 144,08             |
| 0,40                   | 7,59                              | 152,73             |
| 0,45                   | 6,80                              | 125,26             |
| 0,50                   | 6,25                              | 100,65             |
| 0,55                   | 6,35                              | 88,20              |
| 0,60                   | 6,31                              | 67,04              |
| 0,65                   | 5,49                              | 54,24              |
| 0,70                   | 4,58                              | 45,36              |
| 0,75                   | 4,13                              | 42,55              |
| 0,80                   | 4,02                              | 37,41              |
| 0,85                   | 4,22                              | 34,43              |
| 0,90                   | 4,61                              | 37,12              |
| 0,95                   | 5,26                              | 41,44              |
| 1,00                   | 6,03                              | 45,59              |

**Tabla 81: Resultados ensayo CPT N°35.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 8,75                              | 13,88              |
| 0,10                   | 26,41                             | 22,18              |
| 0,15                   | 39,38                             | 27,53              |
| 0,20                   | 46,73                             | 155,13             |
| 0,25                   | 38,04                             | 351,14             |
| 0,30                   | 27,61                             | 690,80             |
| 0,35                   | 21,40                             | 1001,82            |
| 0,40                   | 17,67                             | 1108,36            |
| 0,45                   | 14,52                             | 967,23             |
| 0,50                   | 11,89                             | 812,63             |
| 0,55                   | 9,81                              | 751,22             |
| 0,60                   | 9,42                              | 610,33             |
| 0,65                   | 9,41                              | 488,85             |
| 0,70                   | 7,94                              | 484,09             |
| 0,75                   | 8,51                              | 48,77              |
| 0,80                   | 7,30                              | 184,83             |
| 0,85                   | 6,56                              | 287,96             |
| 0,90                   | 6,61                              | 280,49             |
| 0,95                   | 6,39                              | 192,66             |
| 1,00                   | 6,55                              | 175,95             |

**Tabla 82: Resultados ensayo CPT N°36.**

| <b>Profundidad [m]</b> | <b>Resistencia de Punta [MPa]</b> | <b>Fuste [kPa]</b> |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 0,05                   | 0,02                              | 0,30               |
| 0,10                   | 2,62                              | 0,12               |
| 0,15                   | 6,54                              | 7,80               |
| 0,20                   | 8,67                              | 30,11              |
| 0,25                   | 9,55                              | 23,88              |
| 0,30                   | 10,02                             | 25,21              |
| 0,35                   | 10,58                             | 26,42              |
| 0,40                   | 11,22                             | 29,87              |
| 0,45                   | 12,31                             | 30,77              |
| 0,50                   | 13,27                             | 31,01              |
| 0,55                   | 12,72                             | 33,61              |
| 0,60                   | 11,49                             | 60,64              |
| 0,65                   | 9,90                              | 72,18              |
| 0,70                   | 8,98                              | 78,77              |
| 0,75                   | 8,79                              | 76,54              |
| 0,80                   | 10,54                             | 63,42              |
| 0,85                   | 22,26                             | 94,25              |
| 0,90                   | 37,38                             | 118,07             |
| 0,95                   | 28,72                             | 74,00              |
| 1,00                   | 35,17                             | 85,06              |