



Universidad de Valparaíso

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**METODOLOGÍA PARA EL CONTROL DE COMPACTACIÓN DE
SUELOS CON EL USO DEL DENSÍMETRO SDG 200 COMPARABLE
CON EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA
EN BASES GRANULARES PARA PAVIMENTOS**

Preparado por

RODRIGO ESTEBAN REYES CAIMANQUE

**TRABAJO DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

PROFESOR GUÍA: GUILLERMO BRANTE LARA

JULIO, 2013

Agradecimientos

Debo agradecer de manera especial y sincera a mi profesor guía Guillermo Brante Lara, por aceptarme bajo su dirección y brindarme su apoyo para realizar este trabajo.

A la universidad de Valparaíso por formarme como profesional.

Al laboratorio regional de vialidad y a las personas que trabajan en él, por brindarme toda la ayuda en cuanto a materiales y equipos que fueron utilizados este trabajo.

A la unidad de autocontrol de la constructora COP, por prestarme ayuda en los controles realizados en terreno en la ruta F-50.

A mis familiares, compañeros, amigos y a todas las personas que de alguna manera me ayudaron a realizar este trabajo.

Dedicatorias

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo y por sobre todo, por su amor.

A mis hermanos, por estar siempre conmigo de alguna u otra manera y por formar parte de lo más hermoso que tengo, mi familia.

A mis familiares y amigos, por todo el cariño y apoyo entregado durante toda mi vida.

ÍNDICE

Glosario	7
Lista de abreviaturas	8
Índice de figuras	9
Índice de tablas	12
Lista de ecuaciones.....	14
Resumen	15
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES DEL TRABAJO	16
1.1.- Introducción.....	16
1.2.- Objetivos	17
1.2.1.- Objetivo general	17
1.2.2.- Objetivos específicos	17
1.3.- Alcances.....	18
1.4.- Metodología de Trabajo	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	20
2.1.- Fases en la composición de un suelo	20
2.1.1.- Relaciones de las masas	20
2.1.2.- Relaciones de volúmenes	21
2.2.- Caracterización y clasificación de los suelos.....	21
2.2.1.- Análisis Granulométrico	22
2.2.2.- Límites de consistencia.....	24
2.2.3.- Sistema de clasificación AASHTO	26
2.2.4.- Sistema de clasificación USCS.....	27
2.3.- Compactación de los suelos	28
2.3.1.- Factores principales que determinan el grado de compactación	28
2.3.1.1.- Efectos del agua	28
2.3.1.2.- Energía de compactación	29
2.3.1.3.- Tipo de suelo.....	30
2.3.2.- Formas de compactación.....	30
2.3.3.- Compactación en laboratorio	33
2.3.3.1.- Proctor Modificado	33
2.3.4.- Control de compactación en terreno	35
2.3.4.1.- Método del cono de arena	36
2.3.4.2.- Densímetro SDG 200.....	38
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	41
3.1.- Metodología para realizar el ensayo del cono de arena.....	41

3.2.- Metodología de uso del densímetro SDG 200.....	45
CAPÍTULO IV: PROGRAMA EXPERIMENTAL Y OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS	48
4.1.- Primera etapa del trabajo.....	49
4.1.1.- Obtención de la muestra	49
4.1.2.- Homogenización del suelo y preparación del material para cada ensayo	50
4.2.- Segunda etapa del trabajo	50
4.3.- Tercera etapa del trabajo.....	51
4.3.1.- Ingreso de valores de calibración al equipo para un determinado suelo	51
4.3.2.- Metodología empleada para realizar las pruebas.....	51
4.3.3.- Descripción del lugar donde se realizaron las pruebas	52
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
5.1.- Presentación de resultados obtenidos en laboratorio.....	54
5.1.1.- Ensayo de granulometría	54
5.1.2.- Límites de Consistencia	56
5.1.3.- Proctor Modificado	56
5.1.4.- Resultados otros ensayos adicionales realizados	57
5.2.- Clasificación de los suelos	57
5.2.1.- Clasificación mediante sistema AASHTO.....	57
5.2.2.- Clasificación mediante sistema USCS.....	58
5.3.- Ingreso de los valores de calibración al equipo para caracterizar el suelo	58
5.4.- Presentación y análisis de los resultados del trabajo realizado en terreno.....	59
5.4.1.- Presentación y análisis de los resultados obtenidos para la base granular n° 1.....	59
5.4.1.1.- Comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200	60
5.4.1.2.- Comparación de la humedad obtenida mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200	62
5.4.1.3.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200	64
5.4.1.3.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido	66
5.4.1.6.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido	67
5.4.1.7.- Planteamiento de una nueva corrección que involucra la temperatura del suelo	69
5.3.2.- Presentación y análisis de los resultados obtenidos para la base granular n°2.....	72
5.4.2.1- Comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200.	73
5.4.2.2.- Comparación de la humedad obtenida mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200	75
5.4.2.3.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200.	77

5.4.2.3.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido	78
5.4.2.6.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido	80
5.4.2.7.- Planteamiento de una nueva corrección que involucra la temperatura del suelo	81
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	84
Anexo A: Resultados obtenidos con el método del cono de arena	86
Anexo B: Resultados obtenidos con el densímetro SDG 200	89
Anexo C: Requisitos para bases granulares según la normativa vigente	92
Bibliografía.....	97

Glosario

Base Boco: Base granular obtenida de la empresa Aridos Boco Ltda. Es una empresa dedicada a la producción de áridos para la construcción, que se inicio hace más de 16 años en la ciudad de Quillota a orillas del río Aconcagua, atendiendo a numerosas empresas constructoras y organismos fiscales que han realizado obras entre las comunas de Nogales y Quilpué preferentemente, como también en el sector costero.

Maicillo: Es un material originado por la meteorización de rocas graníticas, puede ser plástico o no plástico y se encuentra en grandes cantidades en la región.

ASTM: Sigla de la *American Society for Testing and Materials*, fundada en 1898. Es la mayor organización científica y técnica para el establecimiento y la difusión de normas relativas a las características y prestaciones de materiales, productos, sistemas y servicios.

Lista de abreviaturas

D₁₀= Tamaño según curva granulométrica para el cual pasa el 10% del material.

D₃₀= Tamaño según curva granulométrica para el cual pasa el 30% del material.

D₆₀= Tamaño según curva granulométrica para el cual pasa el 60% del material.

Ma = Masa de aire

Ms = Masa sólida

Mt = Masa total

Mw = Masa de agua

Va = Volumen de aire

Vs = Volumen sólido

Vt = Volumen total

Vv = Volumen de vacíos

Vv = Volumen de agua

Índice de figuras

Figura 2.1.- Diagrama de bloques de masas y volúmenes de un suelo	20
Figura 2.2.- Series de tamices normalizados por la ASTM.....	22
Figura 2.3.- Curva granulométrica.....	23
Figura 2.4.- Esquema límites de consistencia	24
Figura 2.5.- Determinación del límite líquido con la cuchara de Casagrande	24
Figura 2.6.- Determinación del límite plástico	25
Figura 2.7.- Clasificación de los suelos según sistema AASHTO	26
Figura 2.8.- Clasificación de los suelos según sistema USCS	27
Figura 2.9.- Relación Humedad – Densidad	28
Figura 2.10.- Efecto de la energía de compactación en la relación Humedad – Densidad.....	29
Figura 2.11.- Rodillo estático.....	31
Figura 2.12.- Apisonador.....	31
Figura 2.13.- Rodillo vibratorio	32
Figura 2.14.- Rodillo "Pata de cabra"	32
Figura 2.15.- Forma de la curva Humedad- Densidad.....	34
Figura 2.16.- Molde y pisón normalizados para el ensayo Proctor Modificado	34
Figura 2.17.- Realización ensayo Proctor Modificado.....	35
Figura 2.18.- Cono de arena	36
Figura 2.19.- Depósito para calibración de arena de ensayo	37
Figura 2.20.- Materiales complementarios para realizar un ensayo de cono de arena	37
Figura 2.21.- Densímetro SDG 200.....	38
Figura 2.22.- Tecnología de medición del densímetro SDG 200.....	39
Figura 3.1.- Determinación de la capacidad volumétrica del depósito	41
Figura 3.2.- Determinación de la densidad aparente de la arena de ensayo	42
Figura 3.3.- Determinación de la arena que llena el cono basal.....	42
Figura 3.4.- Control de compactación en terreno con el método del cono de arena	43
Figura 3.5.- Determinación de la humedad del material extraído en horno según la NCh 1515.....	44
Figura 3.6.- Formato de medición en forma de trébol.....	46
Figura 3.7.- Medición con el densímetro SDG 200 en terreno	46
Figura 3.8.- Diagrama de flujo de metodología de uso del densímetro SDG 200	47
Figura 4.1.- Esquema de los pasos a seguir en el desarrollo del trabajo	48
Figura 4.2.- Obtención de la muestra de base granular n°1	49
Figura 4.3.- Obtención de la muestra de base granular n° 2	49
Figura 4.4.- Homogenización y preparación del suelo a ensayar	50
Figura 4.5.- Metodología empleada para realizar las pruebas	51
Figura 4.6.- Prueba realizada con el densímetro SDG 200 en la base granular n°1.....	52
Figura 4.7.- Prueba realizada con el método del cono de arena en la base granular n°1.....	52
Figura 4.8.- Preparación de la cancha de pruebas de base granular n° 2	53
Figura 4.9.- Esquema de controles de compactación realizados en la base granular n°2.....	53
Figura 5.1.- Curva granulométrica de la base granular n° 1	54
Figura 5.2.- Curva granulométrica de la base granular n°2	55
Figura 5.3.- Curva Densidad - Humedad Proctor modificado base granular n°1	56
Figura 5.4.- Curva Densidad - Humedad Proctor modificado base granular n°2	57

Figura 5.5.- Gráfico comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1	60
Figura 5.6.- Gráfico correlación entre la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°1	61
Figura 5.7.- Gráfico diferencia densidad húmeda obtenida con ambos métodos v/s Temperatura del suelo en la base granular n° 1.....	61
Figura 5.8.- Gráfico Comparación de la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°1	63
Figura 5.9.- Gráfico Correlación entre la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1	63
Figura 5.10.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1	65
Figura 5.11.- Gráfico correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°1	65
Figura 5.12.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n°1	66
Figura 5.13.- Gráfico correlación entre la densidad seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 1	67
Figura 5.14.- Gráfico comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido en la base granular n°1	68
Figura 5.15.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°1	70
Figura 5.16.- Gráfico comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n° 1	71
Figura 5.17.- Esquema de los controles realizados en la cancha de pruebas para la base granular n° 2	72
Figura 5.18.- Gráfico comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2	73
Figura 5.19.- Gráfico correlación entre la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2	74
Figura 5.20.- Gráfico diferencia densidad compactada húmeda obtenida con ambos métodos v/s temperatura del suelo en la base granular n° 2	74
Figura 5.21 - Gráfico comparación de la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 2	75
Figura 5.22 - Gráfico correlación entre la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 2	76
Figura 5.23.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 2	77
Figura 5.24.- Gráfico correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2	78
Figura 5.25.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 2.....	79
Figura 5.26.- Gráfico correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 2	79
Figura 5.27 - Gráfico comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido en la base granular n°2.....	80
Figura 5.28.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°2	82

Figura 5.29.- Gráfico comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n° 2 83

Índice de tablas

Tabla 2.1.- Tamaños nominales de las aberturas de los tamices utilizados para el análisis granulométrico.....	22
Tabla 2.2.- Densidad máxima según tipo de suelo.....	30
Tabla 5.1.- Granulometría base granular n°1.....	54
Tabla 5.2.- Granulometría base granular n°2.....	55
Tabla 5.3.- Proctor modificado base granular n°1.....	56
Tabla 5.4.- Proctor modificado base granular n°2.....	56
Tabla 5.5.- Valores de calibración ingresados para la base granular n° 1	58
Tabla 5.6.- Valores de calibración ingresados para la base granular n° 2	58
Tabla 5.7.- Resultados obtenidos con el método del cono de arena en la base granular n° 1	59
Tabla 5.8.- Resultados obtenidos con el SDG 200 en la base granular n° 1	59
Tabla 5.9.- Comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1	60
Tabla 5.10.- Comparación de la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°1	62
Tabla 5.11.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1	64
Tabla 5.12.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 1	66
Tabla 5.13.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido en la base granular n°1.....	68
Tabla 5.14.- Datos utilizados para realizar la regresión lineal en la base granular n° 1	69
Tabla 5.15 - Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°1	70
Tabla 5.16.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°1	71
Tabla 5.17.- Resultados obtenidos con el método del cono de arena en la base granular n°2	72
Tabla 5.18.- Resultados obtenidos con el densímetro SDG 200 para la base granular n°2.....	72
Tabla 5.19.- Comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2.....	73
Tabla 5.20.- Comparación de la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 2	75
Tabla 5.21.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2	77
Tabla 5.22.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 2	78
Tabla 5.23.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido en la base granular n°2.....	80
Tabla 5.24.- Datos utilizados para realizar la regresión lineal en la base granular n° 2.....	81
Tabla 5.25.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°2	81
Tabla 5.26.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°2.....	82
Tabla A.1.- Ensayos de control de compactación realizados con el método del cono de arena en la base granular n° 1	87

Tabla A.2.- Ensayos de control de compactación realizados con el método del cono de arena en la base granular n° 2	88
Tabla B.3.- Ensayos de control de compactación realizados con el SDG 200 para la base granular n° 1	90
Tabla B.4.- Ensayos de control de compactación realizados con el método del cono de arena en la base granular n° 2	91
Tabla C.1.- Requisitos límites de consistencia	93
Tabla C.2.- Bandas granulométricas para subbase, bases y capas de rodadura	94
Tabla C.3.- Requisitos para bases granulares según tipo de capa de rodadura (graduación cerrada)	94

Lista de ecuaciones

(2.1).- Densidad del suelo.....	20
(2.2).- Densidad del suelo seco.....	20
(2.3).- Densidad de partículas sólidas.....	20
(2.4).- Peso específico de los sólidos.....	21
(2.5).- Contenido de humedad.....	21
(2.6).- Relación de vacíos o índice de huecos.....	21
(2.7).- Porosidad.....	21
(2.8).- Grado de saturación.....	21
(2.9).- Coeficiente de uniformidad.....	23
(2.10).- Coeficiente de curvatura.....	23
(2.11).- Grado de compactación.....	35
(5.1).- Densidad seca regresión lineal multivariable para base granular n° 1.....	70
(5.2).- Densidad seca regresión lineal multivariable para base granular n° 2.....	81

Resumen

El presente trabajo analiza la utilización de un nuevo sistema para el control de compactación de suelos, el densímetro SDG 200, el que por medio de espectroscopía de impedancia eléctrica (EIS) permite la separación de los efectos del contenido de humedad y la densidad del suelo en la respuesta de éste al sondeo electromagnético.

Este equipo se presenta como un método no destructivo, fácil de utilizar con el que se obtienen resultados en forma rápida y directa. Para ver que tan confiables pueden ser los resultados obtenidos con el equipo se hace necesario investigar al respecto.

Para utilizar el equipo se deben ingresar las características del suelo en donde se va a controlar la compactación, estas características se ingresan a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de granulometría, límites de consistencia y Proctor Modificado. El equipo entrega resultados de acuerdo a las características del suelo ingresado, por lo que es de vital importancia que estas sean representativas del lugar a controlar. Además se deben ingresar las compensaciones de densidad compactada húmeda y porcentaje de humedad, para lo cual es necesario realizar controles en 3 a 5 puntos representativos del terreno, utilizando el densímetro SDG 200 y algún otro método normado y calcular estas compensaciones como el promedio de las diferencias obtenidas.

Para llevar a cabo este trabajo se realizó la comparación de los resultados entregados por este equipo con los obtenidos con el método del cono de arena, realizando ensayos con ambos métodos en los mismos puntos. Los controles de compactación se realizaron en bases granulares utilizadas para la construcción de pavimentos que cumplen con la banda granulométrica TM-50c, se analizaron dos bases granulares en las que se realizaron 27 y 12 comparaciones respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos con el densímetro SDG 200 y los obtenidos con el método del cono de arena, se registraron grandes diferencias, que demuestran que el equipo no entrega resultados confiables.

Los resultados obtenidos con el densímetro SDG 200 se ven influenciados por las características de los materiales ingresados al equipo, y dada la heterogeneidad que presentan las bases granulares, se presentó una gran variabilidad de resultados. También se demostró que los resultados obtenidos con el densímetro SDG 200 se ven influenciados por la temperatura del suelo, obteniendo resultados mayores a medida que la temperatura disminuía.

Se plantearon ecuaciones utilizando regresiones multivariantes, agregando el efecto de la temperatura del suelo como otra variable al momento de realizar la compensación, utilizando estas ecuaciones los resultados se aproximan más a los resultados obtenidos con el método del cono de arena, que los obtenidos al realizar la compensación como el promedio de las diferencias de las primeras pruebas como lo establece el manual de uso del equipo, sin embargo siguen existiendo grandes diferencias que pueden resultar significativas al momento de realizar un control de compactación, además esto es poco práctico ya que se requiere tener controles a distintas temperaturas para poder realizar la regresión.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES DEL TRABAJO

1.1.- Introducción

La compactación de suelos es un proceso fundamental en la construcción de obras viales, que busca mejorar sus propiedades, aumentando su resistencia y mejorando su capacidad de deformación, utilizando para esto medios mecánicos los cuales obligan a las partículas de suelo a estar más en contacto unas con otras, aumentando así su densidad.

Una compactación del suelo deficiente podría ocasionar fallas prematuras en las carpetas de rodado, por lo que se hace necesario llevar un buen control de compactación en terreno y para ello se requiere de métodos seguros que entreguen resultados confiables en forma rápida.

La compactación se mide a partir de un parámetro conocido como grado de compactación, el que relaciona la densidad compactada seca medida en terreno, con la densidad máxima compactada seca (DMCS) obtenida en laboratorio. Este porcentaje debe ser mayor que un valor mínimo definido en las especificaciones.

En Chile el control de compactación se realiza con el método del cono de arena, que está aprobado por la norma chilena NCh 1516 Of 79, es un ensayo destructivo que demora alrededor de 30 minutos en realizar una prueba y se obtienen resultados después de 24 horas, ya que se requiere determinar la humedad del material extraído en laboratorio según la norma chilena NCh 1515 Of 79. Esta espera hace que se pierda un tiempo valioso en el avance de obras de compactación, y dada la velocidad con que se desarrollan los proyectos de construcción hace que este método comience a perder vigencia.

Alternativo a esto, el equipo que más se utiliza para el control de compactación de grandes obras viales es el densímetro nuclear, que está aprobado por la NCh 3145 Of 2008. Este es un método radiactivo que entrega resultados confiables en forma rápida y directa, su uso está regulado por el servicio de salud, quien solo autoriza su uso a personal capacitado. Con una mala manipulación puede ser peligroso para la salud y el ambiente, por lo que se deben tomar todas las precauciones de seguridad necesarias durante su uso.

Debido a que los métodos para controlar la compactación en terreno son demasiado lentos, o se requiere de muchas medidas de seguridad, obliga a realizar controles cada cierta distancia, lo que provoca que obras que involucren trabajos de compactación no lleguen a ser lo suficiente inspeccionadas, y existan lugares donde no se alcanzó la compactación especificada que pasan inadvertidos. De aquí nace la necesidad de buscar métodos que entreguen resultados confiables en forma rápida, para así poder llevar un control más minucioso.

Recientemente, se introdujo en Chile un densímetro no- nuclear llamado SDG 200, el que por medio de espectroscopía de impedancia eléctrica (EIS), permite la separación de los efectos del contenido de humedad y la densidad del suelo, en la respuesta de éste al sondeo electromagnético. Es un método rápido y directo, no requiere de licencias y es fácil de utilizar.

Este trabajo evalúa que tan confiables pueden ser las mediciones obtenidas con el uso del densímetro SDG 200, en el control de compactación de bases granulares utilizadas en la construcción de pavimentos en la quinta región, en comparación con el método del cono de arena. Se busca poder establecer una metodología de uso del equipo.

1.2.- Objetivos

1.2.1.- Objetivo general

Verificar la confiabilidad del densímetro SDG 200 en el control de compactación de bases granulares utilizadas para la construcción de pavimentos en la quinta región y determinar una metodología de uso del equipo para el control de compactación de suelos, comparable con el método del cono de arena.

1.2.2.- Objetivos específicos

- Analizar las características granulométricas y las propiedades de las bases granulares a utilizar en el estudio.
- Analizar la variabilidad de los resultados obtenidos mediante el densímetro SDG 200 en comparación con las densidades de terreno reales obtenidas con el método del cono de arena.
- Determinar factores de corrección que permitan utilizar el densímetro SDG 200 como valor confiable para el control de compactación en terreno.
- Plantear una metodología de control de compactación que pueda ser incluida en la nueva norma chilena.

1.3.- Alcances

El trabajo se llevó a cabo durante el periodo comprendido entre Noviembre del 2012 a Abril del 2013, en las dependencias y con los equipos del laboratorio regional de vialidad de la ciudad de Viña del Mar.

El trabajo en terreno se realizó en la construcción de la ruta F-50, camino Lo Orozco, Quilpué. Para este trabajo se contó con la ayuda de la unidad de autocontrol de la constructora COP.

Los controles de compactación en terreno se realizaron en dos bases granulares:

- La primera base granular analizada, corresponde a la base granular que se está utilizando en la construcción de la ruta F-50, que es una base granular compuesta por un 70% de base Boco y un 30% de maicillo, la que es obtenida a través de una planta mezcladora ubicada a un costado de la ruta F-50 y cumple con las condiciones de granulometría de la banda TM-50c.
- La segunda base granular analizada corresponde a un base Boco pura que cumple con las condiciones de granulometría de la banda TM-50c.

1.4.- Metodología de Trabajo

La primera etapa del trabajo, consistió en la obtención de la muestra representativa de los suelos, en donde se efectuaron los controles de compactación en terreno, para poder realizar los ensayos de laboratorio necesarios.

En la segunda etapa, se hizo un análisis completo de los suelos en laboratorio, donde se emplearon ensayos de granulometría y límites de consistencia, para poder clasificar los suelos mediante los sistemas de clasificación AASHTO y USCS. Luego se realizó el ensayo Proctor Modificado para poder conocer la densidad máxima compactada seca (DMCS) y la correspondiente humedad óptima w (%). Además se hicieron todos los ensayos necesarios para verificar que cumplan con la normativa vigente para ser utilizados como material de base granular.

En la tercera etapa se ingresaron los valores de calibración al equipo para un determinado suelo, a partir de los resultados obtenidos en la etapa anterior. Luego se realizaron los controles de compactación en terreno de las bases granulares en la construcción de la ruta F-50, ubicada en Lo Orozco, Quilpué. Efectuando un control de compactación con el densímetro SDG 200 y en el mismo punto, se hizo un control de compactación con el método del cono de arena, lo anterior para poder comparar y analizar los resultados.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.- Fases en la composición de un suelo

Los suelos están compuestos de muchos elementos diferentes. Estos elementos se pueden encontrar en los 3 estados o fases de la materia: sólido, líquido y gaseoso.

La relación entre las masas y volúmenes de las diferentes fases nos ayuda a definir las condiciones en que se encuentra el suelo, conocer sus propiedades y comportamiento físico.

En la figura 2.1, se muestra un diagrama de bloques de masas y volúmenes que permite ver de forma más fácil las relaciones de masas y volúmenes de un suelo.

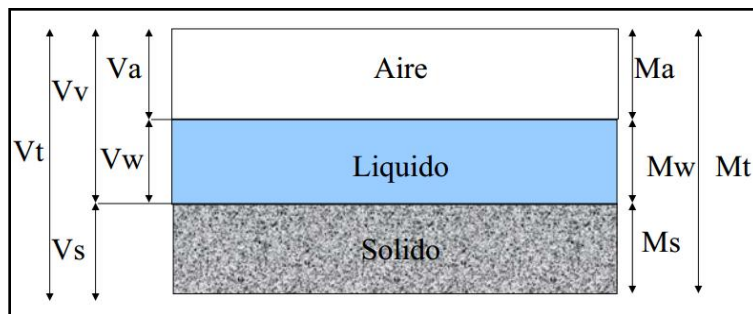


Figura 2.1.- Diagrama de bloques de masas y volúmenes de un suelo

(Fuente: Curso de Laboratorista Vial Volumen III, Geotecnia)

2.1.1.- Relaciones de las masas

- Densidad del suelo (ρ)

$$\rho = \frac{M_t}{V_t} \quad (2.1)$$

- Densidad del suelo seco (ρ_d)

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (2.2)$$

- Densidad de partículas sólidas (ρ_s)

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.3)$$

- **Peso específico de los sólidos (Gs)**

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad G_s = \frac{M_s}{V_s \rho_w} \quad (2.4)$$

Donde: ρ_w = Densidad del agua a 4°C

- **Contenido de humedad (w)**

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \text{ (\%)} \quad (2.5)$$

2.1.2.- Relaciones de volúmenes

- **Relación de vacíos o índice de Huecos (e)**

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.6)$$

- **Porosidad (n)**

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \text{ (\%)} \quad (2.7)$$

- **Grado de saturación (Sr)**

$$S_r = \frac{V_w}{V_t} \times 100 \text{ (\%)} \quad (2.8)$$

2.2.- Caracterización y clasificación de los suelos

Todo estudio de mecánica de suelos necesita una descripción de los suelos en los que se trabaja, para diferenciar los suelos de una misma categoría.

Los siguientes ensayos se utilizan para identificar y clasificar los suelos.

- Granulometría.
- Límites de Consistencia.

Los sistemas más utilizados para la clasificación de los suelos en las obras viales son:

- USCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).
- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

2.2.1.- Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico sirve para conocer la distribución por tamaño de las partículas de una muestra de suelo. Este ensayo en Chile está aprobado por la norma chilena NCh 165 Of 77.

La distribución de las partículas con tamaño superior a 0.075 [mm], se determina mediante el uso de tamices con aberturas normalizadas y en los cuales se mide la masa que queda retenida en cada uno de ellos.

Para partículas menores que 0.075 [mm], se determina observando la velocidad de sedimentación de las partículas en una suspensión de densidad y viscosidad conocidas. Este procedimiento es poco utilizado.

En la figura 2.2, se muestran los distintos tamices normalizados por la ASTM, utilizados para un análisis granulométrico, mientras que en la tabla 2.1, se muestran los tamaños nominales de las aberturas de los tamices utilizados para el análisis granulométrico.



Figura 2.2.- Series de tamices normalizados por la ASTM

Tabla 2.1.- Tamaños nominales de las aberturas de los tamices utilizados para el análisis granulométrico

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
80	(3")
63	(2½")
50	(2")
40	(1½")
25	(1")
20	(¾")
10	(⅜")
5	(N°4)
2	(N°10)
0,5	(N°40)
0,08	(N°200)

Fuente: Manual de Carreteras Volumen 8

Los resultados del análisis granulométrico se expresan en una tabla, tamiz y porcentaje que pasa en cada malla, luego se debe trazar la “curva granulométrica”, colocando en el eje de las abscisas en escala logarítmica el diámetro en milímetros y en el eje de las ordenadas el porcentaje que pasa. En la figura 2.3, se muestra la forma de una curva granulométrica.

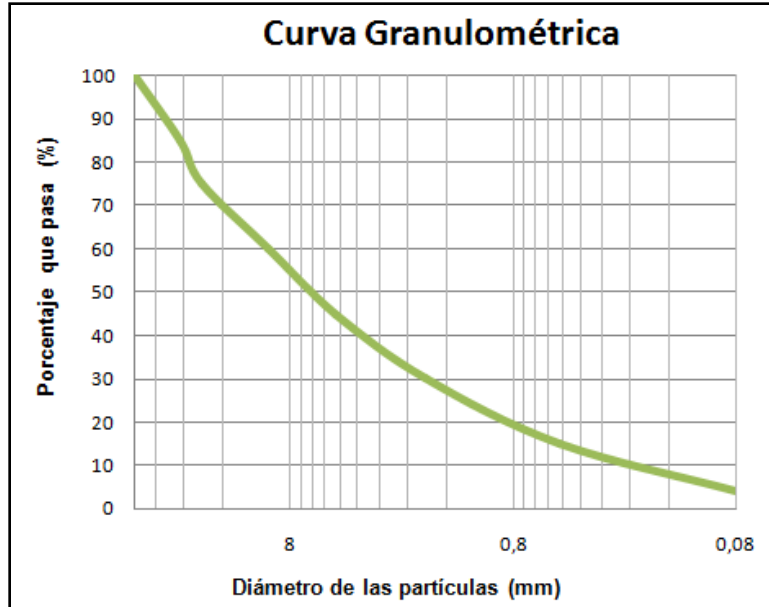


Figura 2.3.- Curva granulométrica

La forma de la curva granulométrica, indica la relación entre los tamaños y para un mayor análisis se definen los siguientes coeficientes.

- **Coefficiente de uniformidad (Cu)**

Se utiliza para saber el tipo de graduación. Un material está bien graduado si el coeficiente de uniformidad (Cu) es mayor a 4 si es grava, y es mayor a 6 si es arena.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.9)$$

Un valor grande de este parámetro, indica que los diámetros D_{60} y D_{10} , difieren en tamaño apreciablemente.

- **Coefficiente de curvatura (Cc)**

Evalúa la regularidad de la curva. Para gravas y arenas bien graduadas debe estar comprendido entre 1 y 3.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}D_{10}} \quad (2.10)$$

2.2.2- Límites de consistencia

Los límites de consistencia o límites de Atterberg, se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos.

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir cuatro estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregarle agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados semisólido, plástico y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de consistencia. En la figura 2.4, se muestra el esquema de los límites de consistencia.

Sólido	Semisólido	Plástico	Semilíquido	Líquido
LC		LP	LL	

Figura 2.4.- Esquema límites de consistencia

Se definen 3 límites:

- **Límite líquido:** Cuando el suelo pasa de un estado líquido a un estado plástico. Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande.
- **Límite plástico:** Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe.
- **Límite de retracción o contracción:** Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad.

Límite líquido (LL)

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante el ensayo aprobado por la norma chilena NCh 1517 I Of 79, en que una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada, se deposita en la "Cuchara de Casagrande", y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que la zanja que previamente se ha recortado, se cierra en una longitud de 12 [mm] (1/2"). En la figura 2.5, se muestra el ensayo de la cuchara de Casagrande.



Figura 2.5.- Determinación del límite líquido con la cuchara de Casagrande

Si el número de golpes para que se cierre la zanja es 25, la humedad del suelo (razón peso de agua/peso de suelo seco) corresponde al límite líquido. Dado que no siempre es posible que la zanja se cierre en la longitud de 12 [mm] exactamente con 25 golpes, existen dos métodos para determinar el límite líquido: - trazar una gráfica con el número de golpes en coordenadas logarítmicas, contra el contenido de humedad correspondiente, en coordenadas normales, e interpolar para la humedad correspondiente a 25 golpes. La humedad obtenida es el límite líquido. - según el método puntual, multiplicar por un factor (que depende del número de golpes) la humedad obtenida y obtener el límite líquido como el resultado de tal multiplicación.

Límite plástico (LP)

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento descrito por la norma chilena NCh 1517 II Of 79, que consiste en medir el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro de suelo, con un diámetro de 3 [mm]. Para esto, se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta conseguir un cilindro de 3 [mm] de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro, y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 [mm]. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad). Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al límite plástico. Se recomienda realizar este procedimiento al menos 3 veces para disminuir los errores de interpretación o medición. En la figura 2.6, se muestra la realización del ensayo para determinar el límite plástico.



Figura 2.6.- Determinación del límite plástico

2.2.3.- Sistema de clasificación AASHTO

El departamento de caminos públicos USA (*Bureau of Public Roads*) introdujo en 1929 uno de los primeros sistemas de clasificación, para evaluar los suelos sobre los cuales se construían las carreteras. En 1945 fue modificado y a partir de entonces se conoce como Sistema AASHTO y recientemente AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*).

Este sistema describe un procedimiento para clasificar suelos en siete grupos, basado en los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de granulometría y límites de consistencia. En la figura 2.7, muestra la clasificación de suelos según el sistema AASHTO.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO											
Clasificación general	Suelos Granulares (≤ 35% pasa 0,08 mm)						Suelos Finos (> 35% bajo 0,08 mm)				
Grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Sub-Grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6*	A-2-7*				A-7-5** A-7-6**
2 mm	≤ 50										
0,5 mm	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
0,08 mm	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35				≥ 36			
WL				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
IP	≤ 6		NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Descripción	Gravas y Arenas		Arena Fina	Gravas y Arenas Limosas o Arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
** A-7-5: IP ≤ (WL-30)						** A-7-6: IP > (WL-30)					
$IG = (B/0,08 - 35) (0,2 + 0,005 (WL - 40)) + (B/0,08 - 15) (IP - 10) \times 0,01$ $* \text{ Para A-2-6 y A-2-7: } IG = (B/0,08 - 15) (IP - 10) \times 0,01$ Si el suelo es NP → IG = 0; Si IG < 0 → IG = 0											

Figura 2.7.- Clasificación de los suelos según sistema AASHTO

(Fuente: Curso de Laboratorista Vial Volumen III, Geotecnia)

2.2.4.- Sistema de clasificación USCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) deriva de un sistema desarrollado por Arthur Casagrande para identificar y agrupar suelos en forma rápida en obras militares durante la guerra.

El sistema divide los suelos en dos grandes grupos: de granos gruesos y de granos finos.

Los primeros tienen más del 50% en peso de granos mayores que 0,08 [mm]; se representan por el símbolo G si más de la mitad, en peso de las partículas gruesas son retenidas en tamiz 5 [mm], y por el símbolo S si más de la mitad pasa por el tamiz 5 [mm]. Luego se les agrega una segunda letra que describe la graduación: W, buena graduación con poco o ningún fino; M, que contiene limo o limo y arena; C, que contiene arcilla o arena y arcilla.

Los suelos finos, con más del 50% bajo el tamiz 0,08 [mm], se dividen en tres grupos, las arcillas (C), los limos (M) y limos o arcillas orgánicos (O). Estos símbolos están seguidos por una segunda letra que depende de la magnitud del límite líquido e indica la compresibilidad relativa: L, si el límite líquido es menor a 50 y H, si es mayor

En la figura 2.8, se muestra la clasificación de suelos según el sistema USCS

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS				SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS								
SUELOS FINOS (≥ 50% pasa 0,08 mm)				SUELOS GRUESOS (< 50% pasa 0,08 mm)								
Tipo Suelo	Símbolo	Lím. Líquido WL	Índice de Plasticidad * IP	Tipo Suelo	Símbolo	% ret. en 5 mm	% Pasa * 0,08 mm	CU	CC	** IP		
Limos Inorgánicos	ML	< 50	< 0,73 (WL - 20) ó < 4	Gravas	GW	≥ 50% de lo retenido en 0,08 mm	< 5	> 4	1 a 3			
	MH	> 50	< 0,73 (WL - 20)		Si no cumple requisitos de GW es GP							
Arcillas Inorgánicas	CL	< 50	> 0,73 (WL - 20) y > 7		GM		> 12				< 0,73 (WL - 20) ó < 4	
	CH	> 50	> 0,73 (WL - 20)		GC						> 0,73 (WL - 20) y > 7	
Limos o arcillas Orgánicas	OL	< 50	** WL seco al horno ≤ 75% del WL seco al aire	Arenas	SW	< 50% de lo retenido en 0,08 mm	< 5	> 6	1 a 3			
	OH	> 50			Si no cumple requisitos de SW es SP							
Altamente Orgánicas	Pt	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente			SM		> 12				< 0,73 (WL - 20) ó < 4	
					SC						> 0,73 (WL - 20) y > 7	
* Si IP = 0,73 (WL - 20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (WL - 20), usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH				* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC								
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente WL seco al horno				** Si IP = 0,73 (WL - 20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (WL - 20), usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC								
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej: CH-MH en vez de CL-ML Si WL = 50; CL-CH ó ML-MH				En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica ej: GW-GM en vez de GW-GC								
				$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$			$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}}$					

Figura 2.8.- Clasificación de los suelos según sistema USCS

(Fuente: Curso de Laboratorista Vial Volumen III, Geotecnia)

2.3.- Compactación de los suelos

Se entenderá por compactación al proceso mecánico mediante el cual se disminuye la cantidad de huecos en una masa de suelo, obligando a sus partículas a un contacto más íntimo entre sí, aumentando así su densidad.

En general los beneficios de la compactación son:

- Aumentar la resistencia al corte y por consiguiente, mejorar la estabilidad y capacidad de carga de cimentaciones y pavimentos.
- Disminuir la compresibilidad y así reducir los asentamientos.
- Disminuir la relación de vacíos y por consiguiente, reducir la permeabilidad.
- Reduce el potencial de expansión, contracción o expansión por congelamiento.

2.3.1.- Factores principales que determinan el grado de compactación

La densidad final que se alcanza en un suelo, depende de varios factores. Entre los principales se pueden mencionar: la humedad, la energía de compactación aplicada y el tipo de suelo de que se trate.

2.3.1.1.- Efectos del agua

Si un suelo que contiene finos plásticos, se somete a un proceso de compactación, y se miden las densidades obtenidas para diferentes contenidos de agua (humedad), manteniendo constante la energía de compactación, se obtiene la curva típica densidad-humedad, la que se muestra en la figura 2.9.

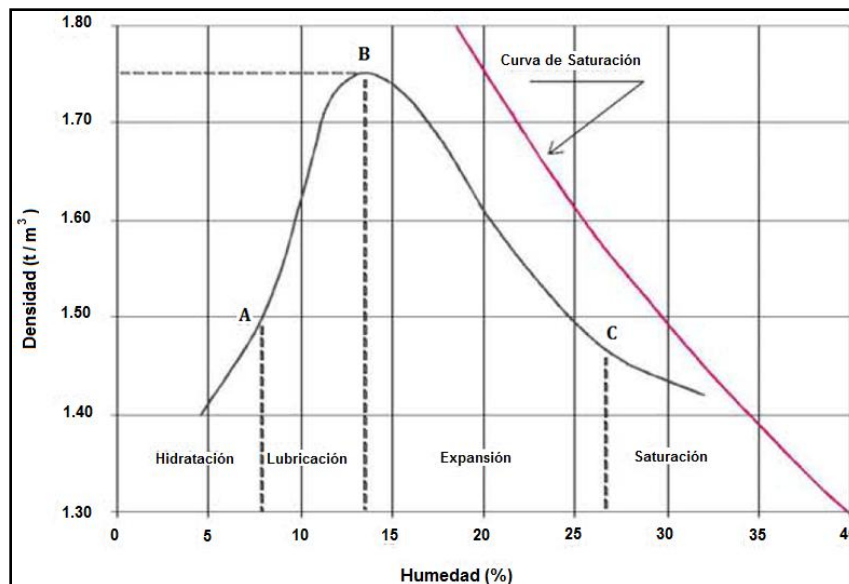


Figura 2.9.- Relación Humedad – Densidad

(Fuente: Manual de Carreteras Volumen 3)

A partir de un valor relativamente bajo, un incremento en el contenido de agua va acompañado de un aumento en la densidad seca obtenida. Este proceso continúa hasta cierto punto en el cual nuevos incrementos en el contenido de agua producen una disminución de la densidad lograda. El punto de mayor compactación corresponde a la densidad máxima y su correspondiente contenido de agua, a la humedad óptima, ambos valores para una energía de compactación dada. El suelo pasa por 4 estados, hasta el punto A de la figura corresponde el estado de hidratación, en el cual toda el agua está en forma de película de agua absorbida, firmemente adherida a las partículas sólidas y prácticamente no contribuye a mejorar la trabajabilidad de ellas.

El segundo estado, de A a B, corresponde al de lubricación, en el cual el aumento de espesor de la película de agua permite un mejor acomodo de las partículas de suelo, ayudando al proceso de compactación. El estado de hidratación y el de lubricación, situados al lado izquierdo de la densidad máxima, constituyen la “rama seca de la curva”. En ambos estados el aire de la fase fluida es “libre” y por lo tanto, puede drenar rápidamente durante la compactación.

El tercer estado, entre los puntos B y C, corresponde al de expansión, una mayor cantidad de agua tiende a separar las partículas sólidas. El aire se encuentra ocluido y no tiene posibilidad de drenar, manteniéndose en un volumen constante, lo que es evidenciado por un paralelismo de la curva de compactación con la línea de saturación.

El cuarto estado es el de saturación, en el cual es preponderante la proporción de agua en la fase fluida (S tiende a 1) y la pequeña cantidad de aire ocluido entra en disolución con una presión relativamente pequeña (Δ), acercándose la curva a la línea de saturación, que corresponde como se sabe, a la relación entre la densidad y la humedad cuando no existe aire en la fase fluida, sino solo agua.

2.3.1.2.- Energía de compactación

Para estudiar la influencia del esfuerzo de compactación se han desarrollado las relaciones humedad-densidad, para diferentes esfuerzos de compactación, obteniéndose la familia de curvas que se muestran en la figura 2.10.

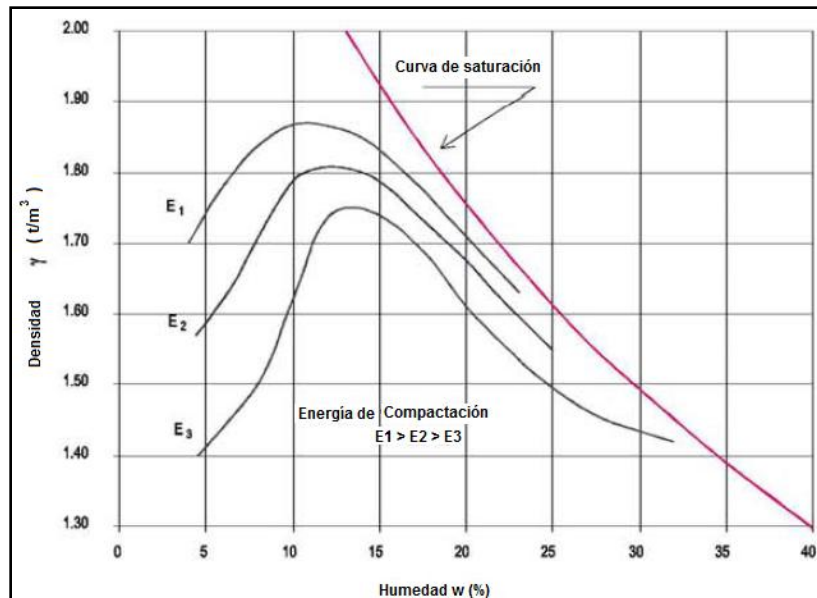


Figura 2.10.- Efecto de la energía de compactación en la relación Humedad – Densidad

(Fuente: Manual de Carreteras Volumen 3)

Se puede observar que a mayor energía de compactación aplicada se logrará una mayor densidad máxima, y una correspondiente menor humedad óptima.

Una conclusión directa es el hecho de que un suelo con exceso de agua no podrá alcanzar una determinada densidad, aun cuando se aumente la energía de compactación aplicada, ya que siempre estará limitado por la línea de saturación.

2.3.1.3.- Tipo de suelo

El tipo de suelo es un factor determinante en la densidad que se logre en un proceso de compactación. Su valor queda determinado en gran medida por características tales como su peso específico, textura, forma de sus partículas, plasticidad, etc. De aquí que no sea recomendable expresar el grado de compactación de un suelo en términos absolutos, sino como un porcentaje de la densidad máxima que alcanza ese mismo suelo, a través de un ensaye normalizado. El valor de la densidad máxima que se obtiene al compactar el suelo, de características normales, se encuentra en el rango de la tabla 2.2, que se muestra a continuación.

Tabla 2.2.- Densidad máxima según tipo de suelo

Tipo de Suelo (Clasificación AASHTO)	Densidad Máxima (kg/dm ³)
A-1	> 2,00
A-2	1,90 - 2,10
A-3	1,70 - 2,00
A-4	1,75 - 1,90
A-5	1,25 - 1,60
A-6	1,25 - 1,75
A-7	1,25 - 1,75

Fuente: Manual de Carreteras Volumen 3

2.3.2.- Formas de compactación

De acuerdo a la naturaleza de las fuerzas aplicadas y su duración, se puede distinguir las siguientes formas de compactación.

- Estática o Por Presión
- Por impacto
- Por vibración
- Por amasado

Cabe destacar que estas técnicas no son todos los modos posibles de entregar energía de compactación a un suelo, como también existen equipos que utilizan formas mixtas.

- Compactación estática o por presión

La compactación se logra utilizando una máquina pesada, cuyo peso comprime las partículas del suelo, sin necesidad de movimiento vibratorio. Por ejemplo: Rodillo estático o rodillo liso. En la figura 2.11, se muestra un rodillo estático.



Figura 2.11.- Rodillo estático

- Compactación por impacto

La compactación es producida por una placa apisonadora que golpea y se separa del suelo a alta velocidad. Por ejemplo: Un apisonador. En la figura 2.12, se muestra un apisonador



Figura 2.12.- Apisonador

- Compactación por vibración

La compactación se logra aplicando al suelo vibraciones de alta frecuencia. Por ejemplo: rodillos vibratorios. En la figura 2.13, se muestra un rodillo vibratorio.



Figura 2.13.- Rodillo vibratorio

- Compactación por amasado

La compactación se logra aplicando al suelo altas presiones distribuidas en áreas más pequeñas que los rodillos lisos. Por ejemplo: Un rodillo "Pata de Cabra". En la figura 2.14, se muestra un rodillo pata de cabra.



Figura 2.14.- Rodillo "Pata de cabra"

- Elección del método de compactación

Para suelos granulares, la compactación por vibración es la más eficaz y económica. La vibración permite que las partículas de suelo se acomoden en una configuración más cerrada, lo que disminuye la porosidad y aumenta su fricción. El efecto de vibración penetra más profundamente en el suelo, con lo que el espesor de las capas a compactar aumenta, contribuyendo esto a la economía del procedimiento.

Los suelos arenosos o limosos con cohesión moderada son compactados en forma adecuada mediante rodillos neumáticos, que se adaptan mejor para la compactación de limos y suelos no plásticos. Para compactar suelos plásticos, con cohesión relativamente baja pueden usarse rodillos pata de cabra. En ambos casos es preferible proceder en capas delgadas y con un contenido de humedad próximo a su óptimo.

Las arcillas sólo responden a la compactación mediante rodillos pata de cabra estáticos cuando el contenido de humedad es ligeramente superior al límite plástico. Esto se debe a que a medida que aumenta la cohesión, disminuye rápidamente la eficiencia de las vibraciones y de las presiones temporales como medio de compactación; ya que la adherencia entre partículas impide su desplazamiento a posiciones más estables.

2.3.3.- Compactación en laboratorio

La determinación de la compactación en laboratorio es de gran importancia, ya que al momento de controlar la compactación en terreno, se compara con la densidad máxima compactada seca obtenida en laboratorio, para conocer el grado de compactación y verificar que se cumple con el límite exigido por la normativa.

En obras viales es ampliamente utilizado el ensayo Proctor Modificado para la determinación de la densidad máxima compactada seca (DMCS) y la correspondiente humedad óptima.

2.3.3.1.- Proctor Modificado

Existen dos tipos de ensayos Proctor. Uno conocido como Proctor Normal, aprobado por la norma chilena NCh 1534 I Of 79, y otro conocido como Proctor Modificado, aprobado por la norma chilena NCh 1534 II Of 79. La diferencia entre ambos ensayos, es solo la mayor energía de compactación empleada en este último.

El ensayo Proctor Modificado es ampliamente utilizado en laboratorio para determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad compactada seca de los suelos.

Para obtener la curva humedad-densidad seca, es necesario realizar el ensayo sobre varias muestras del mismo suelo, donde se agrega distintos porcentajes de humedad y se obtiene distintas densidades compactadas secas, estos puntos forman la curva. Generalmente con cuatro o cinco de estos puntos ya se puede formar la curva, y por lo tanto, obtener la densidad máxima compactada seca (DMCS) y la correspondiente humedad óptima.

En la figura 2.15, se muestra la forma que debe tener la curva humedad-densidad.

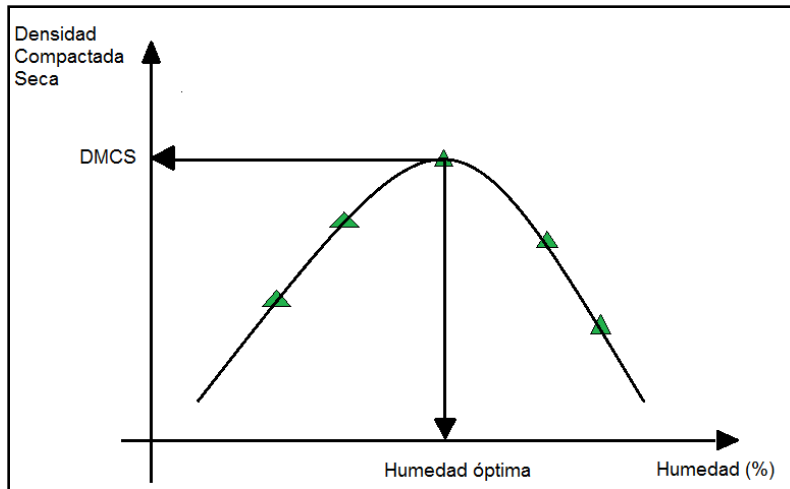


Figura 2.15.- Forma de la curva Humedad- Densidad

En esta prueba se utiliza un molde normalizado y un pisón de 4,5 [kg] de peso, además de otras herramientas de laboratorio. En la figura 2.16, se muestran estos aparatos.



Figura 2.16.- Molde y pisón normalizados para el ensayo Proctor Modificado

Se debe homogenizar el material con la humedad seleccionada. El suelo dentro del molde se debe compactar en 5 capas dando 56 golpes por capa, se deja caer el pisón en caída libre, desde una altura de 460 [mm]. Estos golpes deben ser distribuidos en forma aleatoria dentro del molde. En la figura 2.17, se muestra esta operación.



Figura 2.17.- Realización ensayo Proctor Modificado

Una vez que se termina este proceso, se debe enrasar y pesar el molde con el material, luego por diferencias de pesos y con el volumen del molde se obtiene la densidad húmeda del suelo.

Para conocer la densidad compactada seca se debe determinar la humedad del material mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515.

Este procedimiento se debe realizar para las 5 humedades seleccionadas, de manera de obtener los puntos de la curva humedad-densidad seca y por consiguiente conocer la densidad máxima compactada seca (DMCS) y la humedad óptima.

2.3.4.- Control de compactación en terreno

Se define como grado de compactación, a la relación en porcentaje, entre la densidad seca alcanzada en terreno y la densidad máxima compactada seca obtenida en laboratorio para el mismo suelo mediante el ensayo Proctor Modificado o algún otro método.

$$GC [\%] = \frac{\text{Densidad Seca del suelo "in situ"}}{DMCS} \times 100 \quad (2.11)$$

La densidad compactada seca del suelo en terreno se puede determinar por diferentes métodos, los que se utilizaron en este estudio se presentan a continuación:

- Método del cono de arena.
- Densímetro SDG 200.

2.3.4.1.- Método del cono de arena

El método del cono de arena fue utilizado primeramente por el cuerpo de ingenieros de USA y acogido por las normas ASTM y AASHTO. En Chile se encuentra aprobado por la norma chilena NCh 1516 Of 79.

Este método establece un procedimiento para determinar en terreno la densidad de suelos cuyo tamaño máximo absoluto de partículas sea menor o igual a 50 [mm] (2"). En este caso se utiliza el cono convencional.

Materiales

Cono convencional

Aparato medidor de volumen, provisto de una válvula cilíndrica de 12,5 [mm] de abertura, que controla el llenado de un cono de 6" de diámetro y 60° de ángulo basal. Un extremo termina en forma de embudo y su otro extremo se ajusta a la boca de un recipiente de aproximadamente 5 [litros] de capacidad. La válvula debe tener topes que permitan fijarla en su posición completamente cerrada o completamente abierta.

El aparato debe llevar una placa base para facilitar su ubicación y reducir las pérdidas al transferir el suelo desde la perforación al envase. En la figura 2.18, se muestra el cono de arena.



Figura 2.18.- Cono de arena

Arena de ensayo

Es una arena normalizada que se compone de partículas cuarzosas sanas, subredondeadas, no cementadas y comprendidas entre 0,5 [mm] y 2 [mm], debe estar lavada y seca en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Depósito para calibración de arena de ensayo

En el caso del cono convencional, el depósito para calibrar la arena consiste en un recipiente metálico, de forma cilíndrica, de 165 [mm] de diámetro interior, impermeable y una capacidad volumétrica entre 3 y 3,5 [litros]. En la figura 2.19, se muestra el depósito utilizado para la calibración de la arena.



Figura 2.19.- Depósito para calibración de arena de ensayo

Materiales complementarios para el trabajo en laboratorio

Balanza, brocha, pailas, horno y termómetro.

Materiales complementarios para el trabajo en terreno

Combo, huincha, punto, cuchara, brocha, bolsas, balanza y guantes.

En la figura 2.20, se muestran algunos de los materiales necesarios para realizar el ensayo del cono de arena en terreno.



Figura 2.20.- Materiales complementarios para realizar un ensayo de cono de arena

2.3.4.2.- Densímetro SDG 200



Figura 2.21.- Densímetro SDG 200

- Características principales

El densímetro de la marca TransTech, modelo (SDG) 200, utiliza tecnología de última generación y sus principales características son:

- No se requieren licencias especiales o materiales radioactivos.
- Liviano y fácil de usar.
- 12 horas de funcionamiento portátil.
- Mide densidad en unidades comunes ([lb/ft³] o [kg/m³]).
- Mide porcentaje de humedad.
- Almacena grandes cantidades de lecturas en registro interno de datos.
- Descarga de datos por medio de unidad flash USB (formato de archivo de texto delimitado por punto y coma).

- Tecnología de medición

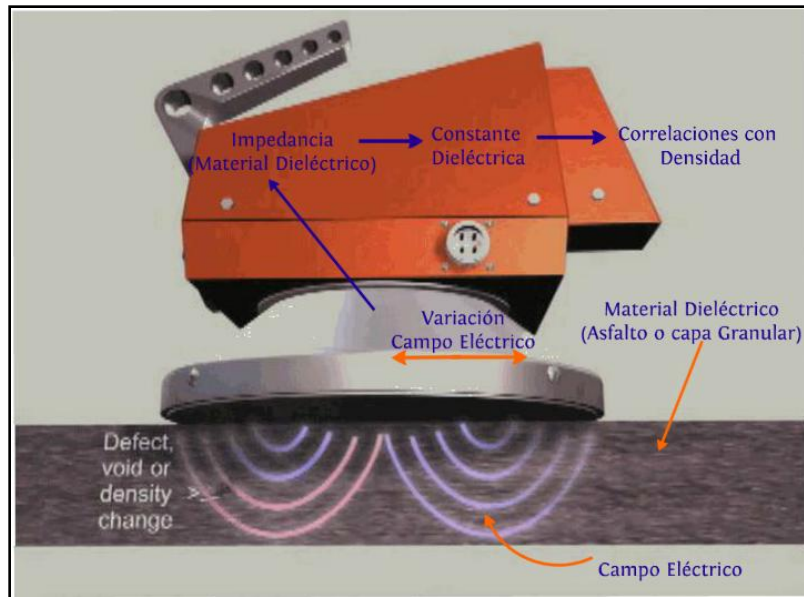


Figura 2.22.- Tecnología de medición del densímetro SDG 200

(Fuente: Presentación Izcra Reyes INDEX S.A)

El equipo genera un campo electromagnético utilizando un transmisor, trabaja a frecuencias de un megahercio (valores comprendidos entre AM y FM). Este equipo se basa en el principio de impedancia eléctrica del material ensayado.

Por medio de la espectroscopia de impedancia eléctrica (EIS) la medición del SDG permite la separación de los efectos del contenido de humedad y la densidad del suelo en la respuesta del suelo al sondeo electromagnético.

El equipo mide la respuesta eléctrica del suelo frente a las variaciones del campo eléctrico generado sobre el material. El nivel de interferencia de este campo eléctrico es medido como la diferencia entre las líneas de campo generadas en el electrodo emisor y las leídas por el electrodo receptor. Esto se traduce en la medición de la impedancia eléctrica del material, la cual es correlacionada con la densidad.

Dado que la constante dieléctrica del aire es bastante menor que la de otros componentes del suelo, a medida que la densidad/compactación crece, la constante dieléctrica combinada aumenta, ya que el porcentaje de aire en la matriz de suelo disminuye.

Normalización del equipo

Una vez encendido el equipo, se debe realizar una prueba de estandarización o normalización, la cual se efectúa desde el interior de la caja de transporte, sobre la placa de acero, situada en la parte inferior de la caja. Este procedimiento se debe hacer lejos de objetos metálicos o antenas de gran tamaño que puedan interferir en sus resultados.

Funcionamiento del equipo

El SDG está destinado básicamente para hacer mediciones de densidad en un espesor de suelo estándar de 30 [cm] durante o después de la compactación. Está diseñado para ser utilizado en materiales granulares gruesos y finos, comunes en suelos estándar usados en proyectos de construcción, luego de configurar el equipo con las propiedades obtenidas mediante los ensayos de granulometría, límites de consistencia, y Proctor Modificado.

Seguridad

El equipo es compatible con las normativas vigentes de salud y seguridad, no necesita de ningún tipo de permiso o autorización especial. Sin embargo se debe tener precaución de no utilizarlo cerca de cables eléctricos. No se deben realizar mediciones cerca de grandes objetos metálicos, ya que estos pueden interferir en los resultados.

Procedimiento de medición

El SDG ha sido diseñado para determinar la humedad y la densidad en una muestra de suelo compactado sin la necesidad de una compensación (en USA). La habilidad para medir humedad y densidad se basa en un modelo empírico que fue desarrollado al estudiar tipos de suelo comunes, con contenidos de humedad cercanos al óptimo con una distribución típica de tamaño de partículas. Como la medición del SDG se basa en un modelo empírico, habrá ocasiones donde el suelo medido es tan distinto de uno que ha sido previamente estudiado, que puede ser necesaria una compensación para permitir al SDG entregar resultados aceptables.

Se deben ingresar las compensaciones para la densidad húmeda y el porcentaje de humedad manualmente por el operador, estas pueden ser sumadas o restadas a la densidad húmeda y porcentaje de humedad calculada por el SDG. La densidad seca, densidad húmeda, porcentaje de humedad y grado de compactación, son recalculados, basados en los valores de compensación ingresados.

Determinación de los valores de la compensación

Para determinar las compensaciones de densidad húmeda y porcentaje de humedad, se deben tomar en tres a cinco puntos representativos, mediciones con el SDG 200 y algún otro método normado en los mismos puntos, para calcular el promedio de las diferencias entre ambos métodos, la que será la compensación a ingresar al equipo. Esta compensación se debe verificar en intervalos durante el desarrollo de la obra, y calcular una nueva, si se cambian los materiales de trabajo. La compensación se guardará en el equipo para trabajar con ese material.

Detalles del tipo de suelo

La densidad determinada por el equipo depende del material dieléctrico que se está controlando, es decir, según el tipo de mezcla de suelos, por lo tanto, es de vital importancia que la información ingresada para caracterizar cada tipo de suelo sea precisa. El equipo está configurado para almacenar hasta 20 tipos de suelos diferentes, que se identifican por las descripciones introducidas por el operador. Se deben ingresar al equipo los valores de calibración que se obtienen a partir de los ensayos de granulometría, límites de consistencia y Proctor Modificado.

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1.- Metodología para realizar el ensayo del cono de arena

Esta metodología describe el procedimiento que se utilizó para la realización de una prueba de control de compactación en terreno, con el método del cono de arena.

- **Determinación de la capacidad volumétrica del depósito en el cual se realizará la determinación de la densidad aparente de la arena de ensayo**
 - Se coloca el depósito limpio y seco, sobre una superficie plana, firme y horizontal.
 - Se llena con agua a temperatura ambiente y se enrasa con una placa de vidrio, eliminando burbujas de aire y exceso de agua.
 - Se determina la masa de agua que llena el depósito, como también su temperatura para así tener la densidad del agua a esa temperatura.
 - Se calcula la capacidad volumétrica dividiendo la masa de agua que llena el depósito por su densidad a la temperatura determinada.

En la figura 3.1, se muestra la determinación de la capacidad volumétrica del depósito.



Figura 3.1.- Determinación de la capacidad volumétrica del depósito

- **Determinación de la densidad aparente de la arena de ensayo**
 - Se coloca el depósito limpio y seco, sobre una superficie plana, firme y horizontal.
 - Se llena el aparato de densidad con arena de ensayo y se monta sobre la placa base encima del depósito.
 - Se abre la válvula y, una vez que la arena deje de fluir, se retira el equipo de densidad, se enrasa y se determina la masa que llena el depósito.
 - Se calcula la densidad de la arena como el promedio de cinco determinaciones, si la diferencia entre los valores extremos de las cinco determinaciones realizadas no excede de 1,5%, respecto de la media aritmética de ellas.

En la figura 3.2, se muestra la determinación de la densidad aparente de la arena de ensayo.



Figura 3.2.- Determinación de la densidad aparente de la arena de ensayo

- **Determinación de la masa de arena que llena el cono basal**

- Se coloca la placa base sobre una superficie plana, firme y horizontal.
- Se llena el aparato de densidad con arena de ensayo, registrando su masa inicial.
- Se coloca el aparato de densidad sobre la placa base.
- Se abre la válvula y se cierra una vez que la arena deja de fluir.
- Se retira y pesa el aparato de densidad, registrando la arena remanente, luego se calcula la arena que llena el cono por diferencia de masas.
- Se calcula la masa de arena que llena el cono como el promedio de tres determinaciones, si la diferencia entre los valores extremos de las tres determinaciones realizadas no excede de 1,0%, respecto de la media aritmética de ellas.

En la figura 3.3, se muestra la determinación de la arena que llena el cono basal



Figura 3.3.- Determinación de la arena que llena el cono basal

- **Determinación de la densidad del suelo en terreno**

- Se selecciona y prepara la superficie a controlar, se limpia con una brocha si es necesario, para acomodar la placa base en posición firme y nivelada.
- Se excava dentro de la abertura de la placa base, se deposita el suelo excavado en una bolsa hermética, se registra la masa de suelo húmedo como la totalidad del suelo excavado y posteriormente se calcula su humedad en laboratorio mediante secado en horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Se registra la masa del aparato de densidad con el total de arena de ensayo, y se coloca sobre la placa base abriendo la válvula hasta que la arena deje de fluir.
- Se retira el aparato y se registra la masa remanente, y por diferencias de masas se determina la masa de arena contenida en la perforación.
- Se determina el volumen de la perforación dividiendo la masa de arena contenida en la perforación con la densidad aparente de la arena de ensayo.
- Se determina la densidad húmeda, dividiendo la totalidad de suelo excavado con el volumen de la perforación.
- Una vez finalizado el ensayo, se recupera la arena de ensayo, para acondicionarla para una nueva utilización.
- Luego se debe determinar la humedad del material, para recién poder calcular la densidad seca y por consiguiente el grado de compactación.

En la figura 3.4, se muestra la realización de un ensayo con el método del cono de arena en terreno.



Figura 3.4.- Control de compactación en terreno con el método del cono de arena

- **Determinación de la humedad del material extraído**

El material extraído en el ensayo del cono de arena, se lleva al laboratorio para determinar la humedad en horno, según la norma chilena NCh 1515. Este proceso demora alrededor de 24 horas. Una vez que es determinada la humedad en laboratorio, se determina la densidad compactada seca y el grado de compactación.

En la figura 3.5, se muestra el secado en horno a 110 ± 5 ° C del material extraído.



Figura 3.5.- Determinación de la humedad del material extraído en horno según la NCh 1515

Observaciones:

- Para obtener mejores resultados es deseable contar con una arena uniforme o de un solo tamaño, para evitar problemas de segregación, de modo que con las condiciones de vaciado se pueda lograr la misma densidad aparente obtenida mediante la calibración de la arena en laboratorio.
- Se debe calibrar la arena constantemente ya que esta puede adquirir humedad o partículas finas, lo que cambia su densidad. Si se controla constantemente se obtendrán resultados más exactos.
- En el momento que se realiza el ensayo en terreno, se debe evitar cualquier tipo de vibración en el área circundante, ya que esto puede provocar un exceso de arena en el agujero.
- En suelos en que predominan las partículas gruesas es recomendable determinar la humedad sobre el total del material extraído.

3.2.- Metodología de uso del densímetro SDG 200

Esta metodología describe el procedimiento que se utilizó para la realización de una prueba de control de compactación en terreno con el SDG 200 de acuerdo a lo establecido en el manual de usuario del equipo.

Definir unidades

Se deben definir las unidades de densidad y temperatura en las que se quiere trabajar. Estas unidades se definen por separado.

Definir detalles del proyecto

Se debe definir el nombre y los detalles de proyecto. Automáticamente se creará una carpeta con el nombre del proyecto, en donde se almacenarán los resultados obtenidos.

Definir detalles del tipo de suelo

Para caracterizar el suelo en donde se realizarán los controles, se deben ingresar al equipo los valores de calibración que se obtienen a partir de los ensayos de granulometría, límites de consistencia y Proctor Modificado. La densidad determinada por el equipo depende del material dieléctrico que se está controlando, es decir, según el tipo de mezcla de suelos, por lo que es de vital importancia que la información ingresada para caracterizar cada tipo de suelo sea precisa. Los datos que se deben ingresar al equipo en forma digital se presentan a continuación:

- Identidad del material
- Descripción
- DMCS
- Humedad óptima
- Porcentaje > 3"
- Porcentaje > ¾"
- Porcentaje de Grava (sobre malla n°4)
- Porcentaje de Arena (bajo malla n°4 y sobre malla n°200)
- Porcentaje de Finos (bajo malla n°200)
- Límite líquido (LL)
- Límite plástico (LP)
- Coeficiente de uniformidad (Cu)
- Coeficiente de curvatura (Cc)
- Compensación densidad húmeda
- Compensación humedad

Determinación de valores de compensación

Se deben determinar las compensaciones de densidad húmeda y porcentaje de humedad, para ello se requiere comparar en tres a cinco puntos representativos los resultados obtenidos con el SDG 200 y algún otro método normado, en este trabajo se utilizó el método de cono de arena como referencia.

La diferencia promedio entre los resultados obtenidos con el SDG 200 y el método del cono de arena, será la compensación que se ingresará al equipo.

Si el SDG 200 mide por debajo de los valores del equipo de referencia, la compensación será positiva, mientras que si el SDG 200 mide por sobre los valores del equipo de referencia, la compensación será negativa. Las compensaciones se ingresan como una característica más del material.

Pruebas realizadas con el densímetro SDG 200 en terreno

Antes de realizar una prueba, se debe preparar la superficie del terreno donde se realizará esta, limpiando con una brocha si es necesario y evitando material suelto. También se debe verificar que no se encuentren objetos metálicos cerca del equipo al momento de realizar la prueba, que puedan interferir en los resultados.

Una prueba completa consiste en cinco mediciones individuales tomadas en un patrón en forma de "trébol" en el lugar de prueba, se realiza la primera lectura en el centro, enseguida se mueve aproximadamente 5 cm, hacia arriba y hacia la derecha en la parte exterior del círculo. En la pantalla se resalta el número de la lectura así como la posición del equipo, se continúa con el proceso hasta completar las cinco lecturas individuales, cada una de las cinco mediciones demora alrededor de 25 segundos. En la figura 3.6, se muestra el tipo de medición en forma de trébol.

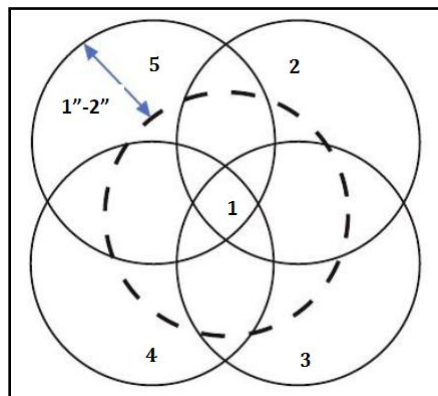


Figura 3.6.- Formato de medición en forma de trébol

Para facilitar la operación se recomienda dibujar un círculo alrededor del equipo como se puede ver en la figura 3.7, para así llevar el movimiento de forma más ordenado.



Figura 3.7.- Medición con el densímetro SDG 200 en terreno

Una vez que se han tomado las 5 posiciones, el equipo entrega el resultado como el promedio de estas. Los resultados que entrega el equipo son: grado de compactación, densidad compactada seca, densidad compactada húmeda, humedad (%) y temperatura del suelo. Estos datos son guardados en la carpeta del proyecto que se está trabajando, una vez que se acepta el resultado.

En la figura 3.8, se muestra un esquema con la metodología de uso del densímetro SDG 200.

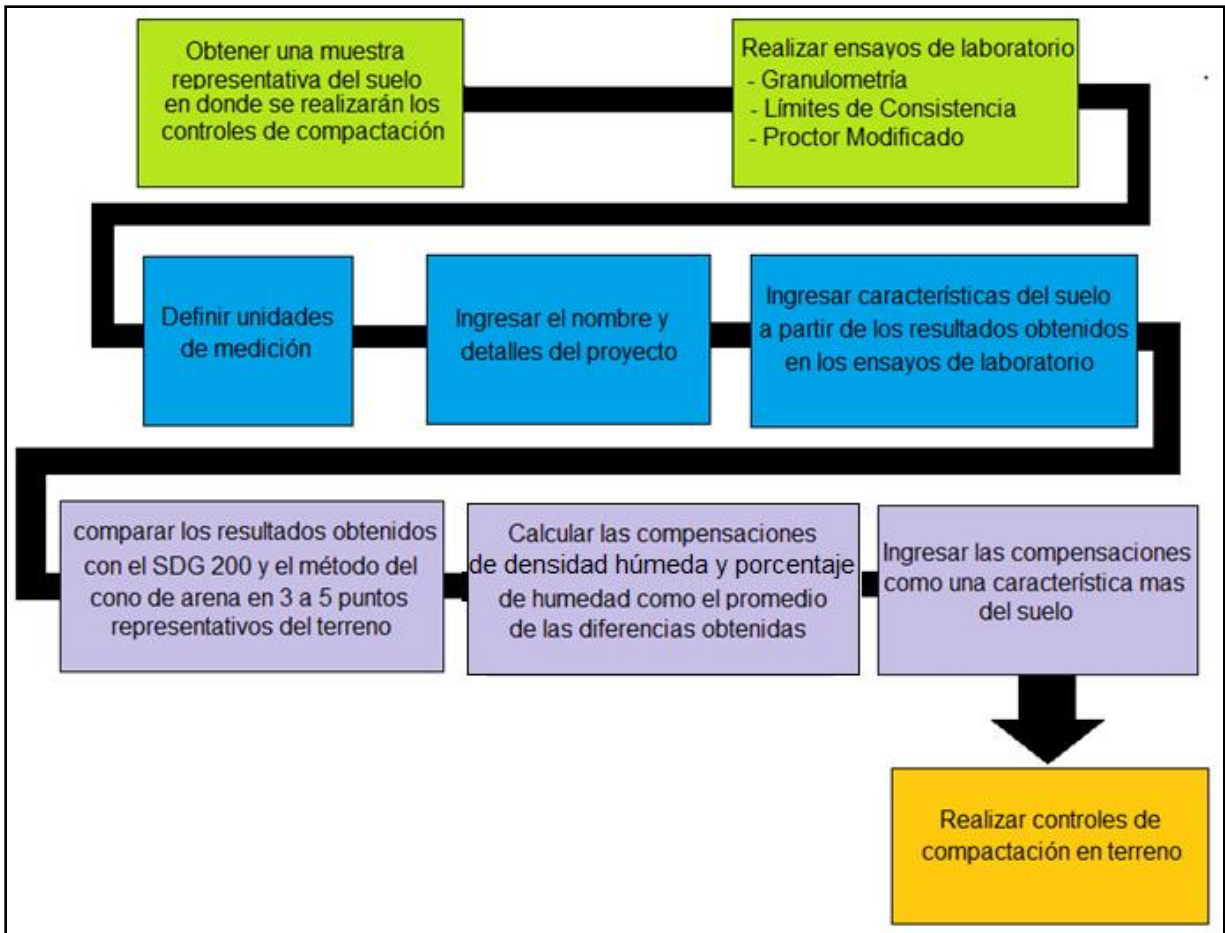


Figura 3.8.- Diagrama de flujo de metodología de uso del densímetro SDG 200

CAPÍTULO IV: PROGRAMA EXPERIMENTAL Y OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS

Para desarrollar el estudio, este se dividió en tres etapas, las que se detallan a continuación:

a) Primera etapa: Obtención y preparación de la muestra.

- Obtención de la muestra.
- Homogenización del suelo y preparación del material necesario para cada ensayo de laboratorio.

b) Segunda etapa: Trabajo realizado en laboratorio.

- Realización de ensayos de granulometría y límites de consistencia.
- Clasificación de los suelos en los sistemas AASTHO y USCS.
- Realización del ensayo Proctor Modificado.
- Realización de los demás ensayos correspondientes para que puedan ser ocupados estos suelos como bases granulares según la normativa vigente.

c) Tercera etapa: Trabajo realizado en terreno.

- Ingreso de valores de calibración al equipo para un determinado suelo.
- Metodología empleada para realizar las pruebas.
- Descripción de los lugares donde se realizaron las pruebas.

En la figura 4.1, se muestra un esquema de los pasos a seguir en esta investigación.

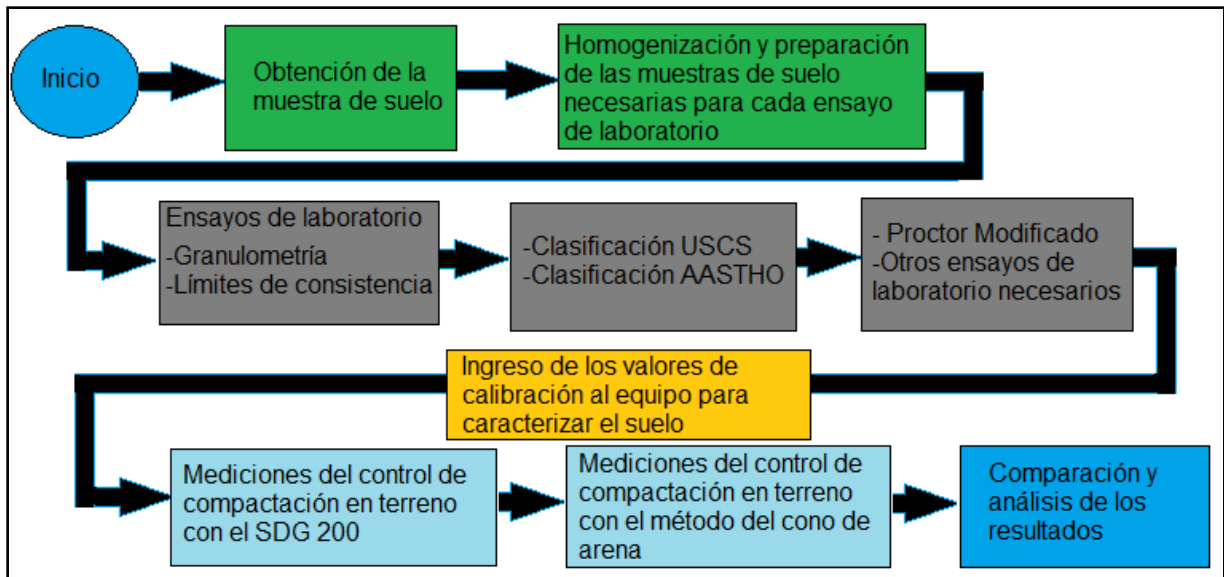


Figura 4.1.- Esquema de los pasos a seguir en el desarrollo del trabajo

4.1.- Primera etapa del trabajo

4.1.1.- Obtención de la muestra

Antes de realizar los controles de compactación, se tomaron muestras de los suelos en los que se realizaron dichos controles, para realizar los ensayos de laboratorio necesarios.

- a) El primer suelo analizado corresponde a la base granular utilizada para la construcción de la ruta F-50, la que se compone de 70% base Boco y 30% de maicillo, que se mezcla en una planta mezcladora de base, ubicada a un costado de la ruta F-50. En la figura 4.2, se muestra el lugar donde se obtuvo la muestra.



Figura 4.2.- Obtención de la muestra de base granular n°1

- b) El segundo material analizado corresponde a la base granular Boco pura, la que se obtuvo en los acopios de la construcción de la ruta F-50 antes que esta sea mezclada con maicillo. En la figura 4.3, se muestra el lugar donde se obtuvo la muestra.



Figura 4.3.- Obtención de la muestra de base granular n° 2

4.1.2.- Homogenización del suelo y preparación del material para cada ensayo

Una vez que el material es llevado al laboratorio, se procede a la homogenización y selección del material necesario para cada ensayo mediante cuarteo, siguiendo lo establecido en la norma chilena NCh 164. En la figura 4.4, se muestra esta operación.



Figura 4.4.- Homogenización y preparación del suelo a ensayar

El material para cada ensayo debe ser seleccionado mediante cuarteo, repitiendo la operación cuantas veces sea necesario, hasta llegar a la cantidad requerida, luego se prepara y almacena de acuerdo a como cada ensayo a realizar lo requiera.

4.2.- Segunda etapa del trabajo

En esta etapa, se realizaron los ensayos de laboratorio necesarios para clasificar y caracterizar los suelos en los cuales se realizaron los controles de compactación en terreno.

Se hizo el análisis granulométrico según lo establecido en la norma chilena NCh 165 Of 77 y límites de consistencia según la norma chilena NCh 1517 Of 79.

Se clasificaron los suelos en los sistemas de clasificación AASHTO y USCS, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de granulometría y límites de consistencia.

Luego se realizó el ensayo Proctor Modificado según lo establecido a la norma chilena NCh 1534 II Of 79 .Para así poder conocer la densidad máxima compactada seca (DMCS) y la correspondiente humedad óptima w (%).

Además se le realizaron a los suelos, los ensayos necesarios para verificar que pueden ser utilizados como material para bases granulares según la normativa. Estos ensayos se presentan a continuación.

- a) **Cubicidad de partículas:** Según el procedimiento descrito en el Volumen 8 del Manual de Carreteras, en la sección 8.202.6.
- b) **Densidad de partículas sólidas:** Según el procedimiento descrito en el Volumen 8 del Manual de Carreteras, en las secciones 8.102.10 y 8.202.20.
- c) **Desgaste de los Ángeles:** Según el procedimiento descrito en el volumen 8 el manual de carreteras, en la sección 8.202.11.
- d) **CBR (Razón de soporte de California):** Según el procedimiento descrito en el volumen 8 del Manual de Carreteras, en la sección 8.102.11.

4.3.- Tercera etapa del trabajo

Esta etapa corresponde a la descripción del trabajo realizado en terreno.

4.3.1.- Ingreso de valores de calibración al equipo para un determinado suelo

Se ingresaron al Densímetro SDG 200 los valores de calibración para un determinado suelo, para poder caracterizar el suelo en donde se realizaron los controles. Estos valores se ingresaron a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de granulometría, límites de consistencia y Proctor Modificado. Es de vital importancia que estos valores sean representativos del suelo en que se realizaron las pruebas.

4.3.2.- Metodología empleada para realizar las pruebas

Se realizaron pruebas en terreno con el densímetro SDG 200, utilizando el formato de medición en forma de trébol, una vez finalizada cada prueba, se realizó una prueba con el método del cono de arena en el mismo punto. Para así comparar y analizar los resultados.

Al momento de realizar los controles de compactación no se ingresaron las compensaciones al equipo de forma inmediata, para así poder saber si las diferencias entre ambos equipos se mantenía constante en la totalidad de las comparaciones y ver si era válido realizar las compensaciones como lo establece el manual del equipo.

En la figura 4.5, se muestra la metodología empleada para realizar las pruebas.

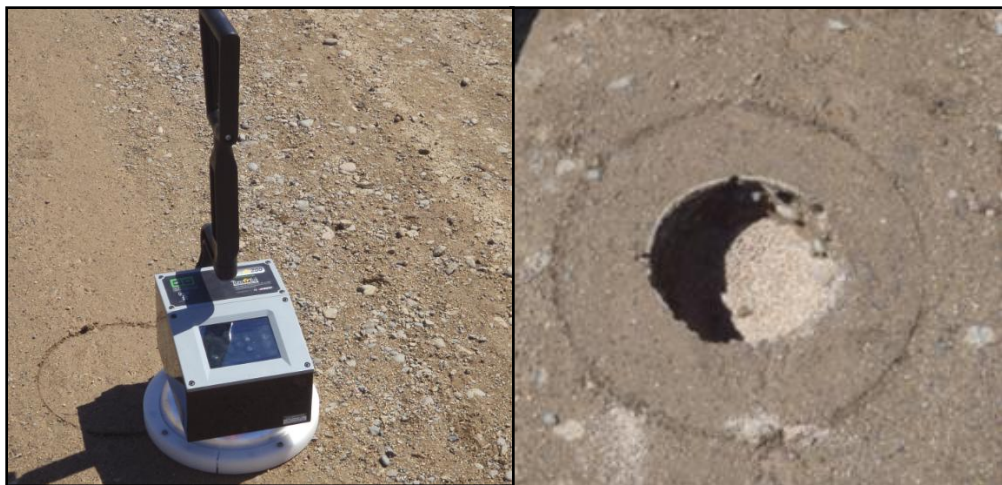


Figura 4.5.- Metodología empleada para realizar las pruebas

4.3.3.- Descripción del lugar donde se realizaron las pruebas

- a) Las pruebas para la primera base granular analizada, la que se compone de 70% base Boco y 30% de maicillo, se efectuaron en la construcción de la ruta F-50. Se realizaron controles de compactación a lo largo de la obra, generalmente estos eran cada 100 metros.

Los controles se realizaron durante los meses de Enero, a Abril del 2013, a medida que entregaban tramos de bases granulares en el desarrollo de la obra. En estos tramos una vez que eran aprobados por la unidad de Topografía, se podían efectuar los controles de compactación, una vez que se verificaba el cumplimiento de la compactación deseada, estos se imprimaban inmediatamente para la posterior colocación de las capas de asfalto. Esta situación limitaba el tiempo de control y la frecuencia de este, realizando estos controles a medida que avanzaba la obra.

A continuación, se muestran imágenes de los controles de compactación realizados en la base granular n°1. En la figura 4.6, se muestra una prueba realizada con el densímetro SDG 200, mientras que en la figura 4.7, se muestra una prueba realizada con el método del cono de arena.

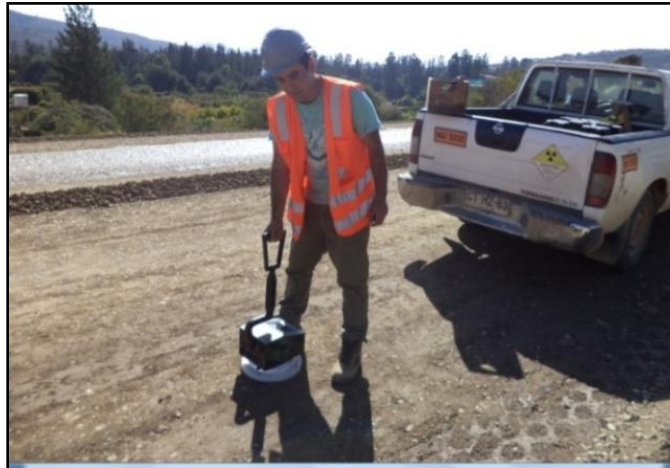


Figura 4.6.- Prueba realizada con el densímetro SDG 200 en la base granular n°1



Figura 4.7.- Prueba realizada con el método del cono de arena en la base granular n°1

- b) Los controles de compactación para la segunda base granular analizada, que corresponde a una base granular Boco pura, se realizaron en una cancha de pruebas preparada por la constructora para efectos de este estudio. En la figura 4.8, se muestra la preparación de la cancha de pruebas, donde se utilizó para la compactación, un rodillo vibratorio.



Figura 4.8.- Preparación de la cancha de pruebas de base granular nº 2

En esta cancha de pruebas se realizaron 12 controles con ambos equipos, como se puede ver en la figura 4.9. Estos controles de compactación se efectuaron en dos días.



Figura 4.9.- Esquema de controles de compactación realizados en la base granular nº2

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.- Presentación de resultados obtenidos en laboratorio

Todos los ensayos se realizaron de acuerdo a la normativa vigente.

5.1.1.- Ensayo de granulometría

a) Base n° 1: Base granular Boco + maicillo

Tabla 5.1.- Granulometría base granular n°1

Granulometría n° 1				
N° Tamiz	Abertura (mm)	Pasa (%)	TM-50C	
			Min	Max
1 1/2"	40	100	100	100
1"	25	88	70	100
3/4"	20	78	60	90
3/8"	10	62	40	75
N° 4	5	51	30	60
N° 10	2	35	15	45
N° 40	0,5	18	10	30
N° 200	0,08	5	0	15

Coefficiente de uniformidad	54,5
Coefficiente de curvatura	1,2

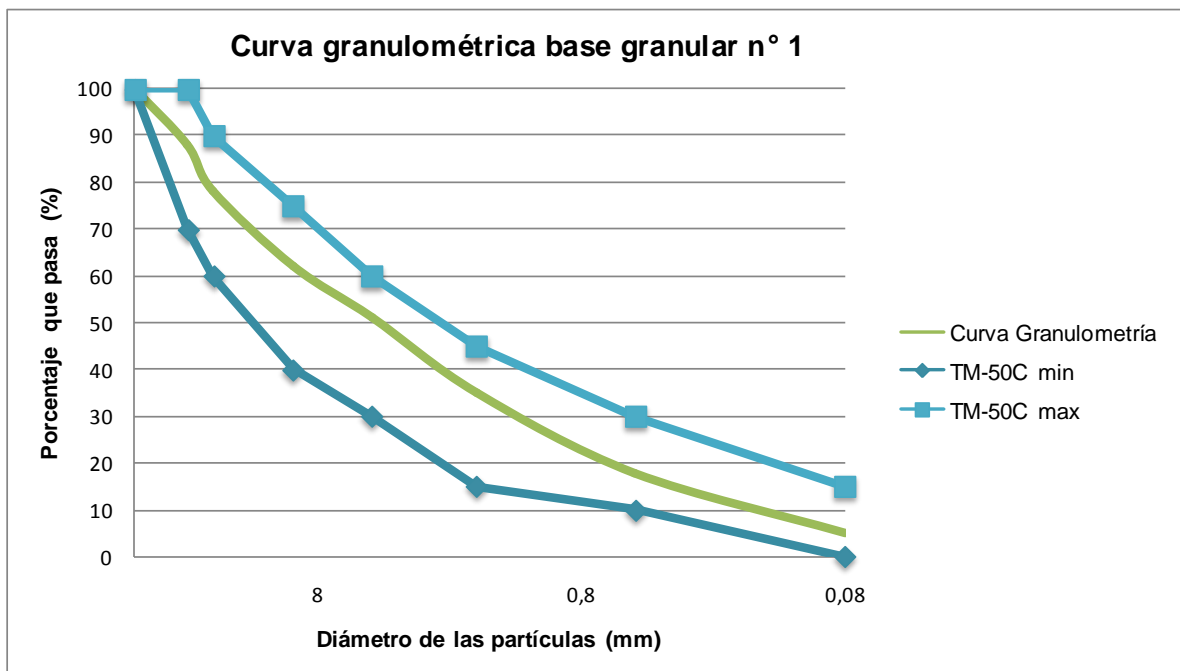


Figura 5.1.- Curva granulométrica de la base granular n° 1

b) Base n° 2: Base granular Boco pura

Tabla 5.2.- Granulometría base granular n°2

Granulometría n° 2				
N° Tamiz	Abertura (mm)	Pasa (%)	TM-50C	
			Min	Max
1 1/2"	40	100	100	100
1"	25	87	70	100
3/4"	20	68	60	90
3/8"	10	42	40	75
N° 4	5	30	30	60
N° 10	2	22	15	45
N° 40	0,5	14	10	30
N° 200	0,08	4	0	15

Coefficiente de uniformidad	67,3
Coefficiente de curvatura	6,4

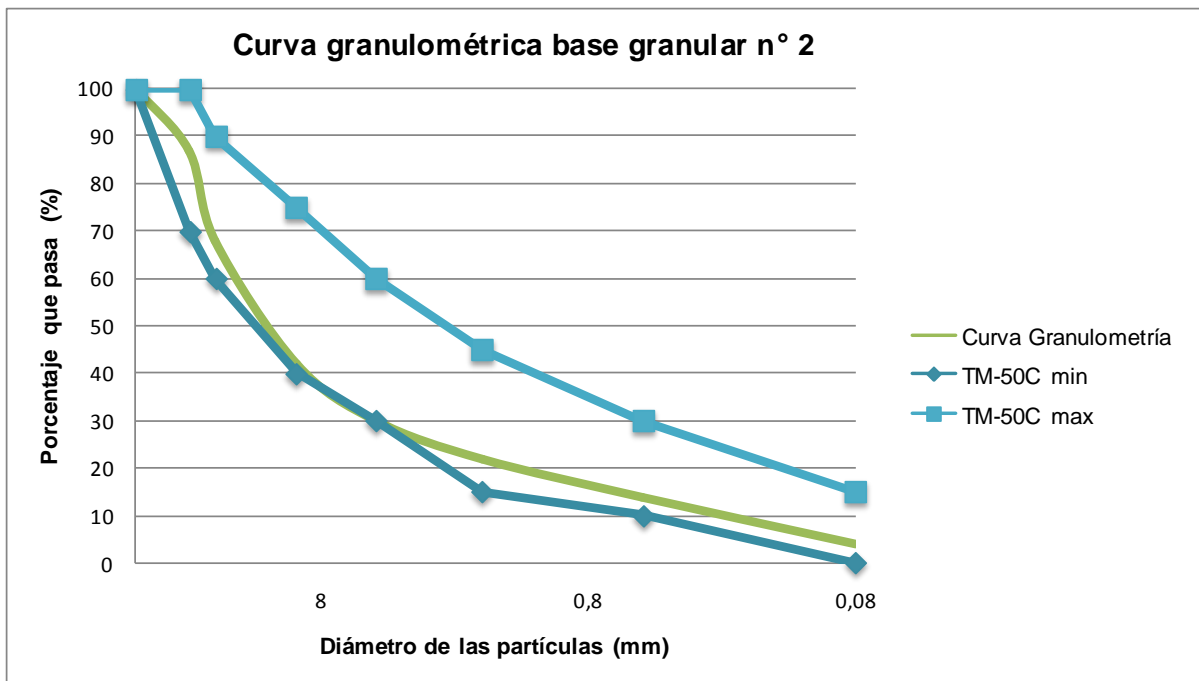


Figura 5.2.- Curva granulométrica de la base granular n°2

5.1.2.- Límites de Consistencia

Ambos materiales son no plásticos.

5.1.3.- Proctor Modificado

a) Base n° 1: Base granular Boco + maicillo

Tabla 5.3.- Proctor modificado base granular n°1

Determinación	1	2	3	4	5
Densidad compactada seca (kg/m ³)	2130	2210	2230	2220	2160
Humedad (%)	2,7	4,4	6,6	7,6	9,4
DMCS (kg/m ³)	2232				
Humedad óptima (%)	6,3				

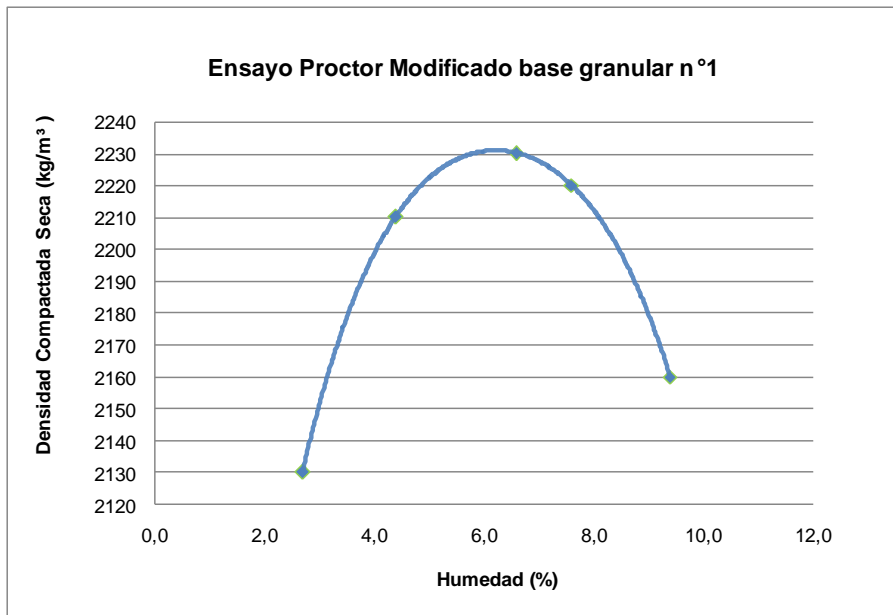


Figura 5.3.- Curva Densidad - Humedad Proctor modificado base granular n°1

b) Base n° 2: Base granular Boco pura

Tabla 5.4.- Proctor modificado base granular n°2

Determinación	1	2	3	4	5
Densidad compactada seca (kg/m ³)	2160	2200	2280	2250	2160
Humedad (%)	3,9	5,6	7,1	7,9	9,4
DMCS (kg/m ³)	2282				
Humedad óptima (%)	7,4				

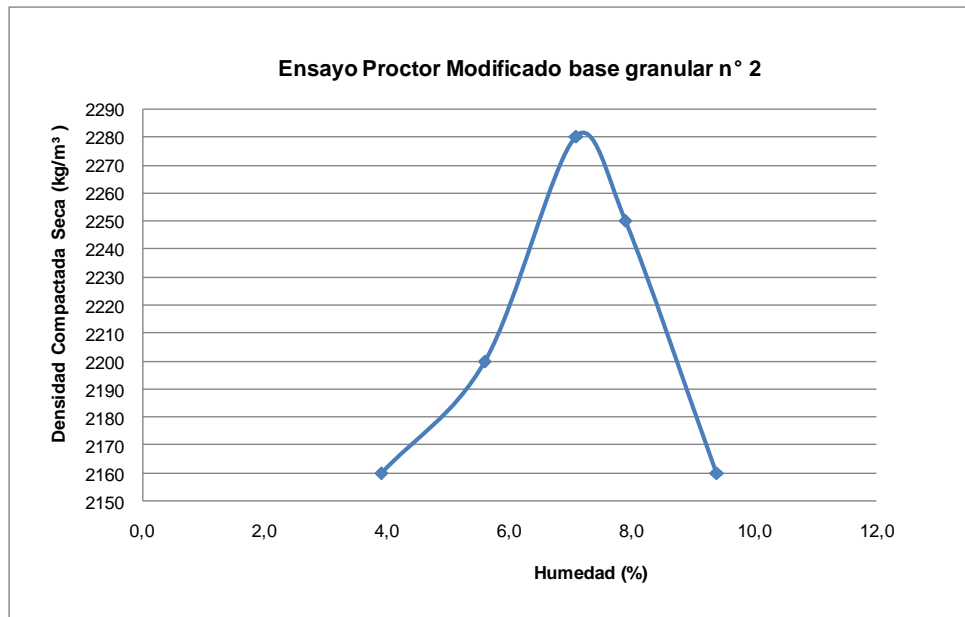


Figura 5.4.- Curva Densidad - Humedad Proctor modificado base granular nº2

5.1.4.- Resultados otros ensayos adicionales realizados

a) Base nº 1: Base granular Boco + maicillo

- **Cubicidad de partículas** = Chancado 61(%), Rodado (39%), Laja (1%)
- **Desgaste de los Ángeles**= (14,2%)
- **Densidad de partículas sólidas** = 2698 (kg/m³)
- **CBR** =100%

b) Base nº 2: Base granular Boco pura

- **Cubicidad de partículas** = Chancado 65(%), Rodado (35%), Laja (1%)
- **Desgaste de los Ángeles**= (13,1%)
- **Densidad de partículas sólidas** = 2691(kg/m³)
- **CBR** =120%

5.2.- Clasificación de los suelos

5.2.1.- Clasificación mediante sistema AASHTO

a) Base nº 1: Base granular Boco + maicillo

Se clasifica como un suelo A- 1a (0).

b) Base nº 2: Base granular Boco pura.

Se clasifica como un suelo A- 1a (0).

5.2.2.- Clasificación mediante sistema USCS

- a) Base n° 1: Base granular Boco + maicillo

Se clasifica como un suelo GW que corresponde a una grava bien graduada.

- b) Base n° 2: Base granular Boco pura.

Se clasifica como un suelo GP que corresponde a una grava pobremente graduada.

5.3.- Ingreso de los valores de calibración al equipo para caracterizar el suelo

- a) Base n° 1: Base granular Boco + maicillo

Tabla 5.5.- Valores de calibración ingresados para la base granular n° 1

Identidad del material	Base granular n° 1
Descripción	Boco + maicillo
DMCS (kg/m ³)	2232
Humedad óptima (%)	6,3
% > 3"	0
% > 3/4"	22
% Grava	49
% Arena	46
% Finos	5
LL	0
LP	0
Cu	54,5
Cc	1,2

- b) Base n° 2: Base granular Boco pura

Tabla 5.6.- Valores de calibración ingresados para la base granular n° 2

Identidad del material	Base granular n° 2
Descripción	Boco pura
DMCS (kg/m ³)	2282
Humedad óptima (%)	7,4
% > 3"	0
% > 3/4"	32
% Grava	70
% Arena	26
% Finos	4
LL	0
LP	0
Cu	67,4
Cc	6,4

5.4.- Presentación y análisis de los resultados del trabajo realizado en terreno

5.4.1.- Presentación y análisis de los resultados obtenidos para la base granular n° 1

Los controles de compactación para este material, se realizaron en la construcción de la ruta F-50, camino Lo Orozco, Quilpué. Se realizaron 27 controles durante el desarrollo de la obra. En la tabla 5.7, se presentan los resultados obtenidos con el método del cono de arena, mientras que la tabla 5.8, se muestran los resultados de los controles realizados con el densímetro SDG 200 en los mismos puntos.

Tabla 5.7.- Resultados obtenidos con el método del cono de arena en la base granular n° 1

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fecha	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	20-feb	20-feb	20-feb	22-feb	22-feb	22-feb
Densidad Compactada Húmeda (kg/m ³)	2329	2327	2321	2287	2244	2361	2364	2346	2357	2316	2345	2306	2264	2263
Humedad (%)	4,1	4,0	3,9	4,1	3,9	3,9	3,6	4,1	3,9	3,1	3,2	3,8	4,0	3,1
Densidad Compactada Seca (Kg/m ³)	2238	2237	2234	2197	2161	2272	2281	2253	2269	2247	2272	2221	2177	2196
Grado compactación (%)	100,3	100,2	100,1	98,4	96,8	101,8	102,2	100,9	101,7	100,7	101,8	99,5	97,5	98,4

Tabla 5.7.- Resultados obtenidos con el método del cono de arena en la base granular n° 1 (Continuación)

N° Prueba	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Fecha	22-feb	22-feb	25-feb	25-feb	26-feb	26-feb	26-feb	28-feb	05-abr	05-abr	05-abr	05-abr	05-abr
Densidad Compactada Húmeda (kg/m ³)	2377	2310	2304	2316	2308	2276	2296	2311	2296	2209	2264	2293	2312
Humedad (%)	4,7	3,9	3,0	3,1	3,0	4,6	3,8	4,7	3,9	3,5	3,5	4,0	4,1
Densidad Compactada Seca (Kg/m ³)	2270	2223	2237	2246	2241	2177	2211	2208	2210	2135	2187	2204	2222
Grado compactación (%)	101,7	99,6	100,2	100,6	100,4	97,5	99,1	98,9	99,0	95,7	98,0	98,7	99,6

Tabla 5.8.- Resultados obtenidos con el SDG 200 en la base granular n° 1

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Densidad Compactada Húmeda (kg/m ³)	1951	1933	1910	1829	1805	1803	1800	1803	1805	1773	1766	1763	1834	1769
Humedad (%)	5,5	5,3	5	4,2	4	3,8	3,7	4	4,1	3,8	3,8	4,2	4,4	3,6
Densidad Compactada Seca (Kg/m ³)	1849	1836	1820	1755	1736	1737	1736	1734	1734	1707	1702	1787	1757	1707
Grado compactación (%)	82,9	82,3	81,6	78,7	77,8	77,9	77,8	77,8	77,8	76,6	76,3	76,3	78,8	76,5
Temperatura ° C	13°C	11°C	18°C	25°C	25°C	36°C	32°C	30°C	25°C	33°C	38°C	26°C	27°C	26°C

Tabla 5.8.- Resultados obtenidos con el SDG 200 en la base granular n° 1 (Continuación)

N° Prueba	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Densidad Compactada Húmeda (kg/m ³)	1873	1870	1762	1768	1862	1964	1813	1981	1783	1764	1768	1791	1799
Humedad (%)	4,5	4,6	3,3	3,4	4,7	5,5	4,2	5,8	3,8	3,6	3,7	3,9	3,9
Densidad Compactada Seca (Kg/m ³)	1792	1787	1706	1709	1779	1861	1740	1872	1719	1703	1706	1723	1731
Grado compactación (%)	80,4	80,1	76,5	76,6	79,8	83,4	78	83,9	77,1	76,4	76,5	77,3	77,6
Temperatura ° C	24°C	24°C	31°C	36°C	17°C	18°C	18°C	16°C	27°C	28°C	29°C	26°C	27°C

5.4.1.1.- Comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200

Tabla 5.9.- Comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1

Densidad compactada húmeda (Kg/m ³)				
N°	Cono de arena	SDG 200	Diferencia	T° Suelo
1	2329	1951	378	18°C
2	2327	1933	394	11°C
3	2321	1910	411	18°C
4	2287	1829	458	25°C
5	2244	1805	439	25°C
6	2361	1803	558	36°C
7	2364	1800	564	32°C
8	2346	1803	543	30°C
9	2357	1805	552	25°C
10	2316	1773	543	33°C
11	2345	1766	579	38°C
12	2306	1763	543	26°C
13	2264	1834	430	27°C
14	2263	1769	494	26°C
15	2377	1873	504	24°C
16	2310	1870	440	24°C
17	2304	1762	542	31°C
18	2316	1768	548	36°C
19	2308	1862	446	17°C
20	2276	1964	312	18°C
21	2296	1813	483	18°C
22	2311	1981	330	16°C
23	2296	1783	513	27°C
24	2209	1764	445	28°C
25	2264	1768	496	29°C
26	2293	1791	502	26°C
27	2312	1799	513	27°C

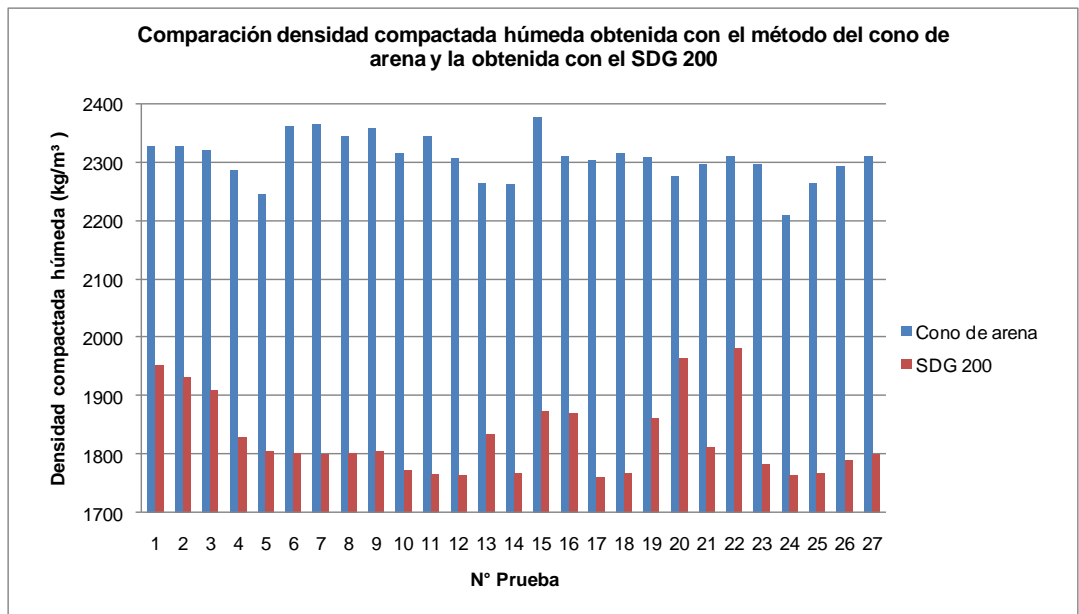


Figura 5.5.- Gráfico comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1

Al observar la tabla 5.9 y el gráfico de la figura 5.5, se puede apreciar que la diferencia entre la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200, presenta una gran variabilidad, arrojando valores que fluctúan entre 312 [kg/m³] y 579 [kg/m³], donde claramente la diferencia entre ambos métodos no se mantiene constante en la totalidad de los controles. Estas grandes diferencias son atribuibles a la heterogeneidad del material y a las distintas temperaturas del suelo al momento de realizar las pruebas.

Al realizar una correlación entre la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el densímetro SDG 200, se demuestra que no tienen ninguna relación, como era de esperar y como se puede apreciar en el gráfico de la figura 5.6.

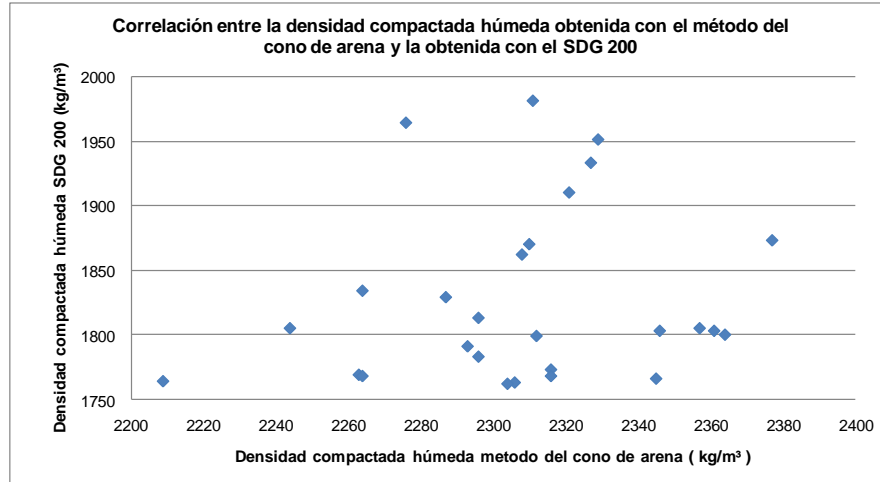


Figura 5.6.- Gráfico correlación entre la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°1

Al observar la tabla 5.9, se puede apreciar que la diferencia entre los resultados de densidad compactada húmeda se ve influenciada por la temperatura del suelo, donde se puede ver que los resultados obtenidos con el SDG 200 aumentan a temperaturas bajas, y va disminuyendo a medida se incrementa la temperatura. En el gráfico de la figura 5.7, se muestra la relación entre la diferencia de la densidad compactada húmeda obtenida con ambos métodos y la temperatura del suelo.

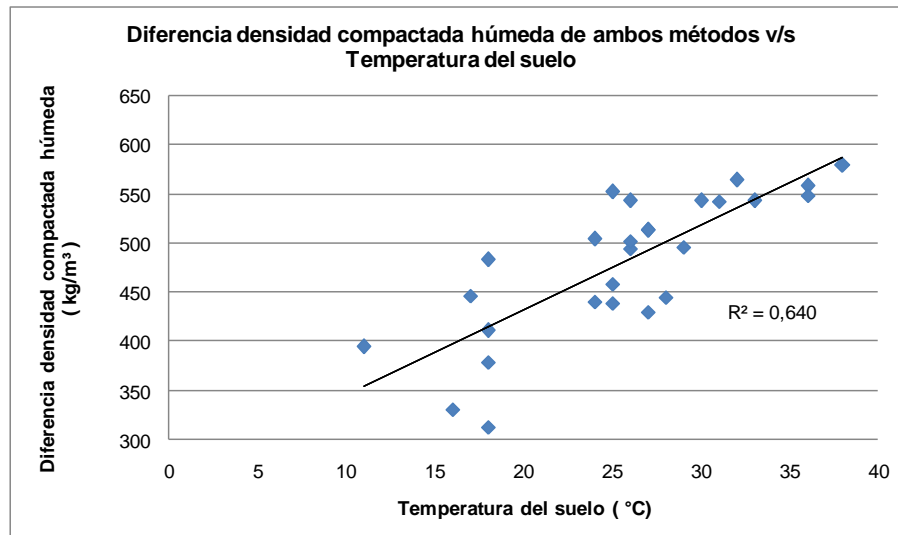


Figura 5.7.- Gráfico diferencia densidad húmeda obtenida con ambos métodos v/s Temperatura del suelo en la base granular n° 1

Se puede observar en el gráfico de la figura 5.7, que los datos presentan una relación bien marcada, a medida que aumenta la temperatura, la diferencia entre los resultados de densidad compactada húmeda obtenida con ambos métodos también aumenta. Con esto se demuestra que los resultados entregados por el equipo se ven influenciados claramente por la temperatura del suelo, además de la heterogeneidad del material.

Para efectos de este estudio, y de acuerdo a como lo establece el procedimiento de uso del equipo, este se debe calibrar agregándole la compensación que corresponde a la diferencia entre los resultados de densidad compactada húmeda obtenidos con el SDG 200 y algún otro método normado, en este caso se utilizó el método del cono de arena para realizar la compensación. Para ello se utilizó el promedio de las diferencias de los primeros 5 controles, a pesar de que ya es sabido de que las diferencias entre los resultados obtenidos con ambos equipos no se mantuvo constante en la totalidad de los controles realizados, sin embargo se respetará el procedimiento de uso del equipo de manera de evaluar su confiabilidad, la compensación a utilizar se presenta a continuación.

Compensación densidad compactada húmeda: 416 [kg/m³]

5.4.1.2.- Comparación de la humedad obtenida mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200

Tabla 5.10.- Comparación de la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°1

Humedad (%)				
N°	NCh 1515	SDG 200	Diferencia	T° Suelo
1	4,1	5,5	-1,4	18°C
2	4,0	5,3	-1,3	11°C
3	3,9	5,0	-1,1	18°C
4	4,1	4,2	-0,1	25°C
5	3,9	4,0	-0,1	25°C
6	3,9	3,8	0,1	36°C
7	3,6	3,7	-0,1	32°C
8	4,1	4,0	0,1	30°C
9	3,9	4,1	-0,2	25°C
10	3,1	3,8	-0,7	33°C
11	3,2	3,8	-0,6	38°C
12	3,8	4,2	-0,4	26°C
13	4,0	4,4	-0,4	27°C
14	3,1	3,6	-0,5	26°C
15	4,7	4,5	0,2	24°C
16	3,9	4,6	-0,7	24°C
17	3,0	3,3	-0,3	31°C
18	3,1	3,4	-0,3	36°C
19	3,0	4,7	-1,7	17°C
20	4,6	5,5	-0,9	18°C
21	3,8	4,2	-0,4	18°C
22	4,7	5,8	-1,1	16°C
23	3,9	3,8	0,1	27°C
24	3,5	3,6	-0,1	28°C
25	3,5	3,7	-0,2	29°C
26	4,0	3,9	0,1	26°C
27	4,1	3,9	0,2	27°C

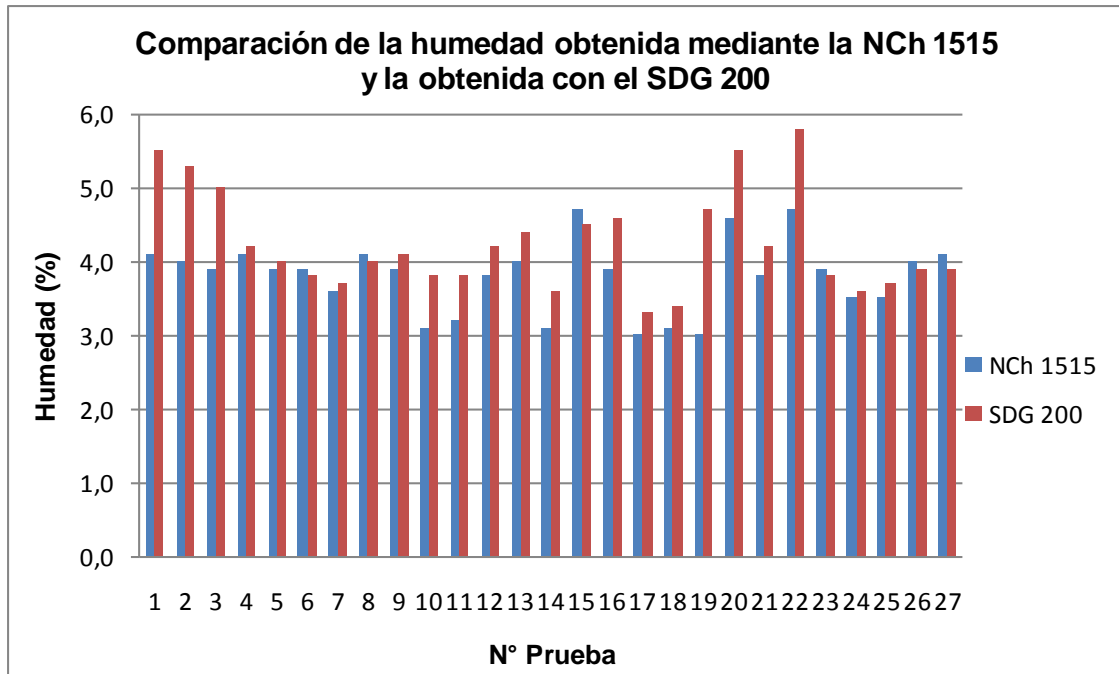


Figura 5.8.- Gráfico Comparación de la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°1

Al observar la tabla 5.10 y el gráfico de la figura 5.8, se puede apreciar la gran variabilidad de las diferencias de las humedades obtenidas con ambos métodos, se observan diferencias que fluctúan entre 0,2(%) y – 1,7(%), en la mayoría de los controles la humedad obtenida con el SDG 200, resultó ser mayor a la obtenida mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515, las mayores diferencias se pueden observar cuando la temperatura del suelo disminuye, ya que los resultados obtenidos con el SDG 200 aumentan a temperaturas bajas.

A continuación en el gráfico de la figura 5.9, se presenta la correlación entre la humedad obtenida mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200.

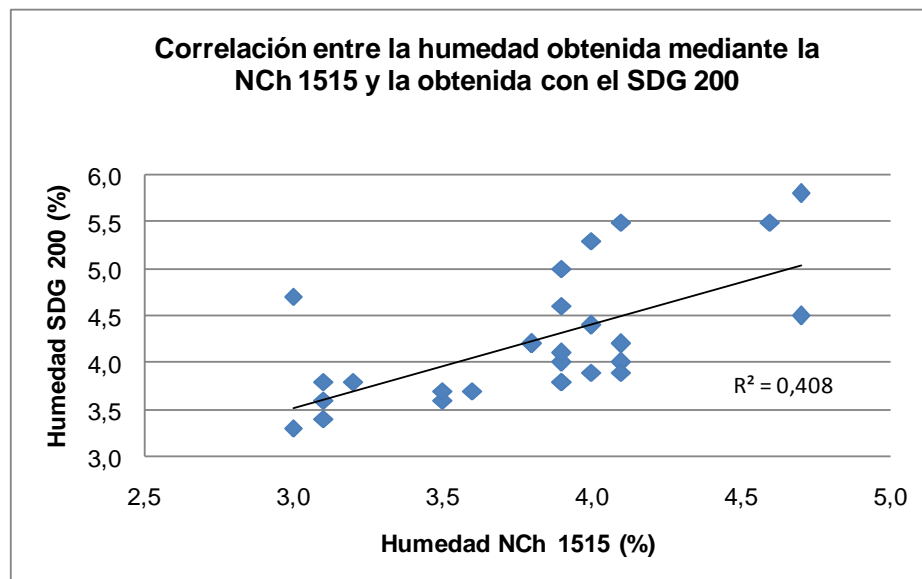


Figura 5.9.- Gráfico Correlación entre la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1

Se puede apreciar en el gráfico de la figura 5.9 que hay una línea de tendencia de bajo ajuste, ya que algunos puntos se escapan de la línea de tendencia, esto se debe como se mencionó anteriormente a la heterogeneidad del material y a la sensibilidad de los resultados a cambios de temperatura. Los puntos que se escapan de forma más notoria de la línea de tendencia, son precisamente los puntos donde la temperatura del suelo es menor y el equipo entrega valores de humedad mayores.

Al igual que para la densidad compactada húmeda y de acuerdo a como lo establece el procedimiento de uso del equipo, se realizó la compensación del porcentaje de humedad, utilizando el promedio de las diferencias de los primeros 5 controles, entre los resultados obtenidos mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515 y los obtenidos con el SDG 200, a pesar de que se sabe que esa diferencia no se mantuvo constante en la totalidad de los controles realizados. La compensación utilizada para la humedad se muestra a continuación.

Compensación humedad (%) = -0,8%

5.4.1.3.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200

Tabla 5.11.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1

Densidad compactada seca (Kg/m ³)				
N°	Cono de arena	SDG 200	Diferencia	T° Suelo
1	2238	1849	389	18°C
2	2237	1836	401	11°C
3	2234	1820	414	18°C
4	2197	1755	442	25°C
5	2161	1736	425	25°C
6	2272	1737	535	36°C
7	2281	1736	545	32°C
8	2253	1734	519	30°C
9	2269	1734	535	25°C
10	2247	1707	540	33°C
11	2272	1702	570	38°C
12	2221	1787	434	26°C
13	2177	1757	420	27°C
14	2196	1707	489	26°C
15	2270	1792	478	24°C
16	2223	1787	436	24°C
17	2237	1706	531	31°C
18	2246	1709	537	36°C
19	2241	1779	462	17°C
20	2177	1861	316	18°C
21	2211	1740	471	18°C
22	2208	1872	336	16°C
23	2210	1719	491	27°C
24	2135	1703	432	28°C
25	2187	1706	481	29°C
26	2204	1723	481	26°C
27	2222	1731	491	27°C

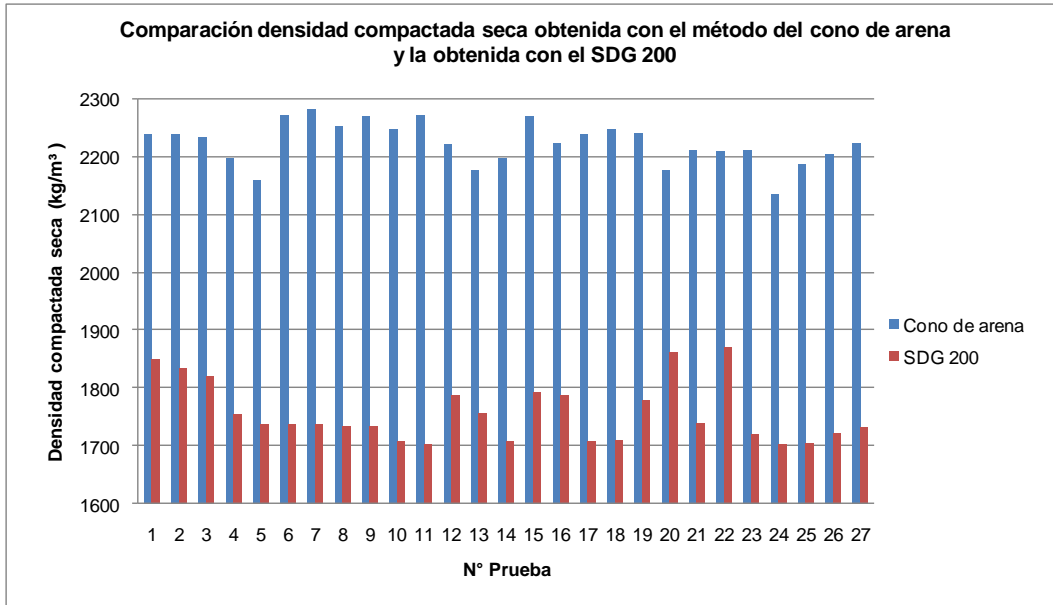


Figura 5.10.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 1

Al observar la tabla 5.11 y el gráfico de la figura 5.10, se puede apreciar que la diferencia entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200, presenta una gran variabilidad al igual que la densidad compactada húmeda, presentando valores que fluctúan entre 316 [kg/m³] y 570 [kg/m³], Estas grandes diferencias son atribuibles a la heterogeneidad del material y a las diferentes temperaturas del suelo al momento de realizar las pruebas.

Al realizar una correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el densímetro SDG 200, se demuestra que no tienen ninguna relación, como era de esperar y como se puede apreciar en el gráfico de la figura 5.11, donde los puntos no presentan ninguna tendencia.

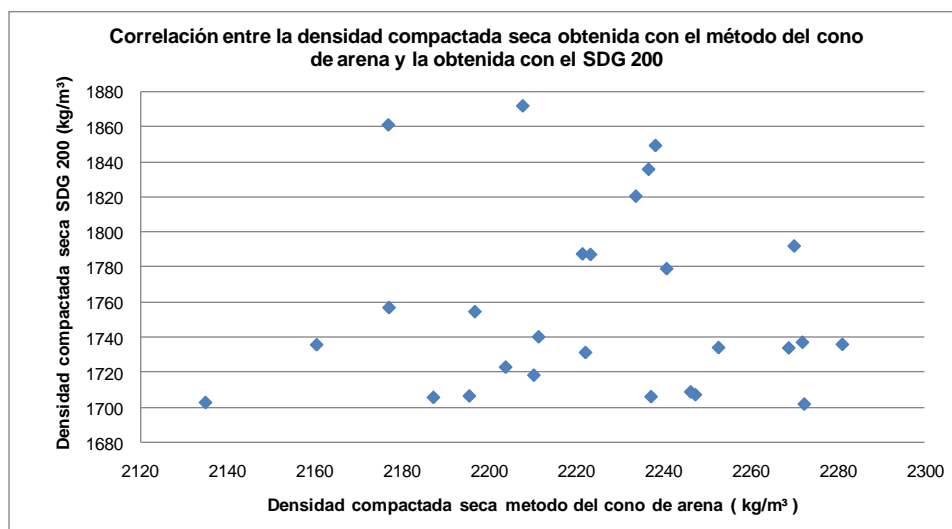


Figura 5.11.- Gráfico correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°1

5.4.1.3.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido

Al realizar la compensación de densidad compactada húmeda y del porcentaje de humedad, obtenida como el promedio de las diferencias entre los resultados obtenidos entre el método del cono de arena y el densímetro SDG 200 para los primeros 5 controles, se calculó la densidad compactada seca corregida para los 22 controles siguientes, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 5.12 y en el gráfico de la figura 5.12.

Tabla 5.12.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 1

Densidad compactada seca (Kg/m ³)				
N°	Cono de arena	SDG 200 corr	Diferencia	T° Suelo
6	2272	2154	118	36°C
7	2281	2154	127	32°C
8	2253	2150	103	30°C
9	2269	2150	119	25°C
10	2247	2125	122	33°C
11	2272	2118	154	38°C
12	2221	2107	114	26°C
13	2177	2172	5	27°C
14	2196	2125	71	26°C
15	2270	2207	63	24°C
16	2223	2202	21	24°C
17	2237	2125	112	31°C
18	2246	2129	117	36°C
19	2241	2192	49	17°C
20	2177	2273	-96	18°C
21	2211	2156	55	18°C
22	2208	2283	-75	16°C
23	2210	2135	75	27°C
24	2135	2121	14	28°C
25	2187	2122	65	29°C
26	2204	2141	63	26°C
27	2222	2148	74	27°C

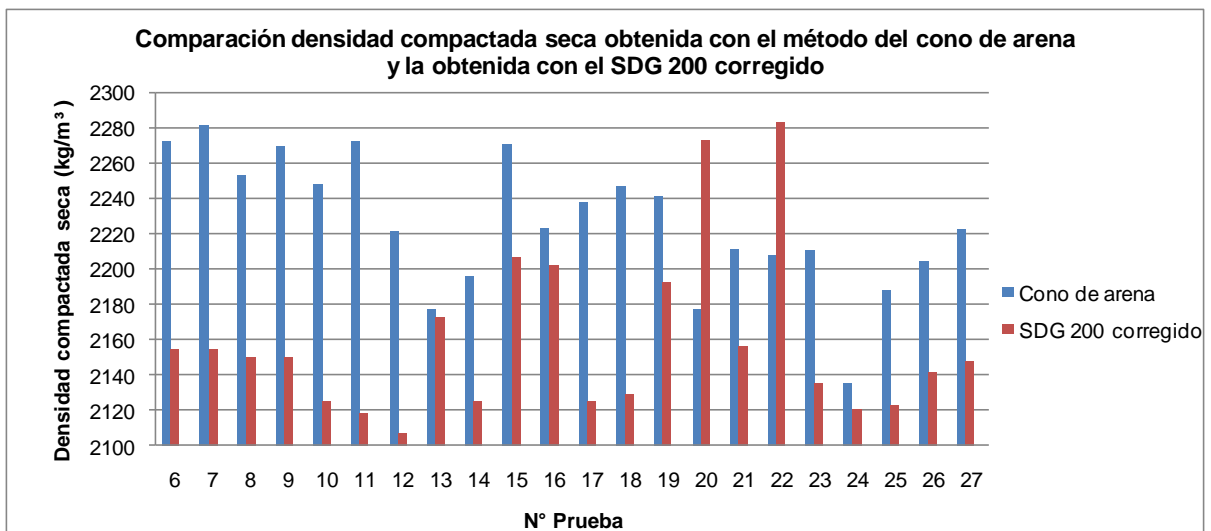


Figura 5.12.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n°1

Se puede ver en la tabla 5.12 y en el gráfico de la figura 5.12, que las diferencias de densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido tienen una gran variabilidad, esto era de esperar ya que se demostró anteriormente que la diferencia entre ambos métodos en la totalidad de los controles no se mantuvo constante, y sin embargo se realizó la compensación como el promedio de las diferencias de los primeros 5 controles. Se observan grandes diferencias que fluctúan entre 5 [kg/m³] y 154 [kg/m³].

En la figura 5.13, se muestra el gráfico de la correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido, donde al igual que al correlacionar la densidad compactada seca sin corregir, se puede apreciar una nula relación.

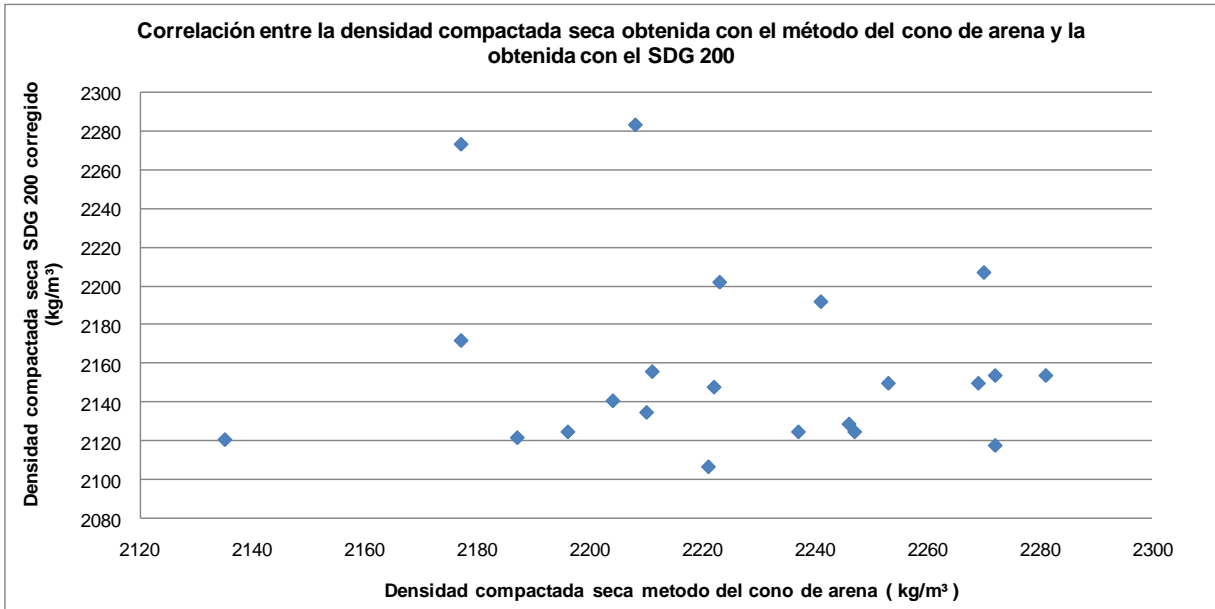


Figura 5.13.- Gráfico correlación entre la densidad seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 1

5.4.1.6.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido

En la tabla 5.13 y en el gráfico de la figura 5.14, se muestran los resultados obtenidos del grado de compactación corregido, el que se calcula a partir de los resultados obtenidos de densidad compactada seca corregida.

Tabla 5.13.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido en la base granular n°1

Grado de compactación				
N°	Cono de arena	SDG 200 corr	Diferencia	T° Suelo
6	101,8	96,5	5,3	36°C
7	102,2	96,5	5,7	32°C
8	100,9	96,3	4,6	30°C
9	101,7	96,3	5,4	25°C
10	100,7	95,2	5,5	33°C
11	101,8	94,9	6,9	38°C
12	99,5	94,4	5,1	26°C
13	97,5	97,3	0,2	27°C
14	98,4	95,2	3,2	26°C
15	101,7	98,9	2,8	24°C
16	99,6	98,7	0,9	24°C
17	100,2	95,2	5,0	31°C
18	100,6	95,4	5,2	36°C
19	100,4	98,2	2,2	17°C
20	97,5	101,8	-4,3	18°C
21	99,1	96,6	2,5	18°C
22	98,9	102,3	-3,4	16°C
23	99,0	95,7	3,3	27°C
24	95,7	95,0	0,7	28°C
25	98,0	95,1	2,9	29°C
26	98,7	95,9	2,8	26°C
27	99,6	96,2	3,4	27°C

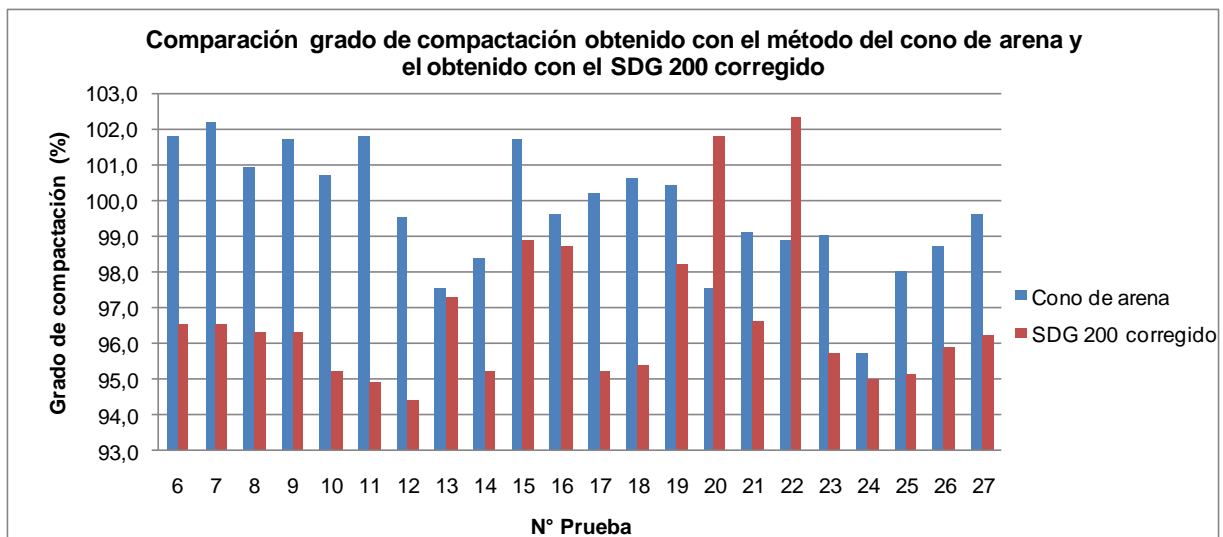


Figura 5.14.- Gráfico comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido en la base granular n°1

Se puede apreciar que la diferencia entre los valores obtenidos para el grado de compactación con ambos equipos presenta una gran variabilidad, como era lógico ya que dependen de la densidad compactada seca corregida. Se observan diferencias de hasta un 6,9%. Esto demuestra que el equipo no entrega resultados confiables para este tipo de suelo, pudiendo aceptar sectores donde no se cumple con la compactación deseada o por el contrario como sucede en este caso, pudiendo rechazar tramos donde según el SDG 200, no se cumple con la compactación deseada, y sin embargo el grado de compactación real determinado por el método del cono de arena es mucho mayor, lo que significaría trabajos de compactación innecesarios.

Las grandes diferencias entre los resultados obtenidos se deben principalmente a la heterogeneidad del material y a la sensibilidad del equipo a los cambios de temperatura.

5.4.1.7.- Planteamiento de una nueva corrección que involucra la temperatura del suelo

Debido a que en este material, se pudo observar que la temperatura del suelo tiene una gran influencia en los resultados entregados por el SDG 200, se realizó una regresión lineal multivariable con los datos obtenidos de densidad compactada seca con el método del cono de arena y los obtenidos con el densímetro SDG 200, agregando la variable del efecto de la temperatura.

Para realizar la regresión lineal, se utilizaron los primeros 18 controles realizados, y se probará esta ecuación con los 9 restantes.

En la tabla 5.14, se muestran los datos utilizados para realizar la regresión lineal

Tabla 5.14.- Datos utilizados para realizar la regresión lineal en la base granular n° 1

Densidad compactada seca (Kg/m ³)			
N°	Cono de arena	SDG 200	T° Suelo
1	2238	1849	18°C
2	2237	1836	11°C
3	2234	1820	18°C
4	2197	1755	25°C
5	2161	1736	25°C
6	2272	1737	36°C
7	2281	1736	32°C
8	2253	1734	30°C
9	2269	1734	25°C
10	2247	1707	33°C
11	2272	1702	38°C
12	2221	1787	26°C
13	2177	1757	27°C
14	2196	1707	26°C
15	2270	1792	24°C
16	2223	1787	24°C
17	2237	1706	31°C
18	2246	1709	36°C

Obteniendo la siguiente Ecuación:

$$\text{Densidad seca } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = A + B \times \left(\text{Densidad seca } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) + C \times (T \text{ [}^\circ\text{C]}) \quad (5.1)$$

Donde:

$$A = 1184,145468$$

$$B = 0,528456$$

$$C = 4,581078$$

Al realizar los cálculos de densidad compactada seca con esta nueva corrección en los 9 controles restantes, se obtuvieron los siguientes resultados, que se presentan en la tabla 5.15 y en el gráfico de la figura 5.16.

Tabla 5.15 - Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°1

Densidad compactada seca (Kg/m ³)				
N°	Cono de arena	SDG 200 corr	Diferencia	T° Suelo
19	2241	2202	39	17°C
20	2177	2250	-73	18°C
21	2211	2186	25	18°C
22	2208	2247	-39	16°C
23	2210	2216	-6	27°C
24	2135	2212	-77	28°C
25	2187	2219	-32	29°C
26	2204	2214	-10	26°C
27	2222	2223	-1	27°C

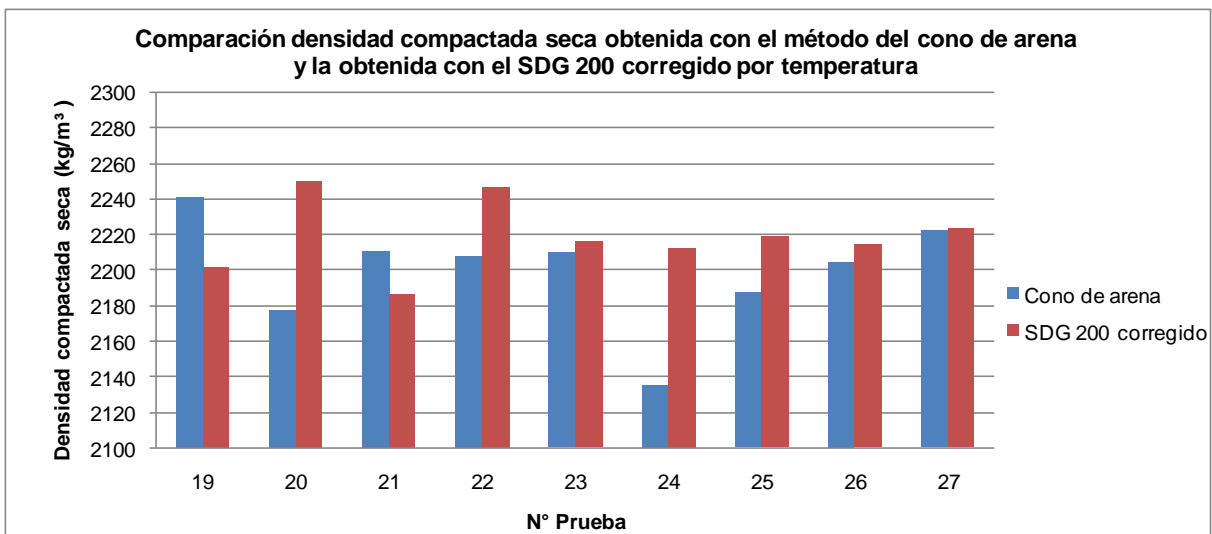


Figura 5.15.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°1

Al realizar esta nueva corrección se puede observar que las diferencias disminuyen bastante y se acercan mucho más a los resultados obtenidos con el método del cono de arena. La mayor diferencia se puede apreciar en el punto 24, donde se observa una diferencia de 77 [kg/m³].

En la tabla 5.16 y en el gráfico de la figura 5.16, se muestran los resultados obtenidos para el grado de compactación con esta nueva corrección agregando el efecto de la temperatura del suelo, el que está en función de la densidad compactada seca antes corregida.

Tabla 5.16.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°1

Grado de compactación (%)				
N°	Cono de arena	SDG 200 corr	Diferencia	T° Suelo
19	100,4	98,7	1,7	17°C
20	97,5	100,8	-3,3	18°C
21	99,1	97,9	1,2	18°C
22	98,9	100,7	-1,8	16°C
23	99	99,3	-0,3	27°C
24	95,7	99,1	-3,4	28°C
25	98	99,4	-1,4	29°C
26	98,7	99,2	-0,5	26°C
27	99,6	99,6	0,0	27°C

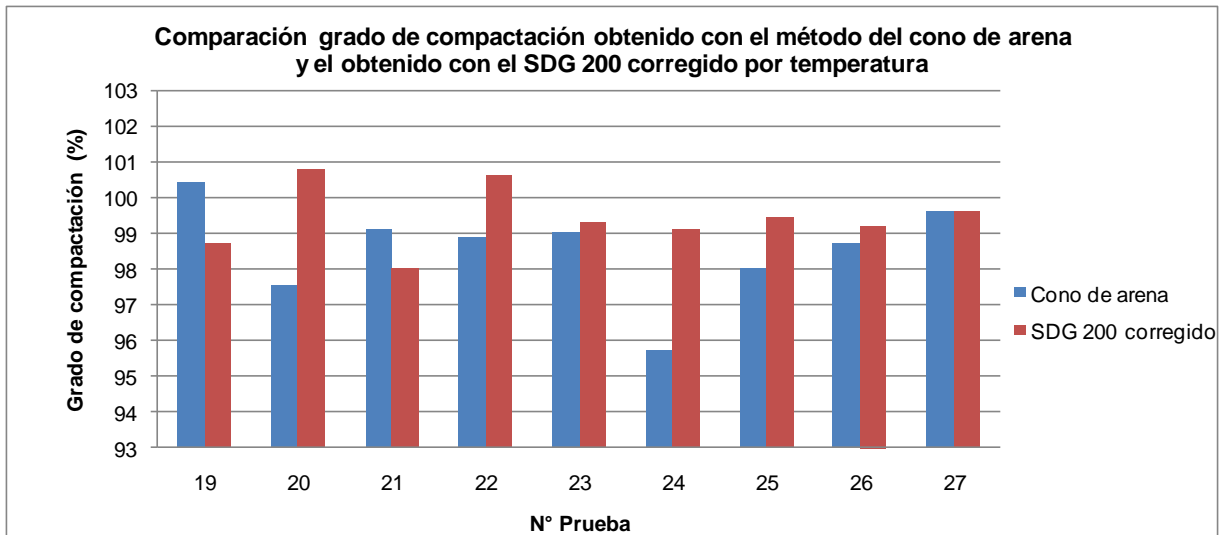


Figura 5.16.- Gráfico comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n° 1

Al efectuar la nueva corrección se puede apreciar que la diferencia entre el grado de compactación obtenido con el densímetro SDG 200 y el método del cono de arena disminuyó considerablemente, en contraste con la que se realizó anteriormente, en donde se utilizó la compensación como el promedio de las diferencias de los primeros 5 controles realizados, pero se sigue observando diferencias de hasta 3,4(%), atribuibles a la heterogeneidad del material.

Si bien al agregar el efecto de la temperatura al cálculo de la densidad compactada seca entregada por el equipo se acerca más a los resultados reales, no da confianza ya que estas grandes diferencias pueden significar errores al momento de controlar algún sector, además que para tener una buena ecuación se deben tomar muchos puntos a distintas temperaturas, lo que lo hace algo poco práctico.

5.3.2.- Presentación y análisis de los resultados obtenidos para la base granular n°2

Los controles en esta base granular se realizaron en una cancha de pruebas, preparada con a la ayuda de la constructora COP, en ella se hicieron 12 controles con ambos métodos, en el orden que se muestra en la figura 5.17.

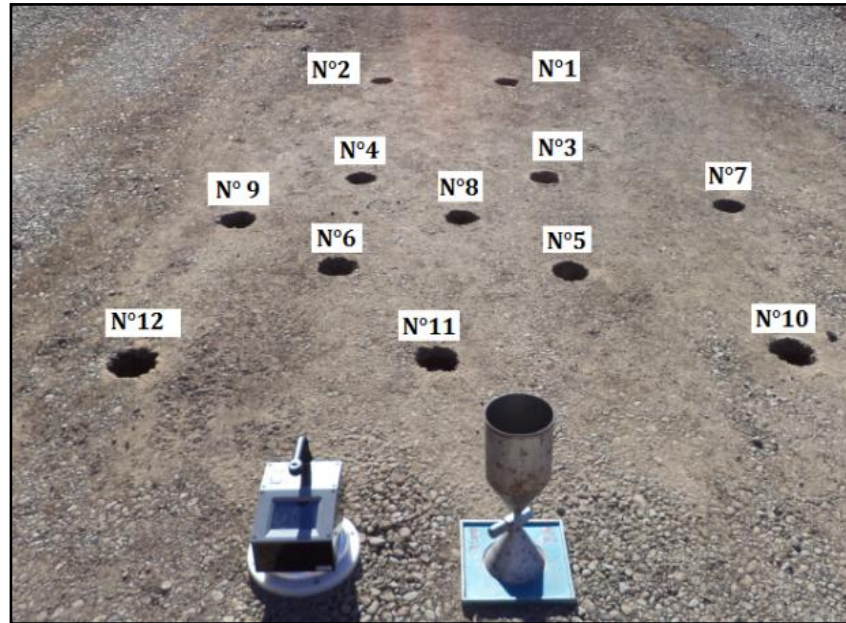


Figura 5.17.- Esquema de los controles realizados en la cancha de pruebas para la base granular n° 2

En la tabla 5.17, se presentan los resultados obtenidos con el método del cono de arena, mientras que la tabla 5.18, se muestran los resultados de los controles realizados con el densímetro SDG 200 en los mismos puntos.

Tabla 5.17.- Resultados obtenidos con el método del cono de arena en la base granular n°2

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fecha	23-mar	23-mar	23-mar	23-mar	23-mar	24-mar	24-mar	24-mar	24-mar	24-mar	24-mar	24-mar
Densidad Compactada Húmeda (kg/m ³)	2365	2295	2249	2264	2383	2368	2303	2329	2314	2249	2354	2354
Humedad (%)	3,3	3,4	3,2	3,0	4,2	3,7	2,6	2,4	2,9	2,5	3,1	3,5
Densidad Compactada Seca (Kg/m ³)	2289	2220	2178	2199	2288	2284	2245	2274	2248	2195	2284	2273
Grado compactación (%)	100,3	97,3	95,5	96,4	100,3	100,1	98,4	99,7	98,5	96,2	100,1	99,6

Tabla 5.18.- Resultados obtenidos con el densímetro SDG 200 para la base granular n°2

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Densidad Compactada Húmeda (kg/m ³)	2310	2061	2267	2082	2264	2310	2181	2196	2170	2121	2194	2134
Humedad (%)	8,2	6,7	8	6,8	7,9	8,3	7,5	7,7	7,5	7,2	7,7	7,3
Densidad Compactada Seca (Kg/m ³)	2136	1932	2100	1949	2098	2133	2029	2040	2019	1978	2037	1988
Grado compactación (%)	93,6	84,7	92	85,4	91,9	93,5	88,9	89,4	88,5	86,7	89,3	87,1
Temperatura ° C	25°C	33°C	25°C	31°C	23°C	20°C	23°C	25°C	32°	32°	31°	31°

5.4.2.1- Comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200.

Tabla 5.19.- Comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2

Densidad compactada húmeda (Kg/m ³)				
N°	Cono de arena	SDG 200	Diferencia	T° Suelo
1	2365	2310	55	25°C
2	2295	2061	234	33°C
3	2249	2267	-18	25°C
4	2264	2082	182	31°C
5	2383	2264	119	23°C
6	2368	2310	58	20°C
7	2303	2181	122	23°C
8	2329	2196	133	25°C
9	2314	2170	144	32°C
10	2249	2121	128	32°C
11	2354	2194	160	31°C
12	2354	2134	220	31°C

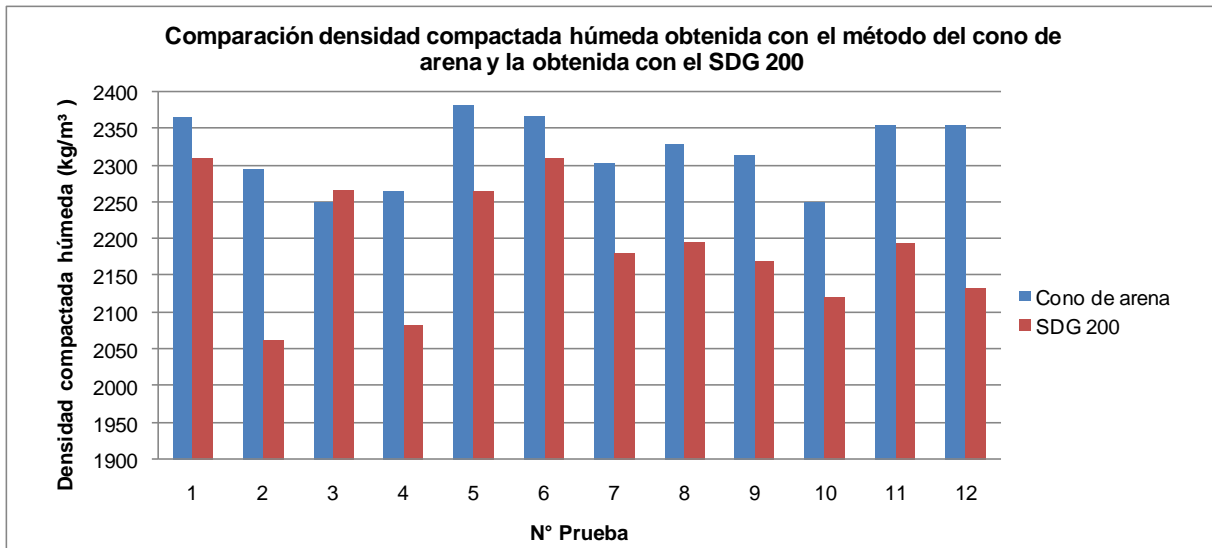


Figura 5.18.- Gráfico comparación de la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2

Al observar la tabla 5.19 y el gráfico de la figura 5.18, se puede apreciar que la diferencia entre la densidad compactada húmeda obtenida con los 2 métodos, presenta una gran variabilidad, presentando valores que fluctúan entre -18 [kg/m³] y 234 [kg/m³], donde claramente al igual que en el material anterior, la diferencia entre ambos métodos no se mantiene constante en la totalidad de los controles realizados. Estas grandes diferencias son atribuibles a la heterogeneidad del material y a las distintas temperaturas del suelo al momento de realizar las pruebas.

Al realizar una correlación entre la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el densímetro SDG 200, se demuestra que tienen poca relación, obteniendo una línea de tendencia con un ajuste bajo, como se puede observar en el gráfico de la figura 5.19.

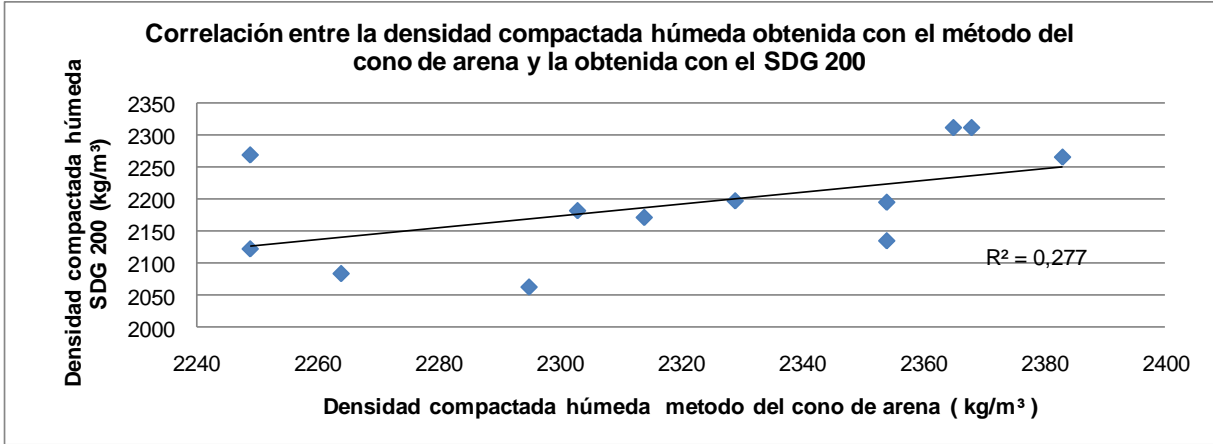


Figura 5.19.- Gráfico correlación entre la densidad compactada húmeda obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2

Al igual que con el material anterior, en la figura 5.20 se muestra el gráfico de la relación de la diferencia entre la densidad compactada húmeda obtenida con ambos métodos y la temperatura del suelo. Donde se puede observar la misma tendencia que en el material anterior, a medida que aumenta la temperatura, la diferencia entre los resultados obtenidos con ambos métodos también aumenta, ya que los resultados entregados por el SDG 200 disminuyen a medida que aumenta la temperatura del suelo.

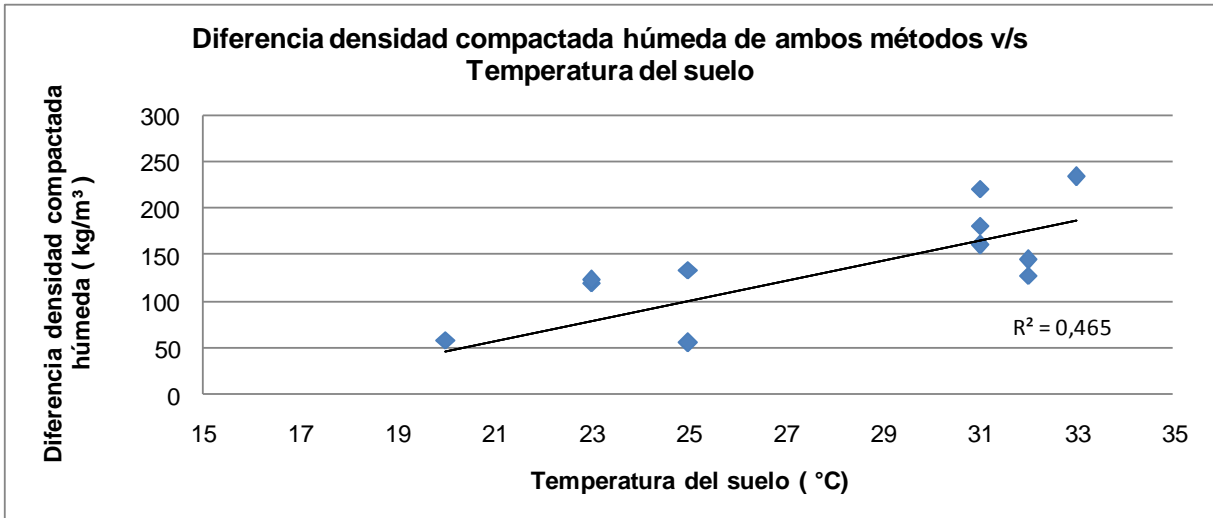


Figura 5.20.- Gráfico diferencia densidad compactada húmeda obtenida con ambos métodos v/s temperatura del suelo en la base granular n° 2

Para efectos de este estudio, y de acuerdo a como lo establece el procedimiento de uso del equipo, este se debe calibrar agregándole la compensación que corresponde a la diferencia entre los resultados de densidad compactada húmeda obtenida con el SDG 200 y algún otro método normado, en este caso se utilizó el método del cono de arena para realizar la compensación. Para ello se utilizó el promedio de las diferencias de los primeros 3 controles, a pesar de que ya es sabido de que las diferencias entre los resultados obtenidos con ambos métodos no se mantuvo constante en la totalidad de los controles realizados, sin embargo se respetará el procedimiento de uso del equipo de manera de evaluar su confiabilidad. La compensación a utilizar se presenta a continuación.

Compensación densidad compactada húmeda: 90 [kg/m³]

5.4.2.2.- Comparación de la humedad obtenida mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200

Tabla 5.20.- Comparación de la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 2

Humedad (%)				
N°	NCh 1515	SDG 200	Diferencia	T° Suelo
1	3,3	8,2	-4,9	25°C
2	3,4	6,7	-3,3	33°C
3	3,2	8,0	-4,8	25°C
4	3,0	6,8	-3,8	31°C
5	4,2	7,9	-3,7	23°C
6	3,7	8,3	-4,6	20°C
7	2,6	7,5	-4,9	23°C
8	2,4	7,7	-5,3	25°C
9	2,9	7,5	-4,6	32°C
10	2,5	7,2	-4,7	32°C
11	3,1	7,7	-4,6	31°C
12	3,5	7,3	-3,8	31°C

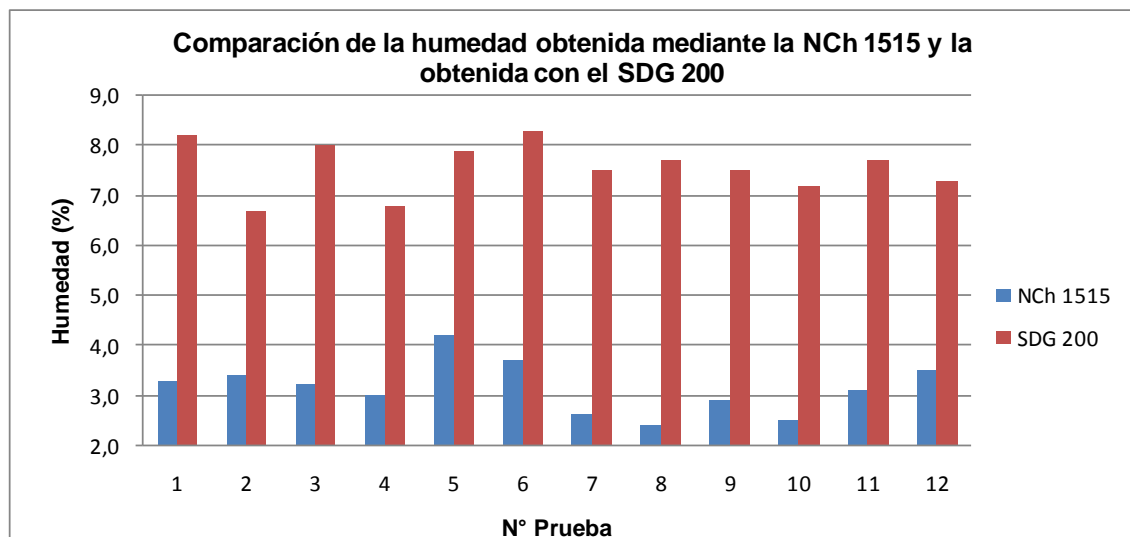


Figura 5.21 - Gráfico comparación de la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 2

Al observar la tabla 5.20 y el gráfico de la figura 5.21, se puede ver que los resultados obtenidos con el SDG 200 son mucho mayores a los obtenidos en el material anterior, y a los resultados obtenidos mediante secado en horno, observándose grandes diferencias que fluctúan entre 3,3(%) y 5,3(%) con respecto a los obtenidos mediante secado en horno. Esto demuestra que los valores entregados por el equipo se ven claramente influenciados por las características del suelo ingresados al equipo, ya que al evaluar este material los resultados de humedad (%) entregados por el equipo son mucho mayores a los resultados reales.

En el gráfico de la figura 5.22, se presenta la correlación entre la humedad obtenida mediante secado en horno según lo establecido en la norma chilena NCh 1515 y la humedad obtenida con el densímetro SDG 200, donde se puede ver que los resultados obtenidos con ambos métodos no tienen ninguna relación.

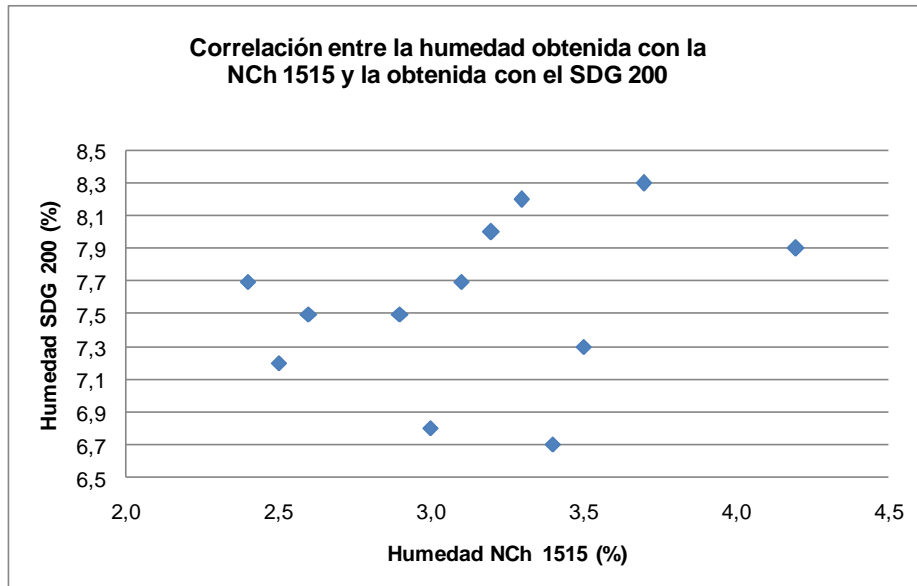


Figura 5.22 - Gráfico correlación entre la humedad obtenida mediante la NCh 1515 y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 2

Al igual que para la densidad compactada húmeda y de acuerdo a como lo establece el procedimiento de uso del equipo, se realizó la compensación del porcentaje de humedad, utilizando el promedio de las diferencias de los primeros 3 controles, entre los resultados obtenidos mediante secado en horno según la norma chilena NCh 1515 y los obtenidos con el SDG 200, a pesar de que se sabe que esa diferencia no se mantuvo constante en la totalidad de los resultados. La compensación utilizada para la humedad se muestra a continuación.

Compensación humedad (%) = -4,3%

5.4.2.3.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200.

Tabla 5.21.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2

Densidad compactada seca (Kg/m ³)				
N°	Cono de arena	SDG 200	Diferencia	T° Suelo
1	2289	2136	153	25°C
2	2220	1932	288	33°C
3	2178	2100	78	25°C
4	2199	1949	250	31°C
5	2288	2098	190	23°C
6	2284	2133	151	20°C
7	2245	2029	216	23°C
8	2274	2040	234	25°C
9	2248	2019	229	32°C
10	2195	1978	217	32°C
11	2284	2037	247	31°C
12	2273	1988	285	31°C

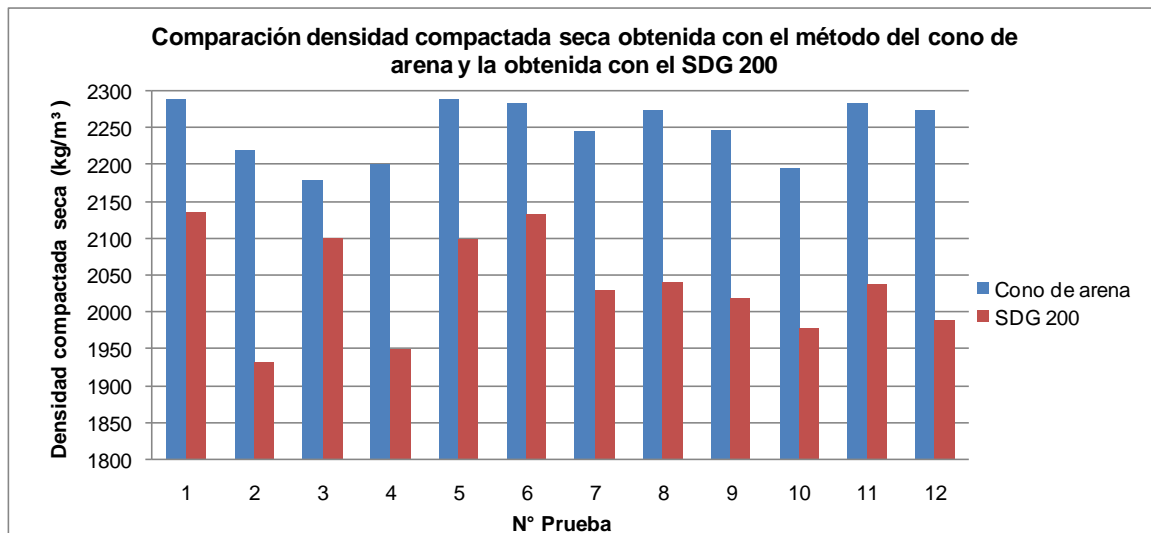


Figura 5.23.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n° 2

Al observar la tabla 5.21 y el gráfico de la figura 5.23, se puede apreciar que la diferencia entre la densidad compactada seca obtenida con los 2 métodos, presenta una gran variabilidad al igual que la densidad compactada húmeda, presentando diferencias que fluctúan entre 78 [kg/m³] y 288 [kg/m³], donde claramente al igual que en el material anterior, la diferencia entre ambos métodos no se mantiene constante. Esto es atribuible a la heterogeneidad del material y a las distintas temperaturas del suelo al momento de realizar las pruebas.

Al realizar una correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el densímetro SDG 200, se demuestra que no tienen ninguna relación, obteniendo una línea de tendencia con un ajuste bajo, como se puede observar en la el gráfico de la figura 5.24.

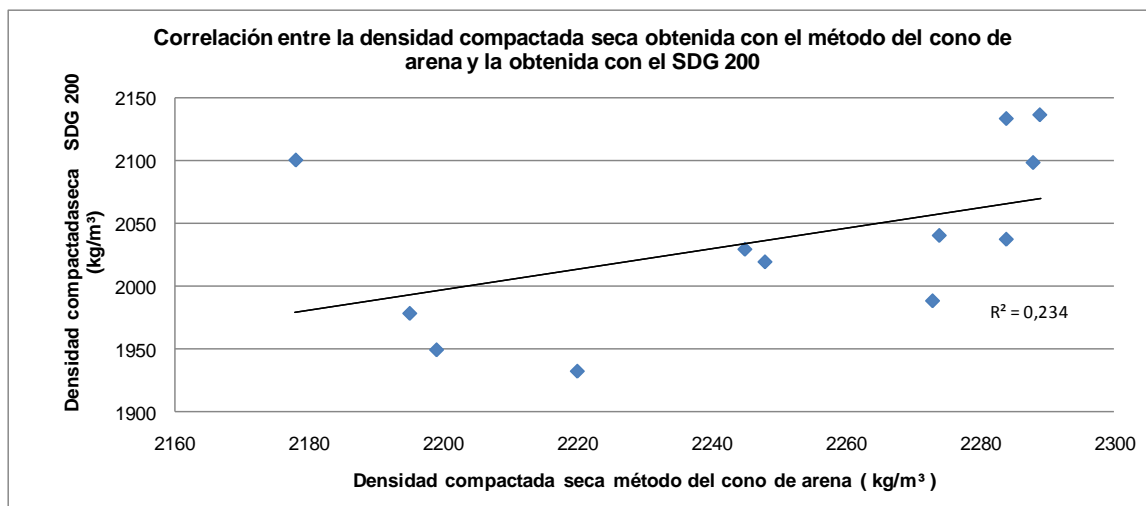


Figura 5.24.- Gráfico correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 en la base granular n°2

5.4.2.3.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido

Al realizar la compensación de densidad compactada húmeda y del porcentaje de humedad, obtenida como el promedio de las diferencias entre los resultados obtenidos entre el método del cono de arena y el densímetro SDG 200 para los primeros 3 controles, se calculo la densidad compactada seca corregida para los 9 controles siguientes, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 5.22 y en el gráfico de la figura 5.25.

Tabla 5.22.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 2

Densidad compactada seca (Kg/m³)				
N°	Cono de arena	SDG 200 corr	Diferencia	T° Suelo
4	2199	2119	80	31°C
5	2288	2272	16	23°C
6	2284	2308	-24	20°C
7	2245	2201	44	23°C
8	2274	2211	63	25°C
9	2248	2190	58	32°C
10	2195	2149	46	32°C
11	2284	2209	75	31°C
12	2273	2159	114	31°C

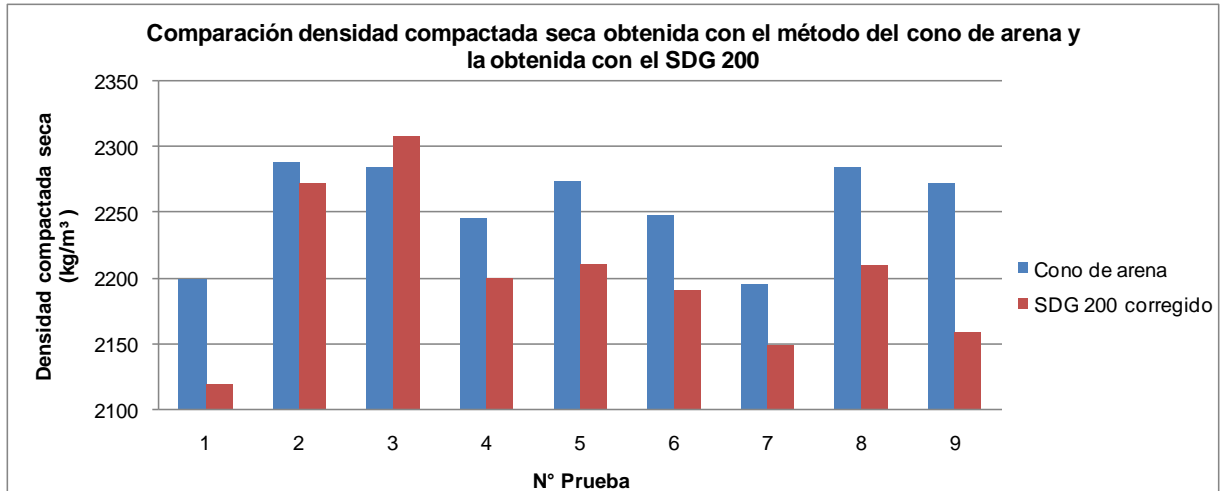


Figura 5.25.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 2

Se puede ver en la tabla 5.22 y en el gráfico de la figura 5.25, que la diferencia de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido tienen una gran variabilidad, esto era de esperar ya que se demostró anteriormente que la diferencia entre ambos métodos en la totalidad de los controles no se mantuvo constante, y sin embargo se realizó la compensación como el promedio de las diferencias de los primeros 3 controles, se observan valores que fluctúan entre -24 [kg/m^3] y 114 [kg/m^3].

En el gráfico de la figura 5.26, se muestra la correlación entre los resultados obtenidos de densidad compactada seca con el densímetro SDG 200 corregido, comparado con los resultados obtenidos con el método del cono de arena, donde se puede observar una tendencia de bajo ajuste, sin embargo esta tendencia es mejor a la calculada anteriormente para el mismo material con el SDG 200 sin corregir.

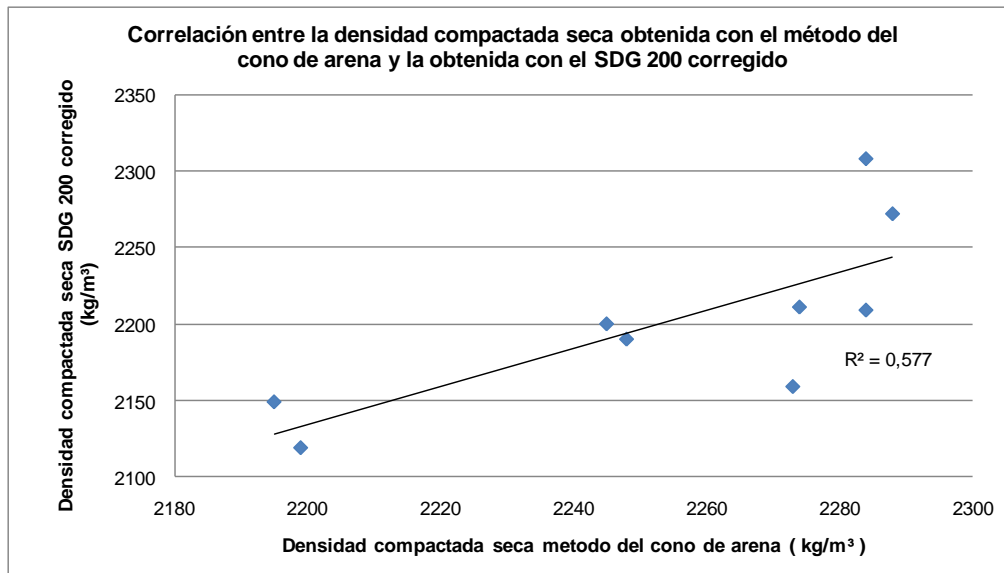


Figura 5.26.- Gráfico correlación entre la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido en la base granular n° 2

5.4.2.6.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido

En la tabla 5.23 y en el gráfico de la figura 5.27, se muestran los resultados obtenidos del grado de compactación corregido, el que se calcula a partir de los resultados obtenidos de densidad compactada seca corregida.

Tabla 5.23.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido en la base granular n°2

Grado de compactación (%)				
N°	Cono de arena	SDG 200 corr	Diferencia	T° Suelo
4	96,4	92,9	3,5	31°C
5	100,3	99,6	0,7	23°C
6	100,1	101,1	-1,0	20°C
7	98,4	96,5	1,9	23°C
8	99,6	96,9	2,7	25°C
9	98,5	96,0	2,5	32°
10	96,2	94,2	2,0	32°
11	100,1	96,8	3,3	31°
12	99,6	94,6	5,0	31°

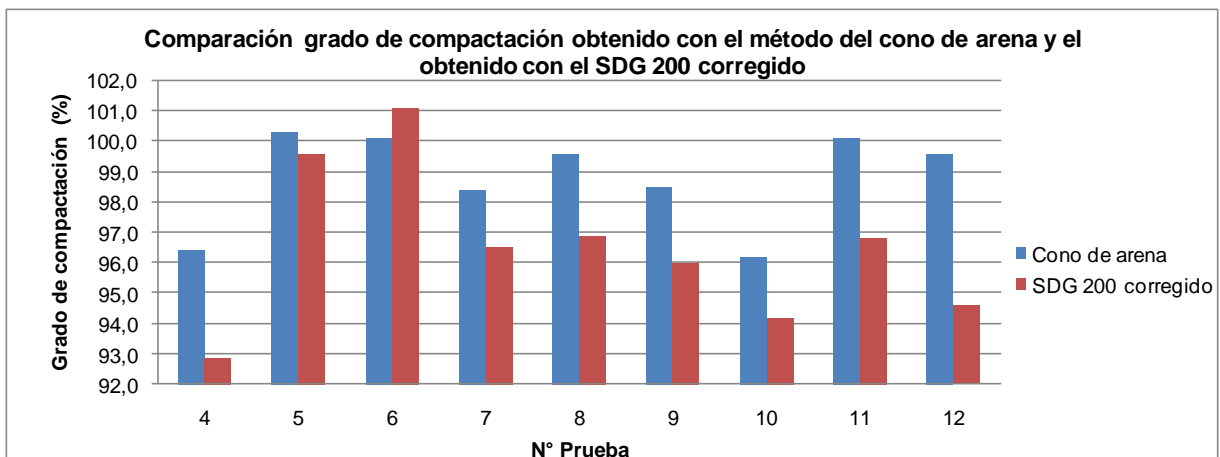


Figura 5.27 - Gráfico comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido en la base granular n°2

Se puede apreciar que la diferencia entre los valores obtenidos para el grado de compactación con ambos equipos presenta una gran variabilidad, como era lógico ya que dependen de la densidad compactada seca corregida. Se observan diferencias de hasta un 4,8%. Estas grandes diferencias demuestran que el equipo no entrega resultados confiables para este tipo de suelo, pudiendo rechazar sectores donde según el SDG 200, no se cumple con la compactación deseada, y sin embargo el grado de compactación real determinado por el método del cono de arena demuestra que es mucho mayor.

Las grandes diferencias entre los resultados obtenidos se deben principalmente a la heterogeneidad del material y a la sensibilidad del equipo a los cambios de temperatura.

5.4.2.7.- Planteamiento de una nueva corrección que involucra la temperatura del suelo

Al igual que para el material anterior, se realizó una regresión lineal multivariable con los datos obtenidos de densidad compactada seca con el método del cono de arena y los obtenidos con el densímetro SDG 200, agregando la variable del efecto de la temperatura.

Para realizar la regresión lineal, se utilizaron los primeros 8 controles realizados, y se probará esta ecuación con los 4 controles restantes.

En la tabla 5.24, se muestran los datos utilizados para realizar la regresión lineal

Tabla 5.24.- Datos utilizados para realizar la regresión lineal en la base granular n° 2

Densidad compactada seca (Kg/m ³)			
N°	Cono de arena	SDG 200	T° Suelo
1	2289	2136	25°C
2	2220	1932	33°C
3	2178	2100	25°C
4	2199	1949	31°C
5	2288	2098	23°C
6	2284	2133	20°C
7	2245	2029	23°C
8	2274	2040	25°C

Obteniendo la siguiente Ecuación:

$$\text{Densidad seca } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = A + B \times \left(\text{Densidad seca } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) + C \times (T \text{ [}^\circ\text{C]}) \quad (5.2)$$

Donde:

A=2192,416812

B=0,084060

C= - 4,596837

Al realizar los cálculos de densidad compactada seca con esta nueva corrección en los 4 controles restantes, se obtuvieron los siguientes resultados, que se presentan en la tabla 5.25 y en el gráfico de la figura 5.28.

Tabla 5.25.- Comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°2

Densidad compactada seca (Kg/m ³)				
N°	Cono de arena	SDG 200 corr	Diferencia	T° Suelo
9	2248	2215	33	32°C
10	2195	2212	-17	32°C
11	2284	2221	63	31°C
12	2273	2217	56	31°C

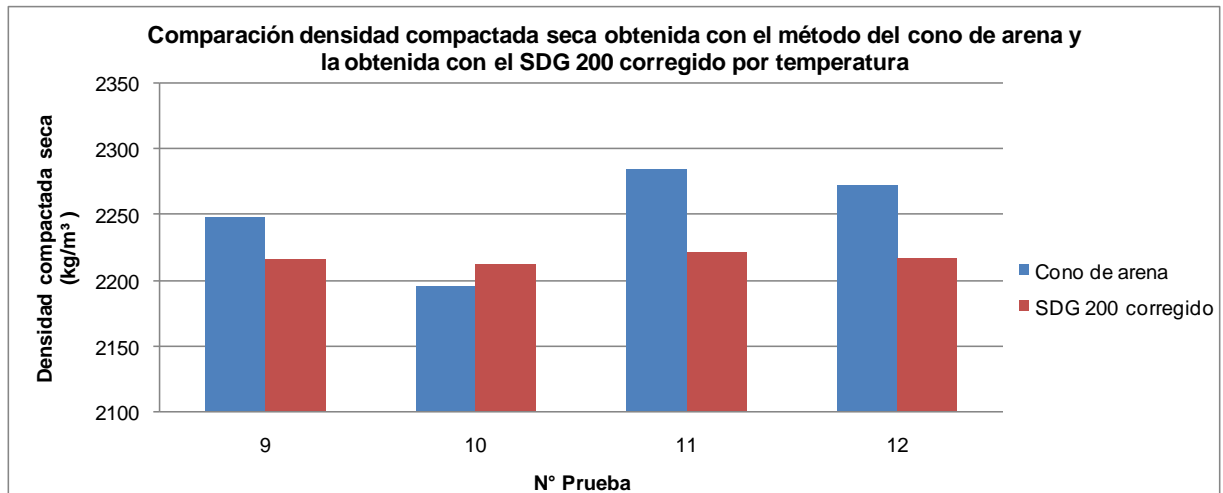


Figura 5.28.- Gráfico comparación de la densidad compactada seca obtenida con el método del cono de arena y la obtenida con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°2

Al realizar esta nueva corrección se puede observar que las diferencias disminuyen bastante y se acercan mucho más a los resultados obtenidos con el método del cono de arena. La mayor diferencia se puede apreciar en el punto 11, donde se observa una diferencia de 63 [kg/m³].

En la tabla 5.26 y en el gráfico de la figura 5.29, se muestran los resultados obtenidos para el grado de compactación con esta nueva corrección para el control de compactación, el que está en función de la densidad compactada seca antes corregida.

Tabla 5.26.- Comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular n°2

Grado de compactación (%)				
N°	Cono de arena	SDG 200 corr	Diferencia	T° Suelo
9	98,5	97,1	1,4	32°C
10	96,2	96,9	-0,7	32°C
11	100,1	97,3	2,8	31°C
12	99,6	97,2	2,4	31°C

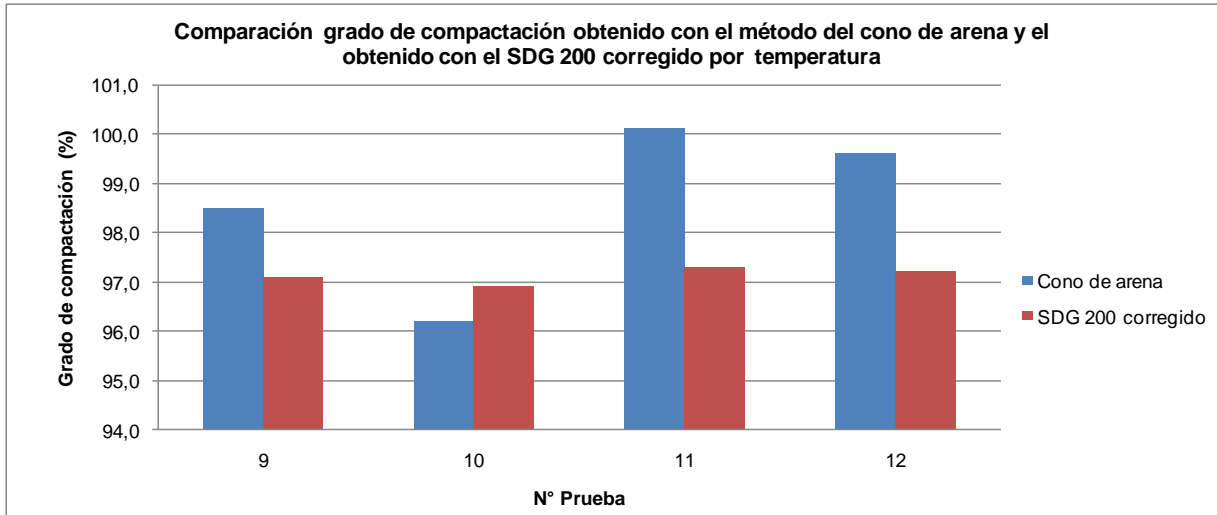


Figura 5.29.- Gráfico comparación del grado de compactación obtenido con el método del cono de arena y el obtenido con el SDG 200 corregido por temperatura en la base granular nº 2

Al efectuar la corrección por temperatura se puede apreciar que la diferencia entre el grado de compactación obtenido con el SDG 200 y el método del cono de arena disminuyó considerablemente, en contraste con la que se realizó anteriormente, en donde se utilizó la compensación como el promedio de las diferencias de los primeros 3 controles realizados, pero se sigue observando diferencias de hasta 2,8(%), que se puede observar en el punto nº 11. Sin embargo de acuerdo a este procedimiento se hubieran aprobado todos los puntos que se midió la densidad, debido a que con ambos métodos se obtienen resultados de grado de compactación mayores al 95(%), pero no da confianza debido a que al igual que en el material anterior, estas grandes diferencias entre el grado de compactación, demuestra que fácilmente al momento de medir la compactación en algún sector con el SDG 200, se puede aprobar sin que cumpla con la compactación deseada, o por el contrario se puede rechazar un sector, aun cumpliendo con la compactación deseada lo que significaría mayores gastos en obras de compactación innecesarias.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

De acuerdo a los ensayos de laboratorio realizados a los suelos donde se efectuaron los controles de compactación, se concluye que ambos materiales cumplen con la banda granulométrica TM-50c y además cumplen con las características para ser utilizados como bases granulares según la normativa vigente.

Los resultados obtenidos con el SDG 200 presentan una gran variabilidad, esto se debe principalmente a la heterogeneidad del material, posiblemente producto de concentraciones superiores de agregado grueso en las zonas donde se obtuvieron mayores resultados. Los resultados obtenidos presentan grandes diferencias con respecto al método del cono de arena.

Otro factor importante que influye en los resultados, es la temperatura del suelo, se pudo demostrar que esta influía en la variación de la medición, observando que a medida que la temperatura del suelo disminuía, el equipo entregaba resultados de densidad mayores, lo que hacía que la diferencia entre el SDG 200 y el método del cono de arena presentara variaciones importantes.

Al realizar las compensaciones de densidad compactada húmeda y porcentaje de humedad, como el promedio de las diferencias obtenidas en las primeras pruebas con el SDG 200 y el método del cono de arena, se siguen observando grandes diferencias en los resultados obtenidos, lo anterior producto de que la diferencia con la cual se compensaron los resultados, no se mantuvo constante en la totalidad de los controles realizados, presentando grandes variaciones.

Se plantearon ecuaciones utilizando regresiones multivariantes, agregando el efecto de la temperatura del suelo como otra variable al momento de realizar la compensación, utilizando estas ecuaciones los resultados se aproximan más a los resultados entregados por el método del cono de arena, en contraste con los obtenidos al realizar la compensación con el promedio de las diferencias de las primeras pruebas como lo establece el manual de uso del equipo, sin embargo siguen existiendo grandes diferencias que pueden resultar significativas al momento de realizar un control de compactación, además esto es poco práctico ya que se requiere tener controles a distintas temperaturas para poder realizar una buena regresión.

Otra de las desventajas que presenta el SDG 200, es que solo mide a una profundidad de 30 [cm], y al momento de controlar capas de menor espesor, se estaría controlando el material que se encuentra bajo el espesor controlado, el cual no corresponde al modelo de suelo que se ingresó al equipo, lo que hace que los resultados varíen en comparación con los obtenidos en mediciones de capas de mayor espesor, por esta razón, para este trabajo, no se consideraron los controles que se realizaron en las bermas, ya que estas tenían 20 [cm] de espesor y los resultados presentaban grandes diferencias en comparación a los realizados en la calzada, la que tenía un espesor de 30 [cm].

Al utilizar el SDG 200, es de vital importancia que las características del modelo de suelo ingresado al equipo, sean lo más representativo de suelo que se está midiendo, ya que pequeñas diferencias en el modelo de suelo ingresado, pueden influenciar en los resultados entregados por el equipo.

Las desventajas más relevantes de cada uno de los métodos existentes son que el densímetro SDG 200 no es un equipo autosuficiente ya que requiere de otros métodos para su calibración, además sus resultados se ven influenciados por la heterogeneidad del material y las variaciones de temperatura del suelo, el método del cono de arena es lento y los resultados se obtienen recién después de las 24 horas de iniciada la prueba, y el densímetro nuclear es un equipo radioactivo.

Ya que los resultados obtenidos con el densímetro SDG 200 se ven influenciados por muchos factores, no se recomienda la utilización para el control de compactación de bases granulares, ya que no entrega resultados confiables.

Anexo A: Resultados obtenidos con el método del cono de arena

Resultados ensayos realizados con el método del cono de arena para la base granular n° 1

Tabla A.1.- Ensayos de control de compactación realizados con el método del cono de arena en la base granular n° 1

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
Fecha	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	18-feb	20-feb	20-feb	20-feb	22-feb	22-feb	22-feb	22-feb	22-feb	22-feb	25-feb	25-feb	26-feb	26-feb	26-feb	28-feb	05-abr	05-abr	05-abr	05-abr	05-abr
Arena inicial (g)	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
Arena Final (g)	3522	3314	3373	3942	4585	3936	4175	4433	3863	3837	3321	4351	3950	3314	4157	3868	4423	4656	3260	3791	4355	3525	3447	3626	3414	3826	3803		
Arena Cono (g)	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1652	1649	1649	1649	1649	1649	1649	1610	1610	1610	1610	1610		
Arena Perforación (g)	3826	4034	3975	3406	2763	3412	3173	2915	3485	3511	4027	2997	3398	4034	3191	3480	2928	2695	4091	3560	2996	3826	3943	3764	3976	3564	3587		
Densidad de la arena (g/cm³)	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,456	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,411	1,411	1,411	1,411	1,411		
Volumen Perforación (cm³)	2628	2771	2730	2339	1898	2343	2179	2002	2394	2411	2766	2058	2334	2771	2192	2390	2033	1872	2841	2472	2081	2657	2794	2668	2818	2526	2542		
Peso material Húmedo (g)	6121	6447	6336	5349	4259	5532	5151	4696	5642	5586	6485	4746	5283	6271	5209	5521	4684	4334	6556	5628	4777	6140	6415	5893	6381	5791	5878		
Densidad Compactada Húmeda (kg/m³)	2329	2327	2321	2287	2244	2361	2364	2346	2357	2316	2345	2306	2264	2263	2377	2310	2304	2316	2308	2276	2296	2311	2296	2209	2264	2293	2312		
Humedad (%)	4,1	4,0	3,9	4,1	3,9	3,9	3,6	4,1	3,9	3,1	3,2	3,8	4,0	3,1	4,7	3,9	3,0	3,1	3,0	4,6	3,8	4,7	3,9	3,5	3,5	4,0	4,1		
Densidad Compactada Seca (Kg/m³)	2238	2237	2234	2197	2161	2272	2281	2253	2269	2247	2272	2221	2177	2196	2270	2223	2237	2246	2241	2177	2211	2208	2210	2135	2187	2204	2222		
Grado compactación (%)	100,3	100,2	100,1	98,4	96,8	101,8	102,2	100,9	101,7	100,7	101,8	99,5	97,5	98,4	101,7	99,6	100,2	100,6	100,4	97,5	99,1	98,9	99,0	95,7	98,0	98,7	99,6		
Masa Húmeda (g)	1482	1701,00	1892	5349	4259	5532	5151	4696	1503	1709	1749	1506	5283	6271	5209	5521	4684	4334	6556	5628	4777	6140	6408	5879	6368	5783	5869		
Masa Seca (g)	1424	1635,0	1821	5139	4100	5324	4971	4510	1447	1658	1695	1451	5081	6083	4975	5314	4549	4204	6366	5382	4601	5866	6170	5682	6151	5559	5640,5		
Humedad (%)	4,1	4,0	3,9	4,1	3,9	3,9	3,6	4,1	3,9	3,1	3,2	3,8	4,0	3,1	4,7	3,9	3,0	3,1	3,0	4,6	3,8	4,7	3,9	3,5	3,5	4,0	4,1		

Resultados ensayos realizados con el método del cono de arena para la base granular n° 2

Tabla A.2.- Ensayos de control de compactación realizados con el método del cono de arena en la base granular n° 2

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fecha	23-mar	23-mar	23-mar	23-mar	23-mar	24-mar	24-mar	24-mar	24-mar	24-mar	24-mar	24-mar
Arena inicial (g)	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
Arena Final (g)	2286	3183	3642	2771	2598	3264	2353	3690	3624	3053	4065	3534
Arena Cono (g)	1601	1601	1601	1601	1601	1601	1601	1601	1601	1601	1601	1601
Arena Perforacion (g)	5113	4216	3757	4628	4801	4135	5046	3709	3775	4346	3334	3865
Densidad de la arena (g/cm3)	1,398	1,398	1,398	1,398	1,398	1,398	1,398	1,398	1,398	1,398	1,398	1,398
Volumen Perforacion (cm3)	3657	3016	2687	3310	3434	2958	3609	2653	2700	3109	2385	2765
Peso material Humedo (g)	8650	6922	6043	7494	8184	7005	8314	6178	6248	6991	5614	6508
Densidad Compactada Humeda (kg/m3)	2365	2295	2249	2264	2383	2368	2303	2329	2314	2249	2354	2354
Humedad (%)	3,3	3,4	3,2	3,0	4,2	3,7	2,6	2,4	2,9	2,5	3,1	3,5
Densidad Compactada Seca (Kg/m3)	2289	2220	2178	2199	2288	2284	2245	2274	2248	2195	2284	2273
Grado compactacion (%)	100,3	97,3	95,5	96,4	100,3	100,1	98,4	99,7	98,5	96,2	100,1	99,6
Masa Humeda (g)	8756	6922	6035	7494	8184	7005	8314	6178	6248	6991	5614	6508
Masa Seca (g)	8475	6696	5846	7279	7857	6756	8105	6034	6069	6823	5447	6285
Humedad (%)	3,3	3,4	3,2	3,0	4,2	3,7	2,6	2,4	2,9	2,5	3,1	3,5

Anexo B: Resultados obtenidos con el densímetro SDG 200

Resultados ensayos realizados con el densímetro SDG 200 para la base granular n° 1

Tabla B.3.- Ensayos de control de compactación realizados con el SDG 200 para la base granular n° 1

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Densidad Compactada Húmeda (kg/m ³)	1951	1933	1910	1829	1805	1803	1800	1803	1805	1773	1766	1763	1834	1769	1873	1870	1762	1768	1862	1964	1813	1981	1783	1764	1768	1791	1799
Humedad (%)	5,5	5,3	5	4,2	4	3,8	3,7	4	4,1	3,8	3,8	4,2	4,4	3,6	4,5	4,6	3,3	3,4	4,7	5,5	4,2	5,8	3,8	3,6	3,7	3,9	3,9
Densidad Compactada Seca (Kg/m ³)	1849	1836	1820	1755	1736	1737	1736	1734	1734	1707	1702	1787	1757	1707	1792	1787	1706	1709	1779	1861	1740	1872	1719	1703	1706	1723	1731
Grado compactación (%)	82,9	82,3	81,6	78,7	77,8	77,9	77,8	77,8	77,8	76,6	76,3	76,3	78,8	76,5	80,4	80,1	76,5	76,6	79,8	83,4	78	83,9	77,1	76,4	76,5	77,3	77,6
Temperatura ° C	13°C	11°C	18°C	25°C	25°C	36°C	32°C	30°C	25°C	33°C	38°C	26°C	27°C	26°C	24°C	24°C	31°C	36°C	17°C	18°C	18°C	16°C	27°C	28°C	29°C	26°C	27°C

Resultados ensayos realizados con el densímetro SDG 200 para la base granular n° 2

Tabla B.4.- Ensayos de control de compactación realizados con el método del cono de arena en la base granular n° 2

N° Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Densidad Compactada Húmeda (kg/m ³)	2310	2061	2267	2082	2264	2310	2181	2196	2170	2121	2194	2134
Humedad (%)	8,2	6,7	8	6,8	7,9	8,3	7,5	7,7	7,5	7,2	7,7	7,3
Densidad Compactada Seca (Kg/m ³)	2136	1932	2100	1949	2098	2133	2029	2040	2019	1978	2037	1988
Grado compactación (%)	93,6	84,7	92	85,4	91,9	93,5	88,9	89,4	88,5	86,7	89,3	87,1
Temperatura ° C	25°C	33°C	25°C	31°C	23°C	20°C	23°C	25°C	32°	32°	31°	31°

Anexo C: Requisitos para bases granulares según la normativa vigente

Bases Granulares

Descripción y alcances

Esta sección se refiere a la confección, colocación y compactación de bases granulares, normalmente ubicadas sobre una subbase o subrasante, y destinadas a formar parte de la estructura de un pavimento asfáltico de rodadura del tipo concreto asfáltico o tratamiento superficial. Estos materiales también se utilizarán en la construcción de bermas y otras obras que señale el proyecto.

Requerimientos generales

Los agregados gruesos, retenidos sobre el tamiz N°4 (5mm), deben ser partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca, grava o escorias. Materiales que se quiebran con los ciclos alternados de hielo-deshielo y humedad-sequedad, no deben ser usados.

Los agregados finos, que pasan por el tamiz N°4 (5mm), deben estar constituidos por arenas naturales o trituradas y por partículas minerales que pasan por el tamiz N°200 (0,08mm).

Las fracciones que pasan por el tamiz N°200 (0,08mm) no deberán ser mayores que los dos tercios de la fracción que pasa por el tamiz N°40 (0,5mm)

Los límites de consistencia de la fracción que pasa por el tamiz N°40 (0,5mm) estarán conforme a lo indicado en la siguiente Tabla.

Tabla C.1.- Requisitos límites de consistencia

	Límite Líquido	Índice de Plasticidad
Subbase	Máx. 35	Máx. 8
Base Estabilizada	Máx. 25	Máx. 6
Capa de Rodadura		
- Regiones I a III	Máx. 35	5 - 10
- Regiones IV a VI	Máx. 35	4 - 9
- Regiones VII a X	Máx. 35	3 - 8
- Regiones XI a XII	Máx. 35	Máx. 7

Todo material deberá estar libre de materias orgánicas y terrones de arcillas.

El equivalente de arena, determinado según el Método descrito en 8.202.9 del MC-V8, será de mínimo 25%.

Las sales solubles no deben superar el 4%, Según método descrito en 8.202.19 del MC-V8.

Las bases granulares de gradación cerrada deberán ajustarse a las siguientes bandas granulométricas: TM-50b, TM-50c o TM-25 de la siguiente tabla. Cuando la base este destinada a ser recubierta por un tratamiento superficial, el tamaño máximo absoluto será de 40mm. Una vez elegida la banda granulométrica, esta no podrá ser cambiada por otra sin previa autorización por escrito del inspector fiscal.

Tabla C.2.- Bandas granulométricas para subbase, bases y capas de rodadura

Tamiz (mm)	TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
50	100	100	100				
40	-	70 - 100	-	100	100	100	
25	55 - 100	55 - 85	70 - 100	70 - 100	80 - 100	80 - 100	100
20	-	45 - 75	60 - 90	50 - 80	-	-	70 - 100
10	30 - 75	35 - 65	40 - 75	25 - 50	50 - 80	50 - 80	50 - 80
5	20 - 65	25 - 55	30 - 60	10 - 30	35 - 65	35 - 65	35 - 65
2.5	-	-	-	5 - 15	-	-	-
2	10 - 50	15 - 45	15 - 45	-	25 - 50	25 - 50	25 - 50
0.5	5 - 30	5 - 25	10 - 30	0 - 5	10 - 30	15 - 30	10 - 30
0.08	0 - 20	0 - 10	0 - 15	0 - 3	5 - 15	5 - 20	0 - 15

La fracción gruesa deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensayo de los ángeles, de no más de 35%.

La capacidad de soporte CBR y el porcentaje de material chancado varían, según el tipo de capa de rodadura a construir sobre la base granular. Los requerimientos correspondientes se indican en la siguiente tabla.

Tabla C.3.- Requisitos para bases granulares según tipo de capa de rodadura (graduación cerrada)

DESCRIPCION	CONCRETO ASFALTICO	TRATAMIENTO SUPERFICIAL	TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALTO TRANSITO	METODO
Capacidad de Soporte (CBR) al 95% de la D.M.C.S., según el Método descrito en 8.102.7 del MC-V8.	min. 80%	min. 100%	min. 120%	8.102.11
Material Chancado	min. 50%	min. 70%	min. 90%	8.202.6

Confección y colocación

Generalidades

La colocación de los materiales de base solo se iniciara una vez que se haya dado cumplimiento a los requerimientos establecidos en la sección 5.209, Preparación de la subrasante, la sección 5.301, subbases granulares , u otra sección de las E.T.G.C. que corresponda, cuando la base granular se coloque directamente sobre pavimentos existentes en proyectos de repavimentación. La base granular no deberá extenderse sobre superficies que presentes capas blandas, barrosas, heladas o con nieve.

Los procedimientos de confección y colocación del material deberán asegurar que al perfilarse y compactarse según lo especificado, la base granular se ajustara a los perfiles longitudinales y transversales del proyecto. Los sectores de camino donde se coloquen bases granulares deberán estacarse emplazando puntos de referencia aritmética y de ubicación del eje y bordes, a distancias no superiores a 20 m entre sí. Deberán estacarse además, todos los puntos singulares del trazado. En zonas de transición de peraltes, las estacas se deberán colocar a 10 m de distancia entre sí, como máximo.

Confección

La confección de la base granular deberá efectuarse en plantas procesadoras fijas o móviles, que asegure la obtención del material que cumpla con los requisitos establecidos. El material deberá acopiarse en canchas habilitadas especialmente para este efecto, de manera que no se produzca contaminación ni segregación de los materiales.

Colocación

La base granular debidamente preparada, se extenderá sobre la plataforma del camino, incluyendo las aéreas de bermas, mediante equipos distribuidores autopropulsados, debiendo quedar el material listo para ser compactado sin necesidad de mayor manipulación para obtener el espesor, ancho y bombeo deseado. Alternativamente, el material podrá transportarse y depositarse sobre la plataforma del camino, formando pilar que den un volumen adecuado para obtener el espesor, ancho y bombeo especificado. En este último caso, los materiales apilados deberán mezclarse por medios mecánicos hasta obtener la homogeneidad y humedad necesaria, tras lo cual se extenderá uniformemente.

La base deberá construirse por capas de espesor compactado no superior a 0,3 m ni inferior a 0,12 m. Espesores superiores a 0,3m, se extenderán y compactarán en capas. El material extendido deberá ser de una granulometría uniforme, no debiendo presentar bolsones o nidos de materiales finos o gruesos.

Compactación

Una vez extendido el material, este deberá compactarse mediante rodillos preferentemente del tipo vibratorio para terminarse con rodillos lisos o neumáticos. El rodillado deberá progresar en forma gradual desde el punto bajo de los costados hacia el centro de la vía en construcción, traslapando cada pasada con la precedente en por lo menos la mitad del ancho del rodillo.

Las bases granulares de capacidad de soporte $CBR \geq 80\%$ se deberán compactar hasta que el material haya alcanzado un nivel de compactación mínimo del 95% de la DMCS, obtenida según el método descrito en 8.102.7 del MC V-8 u 80% de la Densidad Relativa (DR), según método descrito en 8.102.8 del MC V-8. Las bases granulares de $CBR \geq 100\%$ y $CBR \geq 120\%$, se compactarán hasta alcanzar como mínimo de 98% de la DMCS u 85 % de la DR. Las densidades mínimas señaladas anteriormente, regirán además para el material que conforme las bermas.

En los lugares inaccesibles a los equipos usuales de compactación, el material deberá compactarse con pisones mecánicos manuales u otros equipos, hasta alcanzar la mínima densidad establecida.

Terminación

Una vez terminada la compactación y perfiladura de la base granular, ajustándose a los perfiles longitudinales y transversales del proyecto, esta deberá presentar una superficie de aspecto uniforme y sin variaciones en cota en ningún lugar mayores que +0,0 cm y -1,0 cm para bases granulares de poder de soporte igual o mayor 80% CBR. Asimismo para bases granulares de $CBR \geq 100\%$ y $CBR \geq 120\%$, la tolerancia de determinación será de +1,0 cm y -1,0 cm con respecto a las cotas establecidas en el proyecto. No obstante que se aceptaran las tolerancias e terminación señaladas para las bases granulares, el contratista tomara todas las precauciones necesarias para cumplir con los requisitos de espesor, lisura, rugosidad (IRI) y otros exigidos para el pavimento o tratamiento a construir sobre ellas.

Si se detectaran áreas a un nivel inferior a la tolerancia especificada, estas deberán escarificarse en un espesor mínimo de 0,1m para enseguida agregar material, regar, recompactar y terminar la superficie hasta dar cumplimiento a lo establecido en el numeral anterior. Las áreas a un nivel superior a la tolerancia especificada, deberán ser rebajadas, regadas y compactadas nuevamente, hasta cumplir con lo establecido.

Para la terminación de las bermas, regirán las mismas tolerancias de terminación establecidas anteriormente.

Bibliografía

- Manual de usuario Densímetro SDG 200
- Libro Curso de Laboratorista Vial: Geotecnia Volumen III
- [Nch1516 of 79] Determinación de la densidad en terreno – Método del cono de arena
- [Nch 1515 of 79] Determinación del contenido de humedad en horno
- [Nch 3145.n 2008] Determinación de la densidad en terreno- Método del densímetro nuclear.
- [NCh 164] Preparación y extracción de muestras.

- Manual de carreteras Volumen 3
- Manual de carreteras Volumen 5
- Manual de carreteras Volumen 8
- [Nch 165 of 1977] Tamizado y determinación de la granulometría
- [Nch 1517 I of 1979] Determinación del límite líquido
- [Nch 1517 I of 1979] Determinación del límite plástico
- [Nch 1534 II] Método Proctor Modificado
- [Nch 164] Extracción y preparación de muestras
- Presentación Izcra Reyes INDEX SA.

