

1. SUELOS VOLCÁNICOS — ANÁLISIS — PREPARACIÓN — TESTES Y DISERTACIONES
ACADÉMICAS

2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS — AEROPUERTOS INTERNACIONALES —

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO
QUITO (ECUADOR)

TE
210.4
.H533
2007

**COMPACTACIÓN EN SUELOS VOLCÁNICOS DEL SECTOR DEL
NUEVO AEROPUERTO DE QUITO**

Raúl Fernando Hidalgo Artieda

USFQ - BIBLIOTECA

84601

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, mayo de 2007

USFO - BIBLIOTECA	
d. Puzos	
07-08-13	
17 AGO 2007	03437

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico**

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Compactación en Suelos Volcánicos del Sector del Nuevo
Aeropuerto Internacional de Quito**

Raúl Fernando Hidalgo Artieda

Ing. César Landázuri
Director de la Tesis



Handwritten signature of César Landázuri in blue ink, positioned above a horizontal dashed line.

Ing. Patricio Arévalo
Miembro Comité de Tesis



Handwritten signature of Patricio Arévalo in black ink, positioned above a horizontal dashed line.

Ing. Fernando Romo
Decano del Colegio Politécnico



Handwritten signature of Fernando Romo in black ink, positioned above a horizontal dashed line.

Quito, Mayo 2007

© Derechos de Autor
Raúl Fernando Hidalgo Artieda
2007

© Derechos de Autor
Raúl Fernando Hidalgo Artieda
2007

Dedicatoria:

A mis padres, Raúl y Mónica; a mis hermanos, Juan y David; a mis familiares y amigos.

Agradezco:

A mis padres por todo el apoyo que me han dado en la vida y por permitirme estudiar una carrera y a mis hermanos que los quiero mucho.

A mi familia, abuelos, tíos y primos por siempre estar conmigo.

A mis amigos y compañeros, por su valiosa ayuda durante la carrera y por los buenos momentos.

A mis profesores, por sus enseñanzas, especialmente al Ing. César Landázuri S. por dirigirme en la elaboración de esta tesis.

Agradezco también al: Ing. César Landázuri L., Ing. Marcio da Matta, al laboratorio de Suelos del NAIQ y en general a todas las personas que colaboraron en la elaboración de éste trabajo.

Muchas gracias.

Resumen

Esta tesis: "Compactación en Suelos Volcánicos del Sector del Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito", es un estudio del comportamiento de suelos de origen volcánico al ser compactados.

El proyecto esta ubicado en Tababela, en el sitio en donde se construye el Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito (NAIQ). Una parte importante en la construcción del proyecto es el movimiento de tierras y la compactación del suelo que conforma el terraplén en donde posteriormente se encontraran la pista y las edificaciones importantes.

El movimiento de tierras consta de varias partes como desbroce, excavación y transporte del material, tendido, homogenización y compactación.

La compactación es el proceso mediante el cual se densifica el suelo por medio de la disminución de vacíos usando un esfuerzo mecánico, mejorando así sus características.

El control de compactación o de calidad es vital para asegurarse que el terraplén cumpla con los requerimientos (95% de compactación) y pueda soportar las cargas destinadas al proyecto.

Este control se logra mediante ensayos de laboratorio y de campo. En el laboratorio mediante el ensayo Proctor Modificado y en el campo: densidad de cono y arena, método de control de compactación Hilf, densímetro nuclear, DCP y CBR de Campo.

Mediante los datos obtenidos en estos ensayos, además de controlar la calidad del trabajo, se puede llegar a conocer como se comportan los suelos volcánicos del sector al ser compactados, obtener correlaciones entre los ensayos y dar recomendaciones acerca de la compactación de estos suelos.

Abstract

This thesis: "Compaction of Volcanic Soils From the New Quito International Airport", studies the behavior of volcanic soils when they are compacted.

The project is located near Tababela, in the place where the New Quito International Airport (NQIA) is being built. An important part of this project is the movement of earth and its compaction during the conformation of the embankment where later will be placed the runway and other structures.

The process of earth movement has the following stages: clearing the place, excavation and transportation, spreading of material and compaction.

The compaction is the improvement of the mechanical characteristics of soil by decreasing voids using a mechanical effort.

The compaction control is essential to guarantee that the embankment reaches the requirements of the project (95% of compaction).

This control is made using laboratory and field tests. Modified Proctor Compaction test at laboratory, and at field: sand and cone density, nuclear methods, Hilf's compaction control method, DCP and in situ CBR.

Using these test results it is possible to control the quality of work, know the behavior of the compacted soil, find correlations between tests and to recommend about the compaction of this type of soils.

Tabla de Contenido

Derechos de autor.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Tabla de contenido.....	viii
Lista de figuras.....	xiii
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO.....	1
CAPÍTULO 1.....	3
1. Generalidades.....	3
1.1. Ubicación del Proyecto.....	3
1.2. Características Generales del NAIQ.....	4
1.3. Obras a realizarse en el NAIQ.....	7
1.3.1. Construcciones de tierra.....	8
1.3.2. Movimiento de tierras en el NAIQ.....	10
1.3.2.1. Procedimiento para el movimiento de tierras.....	17
1.4. Descripción de los suelos del lugar.....	25
1.4.1. Suelos volcánicos.....	25
1.4.2. Clasificación de los suelos del lugar.....	27
1.4.2.1. Clasificación manual visual.....	28
1.4.2.2. Clasificación SUCS y AASTHO.....	28
1.4.2.3. Perfiles estratigráficos.....	29
1.4.2.4. Resumen clasificación de los suelos del lugar.....	30
CAPÍTULO 2.....	32

2. Compactación de suelos.....	32
2.1. Introducción.....	32
2.2. Definición de la compactación de suelos.....	32
2.2.1. Teorías de la Compactación.....	33
2.2.2. Contenido de humedad, densidad y grado de compactación.....	37
2.2.3. Curva de Compactación.....	39
2.2.4. Factores que influyen en la compactación.....	41
2.2.4.1. Efecto del contenido de humedad.....	41
2.2.4.2. Efecto de la energía de compactación.....	43
2.2.4.3. Efecto del tipo de suelo compactado.....	45
2.2.4.4. Efecto del método de compactación.....	47
2.2.4.5. Efecto de la preparación de las muestras.....	47
2.2.5. Propiedades de los suelos compactados.....	48
2.2.5.1. Permeabilidad.....	48
2.2.5.2. Compresibilidad.....	49
2.2.5.3. Resistencia al corte.....	50
2.2.6. Comportamiento de los suelos compactados.....	52
2.3. Métodos de compactación en el laboratorio.....	56
2.4. Métodos de compactación en el campo.....	61
2.4.1. Tipos de compactadores en campo.....	61
2.4.2. Compactadores utilizados en el NAIQ.....	63
CAPÍTULO 3.....	65
3. Control de compactación.....	65
3.1. Métodos de control de compactación.....	67
3.1.1. Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557 y PO NQIA 510 04.....	67

3.1.1.1. Resumen del ensayo.....	67
3.1.1.2. Equipo.....	67
3.1.1.3. Preparación de las muestras.....	68
3.1.1.4. Procedimiento del ensayo.....	69
3.1.1.5. Cálculos.....	71
3.1.2. Método del cono y arena ASTM D1556 y PO NQIA 510 10.....	71
3.1.2.1. Resumen del ensayo.....	71
3.1.2.2. Equipo.....	72
3.1.2.3. Procedimiento del ensayo.....	72
3.1.2.4. Cálculos.....	76
3.1.3. Método nuclear (densidad y humedad en campo) ASTM D2922...77	
3.1.3.1. Resumen del ensayo.....	77
3.1.3.2. Principios de funcionamiento de un densímetro nuclear.....	78
3.1.3.3. Equipo.....	80
3.1.3.4. Procedimiento del ensayo.....	80
3.1.3.5. Cálculos.....	82
3.1.4. Ensayo DCP ASTM D6951 y PO NQIA 510 12.....	82
3.1.4.1. Resumen del ensayo.....	82
3.1.4.2. Equipo.....	83
3.1.4.3. Procedimiento del ensayo.....	83
3.1.4.4. Cálculos.....	84
3.1.5. Método Hilf de control de compactación ABNT MB 3443.....	85
3.1.5.1. Resumen del ensayo.....	86
3.1.5.2. Equipo.....	86
3.1.5.3. Procedimiento del ensayo.....	87

3.1.5.4. Cálculos.....	88
3.1.6. Ensayos CBR de laboratorio y CBR de campo.....	90
CAPÍTULO 4.....	92
4. Resultados y análisis.....	92
4.1. Resultados obtenidos.....	92
4.2. Análisis estadístico.....	92
4.2.1. Resultados estadísticos.....	93
4.2.1.1. Densidad seca.....	93
4.2.1.1.1. Densidad seca máxima Proctor Modificado.....	93
4.2.1.1.2. Densidad seca cono y arena.....	94
4.2.1.1.3. Densidad seca densímetro nuclear.....	95
4.2.1.2. Contenido de humedad.....	96
4.2.1.2.1. Humedad óptima Proctor Modificado.....	96
4.2.1.2.2. Humedad cono y arena.....	96
4.2.1.2.3. Humedad densímetro nuclear.....	97
4.2.1.3. Grado de compactación.....	98
4.2.1.3.1. Grado de compactación Hilf.....	98
4.2.1.3.2. Grado de compactación cono y arena.....	99
4.2.1.3.3. Grado de compactación densímetro nuclear.....	100
4.2.1.4. Resumen resultados estadísticos.....	101
4.3. Rangos de trabajo.....	102
4.4. Comparación de resultados obtenidos en los diferentes ensayos.....	102
4.4.1. Confiabilidad de los ensayos Hilf y Nuclear.....	102
4.4.2. Diagramas de Caja.....	111
4.4.2.1. Densidad seca.....	111

4.4.2.2. Humedad.....	112
4.4.2.1. Grado de Compactación.....	113
4.5. Correlaciones.....	116
4.5.1. Correlación Grado de compactación vs. índice DCP.....	116
4.5.2. Correlación CBR vs. índice DCP.....	120
CAPÍTULO 5.....	125
5. Conclusiones y recomendaciones.....	125
5.1. Conclusiones.....	125
5.1.1. Análisis estadístico.....	125
5.1.2. Correlación grado de compactación vs. índice DCP.....	125
5.1.3. Correlación CBR vs. índice DCP.....	126
5.1.4. Confiabilidad de los ensayos Hilf y Nuclear.....	126
5.1.5. Conclusiones generales.....	127
5.2. Recomendaciones.....	128
5.2.1. Proceso de compactación.....	128
5.2.2. Control de compactación.....	129
BIBLIOGRAFÍA.....	132
Anexo 1.....	135
Anexo 2.....	137
Anexo 3.....	142
Anexo 4.....	155
Anexo 5.....	160
Anexo 6.....	172

Lista de Figuras

Figuras

CAPÍTULO 1

1.1. Fotografía aérea pirámide Misión Geodésica de 1740.....	3
1.2. Fotografía aérea ubicación NAIQ con respecto a la ciudad de Quito.....	4
1.3. Distribución general del Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito.....	7
1.4. GC, grupos de corte.....	11
1.5. S1, Primera etapa.....	12
1.6. S2, Etapa 2.....	12
1.7. S3, Etapa 3.....	13
1.8. S4, Etapa 4.....	13
1.9. S5, Etapa 5.....	14
1.10. S6, Etapa 6.....	14
1.11. S7, Etapa 7.....	15
1.12. S8, Etapa 8.....	15
1.13. S9, Etapa 9.....	16
1.14. FG, grupos de trabajo.....	17
1.15. Vista en planta del proceso de limpieza y desbroce del terreno.....	18
1.16. Vista en corte del proceso de limpieza y desbroce del terreno.....	18
1.17. Piscinas de preacondicionamiento.....	19
1.18. Proceso de excavación y transporte.....	20
1.19. Proceso de preparación de la fundación.....	21
1.20. Tendido del material.....	24
1.21. Homogenización del material.....	24
1.22. Compactación del material.....	25

1.23. Ubicación de perforaciones área de relleno para parqueadero NAIQ.....	29
1.24. Ubicación de perforaciones realizadas en el área de corte NAIQ.....	30
CAPÍTULO 2	
2.1. Fases de la curva de compactación según Hogentogler.....	34
2.2. Menisco formado entre partículas de suelo.....	35
2.3. Curva de Compactación.....	39
2.4. Curva de compactación y curvas de saturación.....	42
2.5. Contenido de humedad vs. grado de saturación.....	43
2.6. Curvas de compactación P. estandar y modificado.....	44
2.6. Curvas de compactación para cinco suelos diferentes.....	46
2.8. Esfuerzo normal y esfuerzo cortante en el plano de falla.....	51
2.9. Relación resistencia a compresión con la humedad y peso específico.....	52
2.10. Estructura de suelos finos.....	53
2.11. Resistencia a la compresión simple.....	54
2.12. Resistencia al corte.....	55
2.13. Asentamiento.....	56
2.14. Vista en planta molde Proctor estándar y modificado.....	57
2.15. Dimensiones molde Proctor estándar y modificado.....	57
2.16. Martillo utilizado en el ensayo Proctor estándar.....	58
2.17. Rodillo liso de 16 toneladas Ingersoll Rand SD 160 DX.....	61
2.18. Rodillo neumático Caterpillar PS 150B.....	62
2.19. Rodillo pata de cabra.....	63
2.20. Rodillo liso de 12 toneladas Ingersoll Rand SD 100D.....	64
2.21. Rodillo neumático Caterpillar PS 360C.....	64

CAPÍTULO 3

3.1. Cono con doble válvula, base metálica e implementos.....	72
3.2. Nivelación del terreno.....	73
3.3. Nivelación del terreno.....	73
3.4. Colocación del plato base.....	73
3.5. Excavación del agujero.....	74
3.6. Recolección del material.....	74
3.7. Agujero listo para el ensayo.....	75
3.8. Aparato listo para el ensayo.....	75
3.9. Plato base y arena una vez retirada la botella.....	76
3.10. Recuperación de la arena de Ottawa.....	76
3.11. Modo transmisión directa.....	79
3.12. Modo retrodispersión.....	79
3.13. Densímetro nuclear Troxler 3430.....	80
3.14. Realización del agujero para el ensayo.....	81
3.15. Densímetro nuclear tomando lecturas.....	82
3.16. Dimensiones martillo DCP.....	83
3.17. Martillo DCP.....	83
3.18. Realización ensayo DCP.....	84
3.19. Ábaco para calcular el desvío de humedad Hilf.....	89
3.20. Ensayo CBR de campo.....	91

CAPÍTULO 4

4.1. Resumen estadística densidad seca máxima Proctor Modificado.....	93
4.2. Resumen estadística densidad seca cono y arena.....	94
4.3. Resumen estadística densidad seca densímetro nuclear.....	95

4.4. Resumen estadística humedad óptima Proctor Modificado.....	96
4.5. Resumen estadística humedad cono y arena.....	97
4.6. Resumen estadística humedad densímetro nuclear.....	98
4.7. Resumen estadística grado de compactación Hilf.....	99
4.8. Resumen estadística grado de compactación cono y arena.....	100
4.9. Resumen estadística grado de compactación densímetro nuclear.....	101
4.10. Resumen estadístico desvío GC% Hilf con respecto al cono y arena.....	107
4.11. Resumen estadístico desvío GC% densímetro nuclear con respecto al cono y arena.....	108
4.12. Resumen estadístico desvío densidad seca densímetro nuclear con respecto al cono y arena.....	108
4.13. Resumen estadístico desvío w% densímetro nuclear con respecto al cono y arena.....	109
4.14. Diagramas de caja para la densidad seca.....	112
4.15. Diagrama de caja para la humedad.....	113
4.16. Diagrama de caja para el grado de compactación.....	114
4.17. Diagramas de caja densidad seca ensayos totales.....	114
4.18. Diagramas de caja humedad.....	115
4.19. Diagramas de caja grado de compactación.....	115
4.20. Grado de compactación vs. DCP a 0cm.....	117
4.21. Grado de compactación vs. DCP a 7cm.....	118
4.22. Grado de compactación vs. DCP (P2-P1/1).....	119
4.23. Grado de compactación vs. DCP Total Capa.....	119
4.24. Grado de compactación vs. Primer punto DCP.....	120

4.25. Grado de compactación vs. 2do y 3er puntos DCP.....	120
4.26. CBR vs. DCP (P2-P1).....	122
4.27. CBR vs. DCP (P3-P2).....	123
4.28. CBR vs. DCP (P3-P1).....	123

CAPÍTULO 5

5.1. Profundidad vs. índice DCP.....	130
5.2. Carta de control para el grado de compactación.....	131

Tablas

CAPÍTULO 2

2.1. Compresión de un limo a varios contenidos de humedad y estados de carga.....	50
2.2. Especificaciones del ensayo Proctor Estándar.....	60
2.3. Especificaciones del ensayo Proctor Modificado.....	60

CAPÍTULO 3

3.1. Control de compactación en el NAIQ.....	66
3.2. Tiempo de reposo requerido para muestras humedecidas.....	69
3.3. Correlación DCP-CBR ASTM D 6951-03.....	85

CAPÍTULO 4

4.1. Resultados obtenidos Proctor Modificado, Cono y Arena, y método Hilf de control de compactación.....	172-174
4.2. Resultados obtenidos Proctor Modificado, Cono y Arena, y método Hilf de control de compactación.....	174-176
4.3. Resultados obtenidos en los ensayos del Densímetro Nuclear y DCP en el relleno del NAIQ.....	177-196

4.4. Resumen resultados Proctor Modificado: densidad seca máxima, humedad óptima y densidad húmeda máxima.....	197-201
4.5. Resumen estadístico para el total de ensayos.....	101
4.6. Resumen de resultados grado de compactación ensayos cono y arena, Hilf y densímetro nuclear.....	103-105
4.7. Resumen de resultados densidad seca y humedad, ensayos cono y arena y densímetro nuclear.....	105-106
4.8. Resumen estadística tablas 4.6 y 4.7.....	111
4.9. Ejemplo de un ensayo DCP.....	116-117
4.10. Índice DCP y CBR de campo.....	121-122

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Introducción

La tierra o suelo es uno de los materiales más antiguos que existen. En la antigüedad fue usada para construir tumbas, viviendas, templos, vías de comunicación, muros para retención de agua e inclusive ciudades enteras. En la actualidad la tierra o suelo es utilizado para obras de mayor importancia como rellenos de soporte de estructuras, diques, terraplenes para carreteras y aeropuertos, entre otras estructuras.

Sin embargo la tierra por si sola no es muy resistente, por lo que es necesario mejorar sus condiciones mediante su compactación, la misma que aumenta la resistencia y capacidad de carga del suelo. Este mejoramiento mediante compactación se lleva a cabo debido a la aplicación de una energía sobre el suelo, la que provoca la remoción de aire (vacíos), volviéndose el material más denso y más resistente.

Los primeros estudios sobre la compactación de suelos para su mejoramiento fueron publicados por R. Proctor en el año de 1933. A partir de estos estudios, se obtuvo un método de laboratorio para fijar especificaciones para el trabajo en el campo y control de calidad de la obra. Este método y sus variaciones, son los que dan pautas sobre los procedimientos a utilizarse en el campo, en la construcción de obras de tierra compactada.

Los métodos de compactación de laboratorio, también tienen la finalidad de controlar la calidad de la obra. A esto se le llama control de compactación. Este control es de mucha importancia ya que de él depende que se cumplan los requerimientos de la obra. La falta de control de la compactación puede llevar a obtener resultados no deseados al momento en que la obra sea puesta

en servicio, como por ejemplo: asentamientos no deseados o simplemente el fracaso de proyecto. La utilización de métodos de laboratorio debe estar además acompañada por otros para el campo, cuyos datos son la base del control.

La combinación de métodos de compactación en laboratorio y ensayos de control de compactación en el campo, nos llevan a garantizar la calidad del producto final y que este cumpla con los requerimientos para el funcionamiento óptimo de las obras cuyo principal material es el suelo compactado.

Para el caso de este proyecto, se siguió parte de la construcción del terraplén del Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito, realizándose pruebas y ensayos de laboratorio y de campo, que junto a sus resultados y análisis de los mismos expuestos en esta tesis, pretenden aportar al conocimiento de la compactación de los suelos del sector.

Objetivo

Debido a que no todos los suelos se comportan de la misma manera y esto incluye a su comportamiento al momento de ser compactado, este proyecto tiene como objetivo llegar a conocer el comportamiento y conocer los rangos de trabajo de los suelos volcánicos del sector del Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito, a través del análisis estadístico y la obtención de ciertas correlaciones entre resultados obtenidos en los diversos ensayos como por ejemplo: correlación CBR – DCP, y de esta forma poder dar recomendaciones acerca del procedimiento y control de compactación de estos suelos.

CAPITULO 1

1. Generalidades

1.1. Ubicación del Proyecto

El proyecto del Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito (NAIQ), esta ubicado en las cercanías de Puembo, Tababela y Yaruquí, en la Provincia de Pichincha, Cantón Quito, Parroquia Tababela. Se extiende sobre la llanura de Caraburo, a una altura de 2400 metros sobre el nivel del mar, la misma que se orienta en dirección Nor-Noroeste. El terreno se ubica inmediatamente al sur de la pirámide que en 1740 construyó La Misión Geodésica Francesa. El terreno limita al norte por la quebrada del río Urabia, al este por la quebrada del río Santa Rosa y al oeste por la quebrada del Guambi (Cazar 1). Tiene una inclinación no mayor a al 5% (Cazar 1).

Tomando en cuenta la ubicación de dicha pirámide, se puede decir que las coordenadas aproximadas del lugar de construcción del NAIQ, son $0^{\circ}05'57''$ de longitud sur y $78^{\circ}21'54''$ de latitud oeste (ver Figura 1.1) (Google Earth).



Figura 1.1.- Fotografía aérea Pirámide de la Misión Geodésica de 1740 (Google).

El Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito se ubica aproximadamente a 25Km de la ciudad o a 40 minutos, viajando por la Vía Interoceánica, que en la actualidad es la vía que conecta a Quito con el NAIQ. La ubicación del NAIQ respecto a la ciudad de Quito de muestra en la Figura 1.2.



Figura 1.2.- Fotografía aérea Ubicación del NAIQ con respecto a la ciudad de Quito (Google).

1.2. Características Generales del NAIQ

El Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito entrará en servicio a partir del año 2009 y reemplazará al Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, el mismo que en la actualidad no satisface la demanda de cantidad de pasajeros y de carga, así como no cumple con normas internacionales de aviación.

El NAIQ tendrá la capacidad de recibir a más de 4 millones de pasajeros por año y 270 mil toneladas de carga. Además con el fin de satisfacer la demanda futura, el aeropuerto será ampliado por etapas en los años 2020 y 2030 (CORPAQ, Características).

La superficie que abarca el proyecto es de 1500 hectáreas, de las cuales 540 corresponden al área de construcción. La terminal de pasajeros tendrá una superficie de 38000m², en cuatro niveles, con servicios acordes con las normas IATA y contará con siete puentes de embarque de pasajeros, capacidad de estacionamiento remoto para 20 aeronaves, 50 mostradores para la atención a los viajeros por parte de las compañías de aviación, instalaciones modulares que facilitan la realización de ampliaciones de acuerdo con las necesidades, amplio espacio para estacionamiento de vehículos, servicios de tecnología de punta para operaciones aeroportuarias, normas de seguridad con circuito cerrado de televisión, de acuerdo a normas OACI y sistema inteligente que controla los servicios de energía, iluminación y comunicación (Compaq, Características).

La pista del NAIQ tendrá una longitud de 3600 metros para la fase inicial de operación y 45 metros de ancho, hecha de asfalto y con capacidad para un promedio de 44 operaciones por hora (CORPAQ, Características). La longitud de la pista fue calculada en base a las aeronaves del tipo Boeing 747 – 400 y Airbus 340 – 300, que son de los aviones más grandes del mundo en operaciones de pasajeros y de carga, y bajo las peores condiciones de operación como máxima temperatura, declive y viento extremo (CORPAQ, Resumen Ejecutivo).

La torre de control tendrá una altura de 41m y un área de 901m². Contará con sistema ATC y ayudas de navegación CAT I (AAGC, IMS Módulo 1). El NAIQ podrá acomodar una aproximación ILS (Instrument Landing System) con una pendiente de 2.5 grados desde ambas direcciones y su

espacio aéreo es suficiente y garantiza seguridad para realizar las operaciones de procedimientos instrumentales (CORPAQ, Resumen Ejecutivo).

Estas características del NAIQ permitirán que se alcancen distancias requeridas para llegar a los HUBs, que son aeropuertos al que llegan y salen vuelos de larga distancia y operados por aviones de gran capacidad, como Los Ángeles y Nueva York (CORPAQ).

Además contará con (AAGC, IMS Módulo 1):

- Área de desarrollo de 300Ha
- Sistema de abastecimiento de 120 litros por segundo
- Hangar de $5000m^2$
- Estación de bomberos y mantenimiento de $2300m^2$
- Servicios en tierra, $2600m^2$
- Edificio de catering de $4500m^2$
- Edificios e instalaciones para aviación general de $1000m^2$
- Estación de policía
- Helipuerto
- Puente de salidas
- Conector Alpachaca 4,3km
- Vía de aproximación 4km

En la Figura 1.3 se muestra la distribución general de las obras, edificios y pistas del Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito.

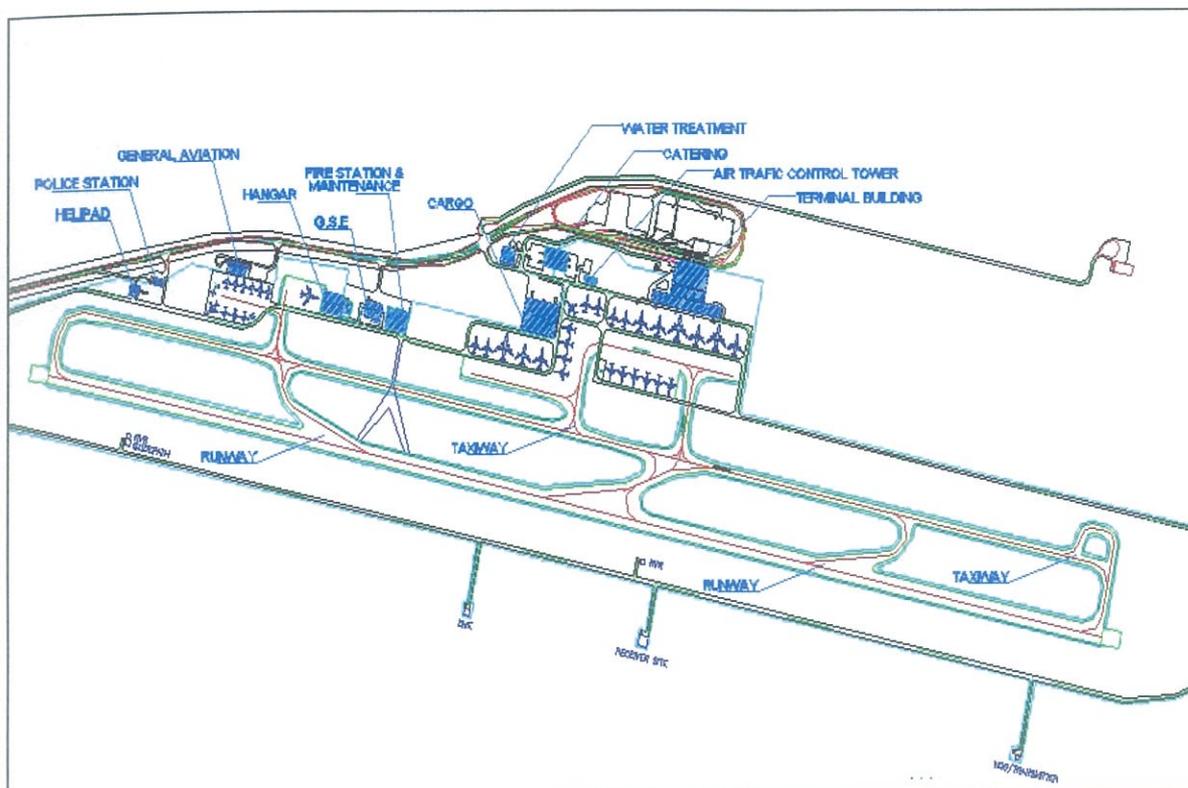


Figura 1.3.- Distribución general del Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito (AAGC).

1.3. Obras a realizarse en el NAIQ

La construcción de del NAIQ se relazará en varias etapas. Las etapas y obras principales del proyecto en orden son (AAGC, IMS Módulo 1):

- Infraestructura de la construcción:
 - Campamento y oficinas
 - Línea de abastecimiento de agua desde Paluguillo.
- Movimiento de tierras:
 - Plataforma de la terminal de pasajeros
 - Norte de campo aéreo
 - Suroeste de campo aéreo.
- Drenaje

- Pavimentos de pista y plataformas
- Infraestructura de aeropuerto
- Construcción de terminal de pasajeros
- Construcción de torre de control y estación de bomberos
- Control de tráfico aéreo, ayudas de navegación y seguridad
- Construcción de edificios auxiliares:
 - Hangar
 - Estación de policía
 - Catering
 - Cargo
 - Edificios de servicios de tierra
- Pruebas y entrega
- Certificación

1.3.1. Construcciones de Tierra

Una de las obras de mayor importancia en la construcción de un aeropuerto y obras en general es el movimiento de tierras y conformación de las obras con dicho material (levantamiento de terraplenes) para conformar el espacio en el cual después se encontrará tanto la pista, como las demás edificaciones importantes del proyecto.

El suelo y la roca son utilizados principalmente para la construcción de rellenos, entendiéndose como relleno un depósito artificial para levantar el nivel natural del terreno, destinado a soportar cargas ya sea de edificaciones, carreteras, ferrocarriles o una pista para aviones. Los rellenos también son utilizados para el manejo de desperdicios y basura (Sowers 259).

Por otro lado, se conoce como *terraplén* a un relleno largo y estrecho, que conforma la base de una carretera o una aeropista. La cimentación o suelo que soporta estas estructuras es la capa subrasante y puede ser el suelos virgen o las capas de suelo y roca especialmente preparada y artificialmente compactadas (Sowers 259).

En la construcción de obras de tierra deben usarse materiales del lugar, debido a que transportar grandes cantidades de material apropiado a grandes distancias resulta muy costoso (Sowers 260). Al mismo tiempo, el material disponible tiene que ser estudiado primero y adaptar así el proyecto según las características del suelo. Una forma de hacerlo es mediante, por ejemplo: un terraplén de prueba, en el cual se hacen pruebas de laboratorio y de campo al material mientras este es compactado, obteniendo así una guía a seguir en la construcción de las obras.

Las características que debe reunir una construcción de tierra son las siguientes:

- La resistencia es el factor principal del suelo utilizado para este tipo de obras. La resistencia debe ser suficiente para aguantar las cargas del proyecto, ya sea del peso propio, como las cargas de ruedas de autos o aviones. La resistencia depende de la naturaleza del suelo, de la humedad y de los vacíos presentes en el mismo (Sowers 261).
- No debe dejar lugar a deformaciones excesivas. Esto principalmente en subrasantes y en terraplenes que soportan pavimentos o estructuras. El asentamiento depende de la naturaleza del material y de su peso específico. La elasticidad aumenta y la compresibilidad disminuye cuando se aumenta el peso específico del suelo (Sowers 261).

- La retracción no debe ser excesiva, ya que puede ser un factor que colabore con la deformación de pavimentos y de las estructuras que se encuentran sobre el relleno. La retracción depende del tipo suelo, el peso específico y la pérdida de humedad después de la construcción. Si el peso específico es mayor y el cambio de humedad es menor, la retracción disminuye (Sower 261-262).
- La expansión es un factor muy peligroso. Una construcción de tierra no se debe expandir en exceso porque esto significaría un daño a los pavimentos y estructuras. Además, la expansión rompe la forma del relleno y disminuye su resistencia. Esta tendencia a expandirse aumenta cuando el peso específico es mayor y se puede evitar con una buena selección del material de relleno e impidiendo que la humedad aumente (Sowers 262).
- La resistencia y la incompresibilidad deben mantenerse. La pérdida de resistencia y la mayor compresibilidad se deben al deterioro del suelo de relleno. Esto se controla seleccionando bien el material y controlando el agua (Sowers 262).
- Deben tener la permeabilidad necesaria para el tipo de obra que se ha construido (Sowers 262).

1.3.2. Movimiento de tierras en el NAIQ

Debido a la inclinación que presenta el terreno donde se construye el NAIQ, la nivelación del mismo requiere de un gran movimiento de tierra y trabajos de corte y relleno. Durante este movimiento de tierras se estima que se moverán 7,000,000 de m³ de material, el mismo que es obtenido del mismo lugar de construcción (AAGC, IMS Módulo 1).

Las operaciones de corte y relleno están subdivididas en grupos y secuencias.

El área de corte esta subdividida en grupos, por ejemplo: Grupo de Corte número CG#, CG1, CG2, etc. CG son las siglas en inglés de "Cut Group". Estos grupos tienen áreas limitadas a 150m de ancho por un largo definido por la topografía (AAGC, PQE 7). Esto se muestra en la Figura 1.4.

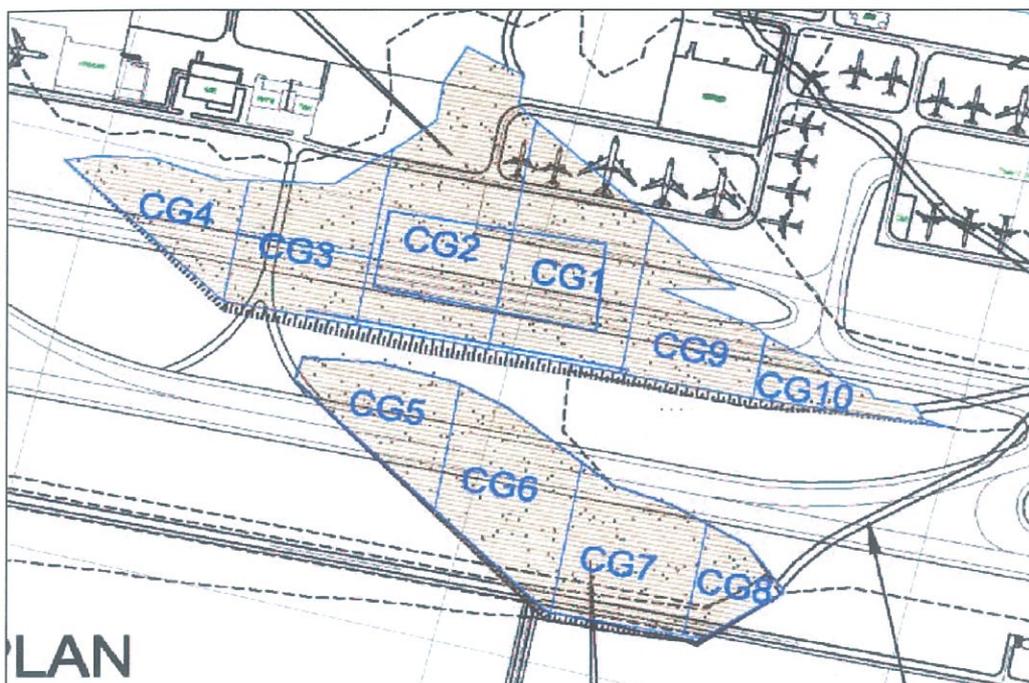


Figura 1.4.- CG, Grupos de corte (AAGC).

Estas excavaciones se realizan a diferentes profundidades dependiendo de la topografía del terreno y ordenadas por el volumen a ser ejecutado por los grupos de relleno (AAGC, PQE 7).

El movimiento de tierras, de corte y relleno en el NAIQ, consta de nueve etapas denominadas cada una como S1, S2, S3,...y S9. S es la sigla en inglés de "Stage" (AAGC, PQE 7). Estas etapas se presentan en las Figuras 1.5; 1.6; 1.7; 1.8; 1.9; 1.10; 1.11; 1.12 y 1.13.

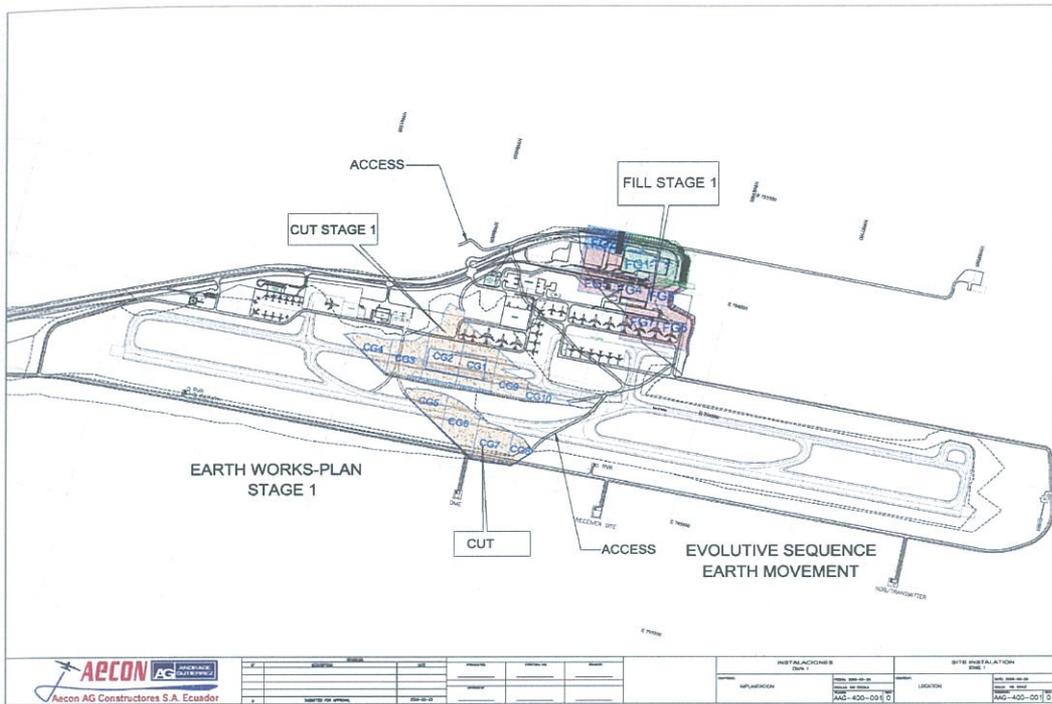


Figura 1.5.- S1, Primera etapa (AAGC).

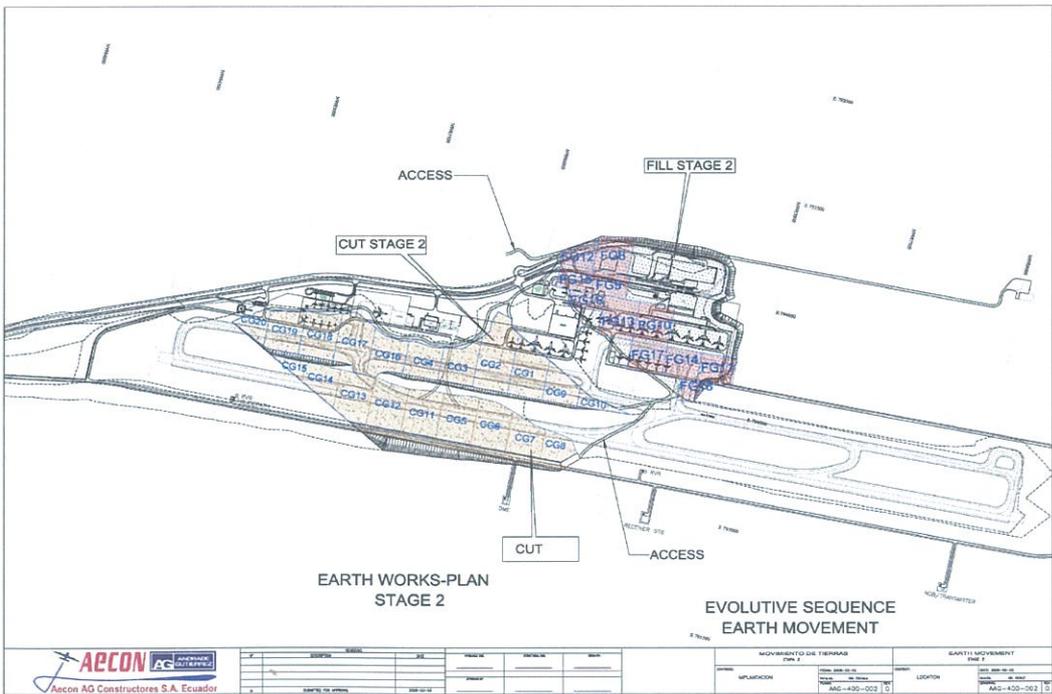


Figura 1.6.- S2, Etapa 2 (AAGC).

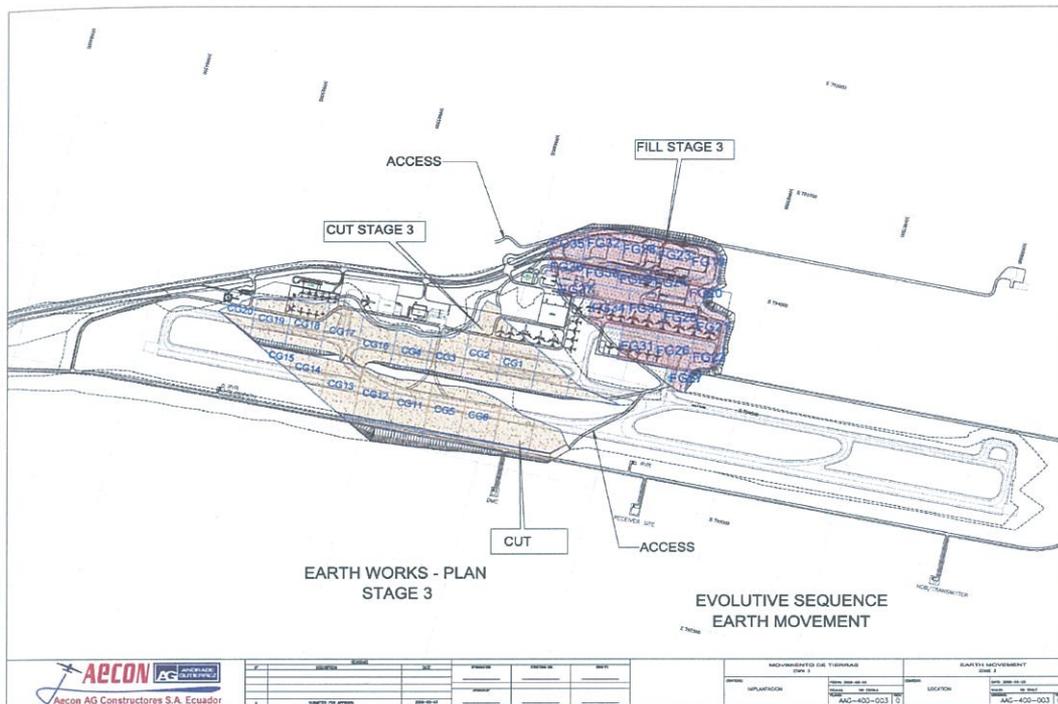


Figura 1.7.- S3, Etapa 3 (AAGC).

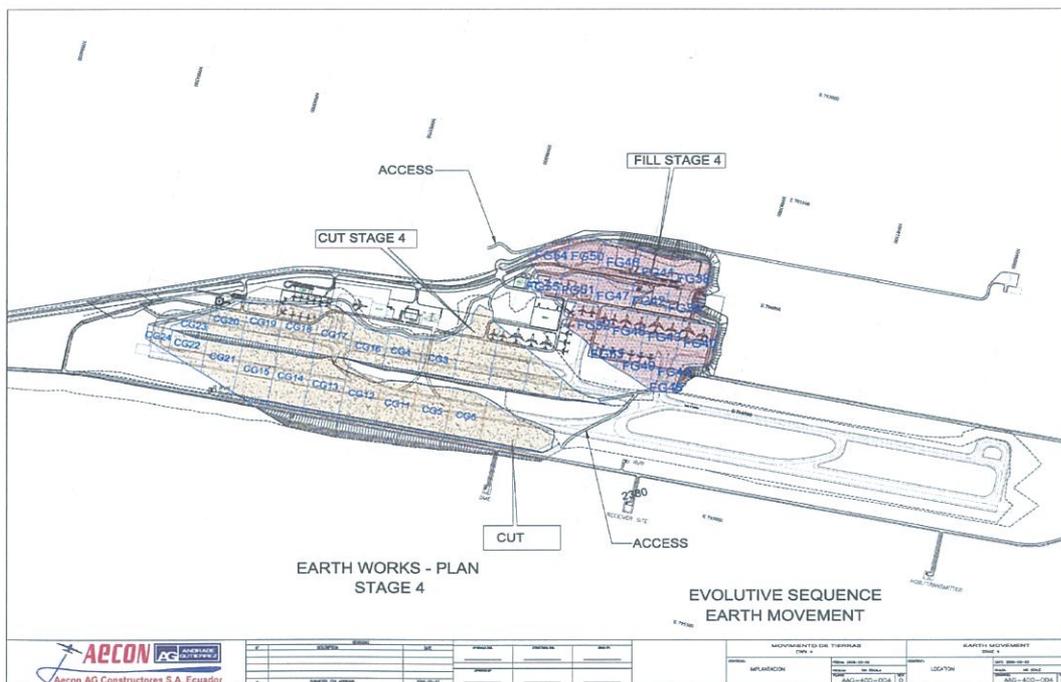


Figura 1.8.- S4, Etapa 4 (AAGC).

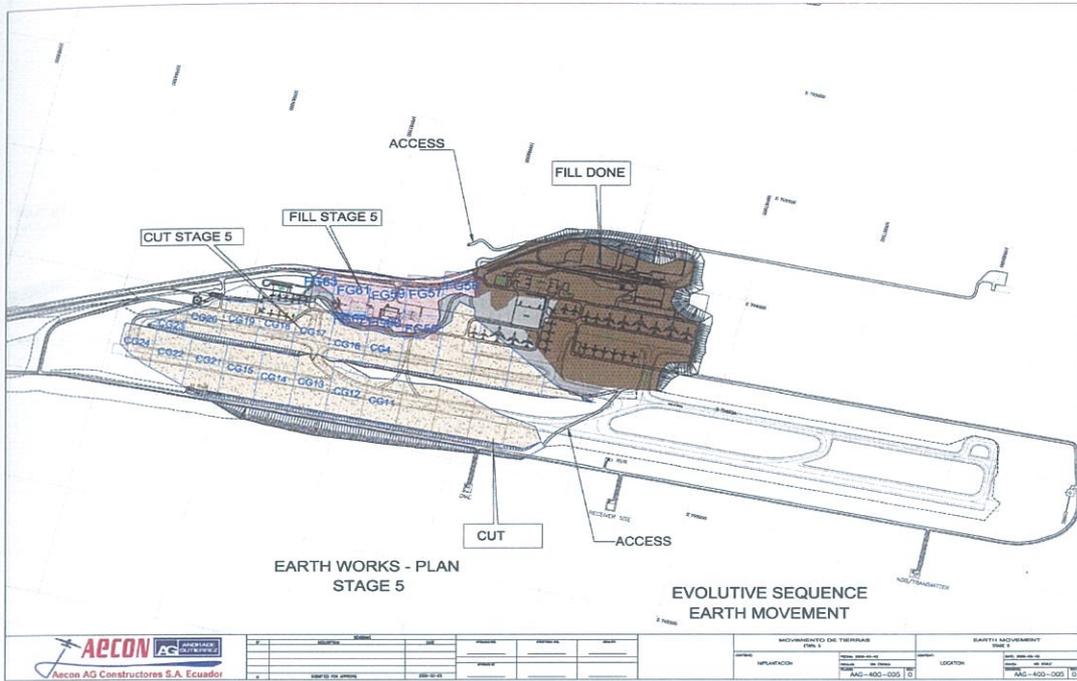


Figura 1.9.- S5, Etapa 5 (AAGC).

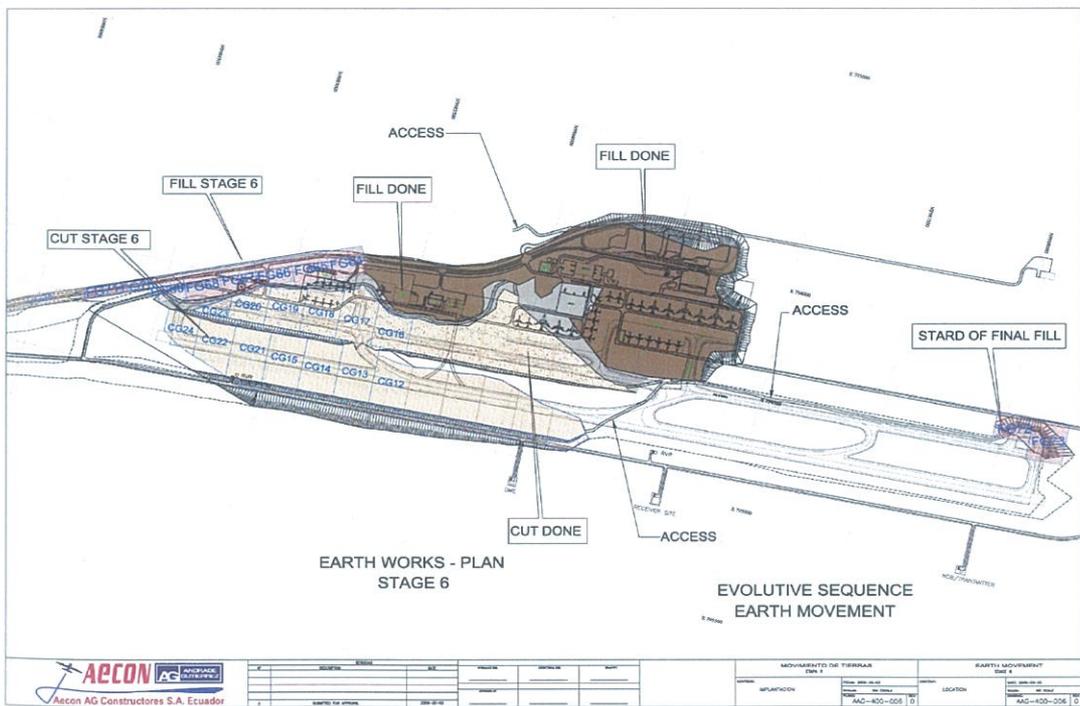


Figura 1.10.- S6, Etapa 6 (AAGC).

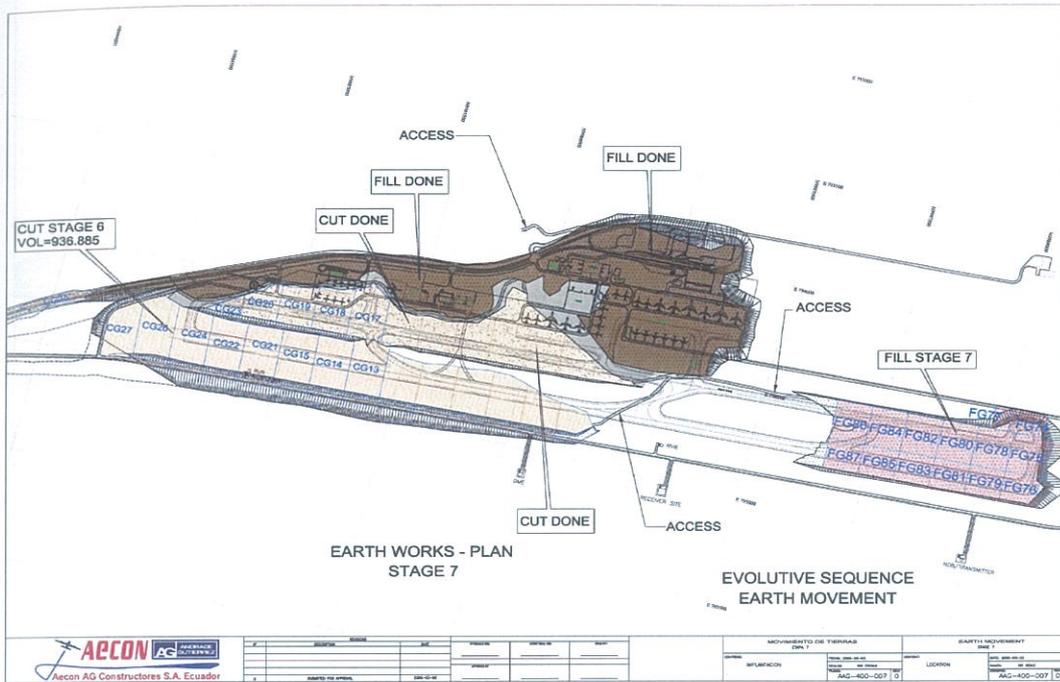


Figura 1.11.- S7, Etapa 7 (AAGC).

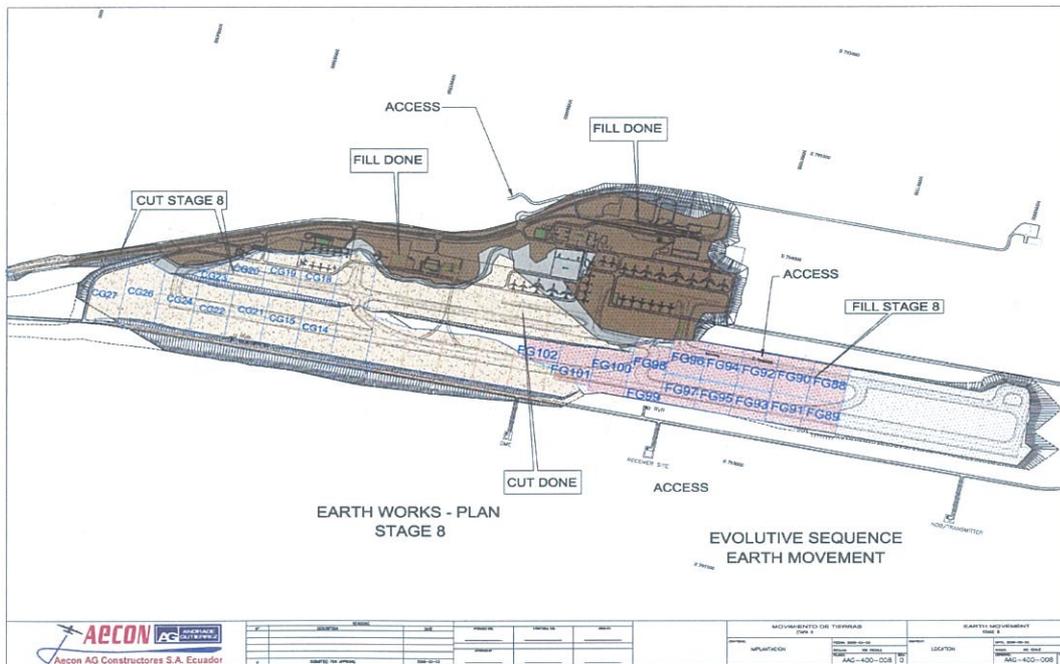


Figura 1.12.- S8, Etapa 8 (AAGC).

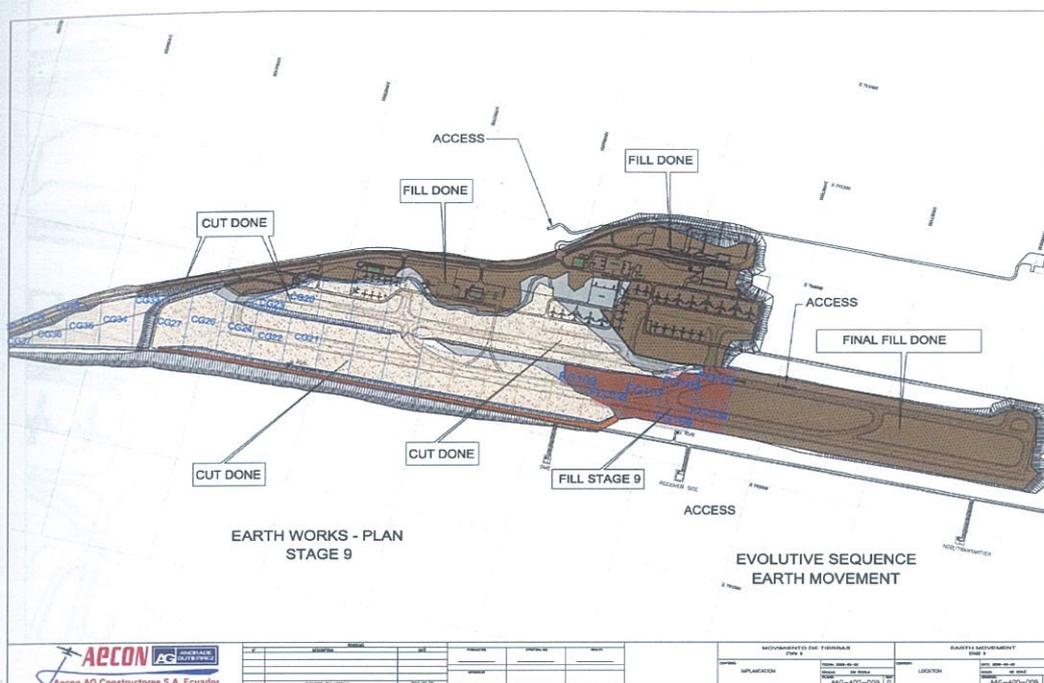


Figura 1.13.- S9, Etapa 9 (AAGC).

Dentro de las etapas están definidos también grupos de trabajo denominados con las siglas en inglés FG# de "Fill Group" (FG1, FG2, etc.), Figura 1.14. Los grupos de trabajo miden 150m x 180m y salvo que estén limitados por la configuración al nivel de relleno acabado, la mayoría posee estas dimensiones. Cada grupo está dividido en 30 paños de 150m de largo por 6m de ancho y un espesor de capa compactada de 0,176m. Los paños pueden formar pendientes para intercalar juntas entre paños que sean adyacentes (AAGC, PQE 7).

Los paños se identifican con la letra P# y las capas con números (1, 2, 3, 4,...n) (AAGC, PQE 7).

La nomenclatura final para identificar una cierta área de trabajo sería por ejemplo: S1FG2 - P15 - 1 que pertenece a la Etapa 1(S1), Grupo de trabajo 2 (FG), paño 15 (P), capa 1.

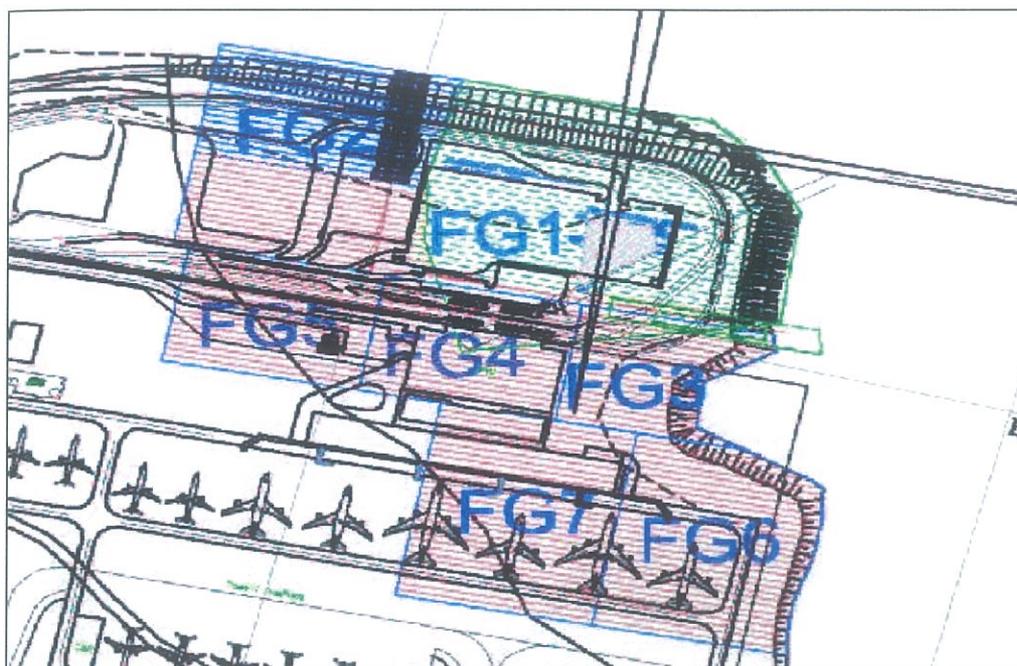


Figura 1.14.- FG, Grupos de trabajo (AAGC).

1.3.2.1. Procedimientos para el movimiento de tierras

El procedimiento para la realización de los movimientos de tierra cubre varias etapas. Los procedimientos determinados por la constructora Aecon Andrade Gutiérrez (AAGC) en su Plan Específico de Calidad PQE NQIA 510 41 01 para el Movimiento de Tierras son los siguientes:

Actividades preliminares.- Antes de empezar con los trabajos de corte y relleno, se debe realizar la ubicación topográfica de las áreas de corte; una inspección botánica para reubicar especies de flora y fauna del lugar en caso de ser necesario; inspecciones arqueológicas para determinar si existen objetos que requieran remoción y análisis; y una identificación de todos los árboles, cercas, marcas, construcciones, líneas de servicios u otras instalaciones que deban permanecer protegidas o deban ser reubicadas.

Después de realizadas las actividades antes mencionadas se procede a la:

Limpieza y desbroce.- En la limpieza y desbroce del área de trabajo de corte y relleno, se deben remover los árboles, arbustos y raíces, restos de suelo superficial y ser transportados a las áreas de botaderos designadas. Ver Figura 1.15 y Figura 1.16.

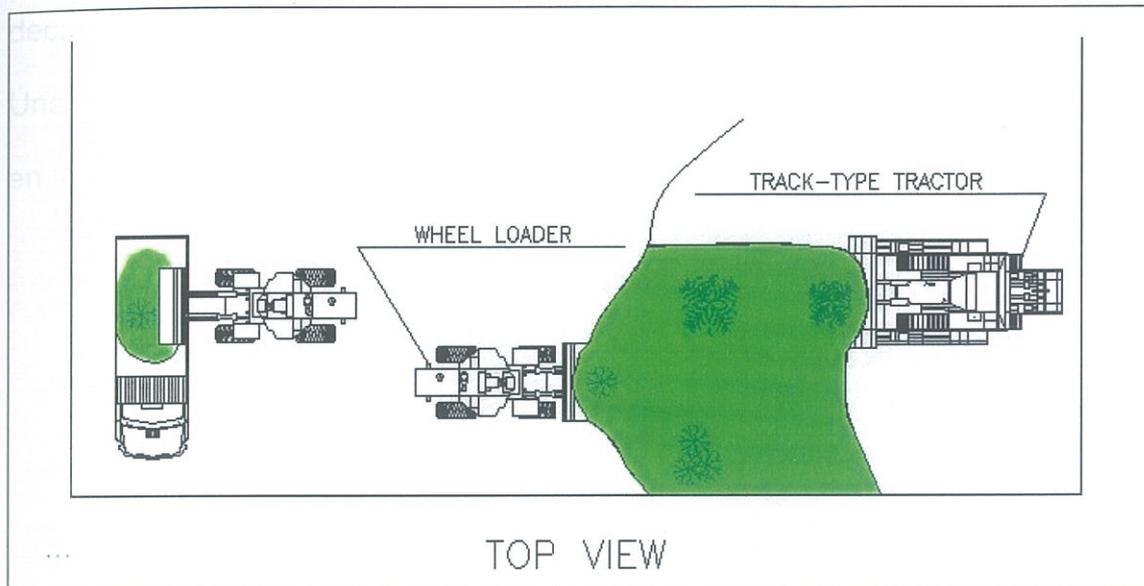


Figura 1.15.- Vista en planta del proceso de limpieza y desbroce del terreno (AAGC).

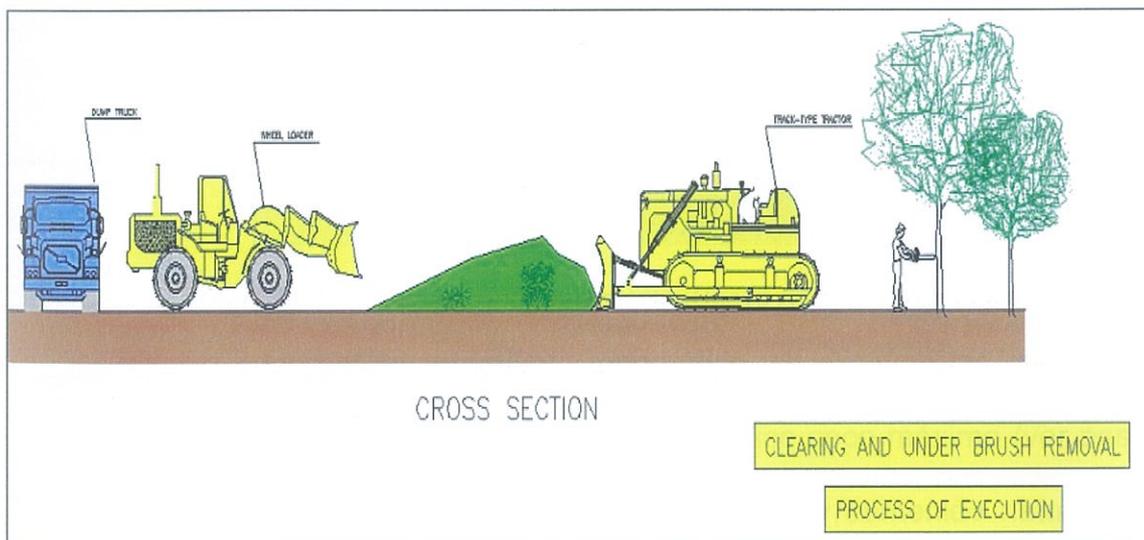


Figura 1.16.- Vista en corte del proceso de limpieza y desbroce del terreno (AAGC).

Preparación de las piscinas, corte, excavación y transporte.- Una vez que el área de corte haya sido liberada, le toca al grupo de levantamiento

topográfico definir y medir el área de excavación, incluyendo la ubicación de las piscinas, las que son utilizadas para precondicionar el material, acercando el contenido de humedad al óptimo (ver contenido de humedad Capítulo 2) previo a la excavación, transporte y colocación en el área de relleno.

Las piscinas miden 8m por lado y tienen una profundidad de 2.80m, es decir un volumen de aproximadamente 180m³ (Nuevo Aeropuerto de Quito). Una fotografía de las piscinas de precondicionamiento del material se muestra en la Figura 1.17.



Figura 1.17. Piscinas de precondicionamiento (Nuevo Aeropuerto de Quito).

Una vez hecho el levantamiento topográfico, se excavan las piscinas y se ensaya el material para obtener su peso específico seco máximo (ver peso específico Capítulo 2), contenido óptimo de humedad y contenido natural de humedad. Una vez obtenidos estos datos, se procede a calcular el volumen de agua que debe añadir a las piscinas para preparar el material.

Para calcular el agua en galones necesaria para que el material se acerque al contenido de agua óptimo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Galones } H_2O = \frac{(w_{opt.} - w_{nat.})}{100} * \frac{\gamma_{dmax} * V_{pis.}}{3,785} \quad (1.1)$$

Donde:

$w_{opt.}$ = Contenido de humedad óptimo

$w_{nat.}$ = Contenido de humedad natural del suelo

γ_{dmax} = Densidad seca máxima

$V_{pis.}$ = Volumen de la piscina

Una vez hecho este cálculo, se procede a añadir el agua necesaria a las piscinas, cuyo material ha sido previamente aflojado con el fin de permitir el fácil ingreso del agua al mismo y a las paredes de la piscina. Una vez que haya transcurrido el tiempo necesario de asentamiento (72 horas (Nuevo Aeropuerto de Quito)), se procede a realizar los trabajos de transporte y excavación. Figura 1.18.

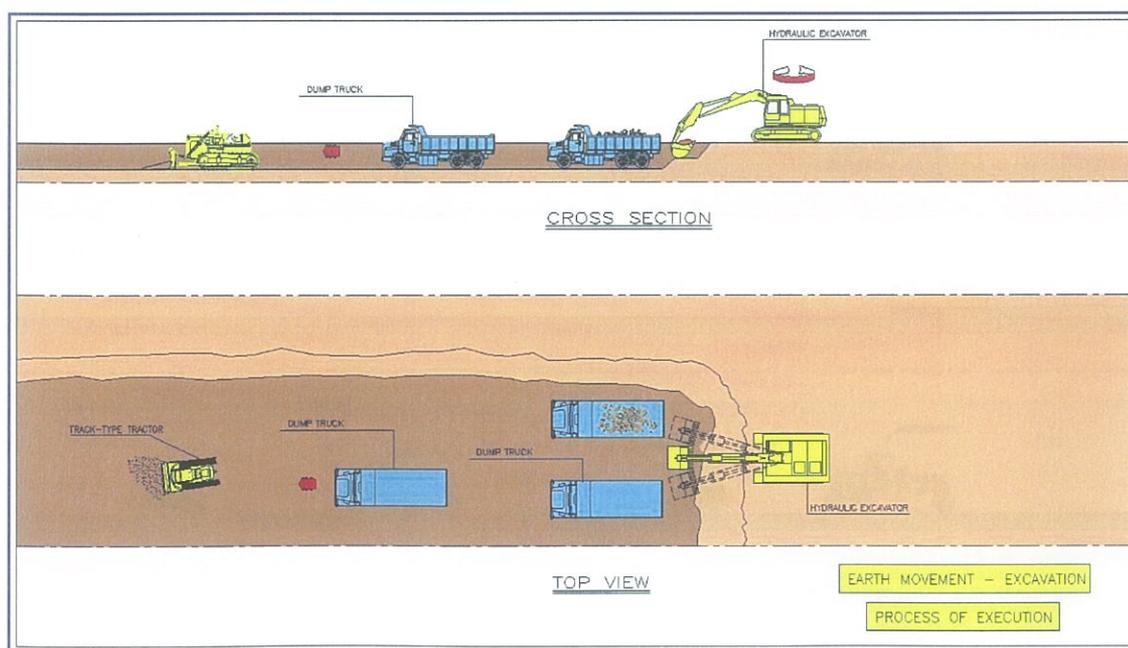


Figura 1.18.- Proceso de excavación y transporte (AAGC).

Preparación de la fundación.- El grupo de levantamiento topográfico, procede ahora a definir y medir la ubicación del grupo de relleno y se obtendrá el peso específico máximo en el laboratorio. Luego se colocan las balizas para delimitar el área de cada uno de los paños del grupo. Se esparce el material y se establece la humedad natural del mismo. Después de esto, y solo si es necesario, se continúa con la infiltración de los paños para alcanzar el contenido óptimo de humedad. Una vez alcanzado la humedad óptima, se homogeniza, nivela y compacta el material en los paños.

Hay dos tipos de paños: los confinados y los no confinados. Los paños confinados son aquellos que se encuentran entre dos paños que ya han sido compactados e incluyen las juntas, mientras que los no confinados son los que están entre dos paños que no han sido compactados.

... Una gráfica de la preparación de la fundación se presenta en la Figura 1.19.

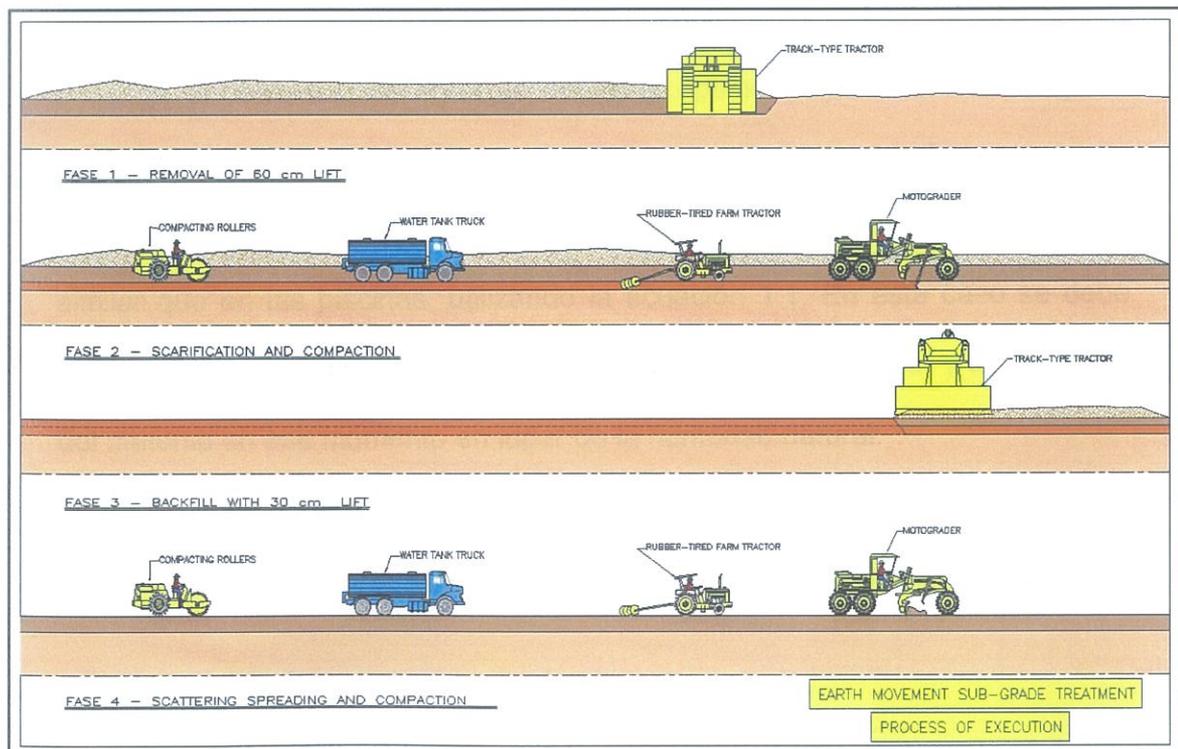


Figura 1.19.- Proceso de preparación de la fundación (AAGC).

Finalmente se obtiene en el laboratorio la densidad alcanzada en los paños luego de la compactación.

Relleno y compactación.- Una vez alcanzada la densidad específica en la fundación, los topógrafos, definen la ubicación de los paños y las balizas "blue tops" (a 22cm) para el control de nivelación de capa, e inicia el proceso de colocación de relleno.

El material proveniente de las piscinas es enviado en volquetas; este es esparcido por dozers y/o moto niveladora sobre el área de relleno hasta alcanzar el nivel requerido, que esta dado por las balizas "blue tops".

El suelo es homogenizado con un tractor agrícola con rastra, el mismo que afloja y mezcla el material hasta que el supervisor considere que este sea homogéneo.

Una vez hecho esto, el laboratorio debe determinar el contenido de humedad del material usando el densímetro nuclear haciendo 10 mediciones a lo largo del paño. El criterio de aceptación para esta parte del proceso es que la humedad debe estar a +/- 2% de la humedad óptima obtenida en el laboratorio.

Si el contenido de agua es mayor al óptimo, el material debe dejarse secar hasta que esté dentro del rango de aceptación. Si ocurre lo contrario, se debe calcular el agua que debe ser añadida al material en el paño de manera similar que en las piscinas, utilizando la ecuación 1.1. En este caso se debe utilizar el volumen del paño en lugar del volumen de la piscina, y la humedad del material en ese momento en lugar de la humedad natural.

Una vez calculada el agua adicional, esta debe ser regada por un tanquero, seguido de la rastra agrícola para ayudar a humectar el material,

repitiéndose el proceso de homogenización hasta que el contenido de humedad esté dentro del criterio de aceptación.

Seguido, la moto niveladora procede a nivelar el material hasta conseguir el espesor especificado antes de compactar el paño.

Una vez alcanzada la condición anterior, se procede a compactar con rodillo liso sin vibración de 16 toneladas el material en los paños. Se debe pasar el rodillo en 3 sectores y 8 veces en cada sector en paños no confinados (pañós ubicados entre dos paños que no han sido compactados), y en 4 sectores, incluyendo las juntas, 8 veces en cada sector en paños confinados (pañós ubicados entre dos paños que ya han sido compactados).

Finalmente, el laboratorio mide la densidad lograda en el paño y el grado de compactación, para comprobar que estos se encuentren dentro de los criterios de aceptación. En este caso el grado de compactación debe ser igual o mayor al 95%.

Otros ensayos se deben realizar como una medida complementaria para controlar la compactación de los paños, los mismos que se exponen en el Capítulo 3 más adelante (AAGC, PO NQIA 510 13 RELLENO Y COMPACTACIÓN).

El proceso de compactación se presenta en la siguiente secuencia de de figuras. Figuras 1.20; 1.21 y 1.22.

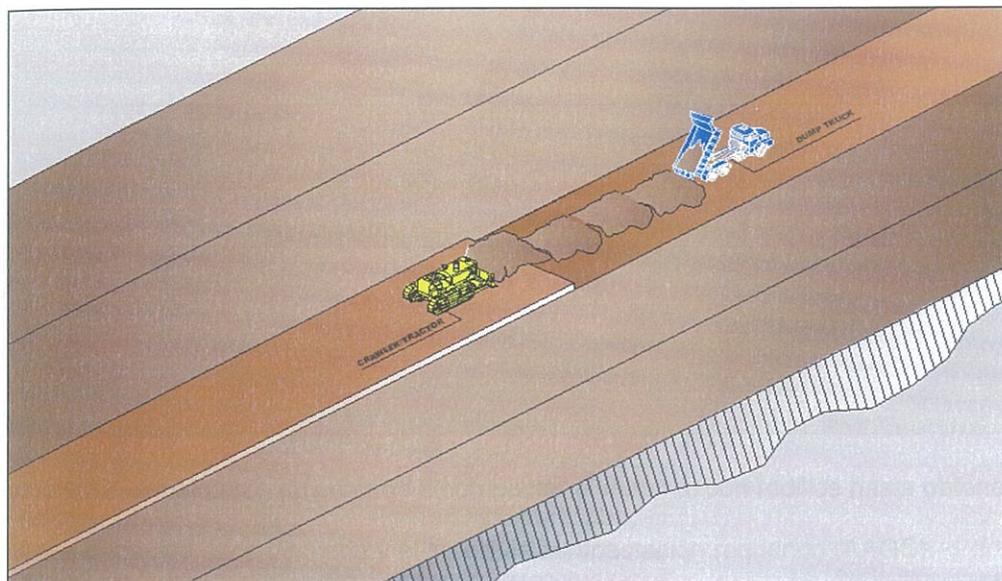


Figura 1.20.- Una volqueta entrega el material y este es esparcido por un dozer (AAGC).

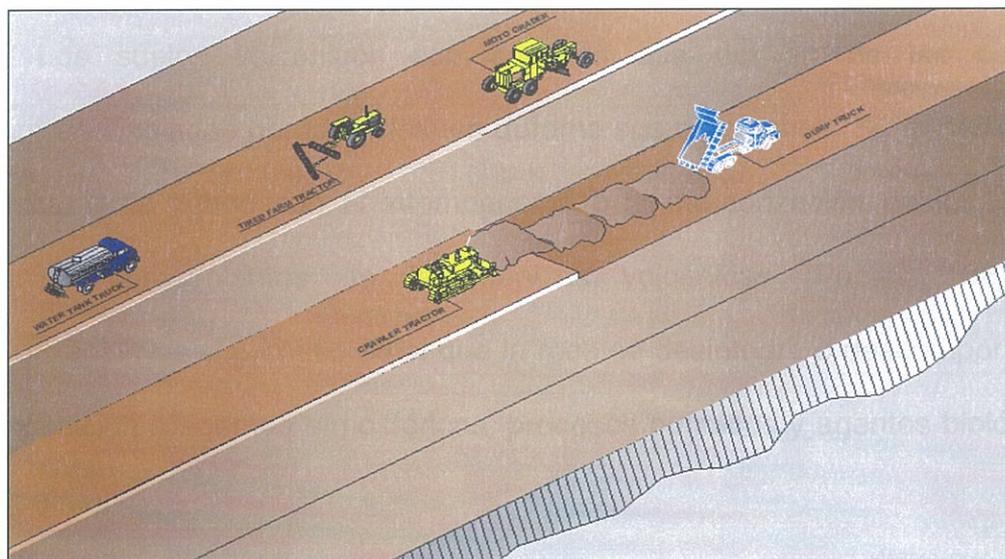


Figura 1.21.- El material el aflojado, mezclado, esparcido (homogenizado) por la rastra agrícola, hidratado para alcanzar el contenido de humedad óptimo, mediante un tanquero y nivelado por la moto niveladora hasta alcanzar el espesor especificado. (AAGC).

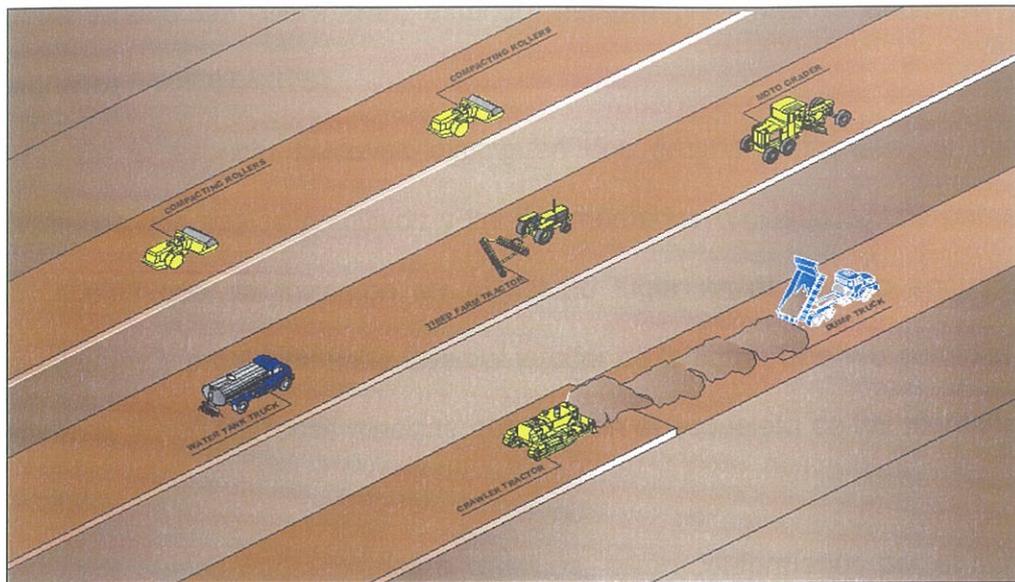


Figura 1.22.- Finalmente se procede a compactar el material con rodillos hasta obtener la densidad seca deseada y el grado de compactación requerido (AAGC).

1.4. Descripción de los suelos del lugar

1.4.1. Suelos volcánicos

Los suelos volcánicos son aquellos que derivan de las cenizas volcánicas arrojadas por los volcanes durante sus erupciones. Su génesis está estrechamente ligado con el intemperismo o la meteorización de los vidrios volcánicos provenientes de las cenizas volcánicas (Padilla 138). La meteorización es el proceso en el que la roca se desintegra o descompone por su exposición a agentes atmosféricos, procesos químicos y agentes biológicos (Wikipedia).

Los materiales volcánicos del Ecuador pertenecen, según su composición mineralógica y química, al grupo de las rocas andesíticas y se caracterizan por la presencia de andesita que es un tipo de feldespato. Los minerales esenciales de la andesita y de sus lavas son: andesina o plagioclasa, anfibola, augita, hiperstena, magnetita, mica negra y cuarzo. Estos minerales no se encuentran en todas las variedades de andesitas, sino que la presencia o

no de alguno las diferencian, estando siempre presentes la andesina y la magnetita (Wolf 374-375).

En el aspecto físico se distinguen dos grupos principales de suelos volcánicos: los suelos primitivos y los fragmentarios o clásticos. Los primeros son suelos que se formaron en el mismo lugar en el que se encuentran actualmente y provienen de la lava del interior de la tierra. Una vez consolidada esta lava, formó las rocas macizas que forman el esqueleto de las montañas y volcanes.

Los suelos fragmentarios o clásticos, están conformados por el mismo material que los suelos primitivos, con la diferencia de que estos han sido trasladados de su lugar de nacimiento luego de su fragmentación. Estos suelos pueden proceder de la descomposición de las andesitas o lavas compactas, que por medio del agua es arrastrado y depositado; o proceder directamente del material lanzado al aire por los volcanes durante sus erupciones y depositados en sus alrededores o a grandes distancias (Wolf 373).

A los suelos fragmentarios pertenece la cangahua, que es una toba fina de color blanco o amarillento que cubre grandes extensiones de la sierra ecuatoriana y que se encuentra mayormente en forma superficial formando un manto más o menos grueso. La cangahua es producto de de la sucesiva descomposición de las andesitas, lavas y tobas, cuyas partículas finísimas son llevadas por el agua de las lluvias y principalmente por los vientos, y depositadas en las irregularidades de la superficie, formando capas que siguen las ondulaciones del terreno (Wolf 373).

1.4.1 En la sierra ecuatoriana, las tres cuartas partes del suelo son de origen volcánico, sin embargo los suelos son variados y se diferencian por la edad o por las condiciones climáticas a las que están expuestas (Padilla 140).

En general existen por ejemplo, suelos arenosos que se encuentran alrededor de los volcanes de actividad reciente o en áreas volcánicas secas, tienen textura arenosa, bajo material orgánico y baja capacidad de retención de agua.

Los suelos francos son aquellos que son resultado de una meteorización avanzada de los suelos arenosos debido a un clima más húmedo. Se ubican en la sierra volcánica baja entre los 2.400 y 3.500msnm.

También se encuentra suelos alofánicos, que tienen como material secundario los alófanos (los alófanos son vidrios amorfos de origen volcánico similares en forma y comportamiento al ser compactados a los minerales arcillosos (Torres 2)). Se encuentran a mayores altitudes (3.200 a 4.000msnm). Los suelos alofánicos húmedos se encuentran en zonas de depósitos de cenizas volcánicas más viejas y tienen un alto contenido de alófano (Padilla 140).

1.4.2. Clasificación de los suelos del lugar

La clasificación de los suelos del NAIQ, se hizo utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el Sistema de Clasificación de la Oficina de Caminos Públicos (AASHTO) y por medio de la Clasificación Manual Visual realizada en las perforaciones SPT realizadas en el terreno del proyecto del NAIQ.

1.4.2.1. Clasificación Manual Visual

Esta clasificación de los suelos es realizada en el campo únicamente mediante observación y manipulación manual del suelo. Este procedimiento incluye la identificación de varias características del suelo a ser clasificado como el color, la plasticidad, la humedad, etc. Los criterios y procedimientos para definir cada una de las características de los suelos, se encuentran descritos a detalle en la norma ASTM D 2488.

Un ejemplo de registro de la clasificación manual visual se presenta en el Anexo 1.

1.4.2.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y Sistema de Clasificación AASHTO

El sistema de clasificación de suelos SUCS, clasifica a los suelos en dos grandes grupos: Suelos de grano grueso, tipo grava y arena con menos del 50% pasando por el tamiz No. 200; y suelos de grano fino con 50% o más pasando por el tamiz No. 200. Este sistema está especificado en la norma ASTM D 2487 (Das 39).

Por otro lado, el sistema de clasificación AASTHO clasifica a las tierras en grupos (A-1 al A-7). Los grupos A-1 al A-3 abarcan los materiales granulares en los que el 35% o menos pasan por el tamiz No. 200 y los grupos A-4 hasta A-7, abarcan a los suelos de tipo limo-arcilla, pasando más del 35% por la malla No 200. Esta clasificación se basa en el tamaño de los granos y la plasticidad. El ensayo de clasificación de suelos AASTHO se detalla en la prueba M145 de la misma norma (Das 35).

Un ejemplo de estas clasificaciones se muestra en el Anexo 2.

1.4.2.3. Perfiles estratigráficos

A partir de ensayos SPT (Prueba de Penetración Estándar) realizados en diferentes puntos del terreno del proyecto del NAIQ (Geosuelos Cía. Ltda.), tomando los ensayos, registros y clasificaciones realizadas en laboratorio de lo que en la actualidad son las obras de relleno para parqueaderos y área de préstamo; se han realizado perfiles estratigráficos de las mismas. Estos perfiles muestran la clasificación y descripción de las muestras obtenidas en los ensayos SPT a diferentes profundidades.

Los perfiles (número de golpes SPT, profundidad, clasificación y descripción) de las perforaciones usadas para la obtención de los perfiles estratigráficos de las zonas correspondientes a la primera etapa de movimiento de tierras del NAIQ (Geosuelos Cía. Ltda.), se presentan en el Anexo 3.

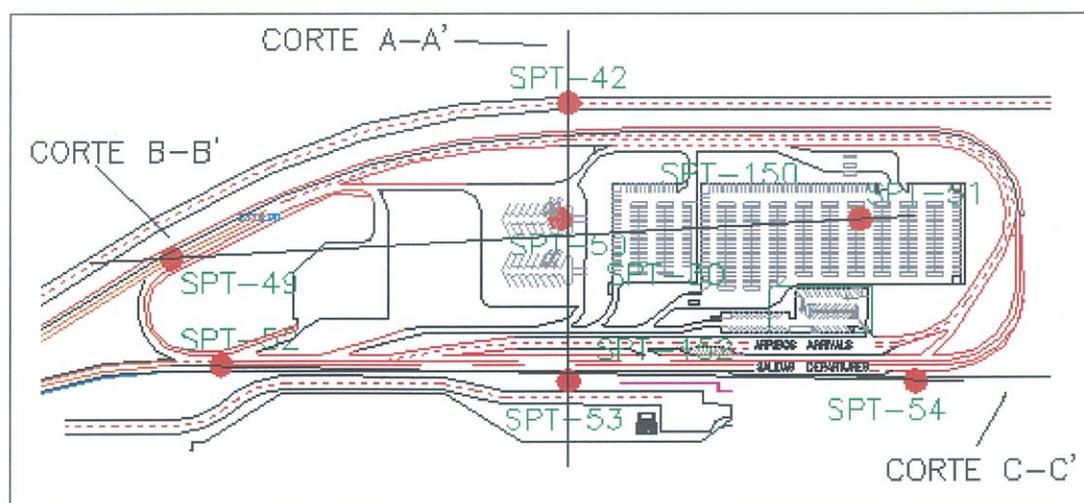


Figura 1.23.- Ubicación de las perforaciones realizadas en el área de relleno para parqueadero, correspondiente a la Etapa 1 del movimiento de tierras en el NAIQ (AAGC).

La ubicación de las perforaciones realizadas en el área de parqueaderos y de préstamo, se muestran en las Figuras 1.23 y 1.24 respectivamente.

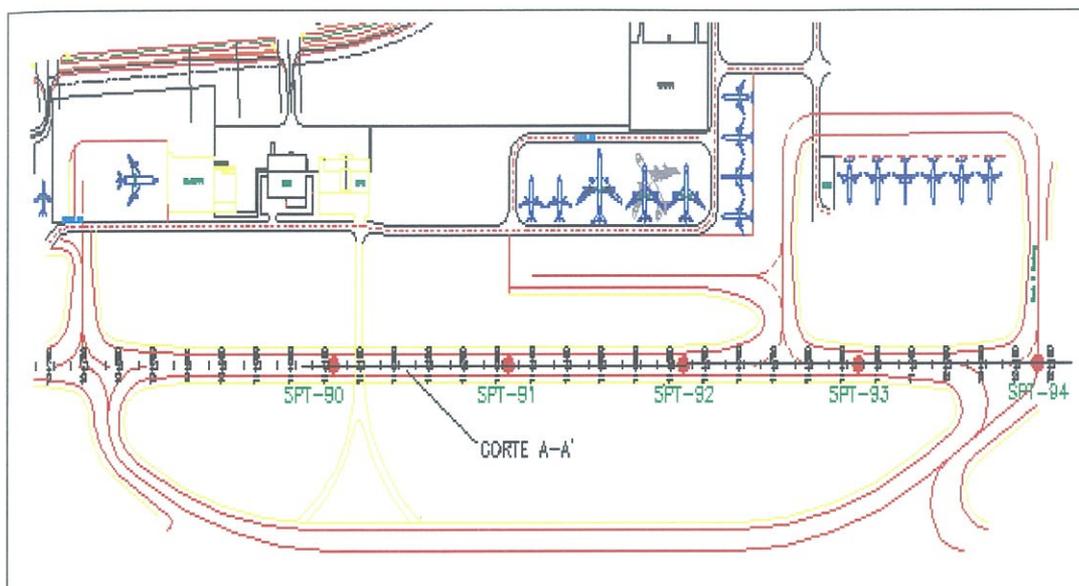


Figura 1.24.- Ubicación de las perforaciones realizadas en el área de préstamo, correspondiente a la Etapa 1 del movimiento de tierras en el NAIQ (AAGC).

1.4.2.4. Resumen de la clasificación de los suelos del lugar

Los suelos del sector del NAIQ, están conformados por Limos Arenosos (ML) y Arenas Limosas (SM) en su mayoría de color café claro, café y café oscuro con tonalidades amarillentas en algunos casos, sin olor. Son suelos en su mayoría no plásticos o que tienen una plasticidad muy baja. Estos suelos son poco húmedos y secos con bajos contenidos de humedad. La clasificación ASSTHO para estos suelos es A-4.

Para los Limos Arenosos se tiene una consistencia firme, muy firme y dura, siendo muy firme y dura en su mayoría. La compacidad de las Arenas Limosas es mayormente media. La compresibilidad de estos suelos es baja y media.

A partir de los perfiles estratigráficos (Anexo 4) se puede observar que en la superficie se encuentran suelos del tipo SM. Entre los 2 y 4 metros de profundidad los suelos son del tipo ML, seguida por otra capa de suelos SM

aproximadamente entre los 5 y 6 metros de profundidad. A estas profundidades existe presencia de pómez. Seguido vuelen a aparecer los limos arenosos, lo que hace pensar que el suelo esta constituido por capas de suelos SM y ML alternadas.

CAPITULO 2

2. Compactación de Suelos

2.1. Introducción

La compactación como medio para mejorar las propiedades del suelo suelto es conocida desde la antigüedad. Al menos así lo demuestran las edificaciones realizadas por las antiguas civilizaciones como: las ciudades prehistóricas hechas con muros de tierra, los bordos construidos en China antes de Cristo y los construidos en América por los mexicas en el siglo XV d.C. (Marsal y Reséndiz 191). Tomando en cuenta que muchas de estas antiguas edificaciones perduran hasta la actualidad, se puede presumir que tales conocimientos acerca de la compactación tenían ya una base racional, aunque muy lejana a la de la actualidad.

Esta racionalización (la de la compactación de suelos) llegó en la tercera década del siglo XX, específicamente en 1933 con las experiencias de R. Proctor en los Estados Unidos de América. Dichas experiencias llevaron a establecer métodos para especificar y controlar la calidad de los trabajos de campo, mediante el empleo de patrones de compactación en laboratorio (Cruz 16). A partir de estas investigaciones, otros estudiosos de los suelos han propuesto otras teorías y métodos acerca de la compactación, los mismos que serán explicados a lo largo de éste capítulo.

2.2. Definición de la Compactación de Suelos

Existen varias definiciones para la compactación de los suelos: Para Juárez Badillo, la compactación de los suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos (575); Das define a la compactación como la densificación del suelo por remoción de aire, lo que

requiere energía mecánica (51); mientras que Winterkorna y Yang dicen que la compactación es el proceso en el cual el volumen de una masa de suelo formado por partículas sólidas, aire y agua es reducida por la aplicación momentánea de cargas aplicadas con rodillos, golpes o vibración (244).

En resumen se puede definir a la compactación de los suelos como: el proceso en el cual se mejoran las propiedades mecánicas y el funcionamiento del suelo por medio de la aplicación de una energía a través de medios mecánicos, induciéndose así a una disminución en el volumen de la masa de suelo, con lo cual se reducen los vacíos existentes por la presencia de aire obteniendo como resultado final un paquete de tierra más denso y resistente.

2.2.1. Teorías de la Compactación

Varios han sido los estudiosos de los suelos y los efectos que tiene la compactación en ellos, así como varias son las teorías existentes que tratan de explicar lo que sucede en este proceso en el cual la distribución de las partículas de suelo cambia, así como sus propiedades y comportamiento. A continuación se presentan algunas de esas teorías generales sobre la compactación:

Proctor en 1933 dio una explicación sobre lo que pasaba al compactar un suelo y agregarle agua. Proctor creía que la humedad en un suelo relativamente seco crea efectos de capilaridad que une a las partículas, creándose una mayor fricción que se opone a las fuerzas de compactación (Winterkorna y Yang 247).

Según Proctor, al compactar un suelo con una mayor cantidad de agua, se fuerza a una mayor lubricación entre sus partículas, provocando que estas se reordenen con mayor facilidad y el suelo sea más denso. El proceso de

compactación termina cuando el contenido de humedad del suelo combinado con el aire que no ha sido expulsado, llenan todos los vacíos. En este punto se puede decir que el suelo alcanza su mayor densidad. Con un mayor contenido de humedad la compactación se limita a un punto en el que los vacíos igualan al volumen de aire y agua, aumentando los vacíos, disminuyendo la densidad e incrementando la plasticidad (Winterkorna y Yang 247).

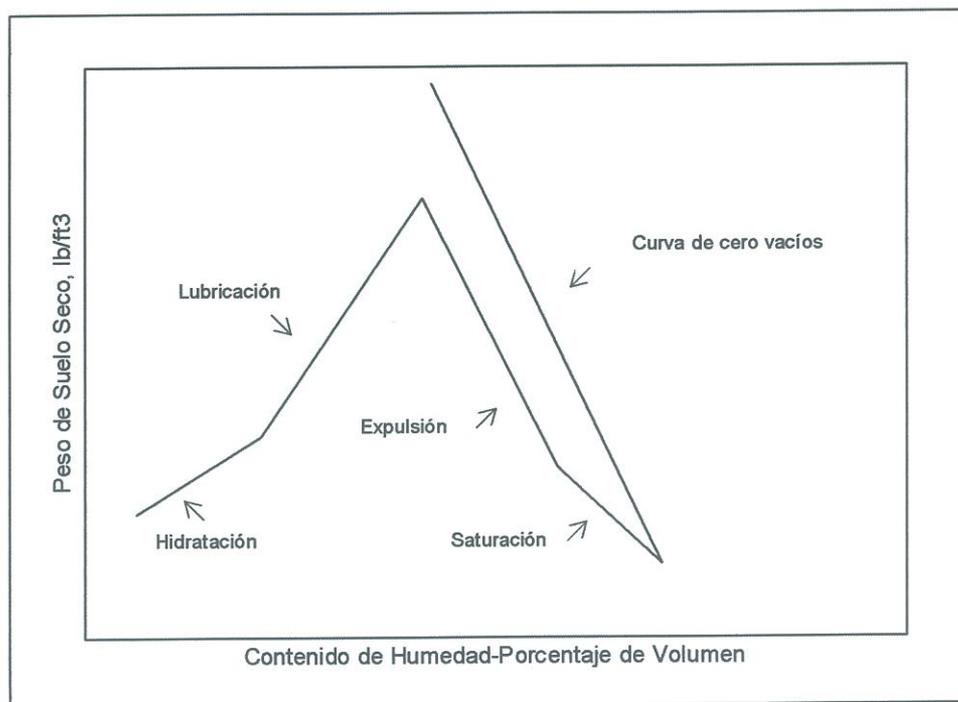


Figura 2.1.- Fases de la Curva de Compactación según Hogentogler (Winterkorna y Yang 247).

Hogentogler en 1936 propuso la teoría de que en el proceso de mojado de una muestra de suelo al se compactado intervienen cuatro etapas: hidratación, lubricación, expulsión y saturación. Estas etapas se pueden ver en la Figura 2.1. La hidratación es la etapa en la que el agua entra en las partículas de suelo y se crea una película alrededor de ellas. En la etapa de lubricación se produce el reacomodamiento de las partículas debido a que el agua adherida a ellas como una película facilita este proceso. Al terminar la

etapa de lubricación y causada por el exceso de agua, se inicia la etapa de expulsión. En esta se expulsa el agua, debido a que la cantidad de aire retenida en el suelo no cambia desde el final de la lubricación y solamente se remueven partículas de suelo. Durante la saturación, teóricamente los vacíos de aire son ocupados completamente por el agua y se llega a obtener la curva de cero vacíos (Winterkorna y Yang 247).

Hilf en 1956, usó la teoría de la presión de agua en los poros en suelos no saturados para dar una idea sobre el proceso de compactación. Según Hilf los suelos secos son difíciles de compactar debido a la apreciable fuerza de fricción que causa la gran curvatura de los meniscos formados por el agua que cubre los granos en la parte de contacto de los mismos. Figura 2.2.

Al compactar el suelo a un mayor contenido de agua, los meniscos entre las partículas de suelo se aplanan o destruyen resistiendo menos el esfuerzo de compactación e incrementándose la densidad del suelo de ahí en adelante hasta alcanzar su máximo (Winterkorna y Yang 248).

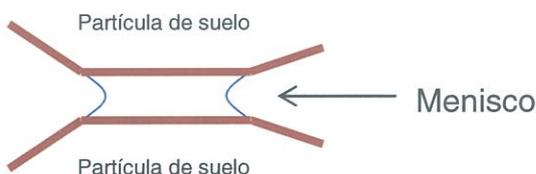


Figura 2.2.- Menisco formado entre granos de suelo provoca fricción resistente al esfuerzo de compactación (Winterkorna y Yang 246).

Lambe (1960) intentó explicar el fenómeno de la compactación argumentando que a bajos contenidos de agua la floculación de las partículas (que es un proceso químico mediante el cual y por medio de sustancias floculantes se aglutinan las sustancias coloidales del agua) (Wikipedia) se produce debido a la alta concentración de electrolitos. La floculación es causa

de bajas densidades, lo que mejora al aumentar el agua, la misma que disminuye la concentración de electrolitos lográndose una estructura más dispersa y con menos vacíos. Esto es lo que permite a las partículas acomodarse de manera más orientada y densa (Winterkorna y Yang 248). Esto se da en suelos finos.

Otro estudioso de los suelos, Olson en el año de 1963, trató de explicar la compactación del suelo basándose en el concepto del esfuerzo efectivo entre partículas de suelo. Explicó que con el incremento de agua, crece el grado de saturación y a su vez esto aumenta la presión de aire y agua en los poros del suelo.

Esto debilita al suelo reduciendo el esfuerzo efectivo entre las partículas. A continuación las partículas se deslizan una sobre otra hasta alcanzar los esfuerzos laterales y horizontales de corte suficientemente grandes con la capa previamente compactada, para dar al suelo el esfuerzo efectivo requerido.

El incremento en la densidad del suelo se da con el mayor número de golpes en el ensayo, concentrando los esfuerzos cortantes en una zona que se densifica cada vez más.

Con respecto al contenido de agua, mientras este crece, la permeabilidad del aire disminuye ocasionando grandes presiones de aire en los poros. Esto causa que los canales de aire ya no sean continuos y el mismo quede atrapado llevando a que la permeabilidad del aire sea cero y no se pueda densificar más el suelo (Winterkorna y Yang 248).

Apoyándonos en la teoría de los esfuerzos efectivos, se concluyen que mientras más seca está una muestra de suelo, los terrones que conforman el

suelo están más fuertemente unidos por el esfuerzo efectivo, siendo difíciles de compactar y que un esfuerzo de compactación será más efectivo si las fuerzas que unen a estos terrones es debilitada mediante la adición de agua.

Finalmente Barden y Sides en 1970 realizaron un estudio en arcillas utilizando observaciones a nivel microscópico. Concluyeron que a bajos contenidos de agua, la baja densidad es causada por la presencia macroporos llenos de aire que tienen resistencia y son capaces de soportar las fuerzas de compactación sin mayor distorsión.

Sin embargo, estos macroporos o las paredes que los forman, se debilitan con el aumento del agua, llenándose estas cavidades con material de suelo, desapareciendo. En este punto la densidad es máxima mientras que disminuye con la añadidura de agua después de tal punto.

Estos dos autores también mostraron que la oclusión de los canales de aire explica la falta de efectividad del esfuerzo de compactación a un contenido de agua dado, ya que no es posible expulsar el aire a partir de este punto. Este punto se denomina el contenido óptimo de agua (Winterkorna y Yang 249).

2.2.2. Contenido de Humedad, Densidad y Grado de Compactación

El contenido de humedad, la densidad y el grado de compactación son los factores más importantes en la compactación de suelos. A continuación se presentan sus conceptos:

Contenido de humedad.- El contenido de humedad de una muestra de suelo es la relación del peso de agua entre el peso de sólidos en un volumen dado de suelo (Das 19). Se representa con w .

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.1)$$

El contenido de humedad se representa como un porcentaje.

Peso específico o densidad.- El peso específico γ es el peso del suelo por volumen unitario (Das 19).

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.2)$$

A este peso específico dado por la ecuación anterior se lo denomina *peso específico húmedo* y se expresa también en términos del peso de sólidos, contenido de humedad y volumen total con la ecuación (Das 19):

$$\gamma = \frac{W_s(1+w)}{V} \quad (2.3)$$

En el estudio de la compactación de suelos, es necesario conocer el denominado *peso específico seco o densidad seca* γ_d , que es el peso por volumen unitario pero de suelo seco, es decir excluyéndose el agua de la misma. Si el contenido de humedad y el peso específico húmedo de una muestra de suelo son conocidos, se puede obtener el valor del peso específico seco con la ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \quad (2.4)$$

Grado de Compactación: El grado de compactación de un suelo, está dado por la siguiente ecuación:

$$GC\% = \frac{\gamma_{dCampo}}{\gamma_{dMAXlab.}} \quad (2.5)$$

Donde:

γ_{dCampo} = Densidad Seca obtenida en el campo luego de compactar el suelo

$\gamma_{dMAXlab}$ = Densidad Seca Máxima obtenida en el laboratorio (Punto 2.2.3 de

este Capítulo).

2.2.3. Curva de Compactación

De los ensayos de compactación en laboratorio se obtienen las curvas de compactación, las mismas que serán distintivas de cada tipo de suelo estudiado. Estas curvas de compactación son el resultado de graficar, en el eje de las abscisas el contenido de humedad del suelo en porcentaje y en el eje de las ordenadas, la densidad seca obtenida en los ensayos de compactación. Figura 2.3. En esta gráfica se puede observar que mientras aumenta el contenido de humedad, aumenta también el peso específico seco hasta un punto en que empieza a decrecer. En este punto el peso específico seco es el máximo ($\gamma_{d\max}$) que se puede obtener en el ensayo de compactación. La abscisa correspondiente a este máximo, representa el contenido óptimo de humedad (w_{op}). Contenidos de humedad mayores al óptimo, arrojan valores menores de peso específico seco.

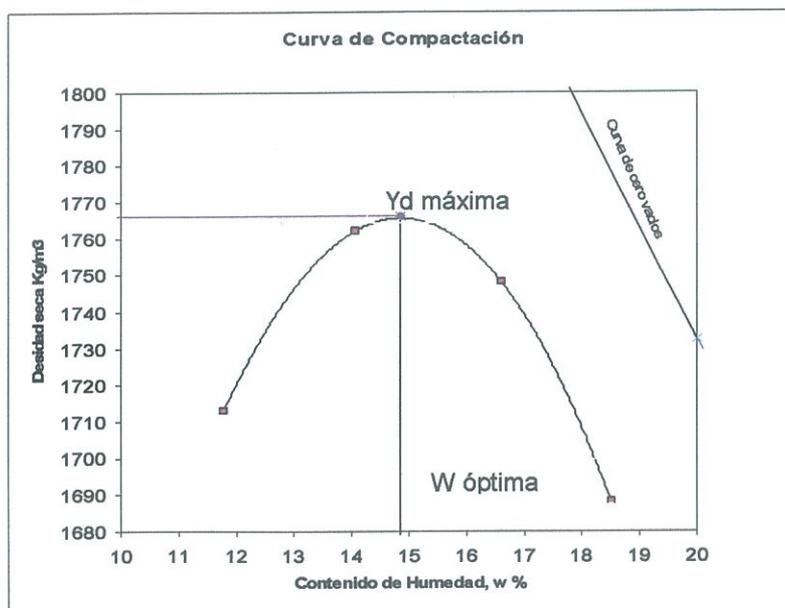


Figura 2.3.- Curva de compactación obtenida del ensayo Proctor modificado en un limo arenoso.

Que el peso específico seco disminuya después del punto de contenido de humedad óptima, se debe a que el agua ocupa todos los vacíos que deberían ser llenados por partículas de suelo. El agua adicionada a partir de ese punto lo único que hace es separar las partículas entre sí y disminuir la densidad (Tschebotarioff 304).

En la Figura 2.3 se muestra también la curva de cero vacíos. En teoría el peso específico seco máximo se obtiene cuando el suelo no tiene vacíos, es decir cuando está completamente saturado.

Teóricamente las curvas de compactación obtenidas de los ensayos, en el punto de densidad máxima y humedad óptima, deberían alcanzar la curva de cero vacíos correspondiente a la gravedad específica G_s del suelo ensayado y seguir esta curva para humedades mayores (Tschebotarioff 304).

Sin embargo esto no ocurre en la realidad debido a que no es posible expulsar todo el aire contenido en el suelo.

Para determinar la curva de cero vacíos se debe proceder de la siguiente manera (Das 54-55):

- 1) Determinar la densidad de sólidos del suelo o gravedad específica de sólidos G_s .
- 2) Determinar el peso específico del agua γ_w .
- 3) Suponer varios valores de porcentaje de humedad w .
- 4) Calcular el peso específico con cero vacíos γ_d para los diferentes valores de humedad con la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \frac{w G_s}{S}} \quad (2.6) \quad (\text{Torres 6})$$

Para la curva de cero vacíos ($S=100\%$) para una determinada densidad de sólidos, el grado de saturación S , en porcentaje, que se debe reemplazar en la fórmula 2.16 es uno. Para calcular otras curvas de saturación, S cambia, por ejemplo para calcular la curva de vacíos $S=80\%$, se utilizará el valor 0.8 en la fórmula y así para todas las curvas de saturación.

2.2.4. Factores que influyen en la compactación

De todos los factores que influyen e intervienen en la compactación de los suelos, los más importantes son el contenido de humedad y la energía de compactación aplicada en los ensayos. Habiendo también otros factores distintos, a continuación se describe como afectan estos en la compactación del suelo.

2.2.4.1. Efecto del contenido de humedad

El contenido de humedad influye directamente en el peso específico seco obtenido en el proceso de compactación. Como se puede ver en la Figura 2.4; mientras el contenido de humedad aumenta, mayor es el peso específico seco obtenido, hasta llegar al pico de la curva que es donde el contenido de humedad óptimo proporciona el máximo valor de peso específico del ensayo. Después de este contenido de humedad óptimo, los pesos específicos disminuyen.

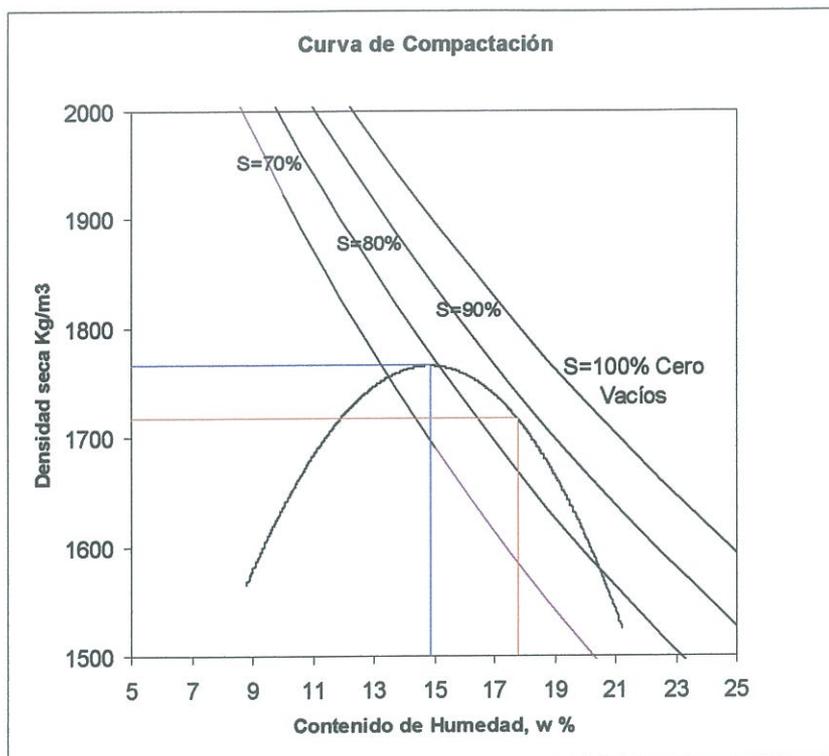


Figura 2.4.- Curva de compactación y curvas de saturación 100%,90%, 80% y 70%.

En la Figura 2.4, se puede ver que el grado de saturación aumenta con el aumento de la humedad. En esta gráfica, para la densidad de sólidos del suelo, y al ser este compactado, alcanza un grado de saturación del 80% en el punto de densidad máxima y humedad óptima (líneas azules). A partir de este punto, el grado de saturación sigue en aumento con la adicción de agua hasta que llega a su mayor grado de saturación aproximadamente del 90% (líneas rojas en la gráfica). A partir de este punto, el grado de saturación decrece permaneciendo más o menos constante.

La Figura 2.5 nos muestra también lo explicado en el párrafo anterior, mostrando en líneas azules la humedad óptima y en líneas rojas la humedad de máxima saturación. Esta gráfica representa la variación del grado de saturación con el aumento de humedad para el mismo ejemplo de la Figura 2.4.

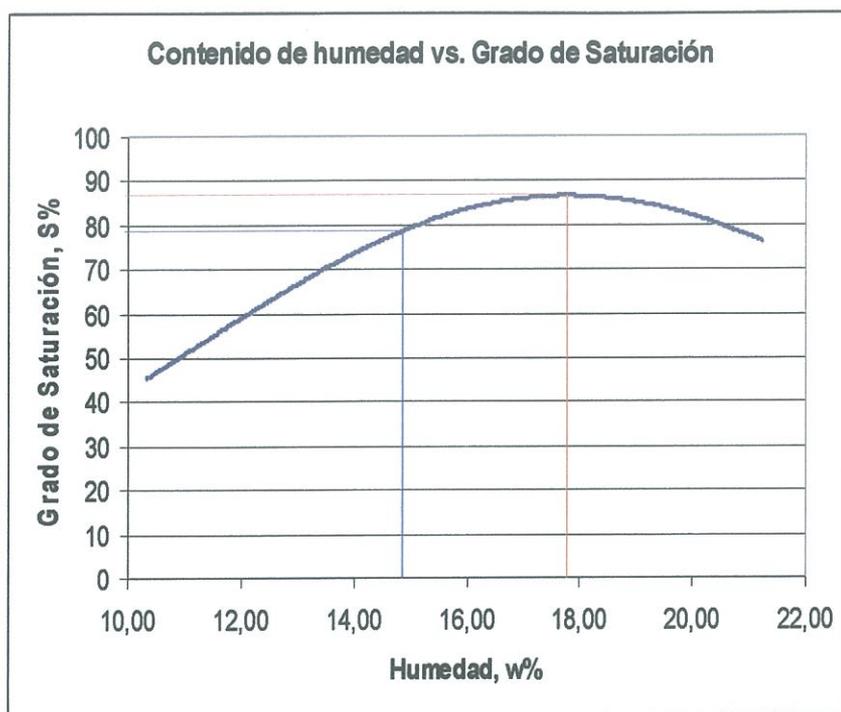


Figura 2.5.- Contenido de humedad vs. Grado de saturación.

El contenido de agua, además afecta a la estructura del suelo que está siendo compactado. Cuando hay poco agua en el suelo, este ejerce una fuerza de resistencia al esfuerzo de compactación, debido a la alta concentración de iones en el agua, a los esfuerzos efectivos producidos por la tensión capilar y la poca repulsión entre las partículas. Cuando aumenta el contenido de agua, estas condiciones cambian, la resistencia a la deformación disminuye provocando que las partículas del suelo tomen un mayor grado de orientación (Marsal y Resédiz 199).

2.2.4.2. Efecto de la energía de compactación

La energía con que se compacta el suelo afecta considerablemente a los pesos específicos secos obtenidos en los ensayos. Como se puede observar en la Figura 2.6; si se compacta el suelo con una energía de compactación baja, se obtienen pesos específicos más bajos. Por el contrario si la energía de

compactación es alta, las curvas de compactación se recorren hacia arriba y a la izquierda, siguiendo la parte descendente de las mismas más o menos paralelas a la curva de cero vacíos, obteniéndose así pesos específicos secos máximos mayores. En esta figura se puede apreciar también que cuando aumenta la energía de compactación, disminuye el contenido de humedad óptimo.

Cabe mencionar que para valores mayores al contenido óptimo de humedad, la energía de compactación solamente deforma angularmente al suelo y no disminuye su volumen. Esto se debe a que un suelo que contiene más agua, es más deformable pero menos compresible por su bajo contenido de aire (Marsal y Reséndiz 199).

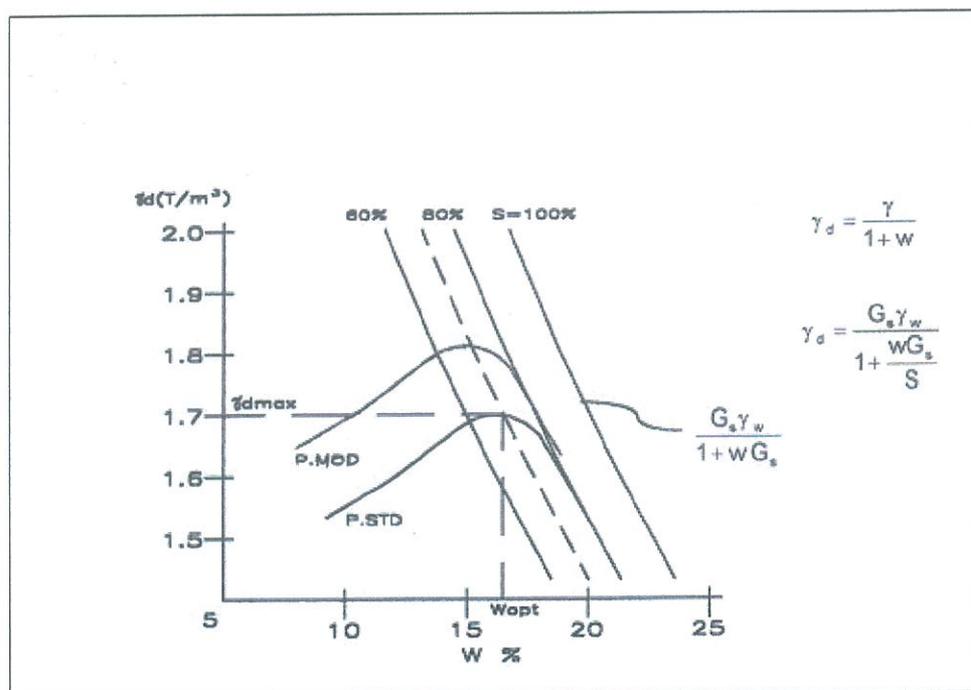


Figura 2.6.- Curvas de compactación Proctor Estándar y Modificado, curvas de saturación (Torres 6).

La energía de compactación aplicada, afecta a la estructura de los suelos ya que por sus medios se logra reducir el volumen y ocasionar deformaciones angulares. A mayor energía de compactación, acompañada también por un aumento del contenido de humedad, mayor es la remoción de vacíos de aire (disminución de volumen) y mayores son también las deformaciones angulares. Esto se logra excepto a valores de contenido de agua superiores al óptimo (Marsal y Resédiz 199-200).

A cerca de los efectos que tiene la fuerza de compactación sobre la saturación de las muestras compactadas, se puede decir que mientras mayor sea la energía, más eficaz será la remoción de vacíos permitiendo que el agua ocupe estos espacios llegando a un grado mayor de saturación. Este aumento de energía logra este aumento en la saturación del suelo solamente en a valores de humedad menores o iguales al óptimo, después es ineficiente.

2.2.4.3. Efecto del tipo de suelo compactado

El tipo de suelo, su granulometría, la forma de sus partículas, la densidad de sólidos y la cantidad y tipo de finos presentes, influyen en el peso específico seco y humedad óptima del suelo al ser compactado (Das 56).

En la Figura 2.7, se muestran las curvas de compactación de cinco diferentes tipos de suelos. Se puede ver que los suelos finos como el limo arenoso y la arcilla limos, tiene mayos pesos específicos secos que las arenas.

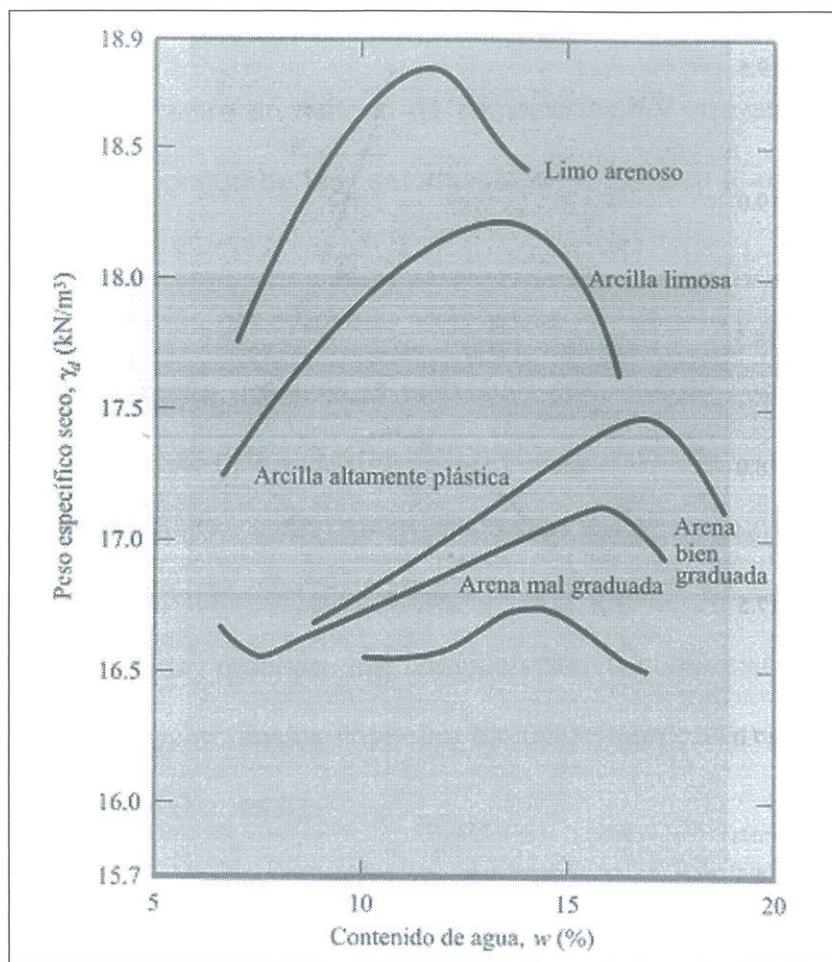


Figura 2.7.- Curvas de compactación para cinco suelos diferentes (Das 56).

Aquí se puede mencionar dentro de tipo de suelo, el efecto que tiene la fracción gruesa de un material sobre la densidad seca. El incremento del porcentaje de material grueso en una mezcla arcilla, arena y grava bien graduada por ejemplo, aumenta el peso específico seco hasta cierto punto y después decrece.

El incremento en la densidad seca se da mientras que la fracción fina del suelo constituya una matriz para las partículas gruesas y estas no entren en contacto y formen cadenas continuas, ocurriendo lo contrario cuando estas cadenas continuas de material grueso se forman (Marsal y Resédiz 200).

2.2.4.4. Efecto del método de compactación

La diferencia entre un método de compactación y otro se puede decir que radica en la magnitud de las deformaciones angulares que cada uno de ellos provoque.

La compactación por amasado es la aplicación de una presión dada un cierto número de veces y simula la estructura obtenida en suelos finos con compactadores pata de cabra (Torres 4). En el laboratorio se utiliza en ensayo Harvard miniatura.

En la compactación estática se aplica una presión hasta obtener una densidad especificada, produce una compactación o compresión edométrica unidimensional y crea en suelos finos una estructura con partículas orientadas (estructura dispersa) (Torres 4).

2.2.4.5. Efecto de la preparación de las muestras

Al momento de prepara una muestra para llevar a cabo un ensayo de compactación, el procedimiento utilizado influye en los resultados. Se puede partir de un suelo relativamente seco e ir agregando la cantidad necesaria para obtener las muestras necesarias para el ensayo, o se puede proceder al revés, partiendo de un suelo húmedo que se va secando.

Utilizando el primer método se obtienen pesos específicos secos más elevados. Esto se debe a que cuando se agrega agua, se crea un exceso que hace que la tensión capilar entre los grumos sea menor que la de los grumos de un suelo en el que se ha hecho evaporar el agua. Por lo mismo la energía de compactación es más eficiente en el primer caso. Para disminuir esta diferencia de resultados entre los dos procedimientos, para el caso de empezar con una muestra seca, se debe dejar pasar algún tiempo después de agregada

el agua para que el suelo iguale en condiciones de tensión capilar al suelo húmedo (Juárez 581).

Por otro lado el uso repetido de las muestras no es conveniente debido a que estas dejarían de ser representativas de las condiciones de los suelos compactados en el campo, ya que estos no son recompactados. En el laboratorio se obtienen densidades secas mayores cuando se reutiliza una muestra, lo cual arroja datos erróneos acerca de las condiciones de compactación en el campo (Juárez 582).

2.2.5. Propiedades de los suelos compactados

El suelo al ser compactado cambia y mejora en sus propiedades físicas y mecánicas, lo cual es deseable puesto que la tierra suelta o los suelos sin compactar no son adecuados para soportar cargas y resistir otras condiciones requeridas por la obra. A continuación se explican algunas de ellas.

2.2.5.1. Permeabilidad

La propiedad de un suelo al no presentar resistencia al paso de agua se llama permeabilidad. La permeabilidad se representa con la letra k , que es un coeficiente que se obtiene experimentalmente. Mientras los valores de k son menores, mayor es la impermeabilidad del suelo (Legault 104). La permeabilidad depende de la relación de vacíos, la estructura del suelo y el grado de saturación S .

Cuando disminuye la relación de vacíos disminuye también la permeabilidad de un suelo debido a que con la eliminación de vacíos se cierran los canales por donde pasa el agua. Sin embargo, la permeabilidad aumenta mientras aumenta el grado de saturación del suelo, esto a cualquier contenido de humedad.

El factor que más afecta a la permeabilidad de un suelo es la estructura que éste ha adquirido después de haber sido sometido al proceso de compactación. Por lo tanto las condiciones bajo las cuales ha sido compactado el suelo influyen en la permeabilidad. Cuando mayor es la orientación que han adquirido las partículas debido a contenidos de humedad y la alta distorsión lograda por el método de compactación, menor es la permeabilidad del suelo (Marsal y Reséndiz 201).

2.2.5.2. Compresibilidad

La compresibilidad del suelo es la relación que existe entre la carga de compresión aplicada al mismo y la deformación o cambio de volumen. La deformación por acción de una carga depende de la magnitud de ésta, de la relación de vacíos y el contenido de humedad. La compresión o consolidación de un suelo puede continuar por varios años bajo la acción de una carga constante aplicada como por ejemplo lo que sucede en un relleno pesado (Legault 105).

El contenido de humedad parece tener un efecto remarcado en la compresibilidad de un suelo que ha sido compactado. En la Tabla 2.1 aparecen los resultados de cambio de volumen obtenidos a partir de ensayos de consolidación unidimensional, realizado a diferentes cargas y contenidos de humedad. En esta tabla se puede observar que mientras menor es el contenido de humedad de las muestras ensayadas, el cambio de volumen en porcentaje es menor, que el cambio que se produce a mayores contenidos de agua. El cambio de volumen también aumenta con el aumento de carga aplicada.

Cambio de volumen en porcentaje bajo diferentes cargas (psi)								
Humedad	γ_d	w	S%	37.5psi	75psi	150psi	300psi	300psi Sat
4% seco	105.5	13.0	59.6	1.2	1.7	2.6	5.5	8.0
2% seco	108.3	15.2	74.8	1.4	2.1	3.4	5.6	5.6
w óptimo	109.7	17.4	88.4	3.6	4.5	5.9	7.9	7.9
2% húmedo	107.4	19.4	93.4	3.8	5.0	6.5	8.5	8.6

Tabla 2.1.- Compresión de un limo a varios contenidos de humedad y estados de carga (Winterkorna y Yang 253).

De esta tabla se puede ver que cuando un suelo es compactado con humedades bajas y lejanas a la óptima, al momento de saturarlo y aplicarle una carga, éste colapsa y se crean grandes cambios de volumen y la compresibilidad aumenta, como en el estado de carga 300 saturado de la tabla (Winterkorna y Yang 253).

Un suelo que ha sido compactado en estado seco, es menos compresible debido a que sus partículas tienen poco grado de orientación, en comparación con uno que contiene más agua en el cual la orientación es mucho mayor.

2.2.5.3. Resistencia al corte

La resistencia al corte de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que ofrece esta para resistir la falla y el desplazamiento a lo largo de cualquier plano de ella. Por lo general la resistencia de un suelo aumenta al ser compactado. Mohr en 1900 presentó su teoría sobre la teoría de la ruptura de los materiales, en la cual sostenía que un material (o suelo) falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y el esfuerzo cortante (Das 208).

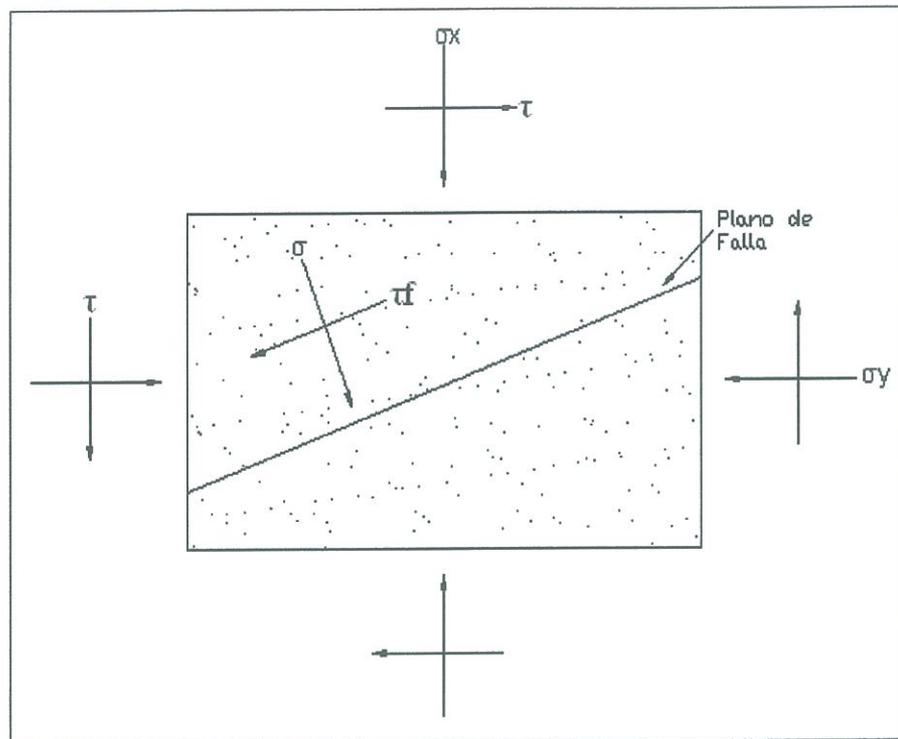


Figura 2.8.- Relación entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre el plano de falla
(Das 208).

En la Figura 2.8, τ_f representa el esfuerzo cortante en el plano de falla y σ es el esfuerzo normal en el plano de falla, los mismos que se combinan para producir la falla por corte en una muestra de suelo.

La resistencia al corte de un suelo depende de la densidad y el contenido de humedad al momento del corte (Winterkorna y Yang 249). La Figura 2.9, nos muestra la resistencia a esfuerzo constante sin drenaje de un suelo cohesivo compactado. Se puede apreciar que la resistencia al corte (líneas continuas en Kg/cm^2), para un peso específico constante disminuye cuando aumenta la humedad.

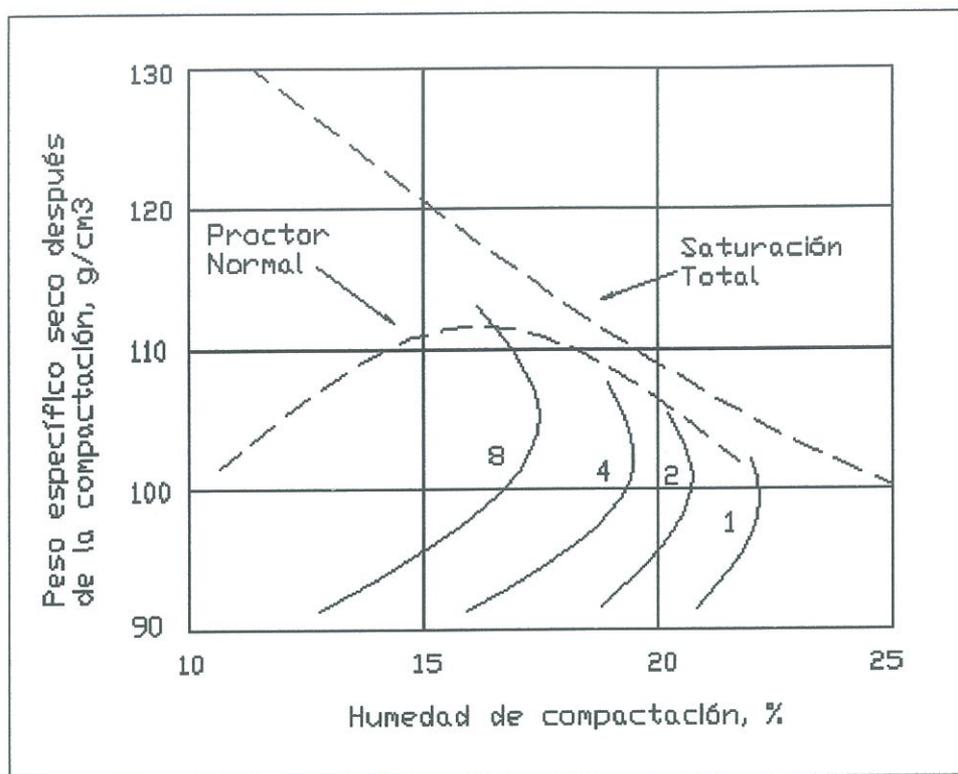


Figura 2.9.- Relación de la resistencia a compresión sin confinar y sin drenar de un suelo cohesivo compactado, con la humedad y el peso específico seco (Sowers 270).

Para una humedad constante, la resistencia al corte aumenta con el incremento de peso específico, exceptuando cuando se acerca a la curva de cero vacíos cuando ésta decrece.

La resistencia de un suelo tiene que ver también con la presión de agua en los poros al momento del corte. Mientras menor sea el contenido de humedad, mayor es la presión del agua en los poros (presión capilar) dando esto mayor resistencia al suelo. Con el incremento de agua, esta presión disminuye disminuyendo la resistencia (Winterkorna y Yang 249).

2.2.6. Comportamiento de los suelos compactados

El comportamiento de los suelos compactados se puede resumir en las siguientes figuras:

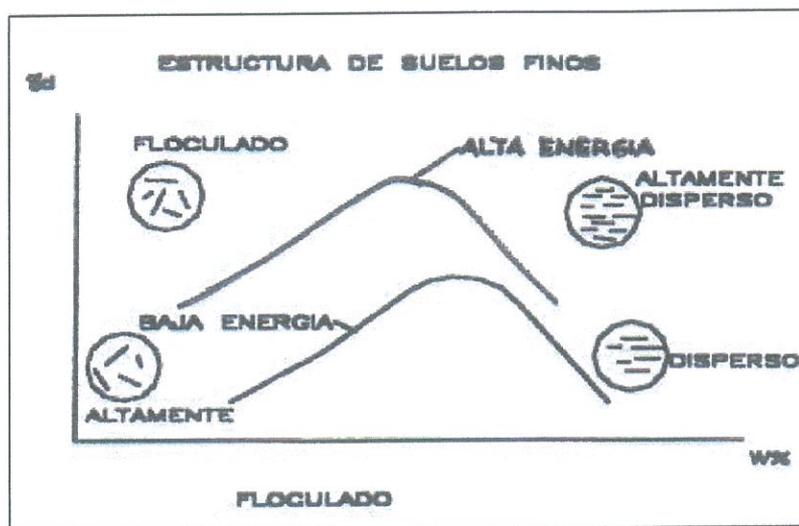


Figura 2.10.- Estructura de los suelos finos (Torres 12).

En la Figura 2.10, se puede ver que la estructura de los suelos finos al ser compactados con una energía baja, pasa de ser una estructura altamente floculada a una estructura dispersa y más densa. Si se compacta el suelo con una energía mayor, se pasa de tener un suelo floculado a un suelo con estructura altamente disperso con mayores densidades secas. Por lo tanto mientras mayor sea la energía de compactación, mayor será la orientación de las partículas.

El aumento del contenido de agua junto con la aplicación de una energía de compactación, ayuda a que el suelo pase de una conformación poco densa, a una estructura dispersa más densa.

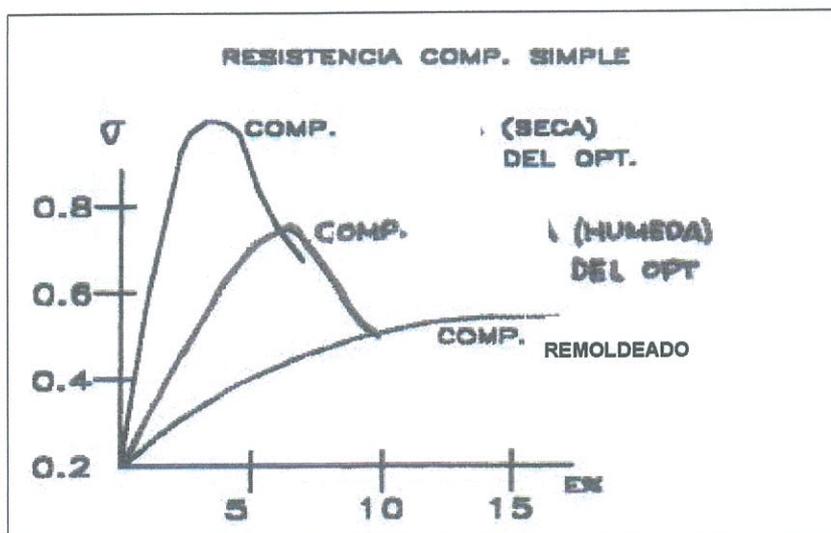


Figura 2.11.- Resistencia a la compresión simple (Torres 12).

La resistencia máxima a la compresión simple, q_u (Figura 2.11) de un suelo que ha sido compactado en la rama seca del óptimo es mayor que la que alcanza un suelo que ha sido compactado en el lado húmedo del óptimo. Estas dos curvas son proporcionales y trazan una línea recta hasta antes de llegar a su punto de falla lo que nos dice que mientras mayores son los esfuerzos aplicados, mayores son las deformaciones.

Cuando algunos suelos son remoldeados, sin aumentar en contenido de humedad, la resistencia a la compresión simple se reduce considerablemente (Das 236). Esto se observa en la curva más aplanada de la figura, se producen mayores deformaciones con menos resistencia.

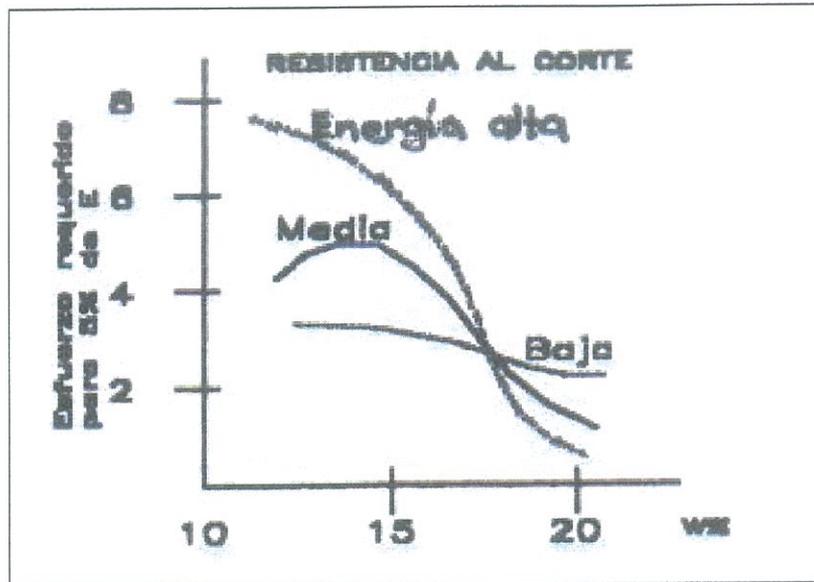


Figura 2.12.- Resistencia al corte (Torres 12).

De esta gráfica (Figura 2.12), la relación que se observa entre la resistencia al corte y la humedad es clara. Cuando aumenta el agua, disminuye la resistencia. Para una energía de compactación alta, el esfuerzo necesario para deformar al suelo, es mayor que para una energía de compactación baja, cuya curva no parece ser tan sensible al aumento de humedad, pero sin embargo su resistencia al corte disminuye con su aumento.

Para una energía de compactación media, la resistencia al corte aumenta primero con la adición de agua alcanzando un máximo, bajando bruscamente después de este punto.

La Figura 2.13 se muestra que los asentamientos de una suelo compactado, son menores cuando la humedad se encuentra en el rango óptimo y son mayores cuando la humedad esta por debajo y por encima de la humedad óptima.

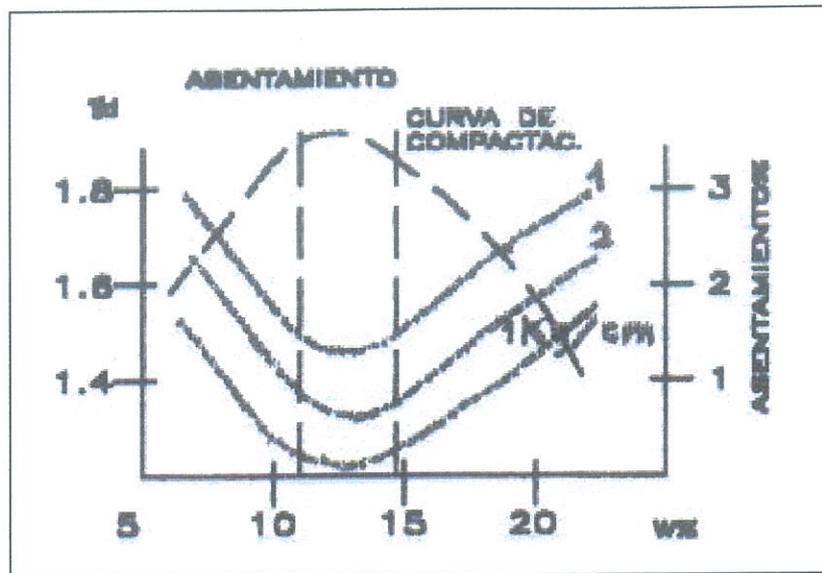


Figura 2.13.- Asentamiento (Torres 12).

2.3. Métodos de compactación en el laboratorio

La necesidad de reproducir las condiciones de compactación del campo en el laboratorio, para propósitos de control y obtención de curvas de compactación y comportamiento, llevó a los estudiosos de la mecánica de suelos a implementar ensayos para laboratorio que copien en cierto grado las condiciones de compactación del campo.

El primer método de esta naturaleza fue establecido por R.R. Proctor. Este método es conocido como el ensayo *Proctor Estándar*, el mismo que fue modificado posteriormente, para recrear con más fidelidad las condiciones de compactación del campo, dando lugar al ensayo *Proctor Modificado*. Estos son los ensayos de compactación de laboratorio más utilizados para obtener los pesos específicos secos máximos y contenidos de humedad óptimos del suelo.

El ensayo *Proctor Estándar*, es realizado en un molde cuyas dimensiones en milímetros se muestran en las Figuras 2.14 y 2.15.

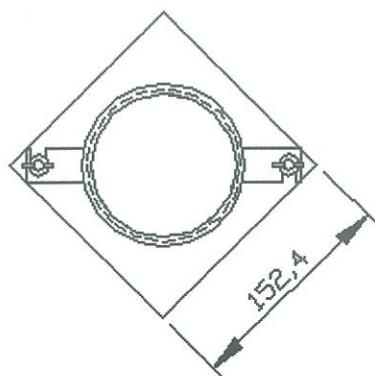


Figura 2.14.- Vista en planta del molde utilizado en el ensayo Proctor Estándar y Modificado (ASTM D 698-00).

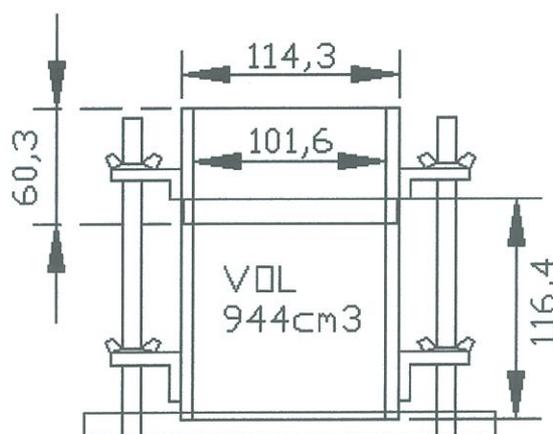


Figura 2.15.- Dimensiones en milímetros del molde utilizado para el ensayo Proctor Estándar y Modificado (ASTM D 698-00).

Este molde tiene diámetro interno de 101.6mm (4 pulgadas), unido a una base cuadrada de 152.4mm por lado, un volumen de 944cm³ y una altura de 116.4mm. Además consta de una extensión acoplable al molde de por lo menos 50.8mm de alto. El suelo se compacta mediante golpeo, usando tres capas de material, cada una golpeada 25 veces, dejando caer el martillo (Figura 2.16) desde una altura de 304.8mm sobre la muestra contenida en el molde. El diámetro del pisón es de 50.8mm y pesa 2.5kg ó 24.4N (ASTM D698-

00). Se deben preparar cuatro o cinco muestras con diferentes contenidos de humedad para ser compactados y así obtener los puntos de la curva γ_d vs. w .

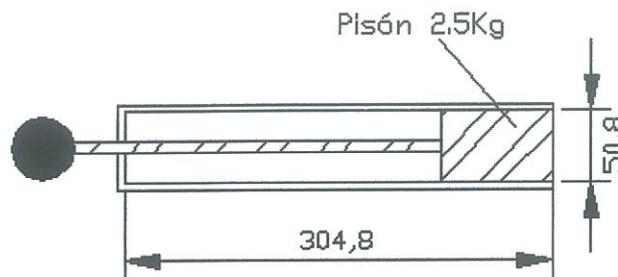


Figura 2.16.- Martillo usado para el ensayo Proctor Estándar.

La energía de compactación aplicada en este ensayo es de $12400 \text{ ft} - \text{lb} / \text{ft}^3$ ó $600 \text{ kN} - \text{m} / \text{m}^3$ y está dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{NnWh}{V} \quad (2.7)$$

Donde:

- E = energía de compactación específica
- N = número de golpes por capa
- n = número de capas
- W = peso del martillo o pisón
- h = altura de caída del pisón
- V = volumen de suelo compactado (Juárez 577).

Usando la Ecuación (2.17) tenemos:

$$E = \frac{25 * 3 * 24.4 \text{ N} * 0.3048 \text{ m}}{944 * 10^{-6} \text{ m}^3} = 590.87 \text{ kN} - \text{m} / \text{m}^3$$

Debido a que el ensayo *Proctor Estándar* y su energía de compactación dejaron de reproducir las condiciones de compactación de campo, se lo modificó para alcanzar los niveles de compactación mayores obtenidos con el avance de la maquinaria.

El ensayo *Proctor Modificado* utiliza el mismo molde que el ensayo *Proctor Estándar* (Figuras 2.8 y 2.9), pero difiere en el número de capas a ser compactadas que ahora es de 5 (manteniéndose igual el número de golpes por capa: 25), la altura de caída del martillo es de 457.2mm, diámetro del área de contacto de 50.80mm y un peso de 4.54Kg ó 44.5N (ASTM D 1557-91).

Al cambiar estas condiciones, el ensayo aplica una mayor energía de compactación al suelo como se puede comprobar usando la Ecuación (2.7) nuevamente:

$$E = \frac{25 * 5 * 44.5N * 0.4572m}{944 * 10^{-6} m^3} = 2694kN - m / m^3 \text{ ó}$$

$$56000ft - lbf / ft^3 \text{ aproximadamente.}$$

Para estos dos ensayos, existe un molde alternativo que difiere al de las Figuras 2.8 y 2.9, en que tiene una base cuadrada de 203.2mm por lado y el radio interno del molde cilíndrico de 152.24mm (6 pulgadas) y uno externo de 165.1mm; y un volumen de 2124cm³ (ASTM D698-00). Sin embargo para alcanzar la misma energía de compactación específica en los dos ensayos (Proctor Estándar y Modificado), es necesario elevar el número de golpes a 56, manteniendo los demás parámetros constantes para cada ensayo respectivamente.

Los ensayos Proctor Estándar y Modificado, tienen tres procedimientos a seguir dependiendo del material retenido en diferentes tamices. El procedimiento A utiliza el material que pasa por el tamiz No.4, el procedimiento B utiliza el material que pasa por el tamiz de 3/8 de pulgada y el procedimiento C el material que pasa por el tamiz de 3/4 de pulgada. En los procedimientos A y B el molde a usar es el de 101.6mm (4 pulgadas) mostrado en las Figuras

2.14 y 2.15; mientras que el procedimiento C utiliza el molde de 152.24mm (6 pulgadas) (ASTM D698-00).

Un resumen de los ensayos de compactación expuestos en este punto, con sus criterios y procedimientos respectivos se presenta en las Tablas 2.2 y 2.3.

Ensayo Proctor Estándar ASTM D698-00			
Concepto	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C
Molde	101.6mm (4 in)	101.6mm (4 in)	152.4mm (6 in)
Volumen del molde	944cm ³ (1/30ft ³)	944cm ³ (1/30ft ³)	2124cm ³ (0.075ft ³)
Peso del martillo	2.5kg (5.5lb)	2.5kg (5.5lb)	2.5kg (5.5lb)
Altura de Caída del martillo	304.8mm (12 in)	304.8mm (12 in)	304.8mm (12 in)
Número de golpes	25	25	56
Número de capas	3	3	3
Energía de compactación	591kNm/m ³ (12400ft-lbf/ft ³)	591kNm/m ³ (12400ft-lbf/ft ³)	591kNm/m ³ (12400ft-lbf/ft ³)
Material a ser usado	Porción que pasa por el tamiz No.4. Se usa si 20% o menos por peso es retenido en el tamiz No.4	Porción que pasa por el tamiz 3/8. Se usa si el suelo retenido en el tamiz No.4 es más del 20% y 20% o menos por peso es retenido en el tamiz 3/8.	Porción que pasa por el tamiz 3/4. Se usa si más de 20% por peso del material es retenido en el tamiz 3/8, y menos del 30% por peso es retenido en el tamiz 3/4.

Tabla 2.2.- Especificaciones del ensayo Proctor Estándar (Das, Principios 765).

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557-91			
Concepto	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C
Molde	101.6mm (4 in)	101.6mm (4 in)	152.4mm (6 in)
Volumen del molde	944cm ³ (1/30ft ³)	944cm ³ (1/30ft ³)	2124cm ³ (0.075ft ³)
Peso del martillo	4.54kg (10lb)	4.54kg (10lb)	4.54kg (10lb)
Altura de Caída del martillo	457.2mm (18 in)	457.2mm (18 in)	457.2mm (18 in)
Número de golpes	25	25	56
Número de capas	5	5	5
Energía de compactación	2700kNm/m ³ (56000ft-lbf/ft ³)	2700kNm/m ³ (56000ft-lbf/ft ³)	2700kNm/m ³ (56000ft-lbf/ft ³)
Material a ser usado	Porción que pasa por el tamiz No.4. Se usa si 20% o menos por peso es retenido en el tamiz No.4	Porción que pasa por el tamiz 3/8. Se usa si el suelo retenido en el tamiz No.4 es más del 20% y 20% o menos por peso es retenido en el tamiz 3/8.	Porción que pasa por el tamiz 3/4. Se usa si más de 20% por peso del material es retenido en el tamiz 3/8, y menos del 30% por peso es retenido en el tamiz 3/4.

Tabla 2.3.- Especificaciones del ensayo Proctor Modificado (Das, Principios 767).

2.4. Métodos de compactación en el campo

2.4.1. Tipos de Compactadores en Campo

La compactación de grandes obras de tierra como terraplenes para pistas de aeropuertos, se realiza mayormente utilizando compactadores de rodillos de diferentes pesos y características. La utilización de cada uno de los tipos de rodillos depende del tipo de suelo a compactarse y las condiciones específicas de la obra.

Existe básicamente cuatro tipos de rodillo: Rodillos lisos, rodillos neumáticos, rodillos pata de cabra y rodillos vibratorios (Das 65).

Los *rodillos lisos* son apropiados para la compactación de suelos granulares (Torres 7). Su tambor cubre un 100% del área compactada, ejerciendo presiones en el suelo de 310 hasta 380kN/m². Estos rodillos no consiguen altos pesos específicos al usarse en capas gruesas (Das 65). Un rodillo liso se muestra la en Figura 2.17.



Figura 2.17.- Rodillo liso Ingersoll Rand SD 160DX (www.ir-abg.com).

Los *rodillos neumáticos* se utilizan para suelos arenosos y arcillosos. Están compuestos por una hilera de neumáticos (mínimo 4), colocados cerca el uno del otro y de tal forma que cada uno pueda subir y bajar independientemente según las irregularidades del suelo que esta siendo

compactado. La presión bajo las ruedas, varían entre 600 y 700kn/m² y su cobertura está aproximadamente entre el 70% y 80% (Das 65). La compactación con estos rodillos depende de la carga y la presión de inflado de los neumáticos.

Debido a que la presión del inflado de los neumáticos el casi la misma que la que estos ejercen sobre el suelo, al incrementarse ésta, se obtienen mayores densidades y menores contenidos de humedad. Lo mismo ocurre si se aumenta la carga sobre los neumáticos. El aumento de la presión de inflado y la carga, también ayuda a que se ejerza presión a mayor profundidad (Winterkorna y Yang 274). Un rodillo neumático se presenta en la Figura 2.18.

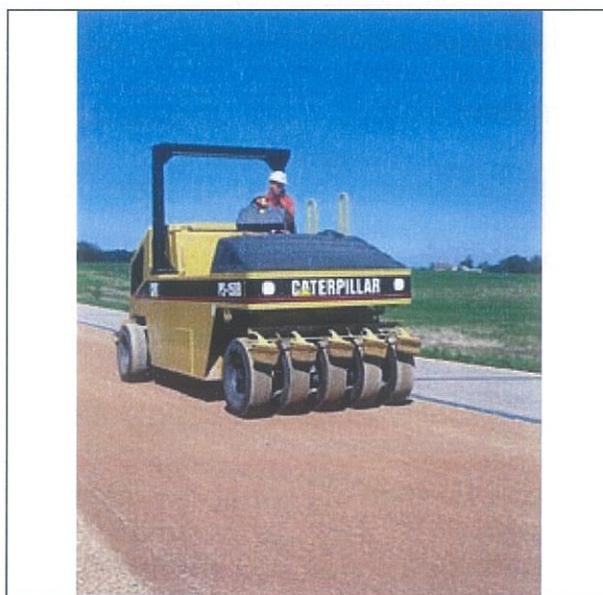


Figura 2.18.- Rodillo neumático Caterpillar PS-150B (www.cat.com).

Los *rodillos pata de cabra* se utilizan con mejores resultados en suelos cohesivos (Torres 7). Este tipo de rodillos son capaces de compactar por capas sin producir laminación, dando un grado de compactación y densidad uniformes y ayuda a homogenizar el material (Winterkorna y Yang 270).

Estos rodillos cuentan con uno o dos tambores con protuberancias que son las que ejercen la presión en el suelo. La presión bajo estas

protuberancias, varían desde los 1380 hasta los 6900kN/m² y su área de 25 a 85cm² (Das 66). La Figura 2.19 muestra un rodillo pata de cabra.



Figura 2.19.- Rodillo pata de cabra (<http://mexico.cat.com>).

Estos tres tipos de rodillos en adición con dispositivos vibratorios, se convierten en *rodillos vibratorios*. Estos rodillos poseen diferentes grados de vibración y frecuencias, para ajustarlos y combinarlos con los pesos de los rodillos, de acuerdo con el suelo que se este compactando. Estos rodillos se utilizan para compactar suelos granulares como gravas y arenas.

2.4.2. Compactadores Utilizados en el NAIQ

En la compactación del terraplén del NAIQ, se utilizan básicamente cuatro tipos de rodillos (Entrevista Luís Feijoo Aguilera, EQUITRANSA):

- 1) Rodillo Liso de 16 toneladas Ingersoll Rand SD 160DX (Figura 2.17).
- 2) Rodillo Liso de 12 toneladas Ingersoll Rand SD 100D (Figura 2.20).



Figura 2.20.- Rodillo Liso 12 toneladas Ingersoll Rand SD 100D (www.ir-abg.com).

- 3) Rodillo Neumático de 12 toneladas Caterpillar, un rodillo similar a este tipo se muestra en la Figura 2.21.



Figura 2.21.- Rodillo Neumático Caterpillar PS 360C (www.cat.com).

- 4) Rodillo Neumático para aplicaciones en asfalto Caterpillar PS 150C de 5.4 toneladas sin cargar y un peso máximo de 12.9 toneladas, llenado con arena gruesa y agua. Un compactador similar se muestra en la Figura 2.18.

CAPITULO 3

3. Control de Compactación

El control de compactación de un terraplén u obra de tierra en general, tiene como objetivo verificar que, las especificaciones dadas para la misma se cumplan. En pocas palabras es el control de la calidad del producto final, en este caso el suelo compactado.

Este control de compactación se hace examinando los resultados obtenidos después de la compactación, midiendo las propiedades físicas y mecánicas del suelo; y controlando el material y la manera en que es tratado previo a ser compactado. Este control en campo, combinado con ensayos de laboratorio lleva a un mejor control de las obras.

Entre las propiedades físicas y mecánicas del suelo, que son controladas después de compactado, está la densidad seca; y entre las que se controla en el material antes y después de la compactación, se encuentra el contenido de humedad del material y de los paños compactados. Estas dos, la densidad seca y la humedad son las propiedades que más se controlan.

Otra característica de calidad a ser medida, es por ejemplo: el grado de compactación alcanzado en un paño. A continuación se presentan en la Tabla 3.1, las características de calidad a ser controladas y probadas, los criterios de aceptación, el método o procedimiento y la frecuencia de realización de ensayos; los mismos que han sido tomados del PLAN ESPECÍFICO DE CALIDAD – MOVIMIENTO DE TIERRAS DEL NAIQ (PQE NQIA 510 41 01).

Fases del Proceso	Características de calidad a ser controladas	Criterio de aceptación	Procedimiento	Frecuencia
Distribución volumétrica de relleno	Volumen transportado y descarga por baliza	Volqueta a ser completamente cargada	Excavación y transporte	1 volqueta de 12m ³ en promedio cada 10 metros
Esparcimiento de relleno	Material no aflojado	-	Inspección visual	Después de pasar los D6
Homogenización del material	Contenido de humedad	± 2% de la humedad óptima	Densidad y contenido de humedad: Densímetro Nuclear ASTM D 2922	10 pruebas tomadas a lo largo del paño
Nivelación del material del terreno	Aspecto visual del material del terreno: Nivel del material puesto antes de la compactación	El material debe estar aproximadamente al nivel del señalado en el blue top	Topografía	Balizas colocadas en las primeras capas: cada una a 20m y las últimas capa: cada 5m. En el nivel a ser determinado por la especificación
Compactación del relleno	Número de pasadas del rodillo en paños no confinados	-	Relleno y compactación	Rodillo liso 16 ton, pasar 8 veces en tres sectores
	Número de pasadas del rodillo en paños confinados	-	Relleno y compactación	Rodillo liso 16 ton, pasar 8 veces en cuatro sectores y en las juntas
Compactación del relleno	Porcentaje de compactación del paño: Máxima densidad seca, Contenido de humedad: ± 2% del óptimo o según especificaciones para relleno particular de una locación (especificación técnica)	>= 95% de la máxima densidad seca, ± 2% de contenido de humedad óptimo o como está especificado para ubicación particular de relleno por el diseñador (especificación técnica) CBR: entre 34 y 20 no saturado CBR: entre 15 y 10 saturado	Proctor modificado ASTM D 1557, Proctor Hilf ABNT MB 3443, Prueba DCP ASTM D 6951, Densidad y contenido de humedad: Densímetro Nuclear ASTM D2922. CBR de Campo	2 pruebas (3 disparos) usando densímetro nuclear en cada paño o cada 500m ² ; 1 prueba de Cono y Arena cada 2 paños o cada 500m ² ; 1 prueba Hilf cada 7 paños o cada 1500m ² ; 3 pruebas DCP cada dos paños o cada 500m ² CBR: 1 CBR de campo y 1 CBR laboratorio (saturado), cada 50 ensayos DCP
	Porcentaje de compactación de la junta: Máxima densidad seca, Contenido de humedad: ± 2% del óptimo o según especificaciones para relleno particular de una locación (especificación técnica)	>= 95% de la máxima densidad seca	Densidad y contenido de humedad: Densímetro Nuclear ASTM D 2922	2 pruebas (3 disparos) usando densímetro nuclear en cada paño: 1 en cada junta

Nota: Las fases del proceso en negritas se refieren al control de compactación en sí.

Tabla 3.1.- Control de compactación en el NAIQ (AAGC, PQE 19).

3.1. Métodos de control de compactación

A continuación se presentan los métodos de control de compactación: equipo, procedimientos y cálculos para cada uno de ellos. Estos métodos son los utilizados para controlar la compactación de los terraplenes del NAIQ en su primera fase (Ver Capítulo 1, Figura 1.5).

3.1.1. Ensayo Proctor Modificado ASTM D 1557 y PO NQIA 510 04

3.1.1.1. Resumen del ensayo

Una muestra con cierto contenido de humedad es colocada en un molde, cada capa (5 en total) se compactada mediante 25 golpes, usando un martillo que cae desde una altura determinada. Esta operación se repite con 4 ó 5 muestras con diferentes contenidos de humedad (bajo o sobre el óptimo), para poder obtener la curva de compactación de dicha muestra (γ_d vs. w).

3.1.1.2. Equipo

El equipo a usarse es:

- Molde de $4'' \pm 0.016''$ ($101.6\text{mm} \pm 0.406\text{mm}$) (Figuras 2.14 y 2.15) con su respectiva extensión
- Martillo de 10lb (4.54Kg)
- Balanza de 410gr-0.01gr
- Balanza de 20Kg-1g
- Horno con regulador ($110 \pm 5^\circ\text{C}$)
- Regla niveladora
- Tamices $\frac{3}{4}$ in, $\frac{3}{8}$ in y No. 4
- Otros: Brocha, cuchara, recipientes, bandejas, espátula, fundas plásticas, etc.

3.1.1.3. Preparación de las muestras

Dos métodos para preparar las muestras han sido desarrollados, el primero prepara las muestras partiendo del suelo húmedo mientras que el otro parte del suelo previamente secado.

Preparación húmeda.- Se deben preparar las muestras de la manera siguiente:

- 1) Obtener aproximadamente 16kg de material para el ensayo.
- 2) Sin secar la muestra, pasar el suelo por el tamiz correspondiente al método escogido (A: No.4, B: $\frac{3}{8}$ in ó C: $\frac{3}{4}$ in; expuestos en el Capítulo 2).
- 3) Separar cuatro (o cinco) muestras de 2500g cada una, en fundas plásticas.
- 4) Preparar una primera muestra con contenido de humedad cercano al óptimo, agregando agua al tanteo.
- 5) A continuación se deben preparar al menos dos muestras con contenido de humedad mayor al óptimo y dos muestras con contenido de humedad menor al óptimo. Los contenidos de humedad deben variar en 2% cada incremento sin exceder un incremento del 4% de humedad.
- 6) La manera de hacer lo indicado en el punto anterior, es la siguiente:
 - 6.1) Para las muestras con humedad mayor a la óptima: Colocar una bandeja en la balanza y encerarla. Poner el material (los 2500g) en la bandeja. Añadir agua con un vaporizador hasta alcanzar un incremento del 2% de humedad por peso, en este caso hasta que la balanza marque 2550g. Para preparar otra muestra con mayor contenido de humedad se procede de la misma manera pero con un incremento del 4% de la humedad. Una vez añadida el agua necesaria, mezclar vigorosamente la muestra para homogenizarla y distribuir uniformemente

el agua. Una vez hecho esto, regresar la muestra a la funda tratando de no perder material.

6.2) Para muestras con humedades menores a la óptima: Dejar secar las muestras al sol o usando el horno sin exceder una temperatura de 60°C. Una vez que las muestras estén secas, proceder como en el punto 6.1), solo que en este caso los incrementos de humedad serán negativos, es decir para una variación de humedad de -2%, se debe agregar agua hasta que la balanza marque 2450g por ejemplo. Así se procederá para las demás muestras bajo el óptimo de humedad.

7) Dejar reposar las muestras el tiempo necesario antes de ser ensayadas, según la Tabla 3.2.

Clasificación	Horas de reposo
GW,GP,SW,SP	No necesario
GM,SM	3
Todos los demás suelos	16

Tabla 3.2.- Tiempo requerido de reposo para muestras humedecidas (ASTM D1557)

Preparación seca.- Cuando una muestra esta demasiada húmeda para ser desmenuzada y pasada por los tamices, se procede a secarla al aire o al horno sin exceder los 60°C. Una vez que el material está seco, se procede a pulverizarlo y tamizarlo escogiendo la malla según el método seleccionado. A partir de este punto se procede a preparar las muestras de la misma forma que en la **preparación húmeda**, puntos 3) al 7).

3.1.1.4. Procedimiento del ensayo

Una vez preparadas las muestras y haber determinado el volumen del molde, el ensayo continúa con los siguientes pasos:

- 1) Asegurar el molde a la base del mismo y pesar.
- 2) Asegurar la extensión o collar al molde.
- 3) Apoyar el molde sobre una base cilíndrica o cuadrada firme, que tenga un peso no menor a 91Kg.
- 4) Colocar la primera muestra a compactar en el molde en una porción aproximadamente a la quinta parte de la altura del molde.
- 5) Con el martillo aplastar suavemente el suelo antes de compactar, para que este no quede suelto.
- 6) Compactar el suelo dando 25 golpes, manteniendo firmemente el martillo y dejando caer libremente el pisón, moviéndolo en círculos sobre la superficie de la muestra.
- 7) Una vez terminada esta acción, limpiar el suelo que se haya quedado en las paredes del molde con un cuchillo. Este material se incluye en la próxima capa a ser compactada.
- 8) Repetir los puntos 5) al 7) para las cuatro próximas capas.
- 9) Una vez compactadas las cinco capas, retirar la extensión o collar.
- 10) Cortar el suelo compactado que sobresalga del molde, con la regla niveladora.
- 11) Rellenar los huecos utilizando el suelo sobrante y nivelar con la regla.
- 12) Pesar el molde con la base y el suelo. Registrar.
- 13) Remover el suelo del molde y separar dos muestras representativas para determinar el contenido de humedad.
- 14) Si en la curva de compactación no se define un máximo, será necesario compactar muestras adicionales, ya sea del lado seco o húmedo del óptimo, para definir la curva.

3.1.1.5. Cálculos

Los cálculos necesarios para obtener la curva de compactación (γ_d vs. w) son los siguientes:

- 1) Obtener la masa de suelo compactado restando la *masa del molde + base*, de la *masa del molde + base + suelo compactado*.
- 2) Dividir esta masa entre el volumen del molde para obtener la densidad húmeda del suelo (γ). Repetir estos dos puntos 1) y 2) para cada muestra compactada.
- 3) Una vez que los contenidos de humedad hayan sido determinados para cada muestra compactada, calcular la densidad seca correspondiente (γ_d) con la siguiente ecuación: $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w}$ (Ecuación 2.4)
- 4) Dibujar la gráfica γ_d vs. w para obtener de ella la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo. En esta gráfica debe dibujarse también la curva de cero vacíos (Ver numeral 2.2.3. Curva de compactación).

La hoja de registro para este ensayo, se muestra en el Anexo 5.

3.1.2. Método del cono y arena ASTM D 1556 y PO NQIA 510 10

3.1.2.1. Resumen del ensayo

Un hueco es excavado en el suelo del cual se quiere conocer la densidad seca, guardando el suelo extraído del hueco. Este agujero es llenado con arena de una densidad conocida (Ottawa). Se determina el volumen del hoyo y dividiendo la masa del suelo sacado del mismo para este volumen, se determina la densidad húmeda. Una vez determinado el contenido de humedad se obtiene la densidad seca del suelo.

3.1.2.2. Equipo

- Cono doble con válvula (Figura 3.1)
- Plato base metálico (Figura 3.1)
- Botellas para arena
- Arena de Ottawa
- Balanza de 410gr-0.01gr
- Balanza de 20Kg-1g
- Horno con regulador ($110\pm 5^{\circ}\text{C}$)
- Otros: Brocha, cuchara, recipientes, espátula, fundas plásticas, etc.



Figura 3.1.- Cono doble con válvula, base metálica y otros implementos para el ensayo.

3.1.2.3. Procedimiento del ensayo

Para realizar este ensayo y determinar la densidad seca del suelo, se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Llenar la botella con la arena de Ottawa, pesar y registrar (P_1).
- 2) Seleccionar el lugar para el ensayo y nivelarlo. Se puede usar el plato base para nivelar el terreno (Figuras 3.2 y 3.3)



Figura 3.2.- Nivelación del terreno.



Figura 3.3.- Nivelación del terreno.

- 3) Asegurar el plato base en el terreno asegurándose de que los bordes del mismo estén completamente en contacto con el suelo. Dibujar el contorno del plato base en el suelo para chequear el movimiento de la misma durante el ensayo (Figura 3.4).



Figura 3.4.- Colocación y aseguramiento del plato base.

- 4) Cavar el hueco (Figura 3.5).
- 5) Recoger el material extraído del agujero y colocarlo en un recipiente para que no pierda humedad (Figura 3.6). Es importante que en este proceso no se pierda material por lo que este debe ser recolectado con sumo cuidado (Figura 3.6). Las paredes del hoyo tienen que ser lisas y no presentar irregularidades que puedan afectar al ensayo (Figura 3.7).



Figura 3.5.- Excavación del agujero.



Figura 3.6.- Recolección del material.

- 4) Cavar el hueco (Figura 3.5).
- 5) Recoger el material extraído del agujero y colocarlo en un recipiente para que no pierda humedad (Figura 3.6). Es importante que en este proceso no se pierda material por lo que este debe ser recolectado con sumo cuidado (Figura 3.6). Las paredes del hoyo tienen que ser lisas y no presentar irregularidades que puedan afectar al ensayo (Figura 3.7).



Figura 3.5.- Excavación del agujero.



Figura 3.6.- Recolección del material.



Figura 3.7.- Agujero listo para el ensayo.

- 6) Acoplar el cono a la botella llena de arena. Verificar que la válvula del cono funcione correctamente y cerrarla. A continuación colocar la botella y el cono sobre el plato base (Figura 3.8). Seguido, verificar que no existan vibraciones en el lugar de la prueba y abrir la válvula para que la arena pase al agujero. Una vez que la arena pare de fluir a través del cono, cerrar la válvula y retirar el aparato (Figura 3.9).



Figura 3.8.- Aparato listo para el ensayo.



Figura 3.9.- Plato base y arena una vez retirara la botella con arena.

- 7) Retirar la arena de la base y del agujero con mucho cuidado para evitar que esta se pierda (Figura 3.10).
- 8) Pesar la botella con la arena restante y registrar (P_2)
- 9) Pesar la muestra extraída del agujero más el recipiente y registrar (P_3).
- 10) Obtener dos muestras representativas del material extraído del agujero y determinar el contenido de humedad de la misma.

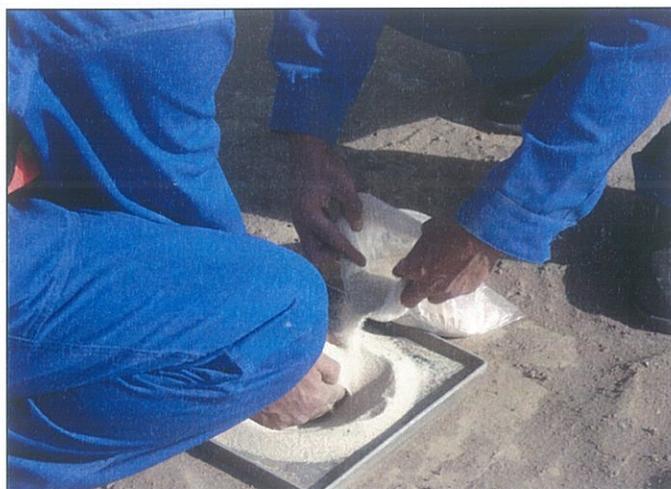


Figura 3.10.- Recuperación de la arena de Ottawa.

3.1.2.4.- Cálculos

Para calcular la densidad seca del suelo utilizando los datos obtenidos en el ensayo del cono y arena, se deben realizar las siguientes operaciones:

- 1) Obtener el peso de arena en el agujero y cono (P_4), restando (P_1) de (P_2), pasos 1) y 8) del procedimiento.
- 2) Obtener la masa de arena en el agujero (P_a), restando la masa de arena en el cono (dato) de (P_4), calculada en el paso 1) de los cálculos.
- 3) Calcular el volumen del agujero (V), dividiendo (P_a) para el peso volumétrico de la arena de Ottawa (dato).
- 4) Calcular el peso de la muestra extraída del agujero (P), restando el peso del recipiente que la contiene de (P_3), ver paso 9) del procedimiento.
- 5) Dividir (P) entre (V) para obtener la densidad húmeda del suelo (γ).
- 6) Una vez conocido el contenido de humedad de la muestra extraída del agujero (paso 10) del procedimiento), calcular la densidad seca del suelo (γ_d) utilizando la Ecuación (2.4).

La hoja de registro para este ensayo, se muestra en el Anexo 5.

3.1.3. Método Nuclear (Densidad y Contenido de Humedad en el campo) ASTM D 2922

3.1.3.1. Resumen del ensayo

Se obtienen datos de humedad, densidad seca y grado de compactación in situ, utilizando un densímetro nuclear.



Este ensayo debe ser realizado por operadores certificados y tomando todas las medidas de seguridad necesarias, puesto que se trabaja con un aparato que emite radiación.

3.1.3.2. Principios de Funcionamiento de un Densímetro Nuclear

Un densímetro nuclear es un dispositivo que mide la densidad, humedad y otros parámetros de suelos o de capas asfálticas por medio de la emisión de radiación.

Los principios básicos del funcionamiento de un densímetro nuclear (en este caso de un densímetro Troxler 3430), extraídos de su Manual del Usuario son los siguientes:

Para determinar la *densidad*, este tipo de densímetro tiene dos modos de operar:

1) Transmisión Directa: Este modo de medición se utiliza para espesores de capa de medio a grueso de suelo (Densímetros Nucleares). La varilla con la fuente del densímetro se introduce en el suelo hasta la profundidad requerida. La radiación emitida por la fuente es captada por los detectores, ubicados en la base del densímetro, y es cuantificada.

Los fotones gamma que salen de la fuente deben atravesar el material para llegar a los detectores y en esto chocan con los electrones presentes en el mismo. Mientras más denso sea el suelo, mayor número de choques se producirán, reduciéndose la cantidad de fotones que llegan a los receptores. La cantidad de fotones que llegan a los detectores es inversamente proporcional a la densidad del suelo. Mientras menor sea la cantidad de fotones gamma, mayor es la densidad del suelo (Manual del Usuario). En la Figura 3.11 se muestra el modo de transmisión directa.

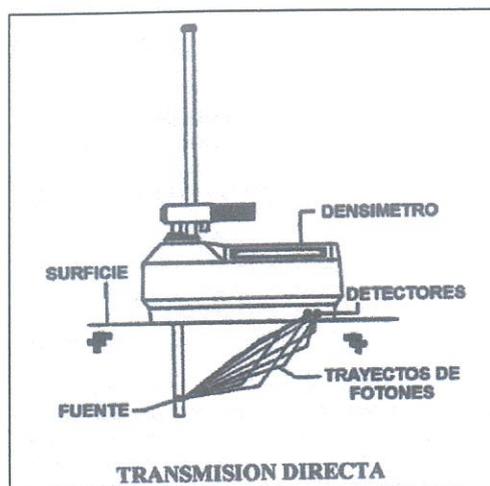


Figura 3.11.- Modo de transmisión directa (www.troxlerlabs.com).

2) Retrodispersión: Este modo se utiliza para medir la densidad de capas finas y no es destructivo. La varilla con la fuente no se introduce en el suelo, quedando dentro del densímetro y en el mismo plano que los detectores.

En este caso los fotones gamma deben ser dispersados o reflejados por lo menos una vez antes de llegar a los detectores, los que miden la cantidad de fotones que llegan a los mismos. El densímetro posee blindajes para evitar que la radiación llegue directamente a los detectores (Manual del Usuario). En la Figura 3.12 se muestra el funcionamiento del modo de retrodispersión.

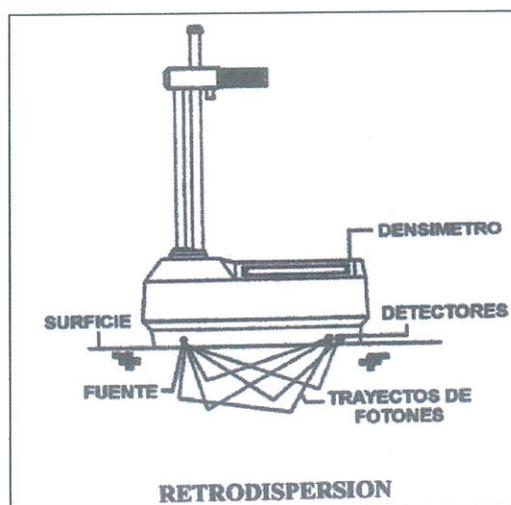


Figura 3.12.- Modo de retrodispersión (www.troxlerlabs.com).

Para determinar la *humedad*, los densímetros recurren a la termalización de los neutrones emitidos por la fuente. La termalización es un proceso en el cual los neutrones son frenados hasta que los choques sucesivos con hidrogeno u otros materiales ya no pierden más velocidad.

Un detector de Helio-3 mide la cantidad de neutrones termalizados o detenidos por el hidrogeno (agua), y así determina el contenido de humedad. La cantidad de neutrones detenidos es directamente proporcional a la cantidad de agua presente en el suelo (Manual del Usuario).

3.1.3.3. Equipo

Es necesario el siguiente equipo:

- Densímetro nuclear (Figura 3.13)



Figura 3.13.- Densímetro Nuclear Troxler 3430.

- Base metálica con guía para hacer el agujero
- Clavo
- Martillo
- Equipo para nivelar el terreno

3.1.3.4. Procedimiento del ensayo

Los pasos a seguir son:

- 1) Nivelar el terreno a ser probado y quitar cualquier material suelto.
- 2) Colocar la base con la guía y hacer el agujero usando el clavo y el martillo (Figura 3.14). Marcar el contorno de la base para luego colocar el densímetro.

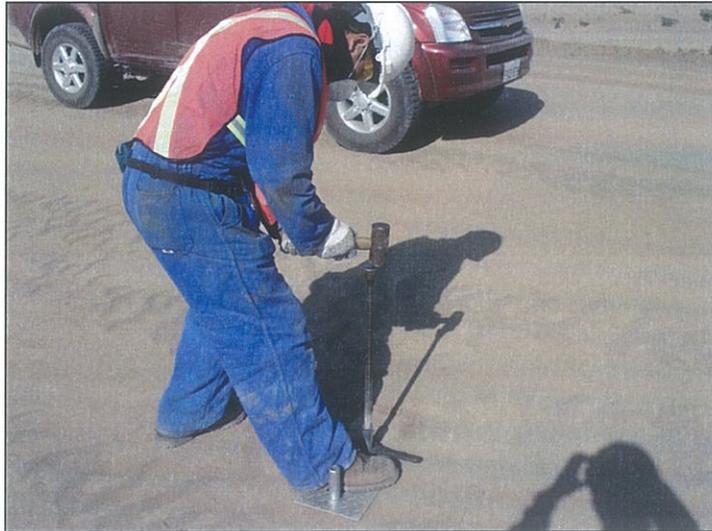


Figura 3.14.- Realización del agujero para el ensayo.

- 3) Sacar el clavo cuidando que este no dañe las paredes del agujero.
- 4) Colocar el densímetro sobre las marcas de la base, cuidando que el agujero coincida con la sonda del densímetro.
- 5) Introducir la sonda en el agujero
- 6) Asentar el densímetro moviéndolo hacia delante y atrás mientras rota alrededor de la sonda.
- 7) Asegurarse de que no haya ningún otro dispositivo radiactivo cerca, para que las lecturas no sean afectadas.
- 8) Activar el densímetro y separarse una distancia prudencial del aparato hasta que este haya realizado las mediciones. Realizar una o varias lecturas (Figura 3.15).



Figura 3.15.- Densímetro nuclear tomando lecturas.

- 9) Anotar las lecturas de densidad húmeda, densidad seca y humedad.

3.1.3.5. Cálculos

Hacer un promedio de las lecturas tomadas.

Si el densímetro no determina datos de densidad seca y humedad, calcular la humedad del lugar utilizando el método ASTM D 2216 y posteriormente calcular la densidad seca.

La hoja de registro para este ensayo, se muestra en el Anexo 5.

3.1.4. Ensayo DCP (Penetración de Cono Dinámica) ASTM D 6951 y PO NQIA 510 12

3.1.4.1. Resumen del ensayo

Se hace penetrar el cono en el suelo, dejando caer el martillo de 8kg y registrar la penetración en milímetros por cada golpe del martillo (mm/golpe), hasta que se alcance una profundidad de 20cm. Mediante este ensayo se puede determinar la rigidez del suelo, correlación con el ensayo CBR u otras características del mismo.

3.1.4.2. Equipo

1) Martillo DCP (Figura 3.16 y 3.17)

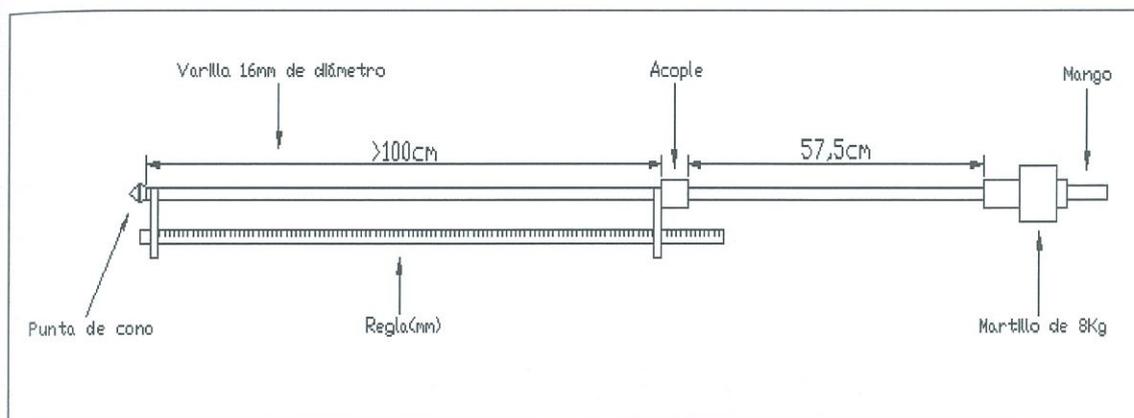


Figura 3.16.- Dimensiones del martillo DCP (ASTM D 6951).

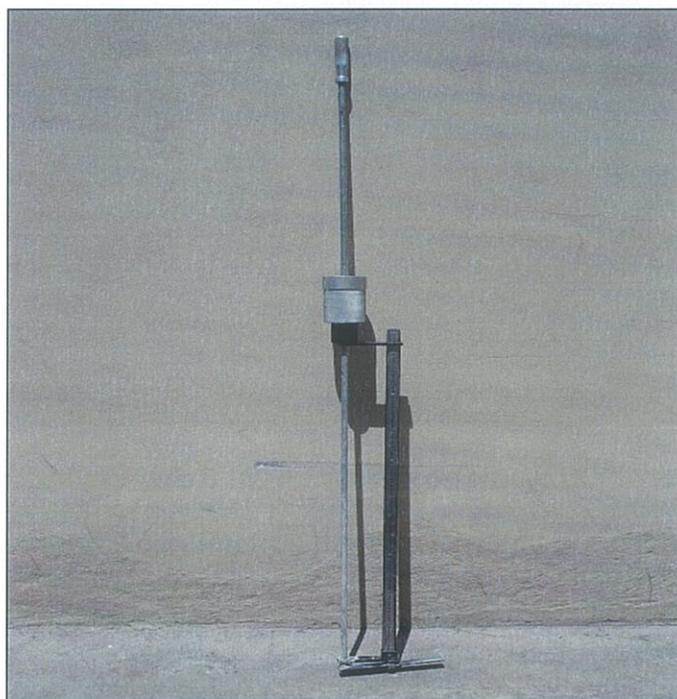


Figura 3.17.- Martillo DCP

- 2) Implementos varios: Llaves para armar el martillo DCP, grasa, puntas, etc.

3.1.4.3. Procedimiento del Ensayo

Se procede de la siguiente manera:

- 1) Chequear el equipo, verificar que las partes del aparato no estén dañadas, ajustar las piezas, revisar la punta.
- 2) Colocar el martillo DCP en posición vertical, sosteniéndolo del mango.
- 3) Hacer penetrar la punta del martillo hasta que la parte más ancha de esta quede al nivel de la superficie del suelo.
- 4) Hacer una lectura inicial y registrar.
- 5) Levantar el martillo hasta que quede casi en contacto con el mango y dejar caer libremente (Figura 3.18)



Figura 3.18.- Realización del ensayo DCP.

- 6) Registrar cuantos centímetros penetra la punta por cada golpe hasta que esta penetre 20cm.
- 7) Sacar la punta, golpeando el martillo contra el mango, hasta que esta salga del suelo.

3.1.4.4. Cálculos

Los datos obtenidos en el ensayo DCP, se pueden correlacionar con el ensayo CBR de campo, para obtener la resistencia al corte del suelo (ASTM D

6951). En la norma ASTM D 6951-03, se presenta la siguiente tabla para esta correlación (Tabla 3.3).

IndiceDCP mm/golpe	% CBR	IndiceDCP mm/golpe	% CBR	IndiceDCP mm/golpe	% CBR
<3	100	39	4.8	69-71	2.5
3	80	40	4.7	72-74	2.4
4	60	41	4.6	75-77	2.3
5	50	42	4.4	78-80	2.2
6	40	43	4.3	81-83	2.1
7	35	44	4.2	84-87	2.0
8	30	45	4.1	88-91	1.9
9	25	46	4.0	92-96	1.8
10-11	20	47	3.9	97-101	1.7
12	18	48	3.8	102-107	1.6
13	16	49-50	3.7	108-114	1.5
14	15	51	3.6	115-121	1.4
15	14	52	3.5	122-130	1.3
16	13	53-54	3.4	131-140	1.2
17	12	55	3.3	141-152	1.1
18-19	11	56-57	3.2	153-166	1.0
20-21	10	58	3.1	166-183	0.9
22-23	9	59-60	3.0	184-205	0.8
24-26	8	61-62	2.9	206-233	0.7
27-29	7	63-64	2.8	234-271	0.6
30-34	6	65-66	2.7	272-324	0.5
35-38	5	67-68	2.6	>324	<0.5

Tabla 3.3.- Correlación DCP-CBR (ASTM D 6951-03).

La correlación utilizada en la Tabla 3.3, es la siguiente, que es recomendada para todos los suelos excepto para suelos del tipo CL con CBR bajo 10 y CH:

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}} \quad (3.2) \quad (ASTM D 6951-03)$$

La hoja de registro para este ensayo, se muestra en el Anexo 5.

3.1.5. Método Hilf de Control de Compactación ABNT MB-3443

En el proceso de compactación, es necesario saber si cierta capa compactada cumple o no con los requerimientos de densidad seca y humedad

6951). En la norma ASTM D 6951-03, se presenta la siguiente tabla para esta correlación (Tabla 3.3).

IndiceDCP mm/golpe	% CBR	IndiceDCP mm/golpe	% CBR	IndiceDCP mm/golpe	% CBR
<3	100	39	4.8	69-71	2.5
3	80	40	4.7	72-74	2.4
4	60	41	4.6	75-77	2.3
5	50	42	4.4	78-80	2.2
6	40	43	4.3	81-83	2.1
7	35	44	4.2	84-87	2.0
8	30	45	4.1	88-91	1.9
9	25	46	4.0	92-96	1.8
10-11	20	47	3.9	97-101	1.7
12	18	48	3.8	102-107	1.6
13	16	49-50	3.7	108-114	1.5
14	15	51	3.6	115-121	1.4
15	14	52	3.5	122-130	1.3
16	13	53-54	3.4	131-140	1.2
17	12	55	3.3	141-152	1.1
18-19	11	56-57	3.2	153-166	1.0
20-21	10	58	3.1	166-183	0.9
22-23	9	59-60	3.0	184-205	0.8
24-26	8	61-62	2.9	206-233	0.7
27-29	7	63-64	2.8	234-271	0.6
30-34	6	65-66	2.7	272-324	0.5
35-38	5	67-68	2.6	>324	<0.5

Tabla 3.3.- Correlación DCP-CBR (ASTM D 6951-03).

La correlación utilizada en la Tabla 3.3, es la siguiente, que es recomendada para todos los suelos excepto para suelos del tipo CL con CBR bajo 10 y CH:

$$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}} \quad (3.2) \quad (ASTM \ D \ 6951-03)$$

La hoja de registro para este ensayo, se muestra en el Anexo 5.

3.1.5. Método Hilf de Control de Compactación ABNT MB-3443

En el proceso de compactación, es necesario saber si cierta capa compactada cumple o no con los requerimientos de densidad seca y humedad

antes de cubrirla y continuar con la compactación. Este método de control de compactación nos permite tener resultados de la capa compactada en un tiempo aproximado de una hora, ya que no se necesita conocer el contenido de humedad del suelo para calcular la densidad seca, lo cual toma cierto tiempo en el laboratorio y demoraría el proceso de compactación.

3.1.5.1. Resumen del ensayo

Se ensaya el terreno compactado para obtener su densidad húmeda y del mismo sector se obtiene una cantidad de muestra suficiente. Se compactan cuatro muestras aumentando o quitando agua a razón de $z = 2\%$, en peso, del total de la masa húmeda de las muestras. Se toma como cero a la humedad del terreno, es decir cuando no se añade ni se quita agua, $z=w$. A partir de esto se obtienen las densidades húmedas convertidas y graficando estas contra los valores de z , se obtiene la curva Hilf, cuya densidad húmeda convertida máxima y el valor de z , nos permiten calcular el grado de compactación y el desvío de humedad.

3.1.5.2. Equipo

El equipo a usarse es prácticamente el mismo el mismo utilizado en el ensayo Proctor Modificado, con la diferencia de que no es necesario el horno para obtener las humedades:

- Molde de $4''\pm 0.016''$ ($101.6\text{mm}\pm 0.406\text{mm}$) (Figura 2.8 y 2,9) con su respectiva extensión
- Martillo de 10lb (4.54Kg)
- Balanza de 410gr-0.01gr
- Balanza de 20Kg-1g
- Regla niveladora

- Tamiz No. 4

- Otros: Brocha, cuchara, recipientes, bandejas, espátula, fundas plásticas, etc.

3.1.5.3. Procedimiento del ensayo

Se procede como sigue:

- 1) Se obtiene la densidad húmeda in situ γ_{ua} , utilizando el método de cono y arena (ASTM D 1556), descrito en el numeral 3.1.2; o cualquier otro método. Se lo hace después de quitar una capa de suelo compactado aproximadamente de 5cm.
- 2) Extraer entre 10 y 12kg de muestra del mismo lugar, cuidando que este no sea superficial.
- 3) Colocar la muestra en un recipiente adecuado para que no pierda humedad en el transporte hacia el laboratorio. Pueden utilizarse dos fundas plásticas grandes sin dejar espacios vacíos al momento de cerrarlas.
- 4) Una vez en el laboratorio, se debe hacer pasar la muestra por el tamiz No.4 y desprejar el material retenido. Seguido se homogeniza la muestra.
- 5) Separar cuatro muestras de 2500g cada una en fundas plásticas. Estas son las masas iniciales M_u .
- 6) A continuación, se procede a preparar las muestras. Se deja una muestra con el mismo contenido de humedad, se adiciona agua a una en un 2%, a otra se le quita agua en un -2% y finalmente a otra -4%. Por ejemplo para aumentar el 2%, se le agregan 50g o 50ml de agua a la muestra escogida obteniendo como peso final 2550g. Así para lograr las muestras secas (-2% y-4%), se debe dejar secar a dos de ellas y luego

añadir agua hasta obtener 2400g y 2450g respectivamente. Una vez añadida o retirada el agua necesaria, se homogeniza cada muestra.

- 7) Se compactan las cuatro muestras usando el ensayo Proctor Modificado ASTM D 1557 (numeral 3.1.1 de este capítulo). Se registra cada peso compactado.

3.1.5.4. Cálculos

Los cálculos necesarios para este ensayo son los siguientes:

- 1) Primero se calcula las densidades húmedas γ_u de cada muestra compactada, dividiendo la masa del suelo compactado M_h entre el volumen del molde V .

$$\gamma_u = \frac{M_h}{V}$$

- 2) Se determina el parámetro z :

$$z = \frac{M_a}{M_u}$$

Donde:

- M_a es la masa de agua adicionada o quitada; y

- M_u es la masa de suelo húmedo

- 3) Seguido se calcula las densidades convertidas γ_{uc} :

$$\gamma_{uc} = \frac{\gamma_u}{1 + z}$$

- 4) Se grafica la curva de compactación Hilf (γ_{uc} vs. z) y se obtienen $\gamma_{uc\text{máx}}$ y

z_m .

Para obtener el grado de compactación y el desvío de humedad se procede de la siguiente forma:

- 1) El grado de compactación se obtiene dividiendo la densidad húmeda in situ γ_{ua} , (obtenida en el numeral 1) de los cálculos anteriores), para la densidad húmeda convertida máxima $\gamma_{ucm\acute{a}x}$:

$$GC = \frac{\gamma_{ua}}{\gamma_{ucm\acute{a}x}} \times 100$$

- 2) En la norma MB 3443, se presentan tres métodos para calcular el desvío de humedad, de los cuales solamente se expondrán dos. El primer método utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta h = -\frac{z_m}{1 + z_m} \left[\frac{1,600\gamma_{um}}{2,600\gamma_{um} - 2,537} \right] \times 100 \quad (\text{ABNT MB 3443 3})$$

Donde γ_{um} es la densidad húmeda máxima de la curva Proctor o Hilf y debe ser introducida en la fórmula en g/cm^3 .

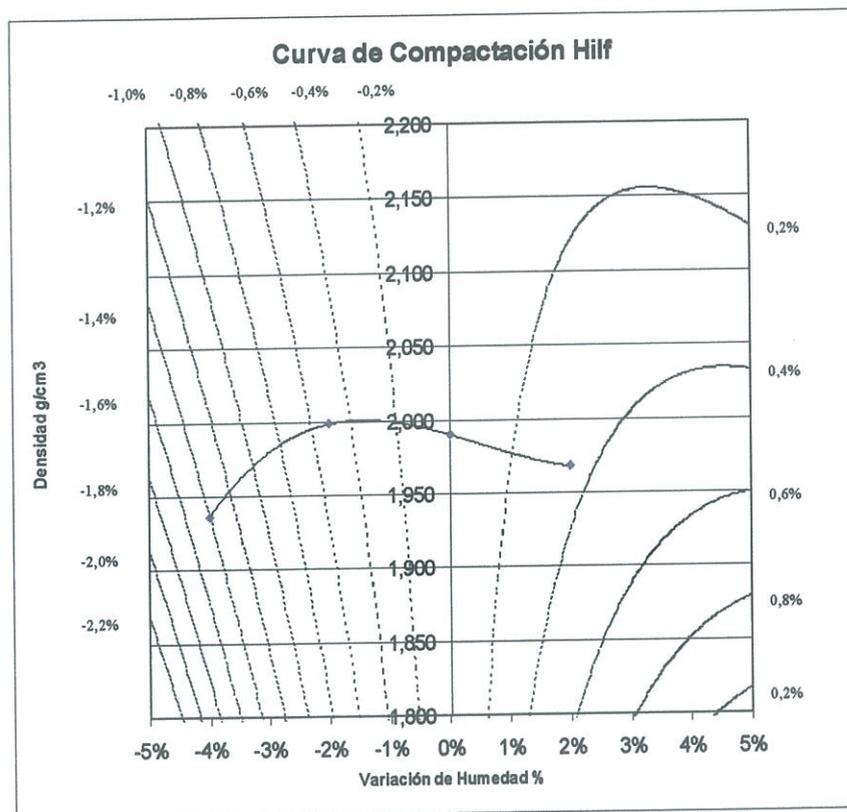


Figura 3.19.- Ábaco para calcular el desvío de humedad Hilf (ABNT MB 3443).

El segundo método consiste en leer un factor de corrección en un ábaco de corrección (Figura 3.19). En este se superpone la curva de compactación Hilf, con el fin de leer el factor de corrección donde se ubique el máximo de la curva. En dicho punto se interpola entre las líneas del ábaco para obtener el factor de corrección.

Una vez determinado este factor, se obtiene el desvío de humedad con la siguiente ecuación:

$$Dh = -(z_m + D) \text{ (ABNT MB 3443 3)}$$

Donde D es el factor de corrección leído del ábaco.

La hoja de registro para este ensayo, se muestra en el Anexo 5.

3.1.6. Ensayos CBR del Laboratorio y CBR de Campo

El objetivo de un ensayo CBR le laboratorio, es de medir la capacidad de soporte (resistencia al corte) de suelos y agregados compactados en el laboratorio, con una humedad óptima y diferentes energías de compactación. Este ensayo mide la resistencia al corte del suelo (Universidad Católica de Valparaíso).

Si se tiene un patrón, en el cual un pistón penetra en un suelo una determinada profundidad, aplicando una fuerza y velocidad determinadas, el valor CBR para otro suelo ensayado, sería el porcentaje de la fuerza necesaria para que le pistón penetre la misma profundidad a la misma velocidad que en el patrón.

Expresado el párrafo anterior como ecuación tenemos:

$$CBR = \frac{C_{ensayo}}{C_{patrón}} * 100$$

Donde *Censayo* es la carga unitaria del ensayo y *Cpatrón* es la carga unitaria del patrón.

El valor CBR se obtiene a una penetración de 0.1 pulgadas (2.5mm) o a 0.2 pulgadas (5mm).

El ensayo CBR de campo, tiene el mismo objetivo que el CBR de laboratorio, medir la resistencia al corte de un suelo por ejemplo ya compactado. Estos ensayos están normados por la ASTM en sus normas D 1883 para el CBR de laboratorio y D 4429 para el CBR de campo.

Para el caso de este proyecto, el ensayo CBR de campo es utilizado para medir la resistencia de los paños compactados, es decir es una medida del buen o mal funcionamiento del producto final. En la figura 3.20 se ilustra un ensayo CBR de campo.

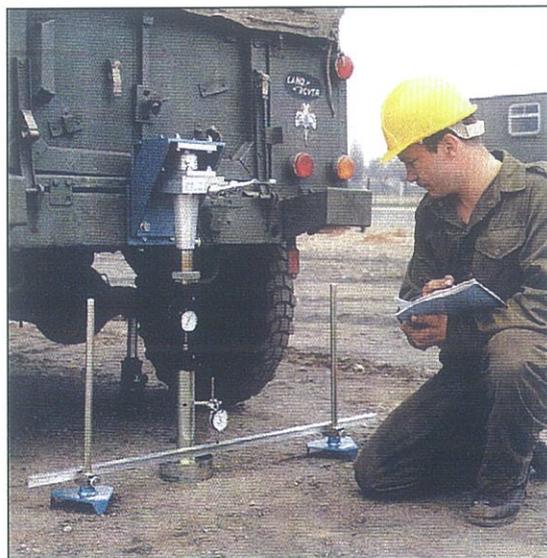


Figura 3.20.- Ensayo CBR de campo (Universidad Católica de Valparaíso).

4.2.1. Resultados Estadísticos

A continuación se presentan los resultados de la estadística descriptiva de cada uno de los datos de interés, utilizando todos los resultados de los ensayos disponibles.

4.2.1.1. Densidad Seca

4.2.1.1.1. Densidad Seca Máxima Proctor Modificado, kg/m³

Estadística Descriptiva: DSMAX Proctor Modificado Kg/m³

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean	TrMean
StDev									
DSMAX	540	540	0	540	100	100	1746,0	1,28	1746,2
	29,7								

Variable	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares	Minimum	Q1	Median
DSMAX	879,2	1,70	942850,0	1,64671E+09	1649,0	1728,0	1745,0

Variable	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis	MSSD
DSMAX	1765,0	1861,0	212,0	37,0	0,03	0,86	674,5

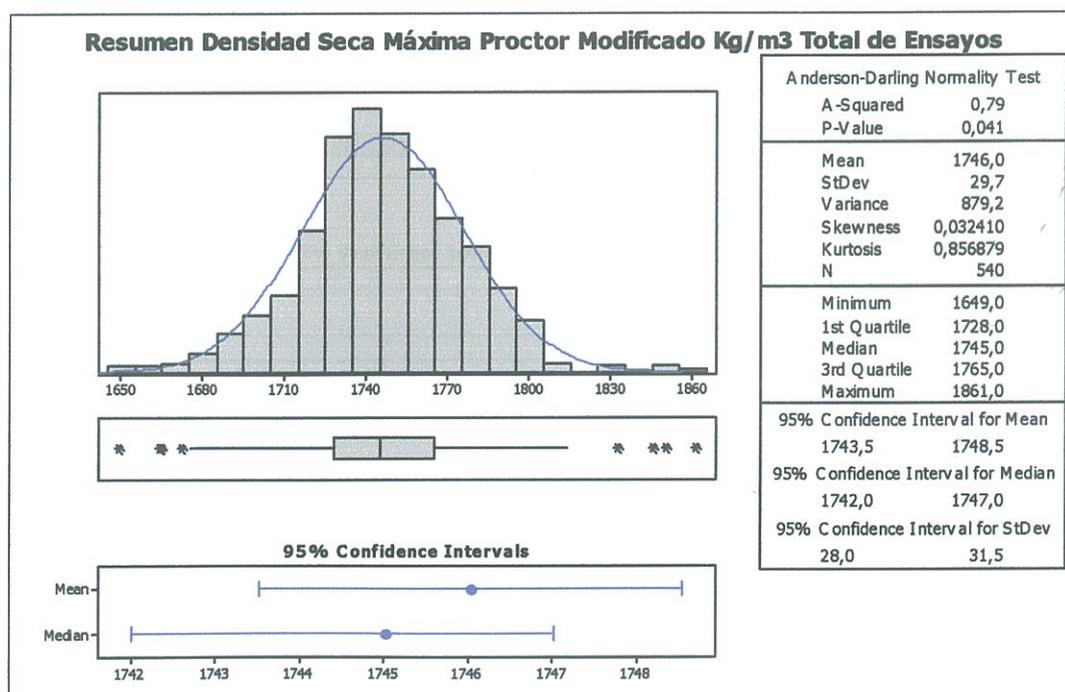


Figura 4.1. Resumen estadística descriptiva para Densidad Seca Máxima kg/m³, Proctor Modificado, Total de Ensayos (MINITAB).

4.2.1. Resultados Estadísticos

A continuación se presentan los resultados de la estadística descriptiva de cada uno de los datos de interés, utilizando todos los resultados de los ensayos disponibles.

4.2.1.1. Densidad Seca

4.2.1.1.1. Densidad Seca Máxima Proctor Modificado, kg/m³

Estadística Descriptiva: DSMAX Proctor Modificado Kg/m³

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean	TrMean
StDev									
DSMAX	540	540	0	540	100	100	1746,0	1,28	1746,2
	29,7								

Variable	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares	Minimum	Q1	Median
DSMAX	879,2	1,70	942850,0	1,64671E+09	1649,0	1728,0	1745,0

Variable	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis	MSSD
DSMAX	1765,0	1861,0	212,0	37,0	0,03	0,86	674,5

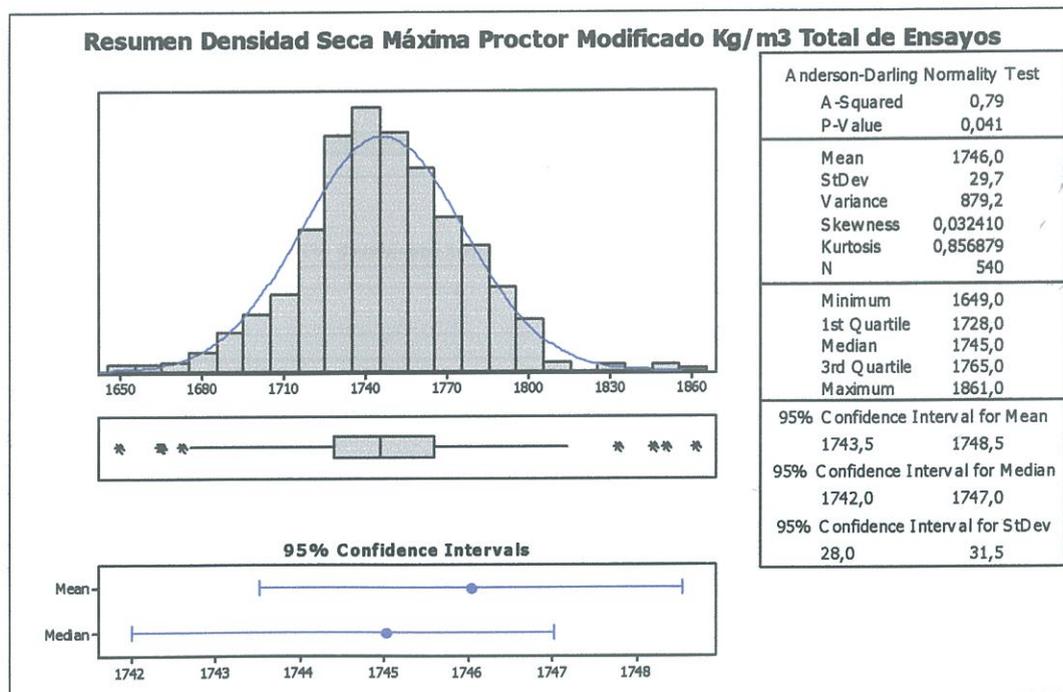


Figura 4.1. Resumen estadística descriptiva para Densidad Seca Máxima kg/m³, Proctor Modificado, Total de Ensayos (MINITAB).

4.2.1.1.2. Densidad Seca Cono y Arena, g/cm³

Estadística Descriptiva: Densidad Seca Cono y Arena g/cm³

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean
Densidad Seca Co	200	200	0	200	100	100	1,6913	0,00211

Variable	TrMean	StDev	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares
Densidad Seca Co	1,6906	0,0299	0,00089	1,77	338,2620	572,2833

Variable	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Range	IQR
Densidad Seca Co	1,6190	1,6690	1,6900	1,7100	1,7970	0,1780	0,0410

Variable	Skewness	Kurtosis	MSSD
Densidad Seca Co	0,33	0,25	0,00072

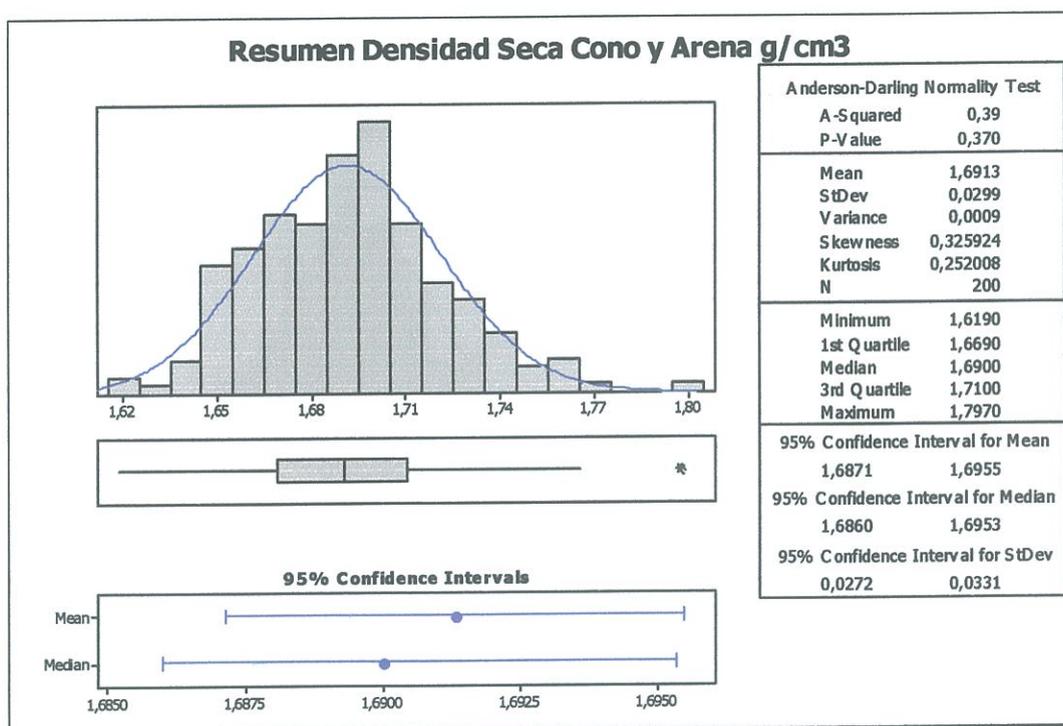


Figura 4.2.- Resumen estadística descriptiva para la Densidad Seca g/cm³, Cono y Arena (MINITAB).

4.2.1.1.3. Densidad Seca Densímetro Nuclear, Kg/m³

Estadística Descriptiva: Densidad Seca Nuclear kg/m³

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean
Densidad Seca Nu	1336	1336	0	1336	100	100	1673,5	0,659

Variable	TrMean	StDev	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares
Densidad Seca Nu	1673,0	24,1	580,0	1,44	2235755,0	3,742224E+09

Variable	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Range	IQR
Densidad Seca Nu	1603,0	1657,0	1672,0	1688,0	1768,0	165,0	31,0

Variable	Skewness	Kurtosis	MSSD
Densidad Seca Nu	0,29	0,12	297,4

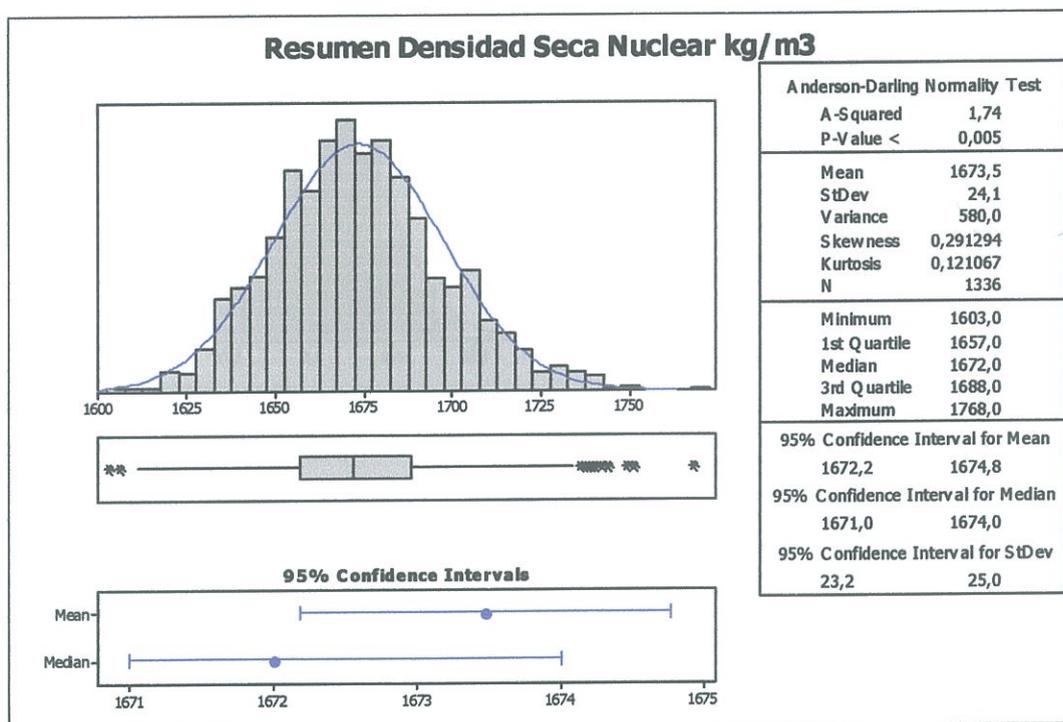


Tabla 4.3.- Resumen estadística descriptiva para la Densidad Seca kg/m³, Densímetro Nuclear (MINITAB).

4.2.1.2. Contenido de Humedad

4.2.1.2.1. Humedad Óptima Proctor Modificado, % w

Estadística Descriptiva: Humedad Óptima w% Ensayos Totales

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean	TrMean
w optima	540	540	0	540	100	100	15,219	0,0501	15,196
StDev	1,164								
Variable	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares	Minimum	Q1	Median		
w optima	1,356	7,65	8218,210	125803,058	11,740	14,483	15,240		
Variable	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis	MSSD		
w optima	15,895	21,850	10,110	1,413	0,65	3,27	1,326		

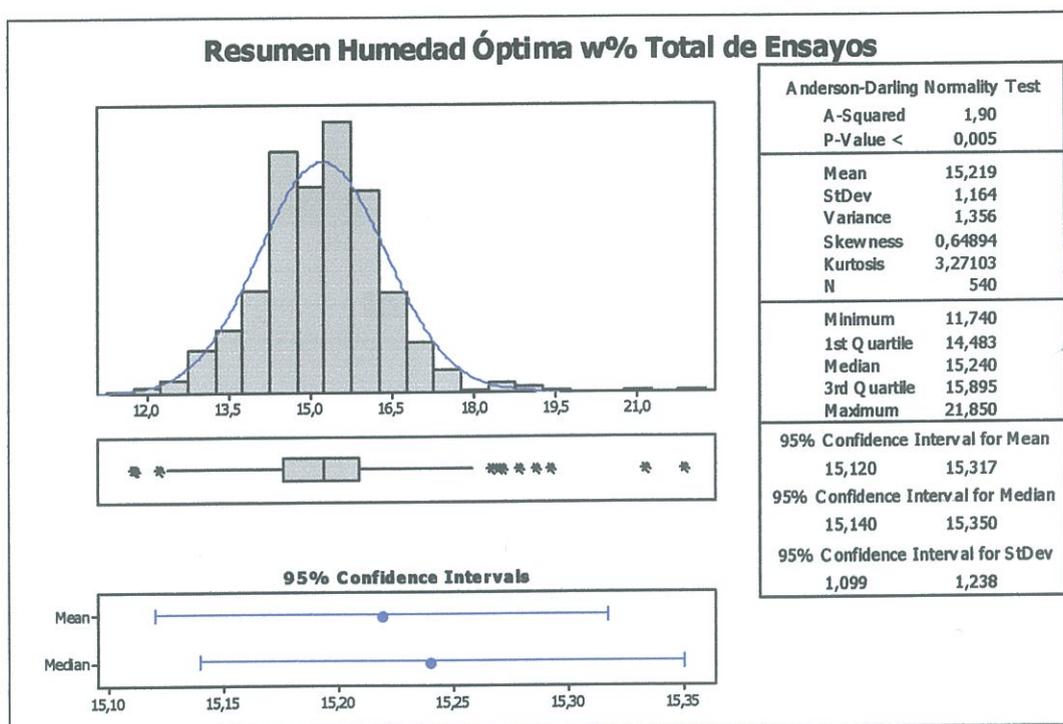


Figura 4.4.- Resumen estadística descriptiva para la Humedad Óptima % w, Proctor Modificado (MINITAB).

4.2.1.2.2. Humedad Cono y Arena, % w

Estadística descriptiva: Humedad Cono y Arena % w

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean
Humedad Cono y A	200	200	0	200	100	100	15,965	0,0830

Variable	TrMean	StDev	Variance	CoefVar	Sum	Squares
Humedad Cono y A	16,014	1,174	1,378	7,35	3193,070	51252,685

Variable	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Range	IQR
Humedad Cono y A	12,470	15,300	16,145	16,788	18,450	5,980	1,488

Variable	Skewness	Kurtosis	MSSD
Humedad Cono y A	-0,68	0,10	1,101

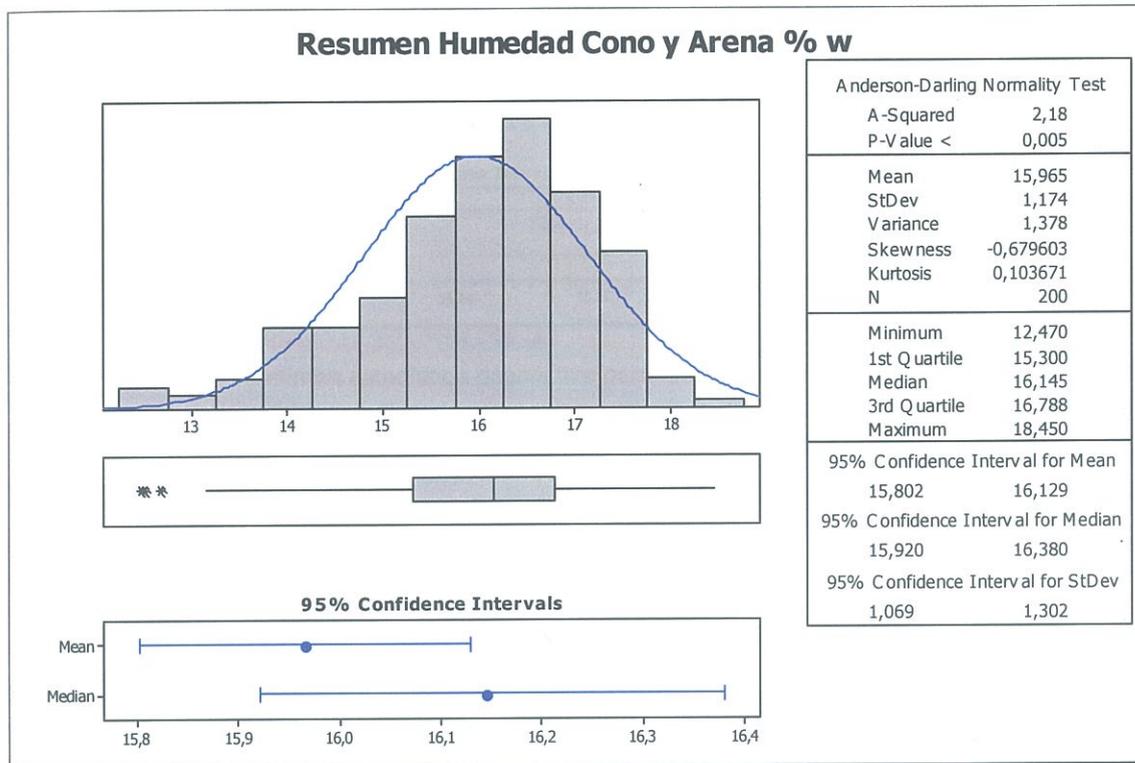


Figura 4.5.- Resumen estadística descriptiva para la Humedad % w, Cono y Arena (MINITAB).

4.2.1.2.3. Humedad Densímetro Nuclear, % w

Estadística Descriptiva: Humedad Densímetro Nuclear kg/m3

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean
Humedad Densímet	1336	1336	0	1336	100	100	15,097	0,0371

Variable	TrMean	StDev	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares
Humedad Densímet	15,102	1,358	1,843	8,99	20169,910	306970,638

Variable	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Range	IQR
Humedad Densímet	10,630	14,200	15,100	16,000	19,400	8,770	1,800

Variable	Skewness	Kurtosis	MSSD
Humedad Densímet	-0,03	-0,08	1,116

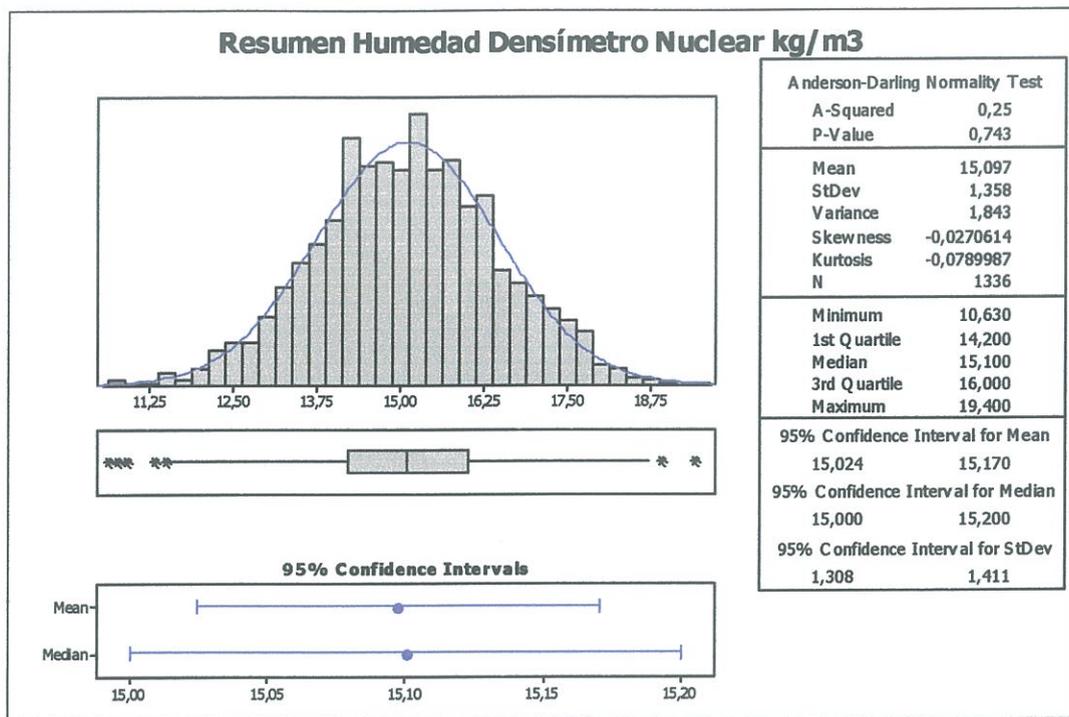


Figura 4.6.- Resumen estadística descriptiva para la Humedad % w, Densímetro Nuclear (MINITAB).

4.2.1.3. Grado de Compactación

4.2.1.3.1. Grado de Compactación Hilf, % GC

Estadística Descriptiva: GC % HILF

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean	TrMean
GC % HILF	152	152	0	152	100	100	96,895	0,0758	96,863

Variable	StDev	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares	Minimum
Q1						
GC % HILF	0,935	0,873	0,96	14727,980	1427193,682	95,000
96,205						

Variable	Median	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness	Kurtosis	MSSD
GC % HILF	96,720	97,520	99,660	4,660	1,315	0,54	-0,02	0,871

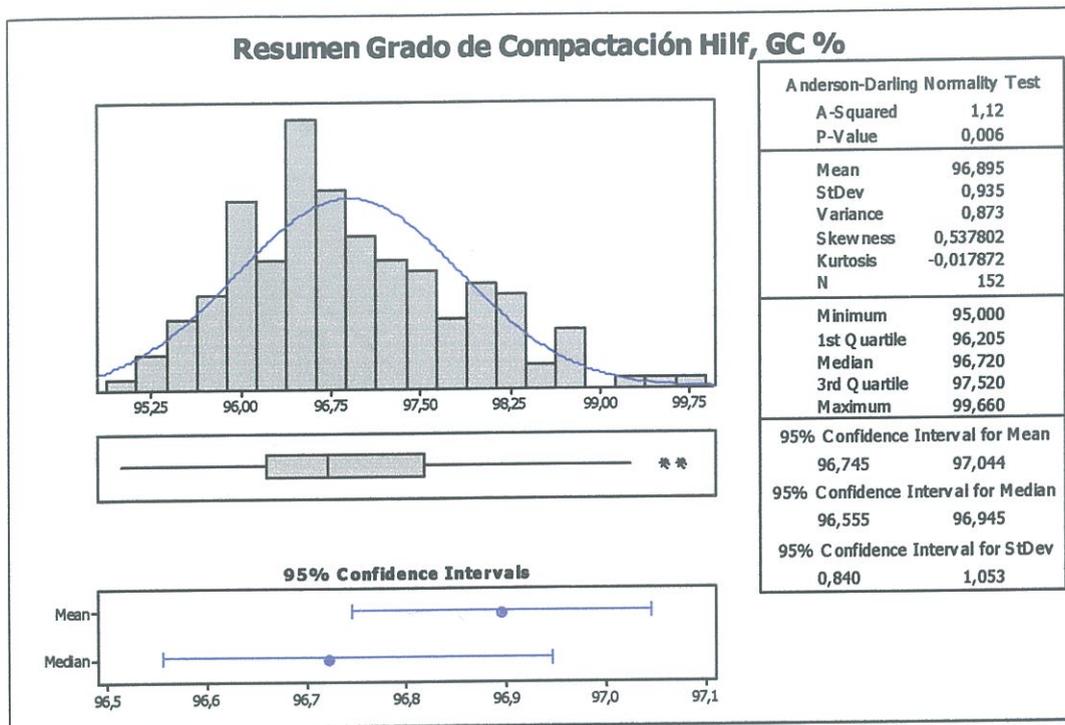


Figura 4.7.- Resumen estadística descriptiva para el Grado de Compactación % GC, Hif (MINITAB).

4.2.1.3.2. Grado de Compactación Cono y Arena, % GC

Estadística Descriptiva: GC % CONO Y ARENA

Variable	Total						Mean	SE Mean
	Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct		
GC % CONO Y AREN	285	285	0	285	100	100	96,276	0,0542

Variable	TrMean	StDev	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares	
GC % CONO Y AREN	96,205	0,914	0,836	0,95	27438,570	2641904,563	

Variable	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	Range	IQR

Variable	Skewness	Kurtosis	MSSD

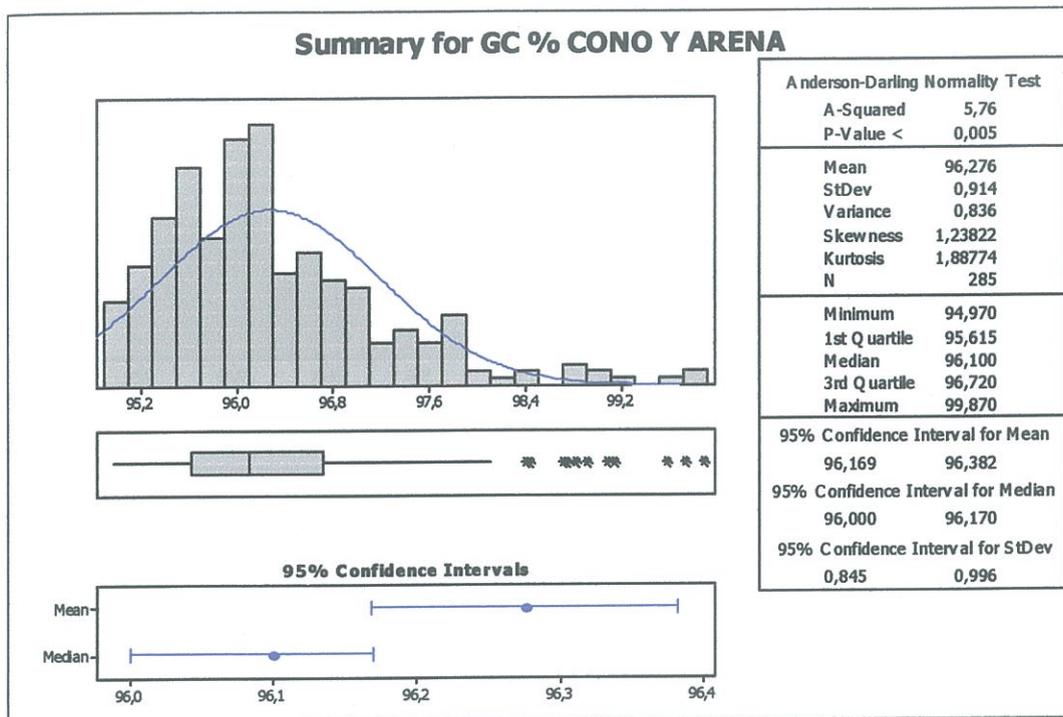


Figura 4.8.- Resumen estadística descriptiva para el Grado de Compactación % GC, Cono y Arena (MINITAB).

4.2.1.3.3. Grado de Compactación Densímetro Nuclear, % GC

Estadística Descriptiva: GC % Nuclear

Variable	Total Count	N	N*	CumN	Percent	CumPct	Mean	SE Mean	TrMean
GC % Nuclear	1336	1336	0	1336	100	100	96,791	0,0288	96,734

Variable	StDev	Variance	CoefVar	Sum	Sum of Squares	Minimum
GC % Nuclear	1,051	1,105	1,09	129312,480	1,25177E+07	95,030

Variable	Q1	Median	Q3	Maximum	Range	IQR	Skewness
Kurtosis							
GC % Nuclear	95,970	96,600	97,430	100,000	4,970	1,460	0,74
0,03							-

Variable	MSSD
GC % Nuclear	0,853

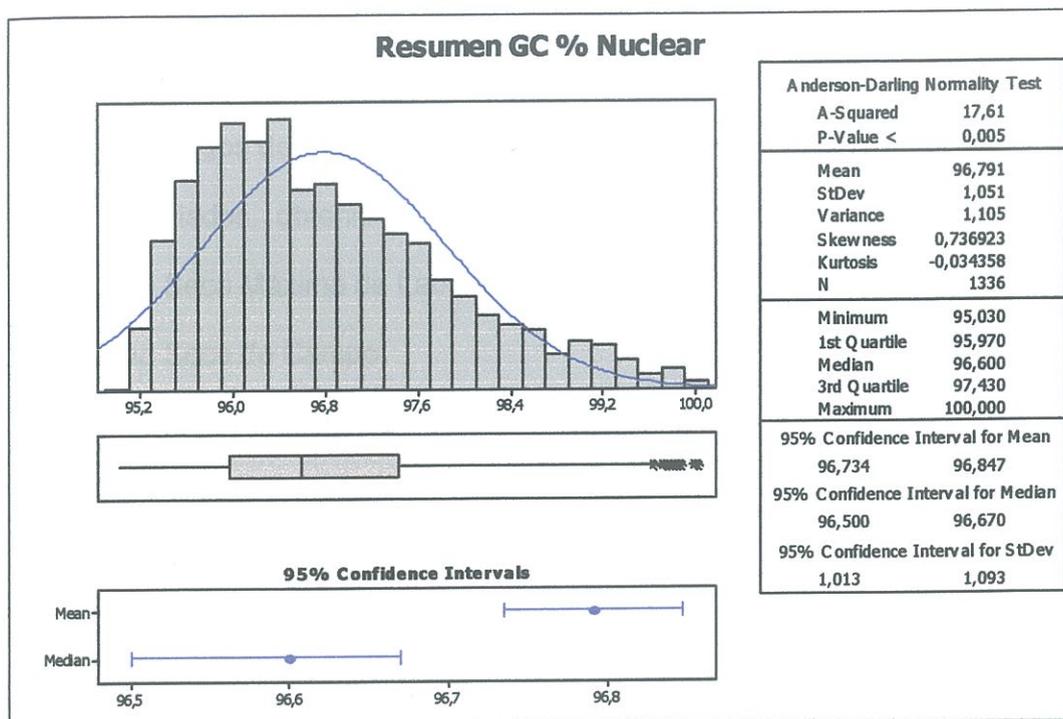


Figura 4.9.- Resumen estadística descriptiva para el Grado de Compactación % GC,
Densímetro Nuclear (MINITAB).

4.2.1.4. Resumen de Resultados Estadísticos

La siguiente tabla muestra un resumen de los resultados estadísticos
(Tabla 4.5):

Ensayo	Estadísticas			
	Media	Desviación Est.	Rango	IC 95% Media
Densidad Seca, kg/m³				
Proctor Mod. Máxima	1746	29,7	212	1743,5 - 1748,5
Cono y Arena	1691	29,9	178	1687,1 - 1695,5
Densímetro	1674	24,1	165	1672,2 - 1674,8
Humedad, w %				
Proctor Mod. Óptima	15,22	1,164	10,1	15,12 - 15,317
Cono y Arena	15,97	1,174	5,98	15,80 - 16,13
Densímetro	15,01	1,358	8,77	15,02 - 15,17
Grado de Compactación, GC %				
Hilf	96,90	0,935	4,66	96,75 - 97,04
Cono y Arena	96,28	0,914	4,90	96,17 - 96,38
Densímetro	97,79	1,051	4,97	96,73 - 96,85

Tabla 4.5.- Resumen estadístico para el total de ensayos.

4.3. Rangos de Trabajo

Los rangos de trabajo del suelo en el campo y en el laboratorio para los suelos estudiados, obtenidos de las Figuras 4.1. a 4.9, son los siguientes:

- Densidad Seca Máxima de Laboratorio: 1649 - 1861kg/m³

- Densidad Seca de Campo:

- Cono y Arena: 1,619 – 1,797g/cm³

- Densímetro Nuclear: 1603 - 1768 kg/m³

- En general: 1603 – 1797kg/m³

-Humedad Óptima Proctor: 11,74 – 21,85%

-Humedad de Campo:

- Cono y Arena: 12,47 – 18,45%

- Densímetro Nuclear: 10,63 – 19,40%

- En general: 10,63 - 19,40%

- Grado de Compactación:

- Hilf: 95 – 99,66%

- Cono y arena: 94,97 – 99,87%

- Densímetro Nuclear: 95,03 – 100%

- En general: 94,97 – 100%

4.4. Comparación de Resultados Obtenidos por los Diferentes Tipos de Ensayos

4.4.1. Confiabilidad de los ensayos Hilf y Densímetro Nuclear.

La base para comparar los resultados obtenidos entre los diferentes ensayos, son los del cono y arena. Esto porque este ensayo nos da una

medida directa de la densidad, humedad y grado de compactación del suelo compactado.

El método del densímetro nuclear, mide estas propiedades de una manera indirecta, como se explica en el capítulo 3, numeral 3.1.3.2.

El método Hilf que determina el GC%, teóricamente es más preciso ya que utiliza en material del lugar.

Ahora para este análisis de confiabilidad, se han tomado los resultados de los diferentes ensayos realizados en un mismo paño y en un mismo punto. Estos datos provienen de las Tablas 4.1 y 4.2 del Anexo 6, y están resumidos a su vez en las siguientes tablas (Tablas 4.6 y 4.7):

Paño	GC% Cono y Arena	GC % Hilf	GC% Densímetro	Desvío GC %Hilf	Desvío GC % Densímetro	Valor absoluto Desvío GC %Hilf	Valor Absoluto Desvío GC % Densímetro
S1FG1 P18-8 s	96,27	97,08	95,73	-0,81	0,54	0,81	0,54
S1FG1 P22-6 s	96,57	97,63	96,26	-1,06	0,31	1,06	0,31
S1FG1 P23-6 n	97,13	98,40	96,90	-1,27	0,23	1,27	0,23
S1FG1 P24-7 c	95,42	96,48	95,67	-1,06	-0,25	1,06	0,25
S1FG1 P27-6 s	97,14	98,13	98,43	-1,00	-1,29	1,00	1,29
S1FG1 P27-7 c	95,55	96,48	95,24	-0,93	0,31	0,93	0,31
S1FG2 P22-7 c	95,80	96,80	95,87	-1,00	-0,07	1,00	0,07
S1FG2P27-8 n	96,20	97,38	95,10	-1,18	1,10	1,18	1,10
S1FG2 P18-7 n	96,16	96,07	95,57	0,09	0,59	0,09	0,59
S1FG1 P17-8 c	96,22	96,16	96,43	0,06	-0,21	0,06	0,21
S1FG1 P28-8 n	97,18	96,36	96,40	0,83	0,78	0,83	0,78
S1FG2 P17-9 s	96,45	96,04	96,40	0,41	0,05	0,41	0,05
S1FG1 P25-8 s	95,43	95,53	97,40	-0,10	-1,97	0,10	1,97
S1FG2 P18-9 s	95,25	95,78	97,93	-0,53	-2,68	0,53	2,68
S1FG2 P20-9 c	95,94	96,15	95,93	-0,21	0,01	0,21	0,01
S1FG2 P21-9 n	96,20	95,64	95,80	0,57	0,40	0,57	0,40
S1FG2 P24-9 s	95,75	96,05	95,43	-0,31	0,32	0,31	0,32
S1FG1 P19-10 c	96,37	97,09	97,07	-0,71	-0,70	0,71	0,70
S1FG1 P23-9 s	96,78	96,92	95,60	-0,14	1,18	0,14	1,18
S1FG1 P22-9 n	96,05	95,38	95,53	0,67	0,52	0,67	0,52
S1FG1 P23-10 c	96,27	96,79	96,30	-0,52	-0,03	0,52	0,03
S1FG1 P24-10 s	96,06	96,10	98,93	-0,04	-2,87	0,04	2,87
S1FG1 P28-9 c	97,17	96,95	95,50	0,21	1,67	0,21	1,67
S1FG2 P18-10 n	95,79	96,39	96,40	-0,59	-0,61	0,59	0,61
S1FG2 P21-11 c	96,15	96,41	96,13	-0,26	0,02	0,26	0,02
S1FG2 P23-10 c	96,41	96,68	95,37	-0,26	1,04	0,26	1,04
S1FG1 P22-11 c	96,34	97,65	96,47	-1,31	-0,13	1,31	0,13
S1FG1 P27-11 s	96,41	96,87	95,13	-0,46	1,28	0,46	1,28

S1FG1 P28-11 c	95,81	96,58	96,93	-0,77	-1,12	0,77	1,12
S1FG2 P24-11 c	95,72	97,25	99,17	-1,53	-3,45	1,53	3,45
S1FG1 P19-12 s	96,81	97,11	97,17	-0,30	-0,36	0,30	0,36
S1FG1 P22-12 n	97,59	98,79	98,27	-1,20	-0,68	1,20	0,68
S1FG2 P18-12 c	96,92	97,37	96,93	-0,45	-0,01	0,45	0,01
S1FG2 P19-12 c	96,17	96,77	96,17	-0,60	0,00	0,60	0,00
S1FG2 P25-12 n	97,12	97,90	96,30	-0,77	0,82	0,77	0,82
S1FG8 P5-1 n	96,70	96,44	99,27	0,26	-2,57	0,26	2,57
S1FG1 P12-14 c	95,99	96,91	98,00	-0,92	-2,01	0,92	2,01
S1FG1 P1-14 n	95,84	96,66	97,30	-0,83	-1,46	0,83	1,46
S1FG1 P16-14 s	96,60	96,40	98,13	0,19	-1,53	0,19	1,53
S1FG1 P21-13 c	95,70	96,64	96,97	-0,94	-1,27	0,94	1,27
S1FG1 P23-12 s	95,70	95,85	97,20	-0,15	-1,50	0,15	1,50
S1FG1 P26-13 c	98,20	99,25	97,07	-1,05	1,13	1,05	1,13
S1FG2 P19-13 n	95,53	95,72	96,30	-0,18	-0,77	0,18	0,77
S1FG2 P23-13 c	96,35	96,27	97,70	0,08	-1,35	0,08	1,35
S1FG2 P25-13 s	96,23	96,78	96,63	-0,55	-0,40	0,55	0,40
S1FG2 P25-14 c	95,99	96,11	98,10	-0,12	-2,11	0,12	2,11
S1FG2 P26-13 n	98,75	99,66	95,97	-0,91	2,78	0,91	2,78
S1FG1 P6-14 s	97,06	98,01	97,13	-0,95	-0,07	0,95	0,07
S1FG1 P15-14 n	96,00	96,55	97,00	-0,56	-1,00	0,56	1,00
S1FG1 P8-15 s	95,56	96,42	97,07	-0,86	-1,51	0,86	1,51
S1FG1 P11-15 n	95,36	96,00	96,83	-0,63	-1,47	0,63	1,47
S1FG1 P4-15 c	95,83	96,62	96,80	-0,79	-0,97	0,79	0,97
S1FG2 P6-15 s	96,94	98,04	97,57	-1,10	-0,63	1,10	0,63
S1FG2 P9-15 n	97,60	98,09	97,83	-0,49	-0,23	0,49	0,23
S1FG2 P14-15 c	95,40	95,76	96,83	-0,36	-1,43	0,36	1,43
S1FG8 P4-2 c	95,18	95,69	96,00	-0,51	-0,82	0,51	0,82
S1FG8 P5-2 n	96,57	97,56	97,63	-0,99	-1,06	0,99	1,06
S1FG8 P12-2 s	96,48	97,07	95,93	-0,59	0,55	0,59	0,55
S1FG8 P14-1 c	96,27	96,28	95,67	-0,01	0,60	0,01	0,60
S1FG8 P15-2 s	97,27	96,58	96,87	0,69	0,40	0,69	0,40
S1FG8 P2-4 n	95,64	96,86	96,97	-1,22	-1,33	1,22	1,33
S1FG8 P4-4 c	97,71	98,86	95,63	-1,16	2,08	1,16	2,08
S1FG8 P2-3 n	95,57	96,12	96,80	-0,55	-1,23	0,55	1,23
S1FG8 P3-6 n	95,66	96,29	96,60	-0,62	-0,94	0,62	0,94
S1FG8 P5-5 c	95,65	96,85	97,40	-1,21	-1,75	1,21	1,75
S1FG8 P7-3 n	96,07	97,10	97,87	-1,03	-1,80	1,03	1,80
S1FG8 P8-5 n	95,22	95,52	96,93	-0,30	-1,71	0,30	1,71
S1FG8 P9-6 c	97,36	97,80	97,10	-0,44	0,26	0,44	0,26
S1FG8 P11-5 n	96,57	98,65	96,30	-2,08	0,27	2,08	0,27
S1FG8 P12-4 s	95,51	96,09	97,10	-0,58	-1,59	0,58	1,59
S1FG8 P13-3 n	98,27	97,61	97,07	0,66	1,20	0,66	1,20
S1FG8 P14-4 c	96,56	97,44	97,33	-0,89	-0,77	0,89	0,77
S1FG8 P15-5 s	95,12	96,42	96,07	-1,30	-0,95	1,30	0,95
S1FG8 P19-3 s	95,53	95,93	96,53	-0,39	-1,00	0,39	1,00
S1FG19 P1-1 n	96,19	96,75	96,90	-0,56	-0,71	0,56	0,71
S1FG19 P5-1 s	97,46	98,68	95,17	-1,22	2,29	1,22	2,29
S1FG19 P9-1 n	98,86	98,22	96,77	0,63	2,09	0,63	2,09
S1FG28 P2-1 c	96,03	98,76	97,13	-2,73	-1,10	2,73	1,10
S1FG28 P11-1 s	95,88	97,68	96,67	-1,81	-0,79	1,81	0,79
S1FG8 P1-7 s	95,55	96,29	95,83	-0,74	-0,28	0,74	0,28

S1FG8 P5-7 c	95,85	95,85	98,00	0,00	-2,15	0,00	2,15
S1FG8 P6-7 s	97,23	98,37	97,43	-1,14	-0,20	1,14	0,20
S1FG8 P12-6 n	95,48	96,10	95,83	-0,62	-0,35	0,62	0,35
S1FG8 P12-7 n	95,72	95,18	95,53	0,54	0,19	0,54	0,19
S1FG8 P14-7 n	95,86	96,10	98,13	-0,24	-2,27	0,24	2,27
S1FG8 P17-7 c	95,96	96,65	96,80	-0,69	-0,84	0,69	0,84
S1FG19 P13-1 s	95,50	96,44	98,40	-0,93	-2,90	0,93	2,90
S1FG19 P18-1 s	95,98	97,27	97,53	-1,28	-1,55	1,28	1,55
S1FG19 P19-1 c	96,84	97,39	97,27	-0,56	-0,43	0,56	0,43
S1FG28 P1-A-1 c	95,59	97,95	97,27	-2,37	-1,68	2,37	1,68
Promedios:	96,29	96,89	96,78	-0,60	-0,49	0,73	1,04

Tabla 4.6.- Resumen de resultados de grado de compactación para los ensayos de Cono y Arena, Hilf y Densímetro Nuclear (Geosuelos Cia. Ltda.)

Paño	yd Cono y Arena, Kg/m ³	yd Nuclear, Kg/m ³	w Cono y Arena, %	w Nuclear, %	Desvió yd, kg/m ³	Desvío, w %	Valor Absoluto Desvió yd	Valor Absoluto Desvío w
S1FG1 P18-8 s	1690	1640	15,54	15,20	50	0,34	50	0,34
S1FG1 P22-6 s	1681	1636	14,15	14,57	45	-0,42	45	0,42
S1FG1 P23-6 n	1685	1647	17,47	15,90	38	1,57	38	1,57
S1FG1 P24-7 c	1655	1648	16,97	14,90	7	2,07	7	2,07
S1FG1 P27-6 s	1691	1695	17,20	16,33	-4	0,87	4	0,87
S1FG1 P27-7 c	1667	1651	17,44	15,13	16	2,31	16	2,31
S1FG2 P22-7 c	1662	1630	16,37	14,10	32	2,27	32	2,27
S1FG2P27-8 n	1660	1638	16,57	15,03	22	1,54	22	1,54
S1FG2 P18-7 n	1659	1637	16,85	14,73	22	2,12	22	2,12
S1FG1 P17-8 c	1692	1681	13,93	13,07	11	0,86	11	0,86
S1FG1 P28-8 n	1686	1651	16,43	14,60	35	1,83	35	1,83
S1FG2 P17-9 s	1661	1681	17,08	14,50	-20	2,58	20	2,58
S1FG1 P25-8 s	1687	1667	16,22	14,17	20	2,05	20	2,05
S1FG2 P18-9 s	1674	1712	16,27	16,53	-38	-0,26	38	0,26
S1FG2 P20-9 c	1690	1637	15,84	14,80	53	1,04	53	1,04
S1FG2 P21-9 n	1703	1671	15,40	14,87	32	0,53	32	0,53
S1FG2 P24-9 s	1651	1633	17,63	14,17	18	3,46	18	3,46
S1FG1 P19-10 c	1696	1686	16,67	15,57	10	1,10	10	1,10
S1FG1 P23-9 s	1660	1644	16,12	15,06	16	1,06	16	1,06
S1FG1 P22-9 n	1671	1653	14,96	15,53	18	-0,57	18	0,57
S1FG1 P23-10 c	1699	1658	16,88	15,13	41	1,75	41	1,75
S1FG1 P24-10 s	1706	1683	15,98	16,13	23	-0,15	23	0,15
S1FG1 P28-9 c	1670	1642	16,56	15,57	28	0,98	28	0,98
S1FG2 P18-10 n	1638	1657	16,85	14,60	-19	2,25	19	2,25
S1FG2 P21-11 c	1665	1635	15,16	16,17	30	-1,01	30	1,01
S1FG2 P23-10 c	1657	1639	16,62	15,30	18	1,32	18	1,32
S1FG1 P22-11 c	1670	1672	16,57	17,57	-2	-1,01	2	1,01
S1FG1 P27-11 s	1708	1658	14,52	14,50	50	0,02	50	0,02
S1FG1 P28-11 c	1704	1670	16,20	17,20	34	-1,00	34	1,00
S1FG2 P24-11 c	1690	1687	15,98	15,80	3	0,18	3	0,18
S1FG1 P19-12 s	1737	1718	15,71	14,67	19	1,04	19	1,04
S1FG1 P22-12 n	1760	1740	14,45	14,93	20	-0,48	20	0,48
S1FG2 P18-12 c	1747	1716	13,05	14,20	31	-1,15	31	1,15
S1FG2 P19-12 c	1714	1700	15,85	15,07	14	0,78	14	0,78
S1FG2 P25-12 n	1743	1704	15,56	16,47	39	-0,91	39	0,91
S1FG8 P5-1 n	1695	1719	14,02	12,83	-24	1,19	24	1,19
S1FG8 P7-1 n	1699	1697	15,14	14,33	2	0,81	2	0,81
S1FG1 P12-14 c	1698	1686	17,05	16,87	12	0,18	12	0,18
S1FG1 P1-14 n	1700	1673	16,97	17,27	27	-0,30	27	0,30
S1FG1 P16-14 s	1709	1688	13,47	14,77	21	-1,30	21	1,30
S1FG1 P21-13 c	1699	1680	16,66	15,67	11	0,99	11	0,99
S1FG1 P23-12 s	1716	1692	16,50	16,33	36	0,17	36	0,17
S1FG1 P26-13 c	1738	1683	17,43	17,17	46	0,25	46	0,25

S1FG2 P19-13 n	1663	1677	16,99	15,73	-20	1,26	20	1,26
S1FG2 P23-13 c	1676	1677	17,48	16,80	-1	0,68	1	0,68
S1FG2 P25-13 s	1696	1659	16,20	15,10	19	1,10	19	1,10
S1FG2 P25-14 c	1704	1700	16,00	15,27	45	0,73	45	0,73
S1FG2 P26-13 n	1689	1685	16,55	15,57	-11	0,98	11	0,98
S1FG1 P6-14 s	1705	1685	16,72	17,17	20	-0,45	20	0,45
S1FG1 P15-14 n	1715	1682	16,79	15,90	33	0,89	33	0,89
S1FG1 P8-15 s	1705	1705	15,84	15,67	0	0,17	0	0,17
S1FG1 P11-15 n	1661	1700	17,06	15,93	-39	1,13	39	1,13
S1FG1 P4-15 c	1664	1700	15,34	14,53	-36	0,81	36	0,81
S1FG2 P6-15 s	1726	1676	16,41	15,63	50	0,78	50	0,78
S1FG2 P9-15 n	1751	1696	15,46	14,63	55	0,83	55	0,83
S1FG2 P14-15 c	1707	1700	15,62	16,87	7	-1,25	7	1,25
S1FG8 P4-2 c	1691	1676	16,79	16,63	15	0,16	15	0,16
S1FG8 P5-2 n	1728	1692	16,14	15,43	36	0,71	36	0,71
S1FG8 P12-2 s	1683	1675	14,28	14,60	8	-0,32	8	0,32
S1FG8 P14-1 c	1663	1656	16,23	14,60	-12	1,63	12	1,63
S1FG8 P15-2 s	1712	1679	14,39	13,30	56	1,09	56	1,09
S1FG8 P17-1 s	1647	1679	13,15	13,30	-32	-0,15	32	0,15
S1FG8 P2-4 n	1691	1687	15,47	14,07	4	1,40	4	1,40
S1FG8 P4-4 c	1747	1664	13,72	13,00	83	0,72	83	0,72
S1FG8 P2-3 n	1701	1689	16,62	17,77	12	-1,15	12	1,15
S1FG8 P3-6 n	1697	1661	15,49	14,50	36	0,98	36	0,98
S1FG8 P5-5 c	1664	1680	15,95	16,23	-16	-0,29	16	0,29
S1FG8 P6-6 s	1686	1674	17,09	16,67	12	0,41	12	0,41
S1FG8 P7-3 n	1690	1669	16,75	15,83	21	0,92	21	0,92
S1FG8 P8-5 n	1619	1666	15,64	14,57	-47	1,07	47	1,07
S1FG8 P9-6 c	1685	1669	17,09	16,03	16	1,06	16	1,06
S1FG8 P11-5 n	1713	1675	15,07	14,80	38	0,27	38	0,27
S1FG8 P12-4 s	1673	1694	15,46	12,57	-21	2,89	21	2,89
S1FG8 P13-3 n	1769	1679	13,45	14,77	90	-1,32	90	1,32
S1FG8 P14-4 c	1694	1657	16,15	14,20	37	1,95	37	1,95
S1FG8 P15-5 s	1695	1684	14,75	14,67	11	0,08	11	0,08
S1FG8 P19-3 s	1656	1666	15,29	14,37	-10	0,92	10	0,92
S1FG19 P1-1 n	1693	1636	15,65	14,70	57	0,95	57	0,95
S1FG19 P5-1 s	1690	1663	16,68	17,57	27	-0,90	27	0,90
S1FG19 P9-1 n	1711	1695	16,73	14,00	16	2,73	16	2,73
S1FG28 P2-1 c	1671	1668	15,04	13,40	3	1,64	3	1,64
S1FG28 P11-1 s	1683	1704	15,14	13,03	-21	2,11	21	2,11
S1FG8 P1-7 s	1698	1634	16,56	17,57	64	-1,02	64	1,02
S1FG8 P5-7 c	1655	1675	18,15	17,83	-20	0,32	20	0,32
S1FG8 P6-7 s	1724	1670	17,36	17,93	54	-0,57	54	0,57
S1FG8 P12-6 n	1681	1638	16,14	16,63	43	-0,49	43	0,49
S1FG8 P12-7 n	1638	1633	16,79	16,97	5	-0,18	5	0,18
S1FG8 P14-7 n	1686	1673	16,15	15,97	13	0,18	13	0,18
S1FG8 P17-7 c	1696	1651	16,85	17,20	45	-0,36	45	0,36
S1FG12 P1-1 s	1728	1680	14,27	15,27	48	-1,00	48	1,00
S1FG19 P10-1 s	1669	1652	16,17	15,03	17	1,14	17	1,14
S1FG19 P13-1 s	1692	1686	16,67	15,47	6	1,20	6	1,20
S1FG19 P18-1 s	1662	1662	17,06	15,53	0	1,53	0	1,53
S1FG19 P19-1 c	1719	1668	15,69	17,27	51	-1,58	51	1,58
S1FG28 P1-A-1 c	1662	1662	17,06	15,43	0	1,63	0	1,63
Promedios:	1691	1673	16,00	15,38	18	0,62	26	1,03

Tabla 4.7.- Resumen de los resultados obtenidos de Densidad Seca y Humedad, en los ensayos de Cono y Arena y Densímetro Nuclear (Geosuelos Cia. Ltda.).

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados de grado de compactación obtenidos para los ensayos del cono y arena, Hilf y densímetro nuclear; y el desvío de los datos obtenidos en las pruebas Hilf y densímetro nuclear con respecto los del cono y arena.

En la Tabla 4.7, se presentan los resultados para la densidad y humedad de los ensayos de cono y arena y densímetro nuclear, así como también el desvío de densidad y humedad del método nuclear con respecto al del cono y arena.

Los desvíos entre los datos del ensayo Hilf y densímetro nuclear (columnas 5 y 6 respectivamente de la Tabla 4.6) siguen una distribución normal como se muestra en las Figuras 4.10 y 4.11.

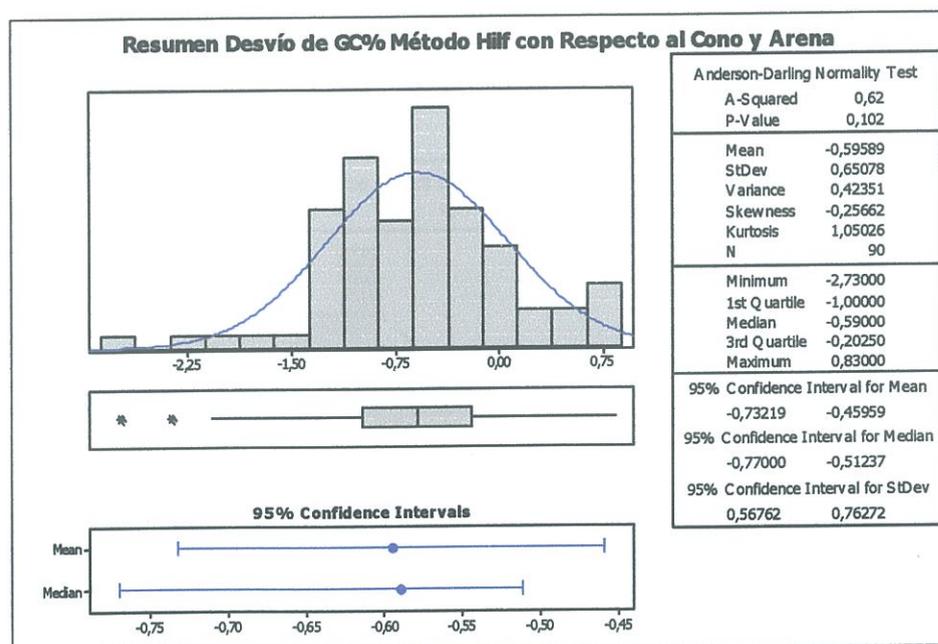


Figura 4.10.- Resumen estadístico para el desvío de GC% método Hilf con respecto al ensayo de cono y arena (MINITAB).

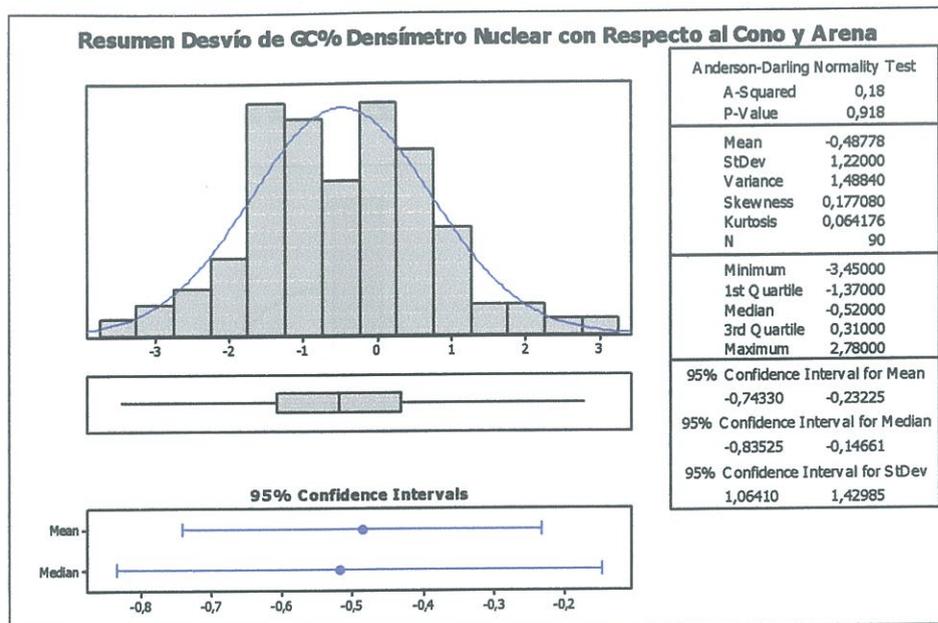


Figura 4.11.- Resumen estadístico para el desvío de GC% densímetro nuclear con respecto al ensayo de cono y arena (MINITAB).

De igual manera las Figuras 4.12 y 4.13, nos muestran que los desvíos de los datos para densidad seca y humedad, obtenidos con el densímetro, siguen una distribución normal.

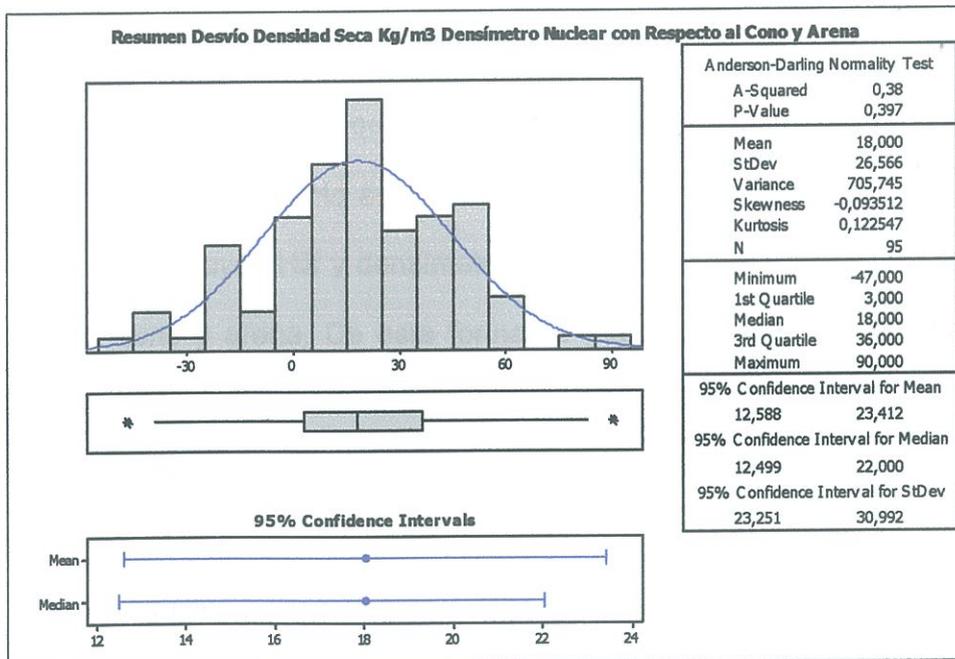


Figura 4.12.- Resumen estadístico para el desvío de GC% densímetro nuclear con respecto al ensayo de cono y arena (MINITAB).

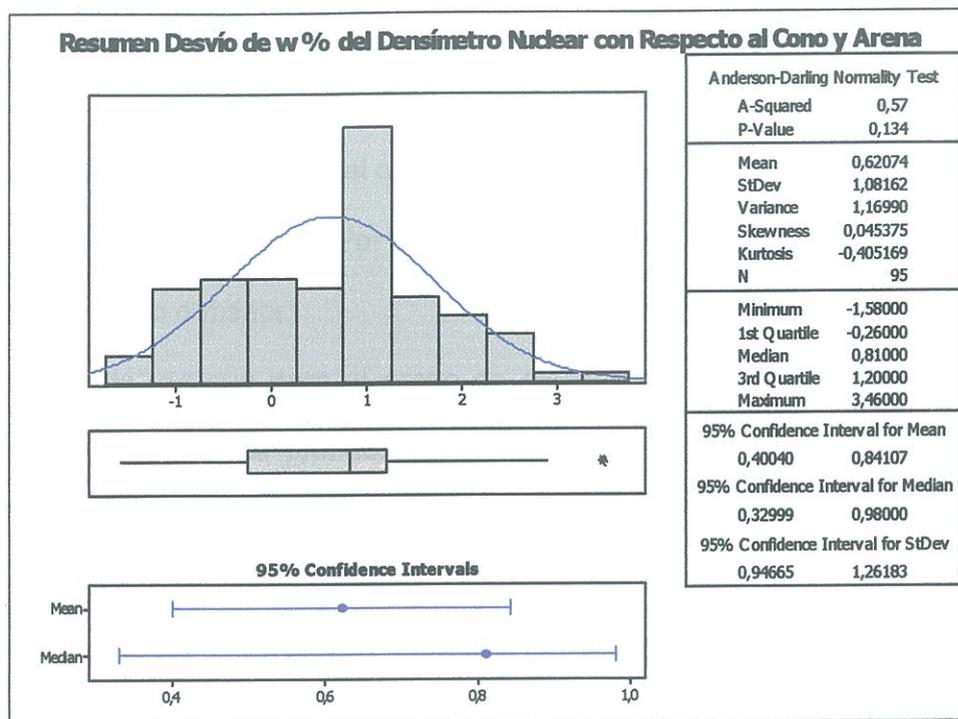


Figura 4.13.- Resumen estadístico para el desvío de GC% densímetro nuclear con respecto al ensayo de cono y arena (MINITAB).

En estas gráficas (Figuras 4.11 a 4.13), los valores P (P-Value), al ser mayores que 0,005 nos indican que no se descarta que los datos tengan una distribución normal, por lo tanto se puede calcular la probabilidad de que los resultados de los ensayos Hilf y densímetro nuclear, sean los mismos que los resultados del cono y arena. De esta forma se puede saber la confiabilidad para estos ensayos.

Las probabilidades acumuladas de que la diferencia entre los resultados obtenidos por los ensayos Hilf y nuclear, y cono y arena sean cero (es decir iguales a los resultados del cono y arena), son las siguientes:

- Grado de compactación Hilf: 82%
- Grado de compactación densímetro nuclear: 65,53%

- Densidad seca densímetro nuclear: 24,89%
- Humedad densímetro nuclear: 28,30%

Estas probabilidades son calculadas utilizando las áreas de las curva de distribución estándar, utilizando el criterio $P \leq 0$, es decir la probabilidad de que la diferencia sea cero o menor. Por lo tanto hay la misma probabilidad de que la diferencia sea cero o menor.

Se puede ver que para el grado de compactación, los ensayos Hilf y nuclear tienen una buena probabilidad de dar los mismos resultados que el cono y arena. Sin embargo el densímetro nuclear con lo que respecta a la densidad seca y humedad, tiene bajas probabilidades.

Esto no quiere decir que no se pueda utilizar este método para medir la densidad y humedad en el campo en el control de compactación, sino que la probabilidad de que los resultados sean iguales a los del cono y arena es menor.

En las Tabla 4.7, los promedios de diferencia en valor absoluto (densidad seca: 26 kg/m³ y humedad 1,03%, columnas 8 y 9 respectivamente) con respecto al cono y arena nos indican que la diferencia es pequeña. En promedio las densidades obtenidas con el densímetro son en promedio apenas 1,064% menores a las del cono y arena. Los de humedad son 3,88% menores.

De la Tabla 4.6 se puede ver también que el promedio de los valores absolutos de desviación entre los ensayos del cono y nuclear son pequeños, lo que reafirma su confiabilidad.

4.4.2. Diagramas de caja

Un diagrama de caja, nos da una idea del centro, dispersión, magnitud de desviación de la simetría y puntos inusuales (Devore 31) y nos permiten tener una visión más general de los datos. A continuación se presentan los diagramas de caja para la densidad seca, humedad y grado de compactación de los diferentes ensayos. Figuras 4.14 a 4.16. Estos diagramas fueron realizados con los datos de las Tablas 4.5 y 4.6. En los diagramas los puntos en color rojo representan a la media y los puntos azules la mediana, los asteriscos representan los puntos inusuales, la caja representa el rango intercuartil, y las colas el rango de datos y la dispersión.

La estadística de estos datos se resume en la siguiente tabla:

Ensayo	Estadísticas		
	Media	Desviación Est.	Rango
Densidad Seca, kg/m³			
Proctor Mod. Máxima	1757	24,5	102,8
Cono y Arena	1691	28,0	150
Densímetro	1673	23,1	110
Humedad, w %			
Proctor Mod. Óptima	15,32	0,895	4,22
Cono y Arena	16,00	1,089	5,1
Densímetro	15,38	1,237	5,36
Grado de Compactación, GC %			
Hilf	96,89	0,951	4,48
Cono y Arena	96,29	0,791	3,74
Densímetro	96,78	0,941	4,17

Tabla 4.8.- Resumen estadística para los datos de las tablas 4.6 y 4.7 (Los datos para el ensayo Proctor se presentan en la Tabla 4.1 del Anexo 6).

4.4.2.1. Densidad Seca

En estos diagramas de caja, se puede observar que los valores obtenidos por el densímetro nuclear, son generalmente menores a los del cono y arena. Se puede ver que el ensayo de cono y arena presenta una mayor

dispersión en sus datos, mayor rango y más puntos inusuales que el ensayo nuclear. Lo que también se puede observar de la Tabla 4.8.

De la Figura 4.14 también se observa que los datos de laboratorio están por encima de los de campo, esto debido a que estos son los máximos de las curvas de compactación. Estos datos corresponden al material de los mismos paños en donde se realizaron los otros ensayos.

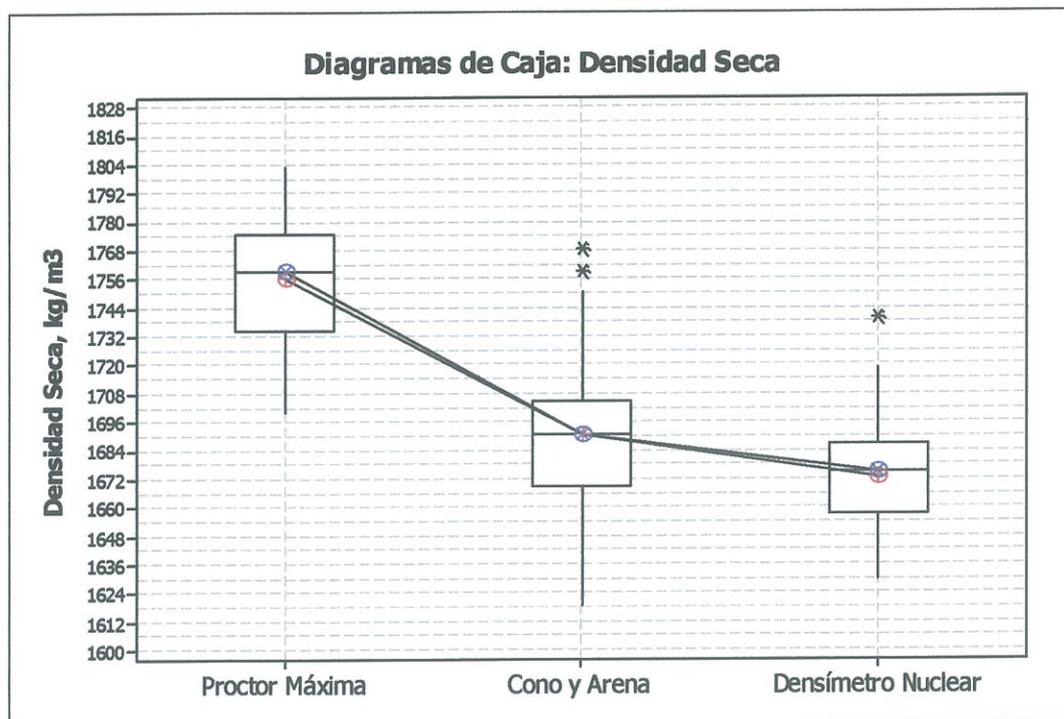


Figura 4.14.- Diagramas de caja para la densidad seca (MINITAB).

4.4.2.2. Humedad

En la Figura 4.15, si tomamos en cuenta las medias de los ensayos nuclear y cono-arena, se puede decir que los datos del densímetro son en general menores a los del cono. Se ve que el ensayo con mayor desviación y rango de datos es el nuclear(ver también Tabla 4.8).

Si comparamos los dos ensayos ya mencionados con los datos del ensayo Proctor de humedad óptima, sus medias nos dicen que el ensayo de

como esta por encima del Proctor, mientras que los datos del ensayo nuclear esta más o menos a la par la humedad óptima.

Tomando los datos de humedad (medias), de la Tabla 4,8 y calculamos el desvío promedio de humedad entre la humedad de los paños y óptima de laboratorio, se obtiene que: el cono nos da un promedio de desvío de 0,68% sobre el óptimo y para el densímetro, 0,06% también sobre el óptimo. Estos dos valores nos dicen que el desvío promedio de humedad de los paños con respecto al óptimo esta dentro de los límites de aceptación para la humedad conseguida en los paños compactados de +/-2%.

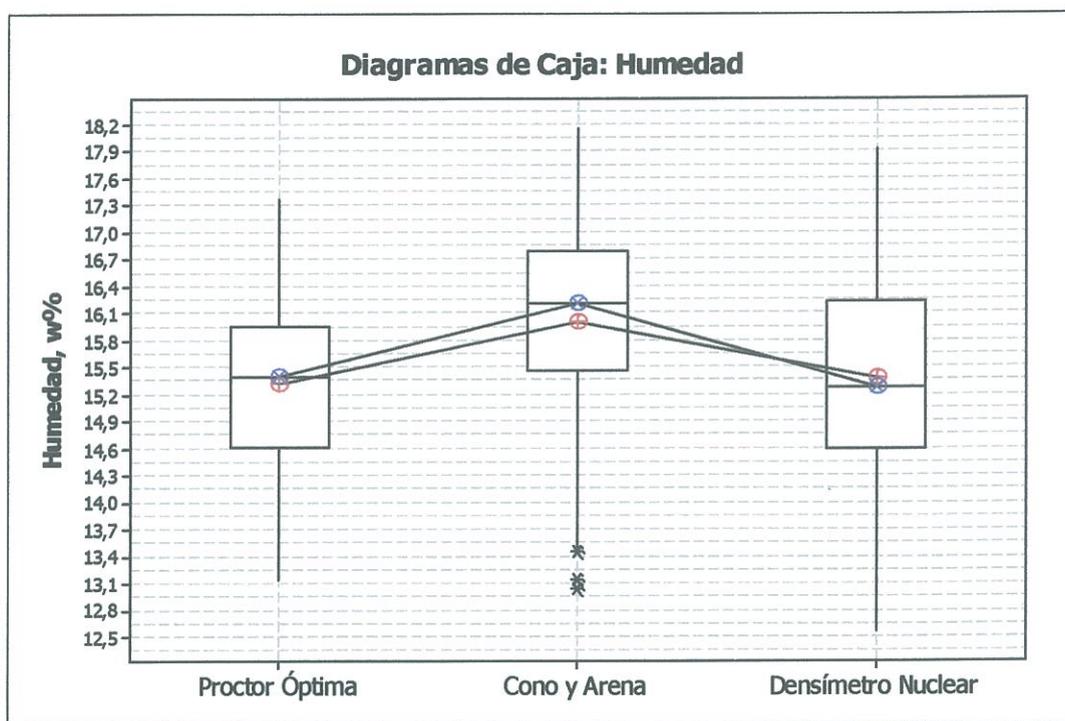


Figura 4.15.- Diagramas de caja para la humedad (MINITAB).

4.4.2.3. Grado de Compactación

Para el grado de compactación y comparando los tres ensayos, se ve en la Figura 4.16, que los ensayos Hilf y Nuclear arrojan valores mayores a los del cono-arena, teniendo estos dos ensayos rangos y medias muy parecidas.

El ensayo de cono y arena tiene datos con menor dispersión que los otros dos ensayo, cuya rango y desviación estándar son muy parecidos (ver también Tabla 4.8).

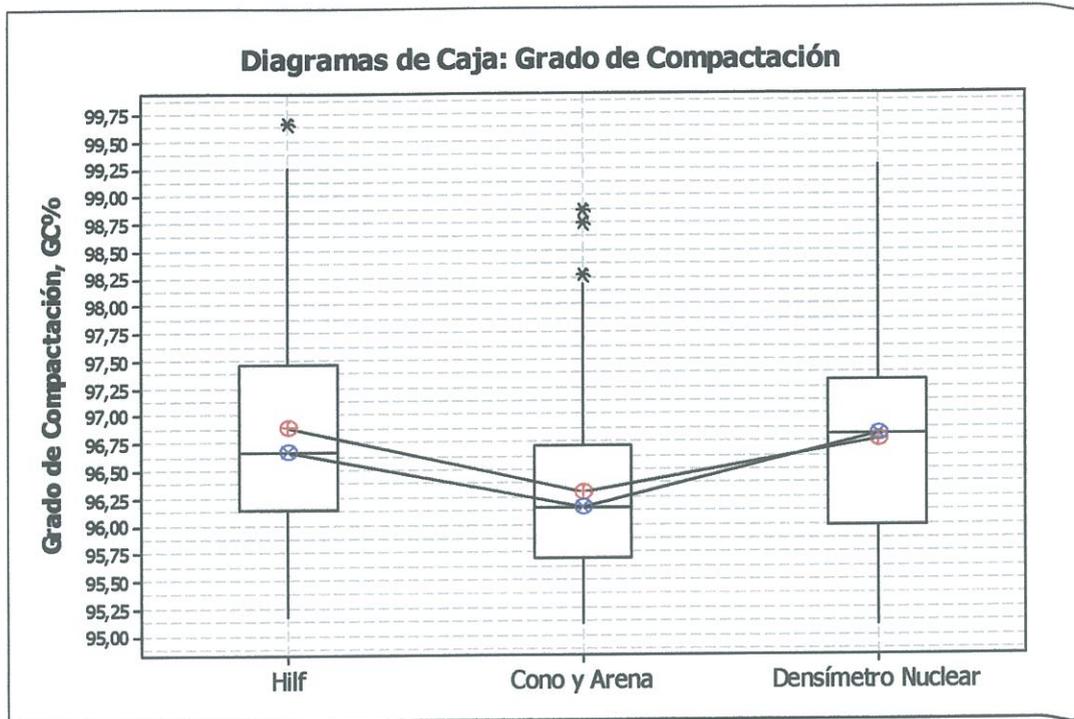


Figura 4.16.- Diagramas de caja para el grado de compactación (MINITAB).

Ahora, si comparamos los diagramas de caja de la muestra de ensayos (Tablas 4.6 y 4.8) con los diagramas de caja para la totalidad de ensayos (Figuras 4.17 a 4.19), realizados con los datos de las Tablas 4.1 a 4.4, se ve que la muestra de ensayos tomados siguen la misma tendencia que la totalidad de ensayos.

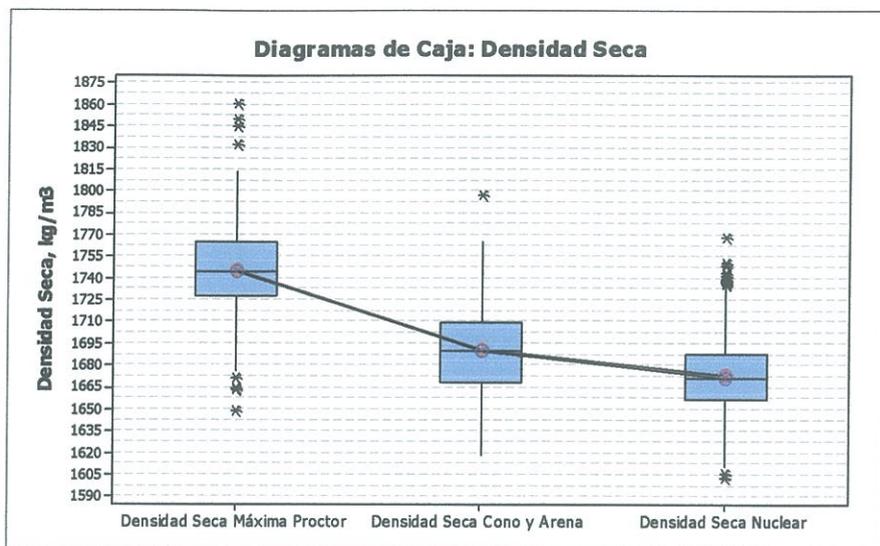


Figura 4.17.- Diagramas de caja para la densidad seca para el total de ensayos (MINITAB).

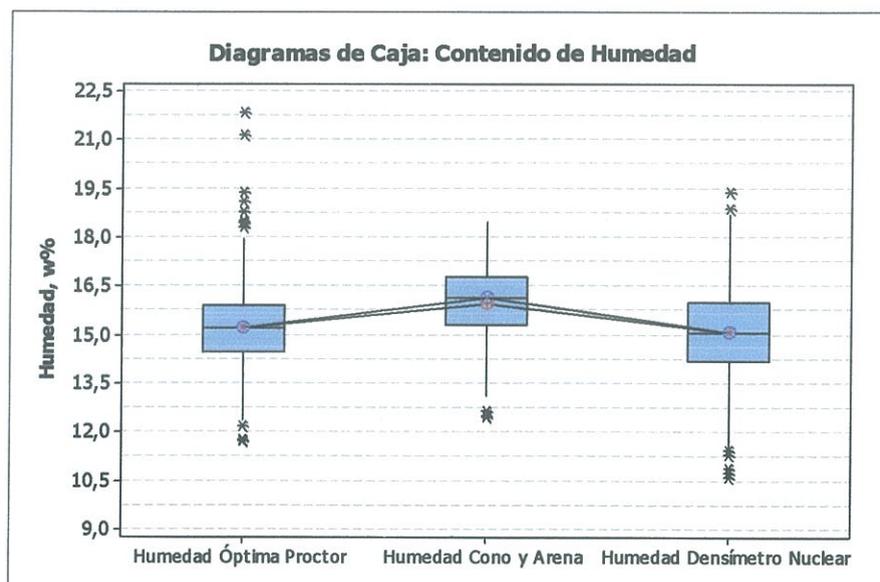


Figura 4.18.- Diagramas de caja para la humedad para el total de ensayo (MINITAB).

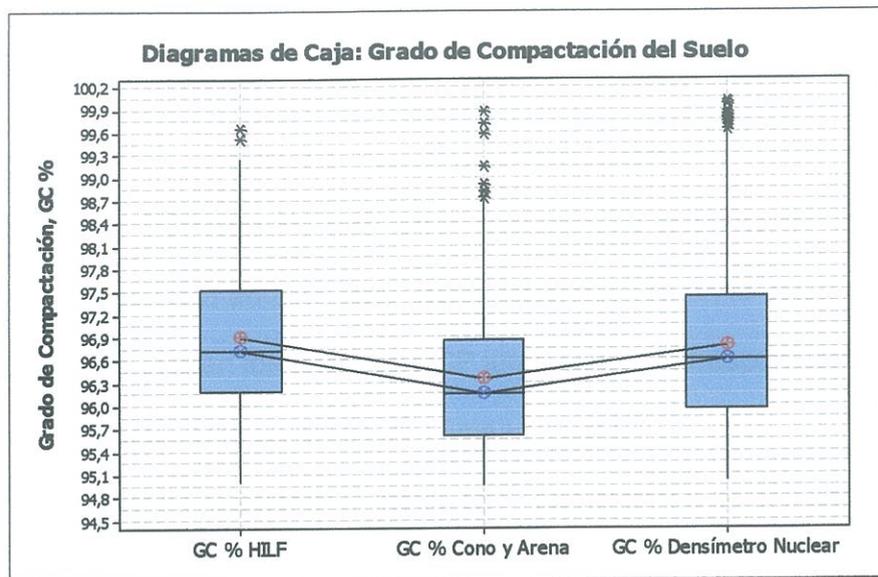


Figura 4.19.- Diagramas de caja para el grado de compactación para el total de ensayos (MINITAB).

4.5. Correlaciones

Muchas veces existen correlaciones entre los resultados de distintos ensayos. En este estudio se estudia la correlación entre el ensayo DCP y el grado de compactación logrado en el suelo, y DCP con el CBR de campo.

4.5.1. Correlación Grado de Compactación vs. Índice DCP

A continuación se presenta un ejemplo de ensayo DCP, Tabla 4.9.

Penetración (cm)	Acumulado (cm)	Número de Golpes	Golpes Acumulados	mm/golpe
22	0	0	0	0
26,5	4,5	1	1	45
29	7	1	2	25
31	9	1	3	20
33	11	1	4	20
35	13	1	5	20
36,7	14,7	1	6	17
38	16	1	7	13
39,5	17,5	1	8	15
40,5	18,5	1	9	10
41,5	19,5	1	10	10
42,3	20,3	1	11	8
43,4	21,4	1	12	11
44,1	22,1	1	13	7
45	23	1	14	9

45,5	23,5	1	15	5
46,2	24,2	1	16	7

Tabla 4.9.- Ejemplo de un ensayo DCP.

El índice DCP son los milímetros que penetra la punta del martillo por cada golpe, en la tabla anterior éste índice se encuentra en la columna 5. Para este análisis, se utilizan los ensayos DCP junto con su correspondiente ensayo de densidad in situ (dato de grado de compactación).

Para tratar de relacionar el índice DCP con el grado de compactación, se hicieron los siguientes análisis:

1) Debido a que cada ensayo de cono y arena se hace a 0 y a 7 cm, se ha calculado los mm/golpe correspondientes a esas profundidades. Pongamos como ejemplo el ensayo DCP de la Tabla 4.5. Para el ensayo de cono a 0cm o superficial, el DCP correspondiente serían aproximadamente los 10 primeros centímetros sobre el número de golpes necesarios para penetrar esos 10cm ($110\text{mm}/4\text{golpes}=27,5$). Se utiliza 10cm debido a que el agujero del ensayo de cono tiene aproximadamente esa profundidad.

Para el ensayo de cono que se realiza a 7cm, se utilizarán aproximadamente los diez centímetros a partir de esa profundidad ($175\text{mm}/6\text{golpes}=17,5$). Esto se hace para tener concordancia entre los datos y el lugar específico donde se realizaron los ensayos.

Las gráficas obtenidas de grado de compactación vs. DCP para éste análisis se muestran en las Figuras 4,20 y 4,21.

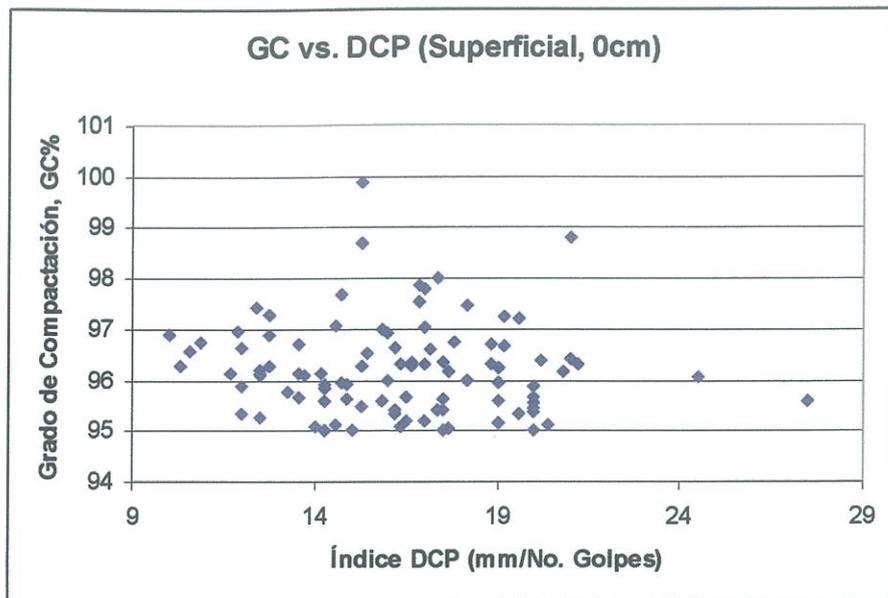


Figura 4.20.-GC% vs. Índice DCP a 0 cm.

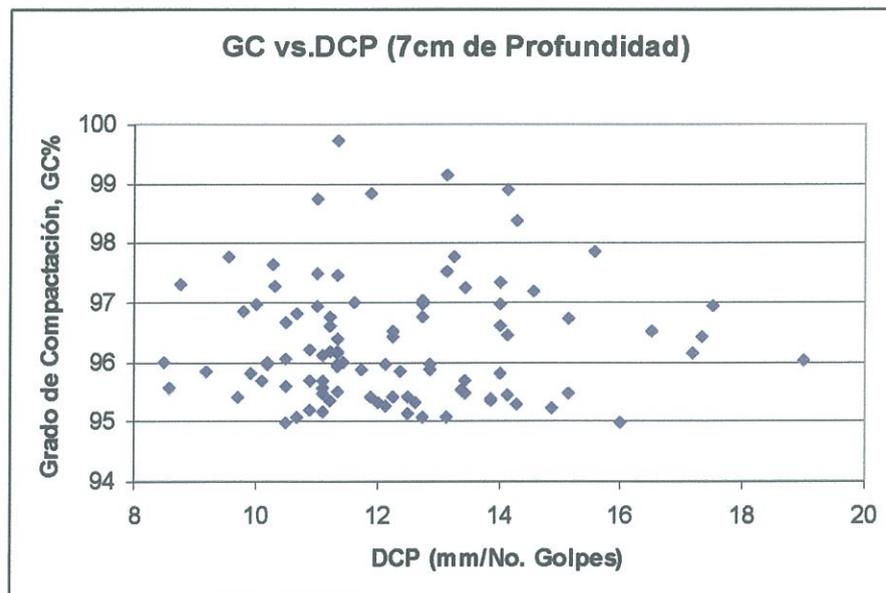


Figura 4.21.-GC% vs. Índice DCP a 7 cm de profundidad.

2) Otro método de análisis aplicado fue tomar la diferencia entre el segundo y primer punto de los ensayos DCP, es decir la pendiente inicial de la gráfica de penetración vs. No de golpes acumulados. Por ejemplo en la Tabla 4.5, P2-P1/1, esto es $70\text{mm}-45\text{mm}=25\text{mm/golpe}$. Éste índice se grafica con el

porcentaje de compactación del cono y arena superficial, ya que los dos corresponden a la zona donde se realizó el ensayo. Las Figuras 4.22 muestra esta gráfica.

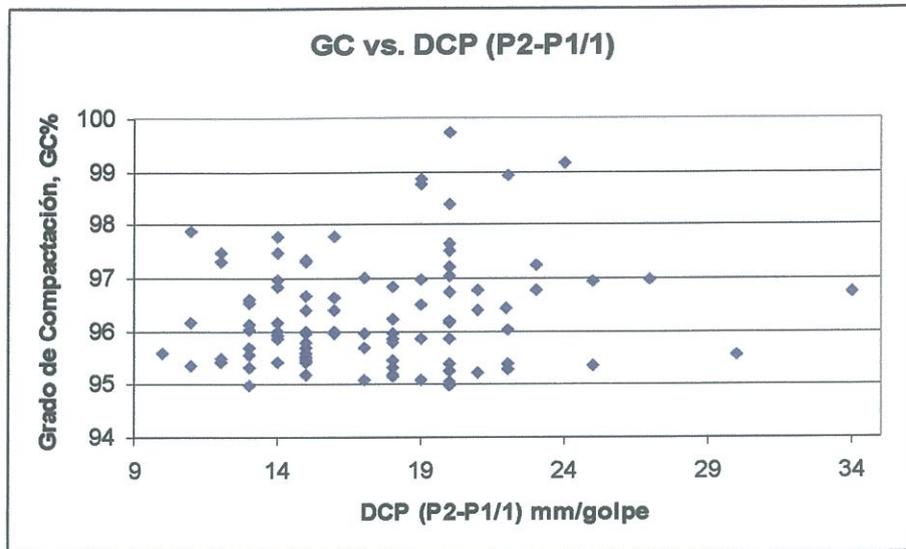


Figura 4.22.- GC% vs. Índice DCP (P2-P1/1).

3) Otros criterios se utilizaron para analizar si existe alguna relación entre el grado de compactación y el ensayo DCP como: utilizar el índice DCP de toda la capa, tomar el segundo y el tercer punto o solo el primer punto. Estas gráficas se presentan a continuación (Figuras 4.23, 4.24 y 4.25).

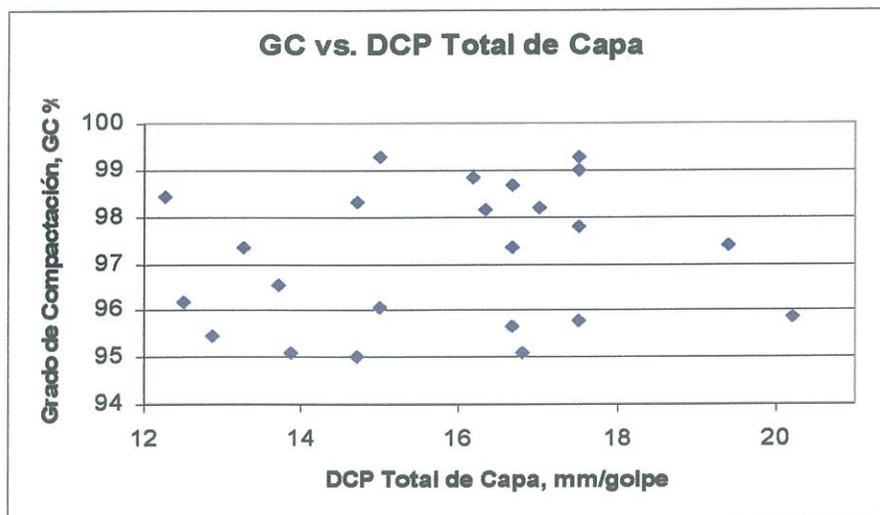


Figura 4.23.- GC% vs. DCP Total Capa.

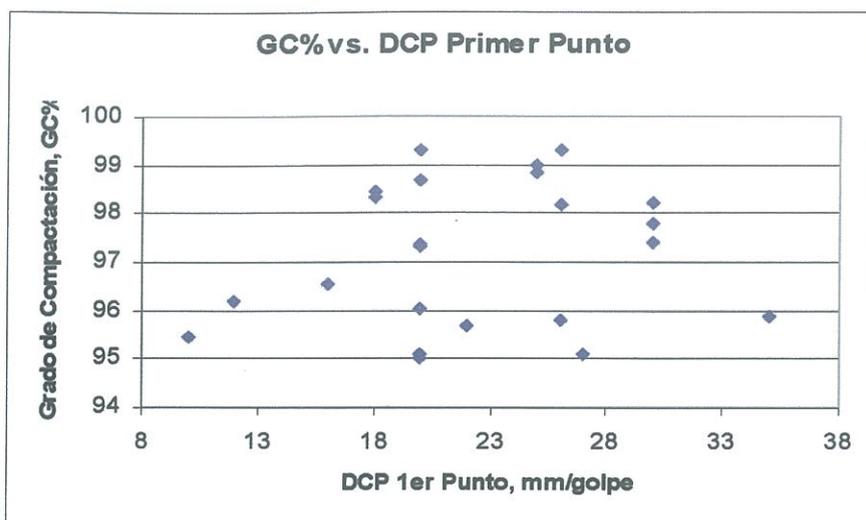


Figura 4.24.- GC% vs. Primer Punto DCP.

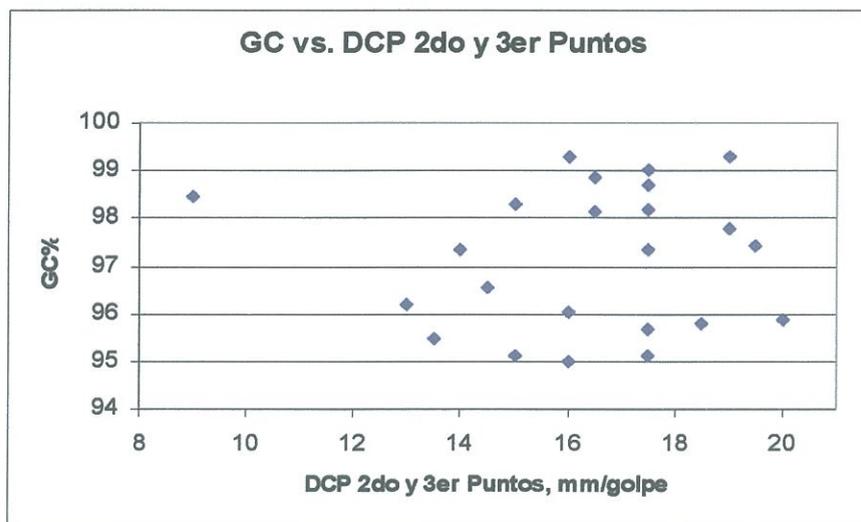


Figura 4.25.- GC% vs. DCP 2do y 3er Puntos.

Como se puede ver en todas estas gráficas, no haya una relación definida entre el ensayo DCP y el grado de compactación, ya que los datos son muy dispersos y no siguen ninguna tendencia.

4.5.2. Correlación CBR vs. Índice DCP

Este análisis está basado en la comparación y ajuste de los datos obtenidos a modelos de correlación DCP-CBR ya existentes. Por un lado tenemos la correlación recomendada por el ASTM en la norma D 6951:

$CRB = \frac{292}{DCP^{1.12}}$, las misma que según la norma puede ser usada para todo tipo

de suelos, excepto para suelos del tipo CL con CBR menor a 10 y suelos tipo CH.; y por otro lado la correlación para arenas limosas o arcillosas, publicada en el artículo: *A Labotarory Study to Establish Some Useful Relationships for the Use of Dynamic Cone Penetrometer* de la EJGE (Electronic Journal of Geotechnical Engineering) por sus autores: K.A:K Karunaprenma y Edirisinghe. Ellos citan la siguiente correlación: $\log CBR = 2.182 - 0,872\log DCP$.

Para éste análisis, se utilizaron datos de ensayos DCP y CBR de campo realizados en el NAIQ en los meses de enero a marzo del 2007. Estos datos se presentan en la Tabla 4.10 a continuación.

INDICE DCP mm/golpe			Valor CBR
P2-P1	P3-P1	P3-P2	
16	21	5	34,2
17	30	13	44,4
19	34	15	33,7
11	22	11	29,5
15	30	15	34,9
12	34	15	50,3
14	27	13	47,9
10	29	19	43,2
17	30	13	36,6
10	24	14	40,6
12	27	15	39,6
11	22	11	46,8
13	25	12	30,2
12	22	10	33,4
16	30	14	28,3
11	26	15	41,3
14	26	12	34,5
17	30	13	33,5
13	24	11	35,6
18	29	11	37,3
7	20	13	43,2
10	22	8	46,2
10	33	23	42,5
17	30	13	31,3
14	28	14	28,7
14	28	14	35,8
14	25	11	40,6
13	24	11	47,8
21	44	23	32,2

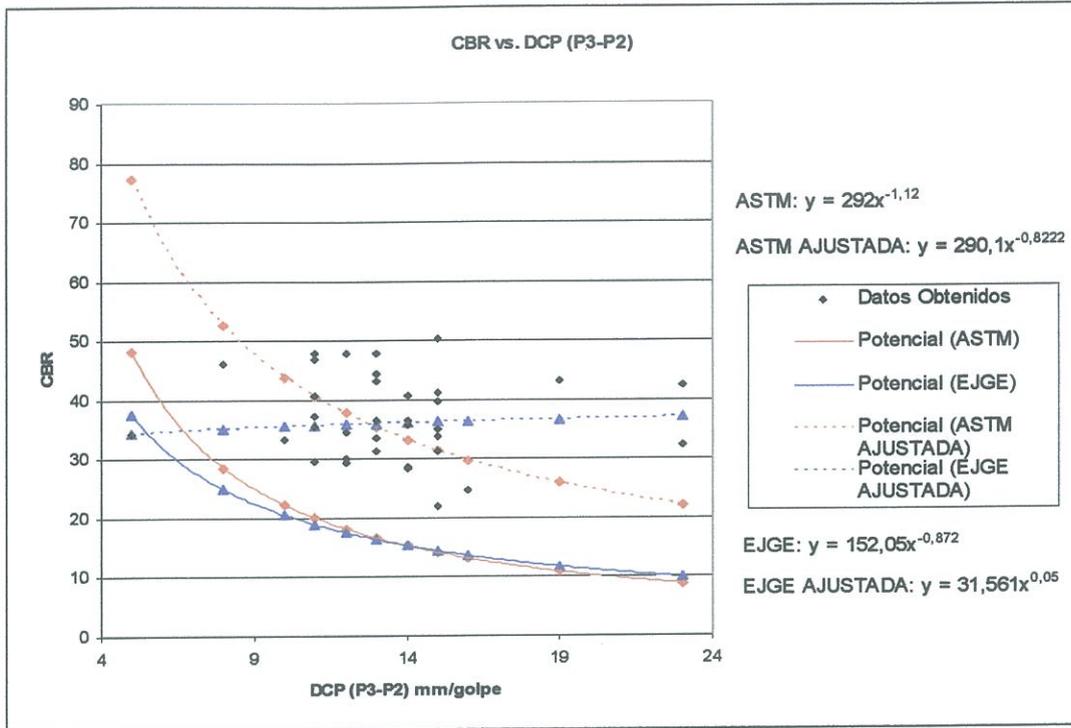


Figura 4.27.-CBR vs. DCP (P3-P2).

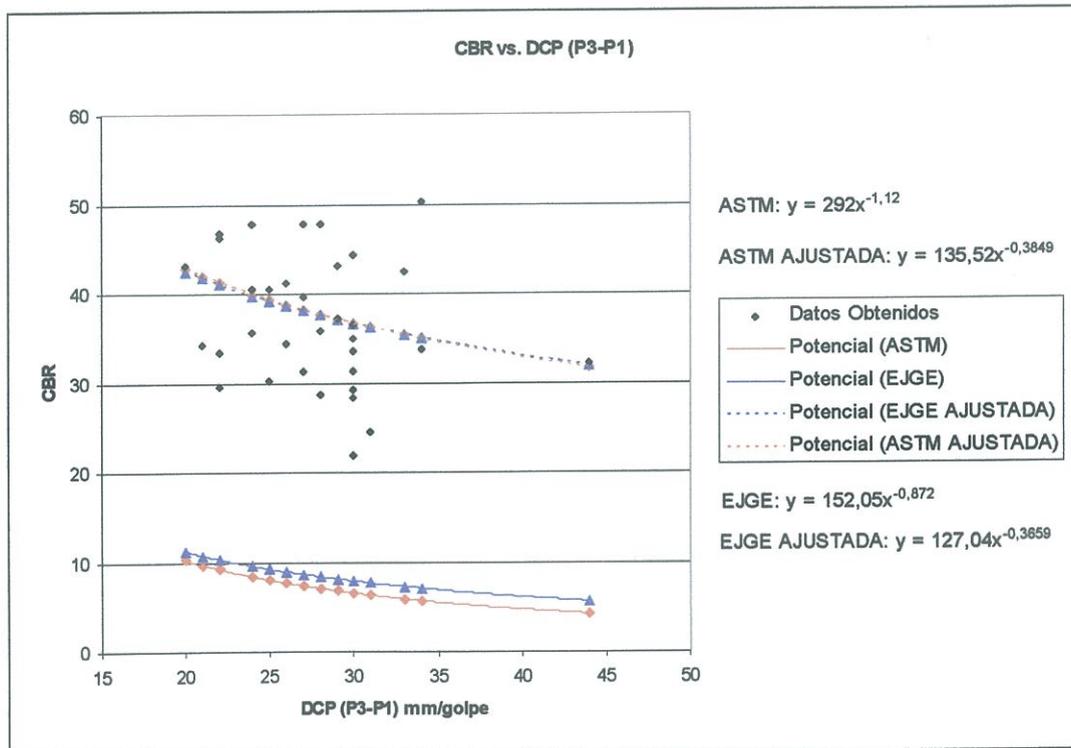


Figura 4.28.-CBR vs. DCP (P3-P1).

Se puede observar en estas gráficas, que existe mucha dispersión en los datos obtenidos y que los mismos no se ajustan adecuadamente a las curvas ajustadas. Se observa también que las curvas ajustadas están muy distantes a las curvas originales de correlación produciéndose una diferencia grande entre los valores de CBR calculados a partir del DCP si se utilizan las curvas ajustadas.

Las curvas ajustadas que utilizan la diferencia P2-P1 son las que mejor se ajustan a los datos obtenidos, con un R^2 igual a 0,1534 para la curva ajustada ASTM y 0,1617 para la curva ajustada publicada por el EJGE. A pesar de ser las curvas que mejor se ajustan, los valores de R^2 nos indican que los datos no se ajustan nada bien a las curvas obtenidas (Figura 4.19).

De las curvas ajustadas, la curva que tiene la ecuación más parecida a las originales es la curva ajustada ASTM para la diferencia DCP (P3-P22):

$$CBR = \frac{290,1}{DCP^{0,8222}}$$
 (Figura 4.20). Sin embargo esto no implica que los datos obtenidos de CBR se ajusten bien a ella, como se puede ver en la misma figura.

CAPITULO 5

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

5.1.1. Análisis Estadístico

Del análisis estadístico, se puede concluir que:

- No todas las variables tienen una distribución normal de sus datos. De las Figuras 4.1 a 4.9, las variables que tienen valores P (P-Values) mayores a 0,005, siguen dicha distribución. Sin embargo para los datos que no siguen esta distribución, se puede aplicar el teorema del límite central. Que dice que para muestras grandes, n mayor que 30, los datos se aproximarán a tener una distribución normal, pudiendo así calcular probabilidades aproximadas utilizando la curva para distribución normal (Devore 221). Si se quiere obtener probabilidades exactas, se debe encontrar la distribución fundamental de los datos.
- La gran mayoría, por no decir todos, de los paños compactados, cumplen con el requerimiento del 95% o más de grado de compactación, lo que nos indica que el procedimiento de compactación utilizado es efectivo. Ver también el numeral 4.3 para el grado de compactación. (98% de probabilidad de superar el 95% de GC con este procedimiento de compactación, distribución 3-lognormal MINITAB).

5.1.2. Correlación Grado de Compactación vs. Índice DCP

Según las gráficas presentadas en el Capítulo 4 (Figuras 4.20 a 4.25), se puede concluir que no existe una relación confiable entre estos dos ensayos para este tipo de suelos ya que los puntos en las gráficas no siguen ninguna tendencia definida y existe demasiada dispersión. Esta dispersión se puede

deber a la variación de mineralogía, granulometría y fracturamiento de minerales, los mismos que no se pueden medir con los ensayos realizados.

5.1.3. Correlación CBR vs. Índice DCP

Al igual que en la correlación CBR – DCP, en las Figuras 4.26 a 4.29, claramente se puede observar que no existe una relación clara entre los datos, tampoco siguen una tendencia definida y no se puede determinar una ecuación que pueda resumir esta relación, con una dispersión confiable.

Se concluye también que, las correlaciones propuestas por el ASTM y por el artículo publicado en el EJGE, no se pueden usar para este tipo de suelos, a pesar de que en la norma ASTM D 6951, se indica en el numeral 6.5.1, que la correlación $CRB = \frac{292}{DCP^{1.12}}$ se puede usar en todos los tipos de suelo, incluyéndose los suelos SM y ML. Lo mismo se puede concluir sobre la otra correlación: $\log CBR = 2.182 - 0,872 \log DCP$.

Esto es debido a que en este proceso y materiales, existen más variables de las que se pueden determinar con este tipo de ensayos.

5.1.4. Confiabilidad de los Ensayos Hilf y Densímetro Nuclear

Del análisis de confiabilidad, del numeral 4.4.1, se concluye que el método Hilf para determinar el grado de compactación de una paño compactado, es el más confiable con un 82% de probabilidad de que los datos sean iguales a los del ensayo del cono (ensayo base).

El ensayo nuclear tiene una probabilidad del 65,53% de obtener los mismos valores que el cono y arena, por lo que se concluye que este ensayo

se puede usar para llevar un control rápido del grado de compactación de los paños.

A pesar de que el método Hilf es teóricamente más preciso y el análisis de confiabilidad nos lo confirme, este método se descarta para el control de compactación de los paños debido a que es más laborioso y toma más tiempo que el ensayo de densímetro nuclear, que también es muy confiable.

A pesar de que el método nuclear para determinar la densidad seca y la humedad de los paños compactados, tiene bajas probabilidades de proporcionar datos iguales a los del ensayo del cono, se puede utilizar para un control rápido, basándonos en la poca diferencia que existe entre los resultados entre estos dos ensayos (Tabla 4.7). Las desviaciones para el grado de compactación (Tabla 4.6), confirman la confiabilidad de los ensayos Hilf y Nuclear para hacer un control rápido de los paños.

5.1.5. Conclusiones Generales

De los resultados obtenidos al tratar de encontrar correlaciones entre ensayos, y al no haber obtenido ninguna relación clara, la conclusión a la cual se ha llegado, es que estos suelos a pesar de tener la misma clasificación (SM y ML), proceder del mismo sitio y tener rangos de trabajo bastante estrechos (numeral 4.4), se comportan de manera diferente y poseen gran heterogeneidad en su granulometría, mineralogía y propiedades físicas. Sin embargo, el proceso utilizado para la compactación de estos suelos parece funcionar eficazmente, sin dejar de tomar en cuenta que no se puede generalizar un proceso debido a que se trata de suelos muy heterogéneos.

Para los rangos de trabajo de estos suelos, no se han encontrado correlaciones con una dispersión confiable para Grado de Compactación -

DCP, y para CBR – DCP, aunque ciertas normas internacionales así lo expongan. Por lo tanto, los datos de CBR presentados en la Tabla 4.3 para toda la capa (calculados con la correlación del ASTM D 6951), no son válidos para estos suelos. Con esto queda claro que no se pueden dejar de hacer ciertos ensayos, como por ejemplo: si existiese una correlación entre el DCP y el CBR, se podría prescindir de los ensayos CBR de campo.

5.2. Recomendaciones

5.2.1. Proceso de Compactación

Las siguientes recomendaciones se pueden tomar en cuenta en proyectos similares:

- 1) Se recomienda hacer un relleno de prueba para establecer una relación entre energía de compactación, espesor de capa, GC% y w%, y así establecer un proceso de compactación que consiga cumplir con los requerimientos de la obra. Se debe tomar en cuenta que el proceso puede cambiar según el material utilizado y las condiciones de trabajo y maquinaria disponible.
- 2) Se recomienda usar rodillos lisos sin vibración y como complemento usar rodillos neumáticos como los expuestos en el numeral 2.4.2 (o la maquinaria disponible) y si están disponibles, hacer pasar las volquetas cargadas sobre paños ya compactados para dar un grado de compactación extra. (Entrevista Luís Feijoo, Equitransa).
- 3) Se recomienda utilizar rodillos neumáticos si se trabaja en las noches, ya que el rocío nocturno humedece el material y provoca que este se pegue en los tambores de los rodillos lisos.

- 4) Para este proyecto específico y tipo de suelos, se recomienda (según los resultados obtenidos en el relleno de prueba de este proyecto), hacer 8 pasadas de un rodillo liso sin vibración de 16 toneladas sobre 4 o 3 sectores dependiendo de si los paños son confinados o no. Si embargo esto puede cambiar de acuerdo a las condiciones y materiales compactados.

5.2.2. Control de Compactación

Para el control de compactación se recomienda:

- 1) El control debe estar conformado por pruebas de laboratorio y de campo punto por punto.
- 2) En laboratorio, un ensayo Proctor Modificado para cada material que sea extraído de un sitio diferente. Por ejemplo: para calcular el grado de compactación en cierto paño, el ensayo de cono y arena necesita del valor de densidad máxima de laboratorio de ese mismo material. Nunca utilizar otro valor.
- 3) En el campo, como base el ensayo de cono y arena, y como una medida rápida de control, el densímetro nuclear. El método Hilf se puede utilizar en obras de menor tamaño y si no se dispone de densímetros nucleares.
- 4) Como ensayos para medir el comportamiento o desempeño del suelo compactado, se pueden utilizar los ensayos DCP, CBR de Campo y Pruebas de Placa.
- 5) El ensayo DCP se puede utilizar para controlar la homogeneidad de una capa de suelo compactada, ya que este atraviesa completamente a las mismas. Si se gráfica la profundidad contra el índice DCP, se obtiene

una grafica como la que se muestra en la Figura 5.1. de este modo se puede localizar puntos inusuales de índice DCP.

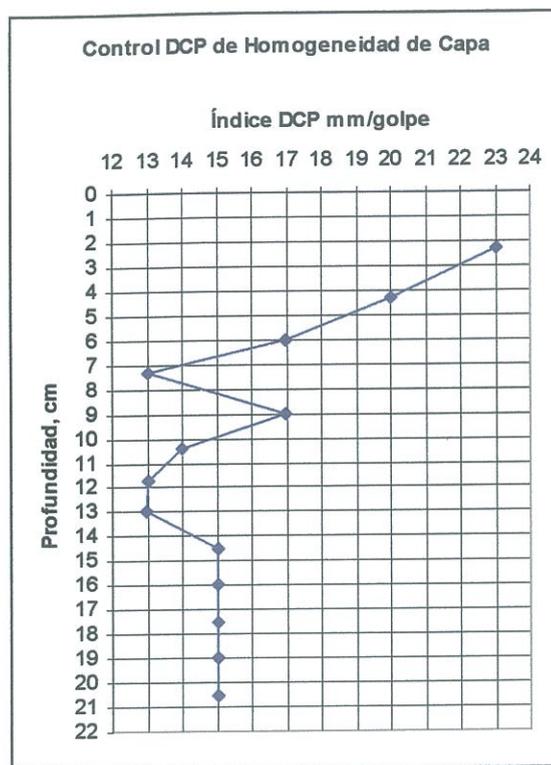


Figura 5.1.- Profundidad vs. Índice DCP

- 6) Se recomienda llevar un registro ordenado de los datos obtenidos en los ensayos ordenados según la denominación expuesta en el numeral 1.3.2 o similar, con el fin de poder relacionar los distintos ensayos realizados para facilitar su análisis. También se pueden tomar como referencia los formatos del Anexo 5 y el programa realizado para los ensayos utilizados en este proyecto.
- 7) Debido a que la compactación de los suelos es un proceso en el cual se realiza en varias etapas: tendido, homogenización y paso de rodillos (cada una con sus especificaciones), se puede aplicar la utilización de cuadros de control estadístico para el producto final. En este caso se podría monitorear por ejemplo el desvío de humedad obtenido al finalizar

el proceso de compactación. Los datos a utilizarse son los del ensayo de cono y arena. A continuación se presenta un ejemplo de un cuadro de control para el monitoreo del desvío de humedad (Figuras 5.2) realizadas en el programa MINITAB.

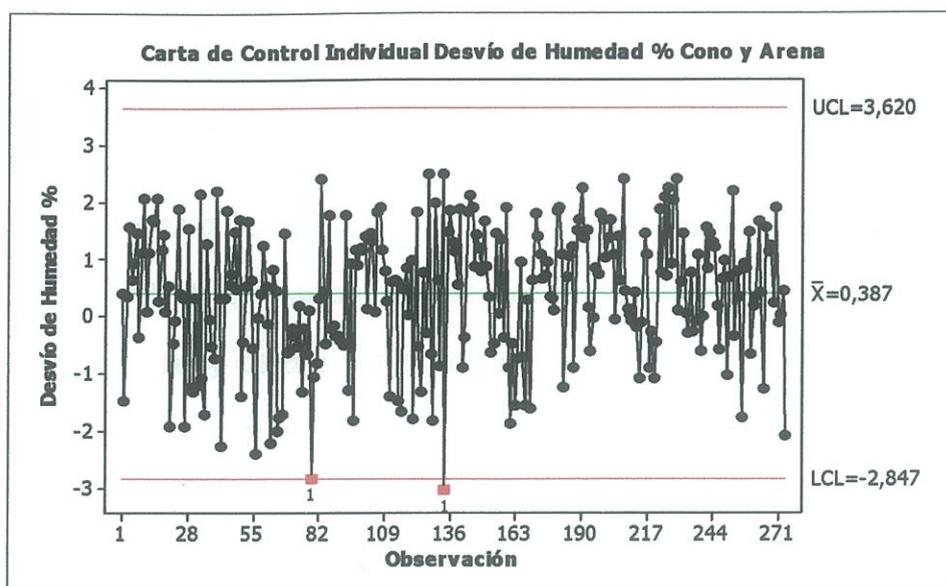


Figura 5.2.- Carta de control individual para el desvío de humedad del ensayo de cono y arena (MINITAB).

Utilizando estos cuadros se pueden localizar los puntos que estén fuera de los límites de control, como los puntos marcados con rojo en las cartas de control. Localizar estos puntos nos permite encontrar irregularidades en el proceso como por ejemplo: la falta de número de pasadas de los rodillos, espesor de capa mayor o menor, la falta de homogenización del material, etc.

Existe abundante literatura a cerca de la elaboración de cuadros de control, la misma que puede ser consultada para fines de control de procesos de compactación.

Bibliografía

- AAGC, *Aecon Andrade Gutiérrez Construcciones S.A. Ecuador*
- AAGC, *IMS Módulo 1- Introducción Proyecto NAIQ*. Presentación Power Point.
- AAGC, *Plan Específico de Calidad, PQE NQIA 510 41 01*.
- AAGC. *Procedimiento Operacional Ensayo DCP*. PO NQIA 510 12.
- AAGC. *Procedimiento Operacional Método Cono y Arena: Densidad*. PO NQIA 510 10.
- AAGC. *Procedimiento Operacional Proctor Modificado*. PO NQIA 510 04.
- AAGC, *Procedimiento Operacional Relleno y Compactación*. PO NQIA 510 13.
- AAGC, *QA QC Weekly October 2006 Report*.
- ABNT MB-3443. *Solo-Controle de compactação pelo método Hilf*. 1991.
- ASTM D 1556. *Standard Test Method for Density and Unit Weigth of Soil by the Sand-Cone Method*. 1990.
- ASTM D 1557. *Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lb/ft³(2,700 kN-m/m³))*. 1991.
- ASTM D 2922. *Standard Test Methods for Density of Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth)*. 1996.
- ASTM D 6951. *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*. 2003.
- Arquie, Georges. *Compactación en Carreteras y Aeropuertos*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1978.
- Caterpillar. Disponible en:
www.cat.com
- Cazar, Pfander. *Colapsibilidad de los suelos del nuevo Aeropuerto de Quito*. Camara de la Construcción de Quito. Creado el 20 de mayo del 2003.
Disponible en:
http://www.ccquito.org/desarrollo/portal.nsf/frameset_05_tecnico?OpenFrameSet
[et](#)
- CORPAQ. *Resumen Ejecutivo Parte Técnica del nuevo aeropuerto Internacional de Quito (NAIQ)*. Disponible en:
http://www.corpaq.com/index.php?id_node=60&id_content=61
- CORPQ, *Características de Nuevo Aeropuerto*. Disponible en:

http://www.corpaq.com/index.php?id_node=60&id_content=21

Cruz, Abimael. *Información de Interés*. Revista de la SMMS. Octubre-Diciembre 2005.

Das, Braja. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Thomsom Learnig, 2001.

Das, Braja. *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. México: Internacional Thomson Editores, 2001.

Densímetros Nucleares "Roadreaders". Disponible en:
<http://www.mecacisa.com/troxler-3440.htm>

Devore, Jay. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. México: Thomson Editores, 1998.

Feijoo, Luís. Equitransa. Entrevista Personal. 1 de febrero 2007.

Geosuelos Cia. Ltda.

Google Earth. Disponible en:
www.google.com

Ingersoll Rand. Disponible en:
www.ir-abg.com

Juárez, Eulalio y Rico Rodríguez. *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Tomo 1 México, 1985.

Karunaprema, K.A.K. y A.C.H.J. Edirisinghe. *A Labotatory Study to Establish Some Useful Relationships for the Use of Dynamic Cone Penetrometer*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE). 2002.

Legault, Adrian. *Ingeniería de Carreteras y Aeropuertos*. México: Compañía Editorial Continental, 1963.

Manual del Usuario Densímetro Nuclear Marca Troxler, Modelo 3430 y3430-M. Disponible en:
www.troxlerlabs.com

Marsal, Raúl y Daniel Reséndiz. *Presas de Tierra y Enrocamiento*. México: Limusa, 1979.

Minitab 14, Statistical Software. Disponible en:
<http://www.minitab.com/>

Nuevo Aeropuerto de Quito. *Revista Construye*. Abril 2007: 7.

Padilla, Washington. *El Suelo Componente Importante del Ecosistema*. 1999.

Sowers, George B y George F Sowers. *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México: Limusa Wiley 1972.

Torres, Patricio. *Compactación de las Cangahuas*. Cámara de la Construcción de Quito. Disponible en:
http://www.ccquito.org/desarrollo/portal.nsf/frameset_05_tecnico?OpenFrameSet
[et](#)

Torres, Patricio. *Mejoramiento del terreno*. Geosuelos Cía. Ltda.

Tschebotarioff. *Mecánica del suelo*. Madrid, 1967.

Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería en Construcción. *Determinación de la Capacidad de Soporte CBR de Suelo*. Disponible en:
http://icc.ucv.cl/geotecnia/11_nuestro_laboratorio/laboratorio/cbr/index.html

Wikipedia Enciclopedia Libre. Disponible en:
<http://es.wikipedia.org/>

Winterkorna, Hans y Hsai Yang. *Founding Engineering Handbook*. NY: Van Nostrand Reinhold Company, 1975.

Wolf, Teodoro. *Geografía y Geología del Ecuador*. Quito: Casa de la Cultura Ecuatoriana, 1975.

Anexo 1

Ejemplo de Clasificación Manual Visual

GEOSUELOS
LABORATORIO DE SUELOS

LOCALIZACIÓN Ababela
PERFORACIÓN SPT-54
PROYECTO N.A.I.2
FECHA 2005-11-23

CLASIFICACION MANUAL - VISUAL

N (SPT) 15 30 45	COLOR	OLOR	GRANULO METRIA	CONTENIDO DE AGUA	CEMENTA- CION	PLASTICIDAD DE FINOS	PARA SUELOS FINOS SOLAMENTE					RECUPE RACION (cm)	OBSERVACIONES	
							CONSIST	MB	B	M	D			MD
5 6 8	café claro	N	B: — %	SECA	NINGUNA	NULA	CONSIST	MB	B	M	D	MD	30	
14			G: 40 %	POCO HUM.	DEBIL	LIGERA	DILATANCIA	N	ML	L	R			
			S: — %	MUY HUM.	MEDIA	MEDIA	TENACIDAD	N	CM	A				
			F: 60 %	SATURADA	FUERTE	ALTA	RESIST. SECA	N	CM	A	MA			
SIMBOLO: <u>ML</u> NOMBRE: <u>Limo arenoso medianamente compresible poco plastico.</u> NOMBRE GEOLOGICO O VULGAR: _____														
6 8 9	café claro	N	B: — %	SECA	NINGUNA	NULA	CONSIST	MB	B	M	D	MD	30	
17			G: 50 %	POCO HUM.	DEBIL	LIGERA	DILATANCIA	N	ML	L	R			
			S: — %	MUY HUM.	MEDIA	MEDIA	TENACIDAD	N	CM	A				
			F: 30 %	SATURADA	FUERTE	ALTA	RESIST. SECA	N	CM	A	MA			
SIMBOLO: <u>ML/Spt</u> NOMBRE: <u>Limo arenoso / Arena limosa</u> NOMBRE GEOLOGICO O VULGAR: _____														
8 9 10	café	N	B: — %	SECA	NINGUNA	NULA	CONSIST	MB	B	M	D	MD	25	
19			G: 40 %	POCO HUM.	DEBIL	LIGERA	DILATANCIA	N	ML	L	R			
			S: — %	MUY HUM.	MEDIA	MEDIA	TENACIDAD	N	CM	A				
			F: 60 %	SATURADA	FUERTE	ALTA	RESIST. SECA	N	CM	A	MA			
SIMBOLO: <u>ML</u> NOMBRE: <u>Limo arenoso medianamente compresible poco plastico.</u> NOMBRE GEOLOGICO O VULGAR: _____														
11 15 19	café	N	B: — %	SECA	NINGUNA	NULA	CONSIST	MB	B	M	D	MD	25	
34			G: 40 %	POCO HUM.	DEBIL	LIGERA	DILATANCIA	N	ML	L	R			
			S: — %	MUY HUM.	MEDIA	MEDIA	TENACIDAD	N	CM	A				
			F: 60 %	SATURADA	FUERTE	ALTA	RESIST. SECA	N	CM	A	MA			
SIMBOLO: <u>ML</u> NOMBRE: <u>Limo arenoso medianamente compresible poco plastico</u> NOMBRE GEOLOGICO O VULGAR: _____														
11 21 34	café	N	B: — %	SECA	NINGUNA	NULA	CONSIST	MB	B	M	D	MD	30	Hora fini 11h10
65			G: 40 %	POCO HUM.	DEBIL	LIGERA	DILATANCIA	N	ML	L	R			
			S: — %	MUY HUM.	MEDIA	MEDIA	TENACIDAD	N	CM	A				
			F: 60 %	SATURADA	FUERTE	ALTA	RESIST. SECA	N	CM	A	MA			
SIMBOLO: <u>ML</u> NOMBRE: <u>Limo arenoso medianamente compresible con presencia FIN DEL SONDEO de arena</u> NOMBRE GEOLOGICO O VULGAR: _____														
			B: — %	SECA	NINGUNA	NULA	CONSIST	MB	B	M	D	MD		
			G: — %	POCO HUM.	DEBIL	LIGERA	DILATANCIA	N	ML	L	R			
			S: — %	MUY HUM.	MEDIA	MEDIA	TENACIDAD	N	L	M	A			
			F: — %	SATURADA	FUERTE	ALTA	RESIST. SECA	N	L	M	A	MA		
SIMBOLO: _____ NOMBRE: _____ NOMBRE GEOLOGICO O VULGAR: _____														
			B: — %	SECA	NINGUNA	NULA	CONSIST	MB	B	M	D	MD		
			G: — %	POCO HUM.	DEBIL	LIGERA	DILATANCIA	N	ML	L	R			
			S: — %	MUY HUM.	MEDIA	MEDIA	TENACIDAD	N	L	M	A			
			F: — %	SATURADA	FUERTE	ALTA	RESIST. SECA	N	L	M	A	MA		
SIMBOLO: _____ NOMBRE: _____ NOMBRE GEOLOGICO O VULGAR: _____														
			B: — %	SECA	NINGUNA	NULA	CONSIST	MB	B	M	D	MD		
			G: — %	POCO HUM.	DEBIL	LIGERA	DILATANCIA	N	ML	L	R			
			S: — %	MUY HUM.	MEDIA	MEDIA	TENACIDAD	N	L	M	A			
			F: — %	SATURADA	FUERTE	ALTA	RESIST. SECA	N	L	M	A	MA		
SIMBOLO: _____ NOMBRE: _____ NOMBRE GEOLOGICO O VULGAR: _____														

Anexo 2

Clasificación SUCS y AASTHO



ENSAYO DE CLASIFICACIÓN

CLIENTE: Raúl Hidalgo Artieda

OBRA: N.A.I.Q.

UBICACIÓN: Parquederos

FECHA: Diciembre 2006

SONDEO: SPT-53

MUESTRA: 1

PROFUND.: 1,00-1,45 m

	GOLPES	PES. HUM.	PES. SECO	CÁPSULA	w%	RESULTADOS
1.- CONTENIDO DE AGUA		73,69	71,45	18,81	4,26	
		70,11	68,08	20,43	4,26	4,26

2.- LÍMITE LÍQUIDO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

3.- LÍMITE PLÁSTICO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

4.- GRANULOMETRÍA

PES. INICIAL 115,71 (H/D) H
 PESO INICIAL PARA CÁLCULOS = 110,98

TAMIZ	PES. RET.	% RETEN.	% PASA
1"	0,00	0	100
3/4"	0,00	0	100
1/2"	0,00	0	100
3/8"	0,00	0	100
No. 4	0,00	0	100
No. 10	0,02	0	100
No. 40	13,07	12	88
No. 200	62,36	56	44

5.- CLASIFICACIÓN

GRAVA 0
 ARENA 56
 FINOS 44

W_l = -
 W_p = -
 I_p = NP

RESUMEN

SUCS: SM
AASHTO: A-4
IG(86): 2
IG(43): 2

OBSERVACIONES :



ENSAYO DE CLASIFICACIÓN

CLIENTE: Raúl Hidalgo Artieda

OBRA: N.A.I.Q.

UBICACIÓN: Tababela

FECHA: Diciembre 2006

SONDEO: SPT-53

MUESTRA: 2

PROFUND: 2,00-2,45 m

	GOLPES	PES. HUM.	PES. SECO	CÁPSULA	w%	RESULTADOS
1.- CONTENIDO DE AGUA		61,04	57,82	19,82	8,47	
		61,21	57,95	19,71	8,53	8,50

2.- LÍMITE LÍQUIDO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

3.- LÍMITE PLÁSTICO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

4.- GRANULOMETRÍA

PES. INICIAL 111,46 (H/D) H
 PESO INICIAL PARA CÁLCULOS = 102,73

TAMN	PES. RET.	% RETEN.	% PASA
1"	0,00	0	100
3/4"	0,00	0	100
1/2"	0,00	0	100
3/8"	0,00	0	100
No. 4	0,00	0	100
No. 10	0,02	0	100
No. 40	0,76	1	99
No. 200	38,09	37	63

5.- CLASIFICACIÓN

GRAVA 0
 ARENA 37
 FINOS 63

Wl = -
 Wp = -
 Ip = NP

RESUMEN

SUCS: ML
 AASHTO: A-4
 IG(86): 6
 IG(45): 6

OBSERVACIONES:



ENSAYO DE CLASIFICACIÓN

CLIENTE: Raúl Hidalgo Artieda

OBRA: N.A.I.Q.

UBICACIÓN: Tababela

FECHA: Diciembre 2006

SONDEO: SPT-53

MUESTRA: 3

PROFUND: 3,00-3,45 m

	GOLPES	PES. HUM.	PES. SECO	CÁPSULA	w%	RESULTADOS
1.- CONTENIDO DE AGUA		62,74	58,66	20,08	10,58	
		62,98	59,00	20,16	10,25	10,41

2.- LÍMITE LÍQUIDO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

3.- LÍMITE PLÁSTICO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

4.- GRANULOMETRÍA

PES. INICIAL 108,86 (H/D) H
 PESO INICIAL PARA CÁLCULOS = 98,59

TAMIZ	PES. RET.	% RETEN.	% PASA
1"	0,00	0	100
3/4"	0,00	0	100
1/2"	0,00	0	100
3/8"	0,00	0	100
No. 4	0,00	0	100
No. 10	0,02	0	100
No. 40	1,47	1	99
No. 200	36,86	37	63

5.- CLASIFICACIÓN

GRAVA 0
 ARENA 37
 FINOS 63

W_l = -
 W_p = -
 I_p = NP

RESUMEN

SUCS: ML
 AASHTO: A-4
 IG(86): 6
 IG(45): 6

OBSERVACIONES:



ENSAYO DE CLASIFICACIÓN

CLIENTE: Raúl Hidalgo Artieda

OBRA: N.A.I.Q.

UBICACIÓN: Tababela

FECHA: Diciembre 2006

SONDEO: SPT-53

MUESTRA: 4

PROFUND.: 4,00-4,45 m

	GOLPES	PES. HUM.	PES. SECO	CÁPSULA	w%	RESULTADOS
1.- CONTENIDO DE AGUA		62,28	58,78	23,31	9,87	
		63,84	60,11	18,88	9,05	9,46

2.- LÍMITE LÍQUIDO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

3.- LÍMITE PLÁSTICO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

4.- GRANULOMETRÍA

PES. INICIAL 106,37 (H/D) H
 PESO INICIAL PARA CÁLCULOS = 97,18

TAMIZ	PES. RET.	% RETEN.	% PASA
1"	0,00	0	100
3/4"	0,00	0	100
1/2"	0,00	0	100
3/8"	0,00	0	100
No. 4	0,00	0	100
No. 10	0,00	0	100
No. 40	0,96	1	99
No. 200	35,53	37	63

5.- CLASIFICACIÓN

GRAVA 0
 ARENA 37
 FINOS 63

Wl = -
 Wp = -
 Ip = NP

RESUMEN

SUCS: ML
 AASHTO: A-4
 IG(86): 6
 IG(45): 6

OBSERVACIONES:



ENSAYO DE CLASIFICACIÓN

CLIENTE: Raúl Hidalgo Artieda

OBRA: N.A.I.Q.

UBICACIÓN: Tababela

FECHA: Diciembre 2006

SONDEO: SPT-53

MUESTRA: 5

PROFUND.: 5,00-5,45 m

	GOLPES	PES. HUM.	PES. SECO	CÁPSULA	w%	RESULTADOS
1.- CONTENIDO DE AGUA		66,13	61,13	18,62	11,76	
		71,89	66,25	17,69	11,61	11,69

2.- LÍMITE LÍQUIDO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

3.- LÍMITE PLÁSTICO

LA MUESTRA NO ES PLÁSTICA

4.- GRANULOMETRÍA

PES. INICIAL 106,34 (H/D) H
 PESO INICIAL PARA CÁLCULOS = 95,21

TAMIZ	PES. RET.	% RETEN.	% PASA
1"	0,00	0	100
3/4"	0,00	0	100
1/2"	0,00	0	100
3/8"	0,00	0	100
No. 4	0,00	0	100
No. 10	0,25	0	100
No. 40	5,79	6	94
No. 200	37,94	40	60

5.- CLASIFICACIÓN

GRAVA 0
 ARENA 40
 FINOS 60

W_l = -
 W_p = -
 I_p = NP

RESUMEN

SUCS: ML
 AASHTO: A-4
 IG(86): 5
 IG(45): 5

OBSERVACIONES :

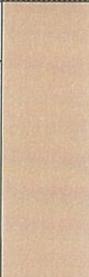
Anexo 3

Perforaciones SPT, perfiles estratigráficos

SPT - 42, Cota 2373,89m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	7	9	11		ML	Limo Arenoso color café claro, seca, de cementación débil, ligera plasticidad, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible.
1.45	20					
2.00	7	11	15		ML	Limo arenoso o arena limosa color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve.
2.45	26					
3.00	7	10	11		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible.
3.45	21					
4.00	11	15	19		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible.
4.45	44					
5.00	11	17	20		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible.
5.45	37					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 49, Cota 2378.94m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	5	8	7		ML	Limo Arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve %45 de arena y 55% de finos.
1.45	15					
2.00	6	8	11		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 38% arena y 62% finos.
2.45	19					
3.00	8	13	19		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 38% arena y 62% finos.
3.45	32					
4.00	11	15	20		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 42% arena y 58% finos.
4.45	35					
5.00	16	19	20		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 37% arena y 63% finos. Presencia de pómez.
5.45	39					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 50, Cota 2373.75m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	6	8	8	[Perfil con fondo de puntos]	SM	Arena Limosa, seca, de cementación débil, poco plástica, compacidad media, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, %50 de arena y 50% de finos.
1.45	16					
2.00	6	7	9	[Perfil con fondo de puntos]	ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 30% arena y 70% finos.
2.45	16					
3.00	7	9	13	[Perfil con fondo de puntos]	ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 10% arena y 90% finos.
3.45	22					
4.00	10	14	20	[Perfil con fondo de puntos]	ML	Limo arenoso o arena limosa color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, 36% arena y 64% finos.
4.45	34					
5.00	8	13	20	[Perfil con fondo de puntos]	ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 36% arena y 64% finos. Poco pómez.
5.45	33					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 51, Cota 2360,47m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	4	5	6		SM	Arena Limosa color café claro, seca, de cementación nula, no plástica, compactad media, %58 de arena y 42% de finos.
1.45	11					
2.00	6	8	10		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación media, no plástico, consistencia muy firme, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, 37% arena y 63% finos.
2.45	18					
3.00	6	9	10		ML	Limo arenoso color café claro, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 34% arena y 66% finos.
3.45	19					
4.00	8	14	16		ML	Limo arenoso color café claro, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 40% arena y 60% finos.
4.45	30					
5.00	17	22	29		ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 39% arena y 61% finos. Presencia de pómez.
5.45	51					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 52, Cota 2379.20m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	6	5	5	[Perfil hachurado]	SM	Arena Limosa color café claro, seca, de cementación débil, poca plástica, compacidad suelta a media, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible %55 de arena y 45% de finos.
1.45	10					
2.00	7	9	11	[Perfil naranja]	ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 39% arena y 61% finos.
2.45	20					
3.00	11	14	16	[Perfil rojo]	ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 39% arena y 61% finos.
3.45	30					
4.00	15	23	20	[Perfil rojo]	ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 34% arena y 66% finos.
4.45	43					
5.00	14	19	19	[Perfil rojo]	ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 42% arena y 58% finos.
5.45	38					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 53, Cota 2374.63m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	5	6	7	[Perfil]	SM	Arena Limosa color café claro, seca, de cementación débil, poco plastica, compacidad media, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, %56 de arena y 44% de finos.
1.45	13					
2.00	5	7	12	[Perfil]	ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 37% arena y 63% finos.
2.45	19					
3.00	8	10	12	[Perfil]	ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 37% arena y 63% finos.
3.45	22					
4.00	10	15	19	[Perfil]	ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 37% arena y 63% finos.
4.45	34					
5.00	15	26	44	[Perfil]	ML	Limo arenoso color café, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca alta, medianamente compresible, 40% arena y 60% finos. Presencia de pómez.
5.45	70					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 54, Cota 2370.43m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	5	6	8	[Perfil: Arena]	SM	Arena Limosa color café claro, seca, de cementación débil, poco plástica, compacidad media, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, %52 de arena y 48% de finos.
1.45	14					
2.00	6	8	9	[Perfil: Limo]	ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 37% arena y 63% finos.
2.45	17					
3.00	8	9	10	[Perfil: Limo]	ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, medianamente compresible, 42% arena y 58% finos.
3.45	19					
4.00	11	15	19	[Perfil: Limo]	ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad leve, resistencia seca media, medianamente compresible, 40% arena y 60% finos.
4.45	34					
5.00	11	21	34	[Perfil: Limo]	ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, de cementación débil, poco plástico, consistencia dura, dilatancia muy lenta, tenacidad media, resistencia seca alta, medianamente compresible, 44% arena y 56% finos. Presencia de pómez.
5.45	55					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 90, Cota 2396,96m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	6	6	8		ML	Limo Arenoso color café claro, seco, no plástico, consistencia firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %43 de arena y 57% de finos.
1.45	14					
2.00	7	12	11		ML	Limo Arenoso color café claro, seco, no plástico, consistencia muy firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %43 de arena y 57% de finos.
2.45	23					
3.00	12	13	22		ML	Limo arenoso color café claro, seco, poco húmedo, consistencia dura, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca leve, 46% arena y 54% finos.
3.45	35					
4.00	14	14	17		ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia dura, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca leve, %43 de arena y 57% de finos.
4.45	31					
5.00	26	23	24		SM	Arena Limosa color café claro, poco húmeda, no plástica, compacidad densa, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %52 de arena y 48% de finos. Presencia de pómez.
5.45	47					
6.00	11	8	11		SM	Arena Limosa color café claro, poco húmeda, no plástica, compacidad media, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %52 de arena y 48% de finos. Presencia de pómez.
6.45	19					
7.00	12	12	12		ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia muy firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca leve, %48 de arena y 52% de finos.
7.45	24					
8.00	13	18	23		ML	Arena Limosa color café oscuro, poco húmeda, no plástica, compacidad densa, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %43 de arena y 57% de finos. Presencia de pómez.
8.45	41					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 91, Cota 2395,43m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	5	6	8		ML	Limo arenoso color café claro amarillento, seco, de cementación débil, plasticidad ligera, consistencia firme, baja compresibilidad, 46% arena y 54% finos.
1.45	14					
2.00	5	5	9		ML	Limo arenoso color café claro amarillento, seco, de cementación débil, plasticidad ligera, consistencia firme, baja compresibilidad, 37% arena y 63% finos.
2.45	14					
3.00	10	10	9		ML	Limo arenoso color café claro amarillento, seco, de cementación débil, plasticidad ligera, consistencia muy firme, baja compresibilidad, 46% arena y 54% finos.
3.45	19					
4.00	8	15	11		ML	Limo arenoso color café claro, seco, de cementación débil, plasticidad ligera, consistencia muy firme, baja compresibilidad, 47% arena y 53% finos. Presencia de terrones del mismo material.
4.45	26					
5.00	27	31	30		SM	Arena Limosa color café, poco húmeda, de cementación débil, plasticidad ligera, compacidad muy densa dura, 58% arena y 41% finos. Presencia de partículas de pómez.
5.45	61					
6.00	13	13	11		SM	Arena Limosa color café oscuro, poco húmeda, de cementación nula, plasticidad ligera, compacidad media, 66% arena y 34% finos. Arena de grano grueso.
6.45	24					
7.00	8	9	9		SM	Arena Limosa color café oscuro, poco húmeda, de cementación débil, plasticidad ligera, compacidad media, 51% arena y 49% finos. Arena de grano grueso.
7.45	18					

SPT - 91, Cota 2395,43m, NAIQ						
8.00	8	10	13		ML	Limo arenoso color café oscuro, poco húmedo, de cementación débil, plasticidad ligera, consistencia muy firme, baja compresibilidad, 48% arena y 52% finos.
	23					
8.45						
9.00	13	16	20		SM	Arena limosa color café claro, poco húmeda, de cementación débil, plasticidad ligera, compacidad densa, baja compresibilidad, 54% arena y 46% finos.
	36					
9.45						
10.00	11	12	13		ML	Limo Arenoso color café claro amarillento, poco húmedo, de cementación débil, plasticidad ligera, consistencia muy firme, baja compresibilidad, 39% arena y 61% finos.
	25					
10.45						
FIN DEL SONDEO						

SPT - 92, Cota 2390,58m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	6	10	11	[Perfil con fondo de arena]	SM	Arena Limosa color café claro, poco húmeda, no plástica, compacidad media, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %55 de arena y 45% de finos. Presencia de raíces.
1.45	21					
2.00	7	9	8	[Perfil con fondo de limo]	ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia muy firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %34 de arena y 66% de finos.
2.45	17					
3.00	7	5	6	[Perfil con fondo de limo]	ML	POCA MUESTRA
3.45	11					
4.00	13	12	14	[Perfil con fondo de limo]	ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia muy firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca leve, %43 de arena y 57% de finos.
4.45	26					
5.00	18	28	22	[Perfil con fondo de limo]	ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia dura, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %42 de arena y 58% de finos. Presencia de pómez.
5.45	50					
6.00	16	15	14	[Perfil con fondo de arena]	SM	Arena Limosa color café claro, poco húmeda, no plástica, compacidad media, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula, %74 de arena y 26% de finos. Presencia de pómez.
6.45	29					
7.00	8	6	8	[Perfil con fondo de limo]	ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca leve, %48 de arena y 52% de finos.
7.45	14					
8.00	16	19	21	[Perfil con fondo de limo]	ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia muy firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca leve, %40 de arena y 60% de finos.
8.45	40					
FIN DEL SONDEO						

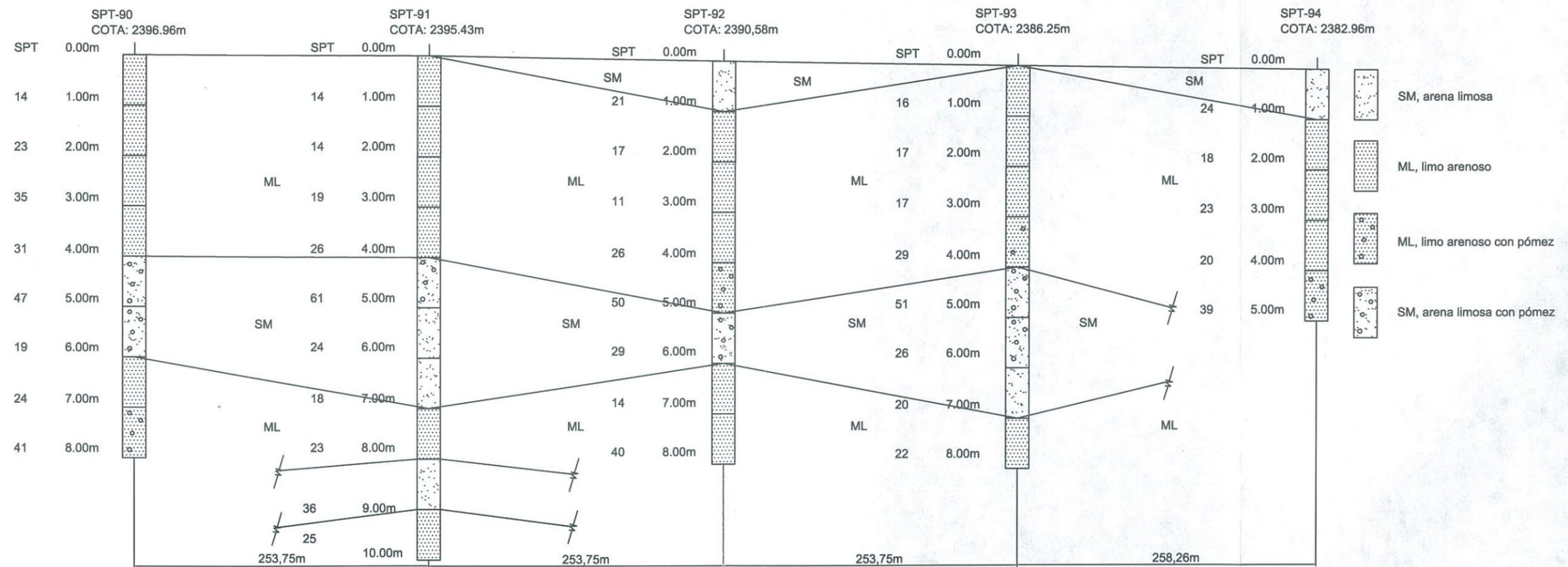
SPT - 93, Cota 2386,25m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	5	6	10		ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, no plástica, de cementación débil, consistencia muy firme, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, baja compresibilidad, %42 de arena y 58% de finos.
1.45	16					
2.00	8	8	9		ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, no plástica, de cementación débil, consistencia muy firme, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, baja compresibilidad, %39 de arena y 61% de finos.
2.45	17					
3.00	10	8	9		ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, no plástica, de cementación débil, consistencia muy firme, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, baja compresibilidad, %48 de arena y 52% de finos.
3.45	17					
4.00	13	13	16		ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, no plástica, de cementación débil, consistencia muy firme, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, baja compresibilidad, %41 de arena y 59% de finos. Presencia mínima de pómez.
4.45	29					
5.00	20	27	24		SM	Arena Limosa color café, poco húmeda, no plástica, de cementación débil, compacidad muy densa, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, %52 de arena y 48% de finos. Presencia de pómez.
5.45	51					
6.00	14	14	12		SM	Arena Limosa color café claro, poco húmedo, no plástica, de cementación nula, compacidad media, dilatancia rápida, %60 de arena y 40% de finos. Presencia de pómez.
6.45	26					
7.00	8	10	10		SM	Arena Limosa color café, poco húmeda, no plástica, de cementación débil, compacidad media, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, %74 de arena y 26% de finos.
7.45	20					
8.00	11	11	11		ML	Limo arenoso color café, poco húmedo, no plástica, de cementación débil, consistencia muy firme, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, %50 de arena y 50% de finos.
8.45	22					
FIN DEL SONDEO						

SPT - 94, Cota 2382,96m, NAIQ						
Profundidad (m)	N Golpes			Perfil	Clasificación	Descripción
	15	30	45			
1.00	10	11	13	[Perfil de arena]	SM	Arena limosa color café claro, seca, no plastica, compacidad media, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula. %57% arena y 43% finos.
1.45	24					
2.00	7	8	10	[Perfil de limo]	ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plastico, consistencia muy firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca leve. 40% arena y 60% finos.
2.45	18					
3.00	9	10	13	[Perfil de limo]	ML	Limo arenoso color café claro, poco húmedo, poco plástico, consistencia muy firme, dilatancia lenta, tenacidad leve, resistencia seca leve, poco compresible, 43% arena y 57% finos.
3.45	23					
4.00	12	11	9	[Perfil de limo]	ML	Limo arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia muy firme, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca leve, 48% arena y 52% finos.
4.45	20					
5.00	13	16	23	[Perfil de limo]	ML	Limo Arenoso color café claro, poco húmedo, no plástico, consistencia dura, dilatancia rápida, tenacidad nula, resistencia seca nula. 70% arena y 30% finos. Presencia de pómez.
5.45	39					
FIN DEL SONDEO						

Anexo 4

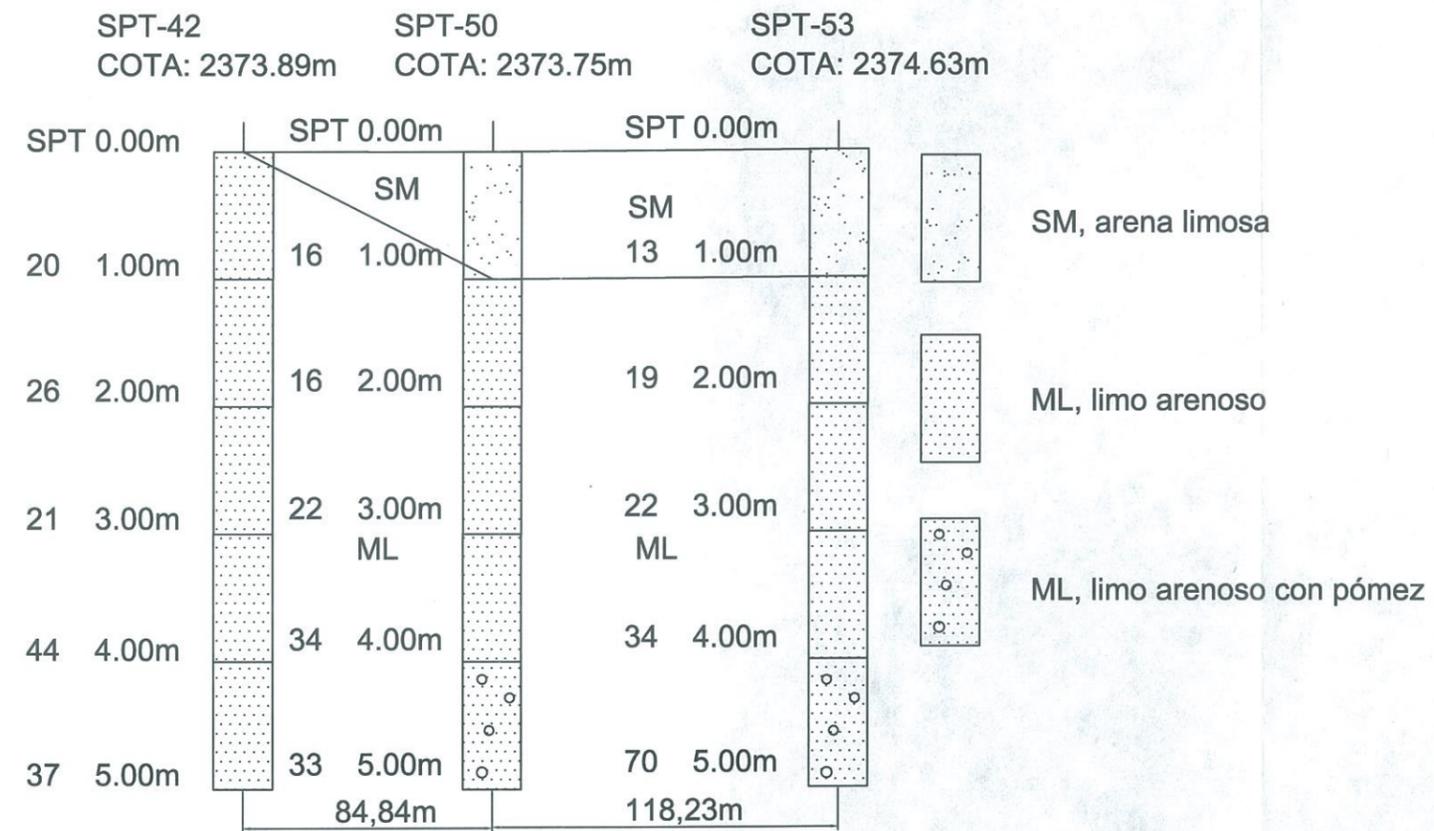
Planos de perfiles estratigráficos

PREFIL ESTRATIGRÁFICO ÁREA DE PRÉSTAMO



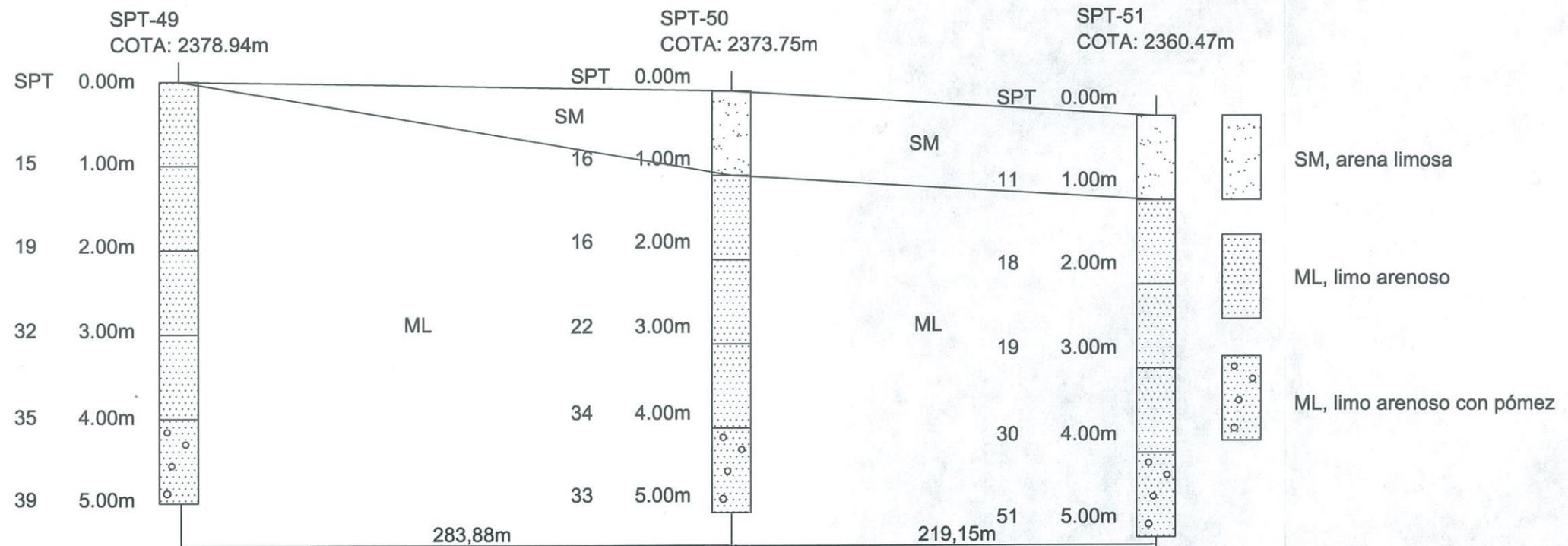
CORTE A-A'

PREFIL ESTRATIGRÁFICO ZONA DE RELLENO (Parqueadero NAIQ)



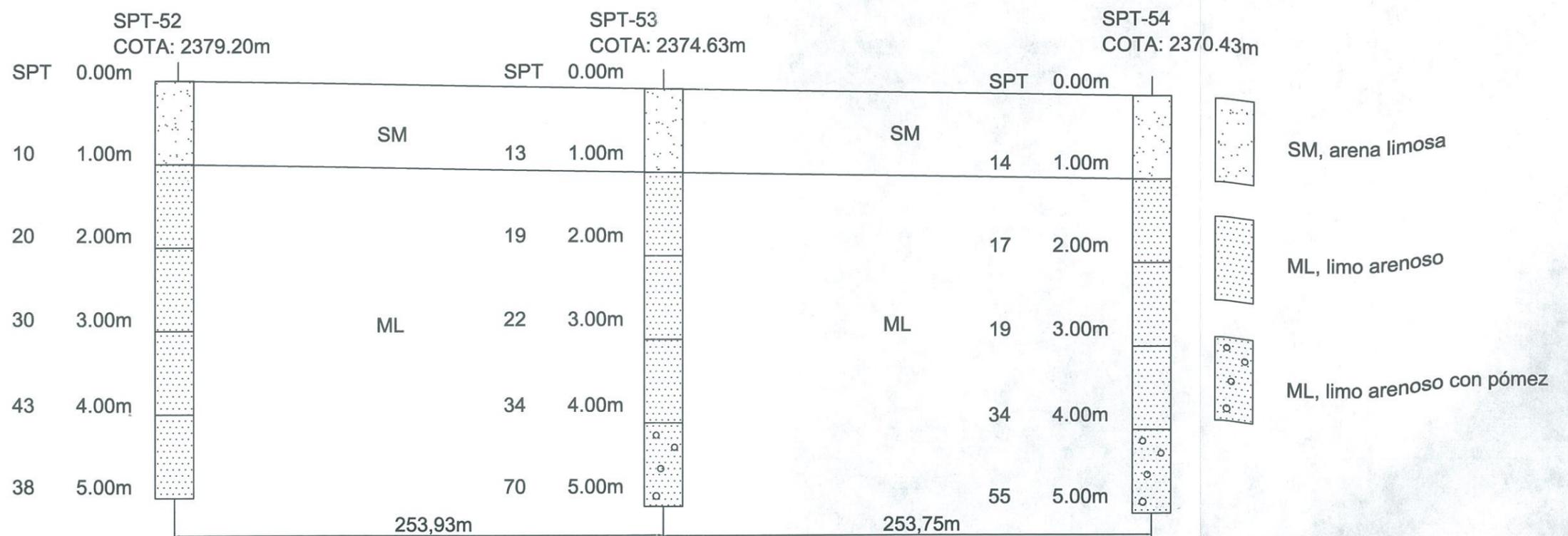
CORTE A-A'

PREFIL ESTRATIGRÁFICO ZONA DE RELLENO (Parqueadero NAIQ)



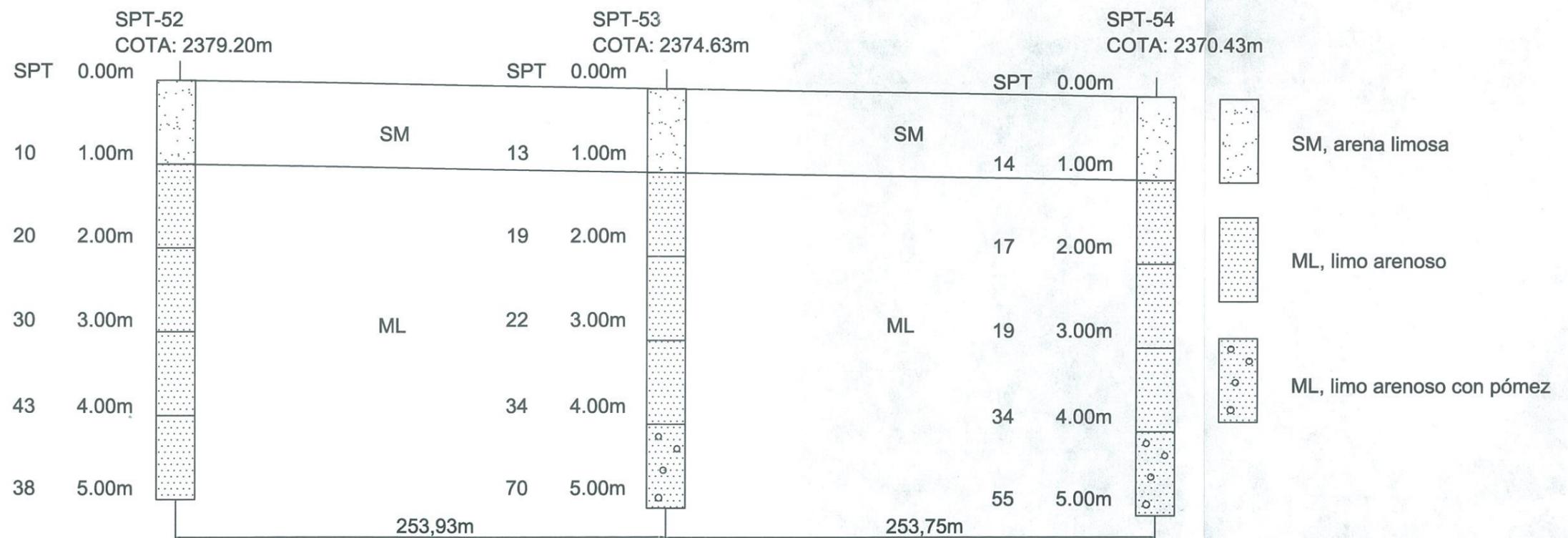
CORTE B-B'

PREFIL ESTRATIGRÁFICO ZONA DE RELLENO (Parqueadero NAIQ)



CORTE C-C'

PREFIL ESTRATIGRÁFICO ZONA DE RELLENO (Parqueadero NAIQ)



Anexo 5

Ejemplos de hojas de cálculo y formatos para ensayos

ENSAYO HILF-PROCTOR

Fecha:

Proyecto:

Ubicación:

DATOS DEL ENSAYO

Descripción:

Ubicación:

Diámetro del Molde (mm):

(1) Volumen del Molde (cm³):

(2) Peso del Molde (g) :

Peso del Martillo (Kg):

Altura de Caída del Martillo (mm):

Número de Golpes:

Número de Capas:

* Cono y Arena

RESULTADOS

(11) γ_{uc} máx (gráfico):	g/cm³
(12) γ_{campo}^* :	g/cm³
(14) Z_m (%) (gráfico):	%
(13) $= (12)/(11)$ GC%:	%
(15) D (ábaco):	%
(16) $= -((14)+(15))$ Dh:	%

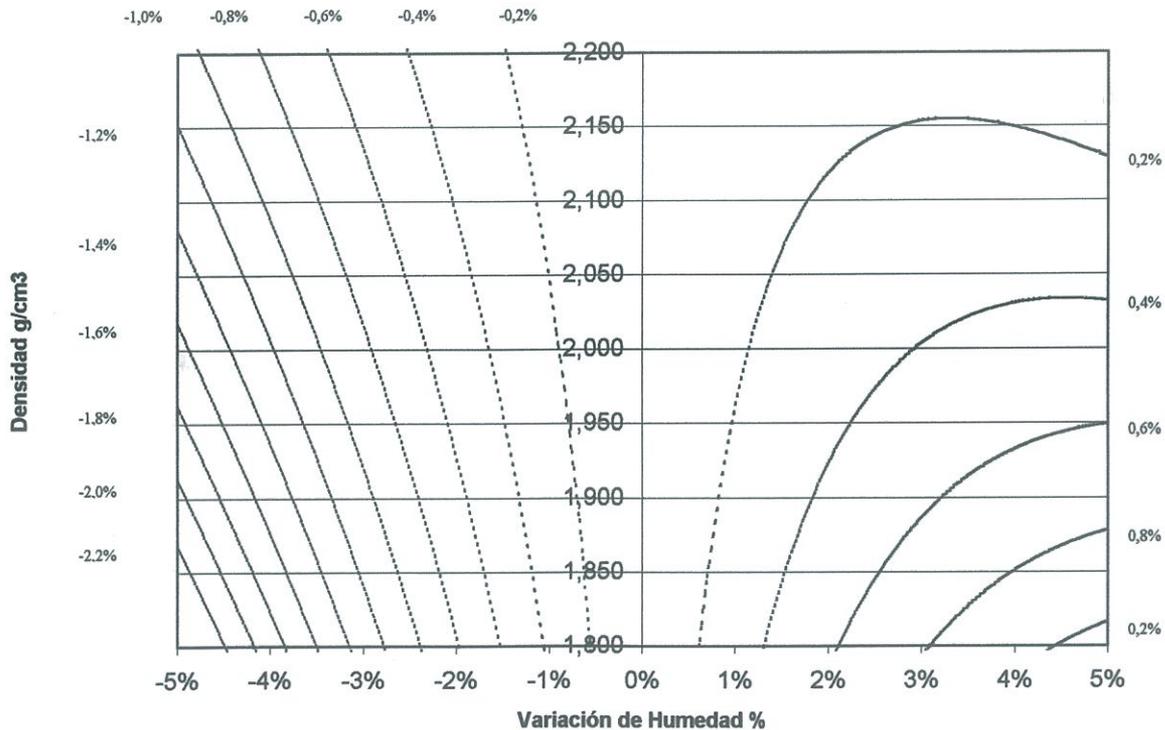
DATOS DE LAS MUESTRAS

Punto:	1	2	3	4
(3) Masa Inicial M_u (g):				
(4) Diferencia de Agua M_a (g):				
(5) $= (3) + (4)$ Masa Final M_o :				

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

(6) Peso Suelo+Molde (g):				
(7) $= (6) - (2)$ Peso Suelo Compactado M_h (g):				
(8) $= (7) / (1)$ Densidad Aparente γ_u (g/cm³):				
(9) $= (4) / (3)$ Parámetro Δ de Humedad z (%):				
(10) $= ((8)/1+(9))$ $\gamma_{aparente\ conv.}$ γ_{uc} (g/cm³):				

Curva de Compactación Hilf



ENSAYO HILF-PROCTOR

Fecha: 28/09/2006

Proyecto: Tesis de Grado: "Compactación en Suelos Volcánicos del Sector del NAIQ"
 Ubicación: Tababela - Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito

DATOS DEL ENSAYO

Descripción: S1FG19 P19-1
 Ubicación: Centro
 Diámetro del Molde (mm): 102
 Volumen del Molde (cm³): 942,2
 Peso del Molde (g): 4228
 Peso del Martillo (Kg): 4,536
 Altura de Caída del Martillo (mm): 45,72
 Número de Golpes: 25
 Número de Capas: 5

RESULTADOS	
yuc máx:	2,043 g/cm³
ycampo :	1,989 g/cm³
Zm (%):	-1,1 %
% Compactación:	97,39 %
Dh:	1,32 %
D:	-0,22 %

DATOS DE LAS MUESTRAS

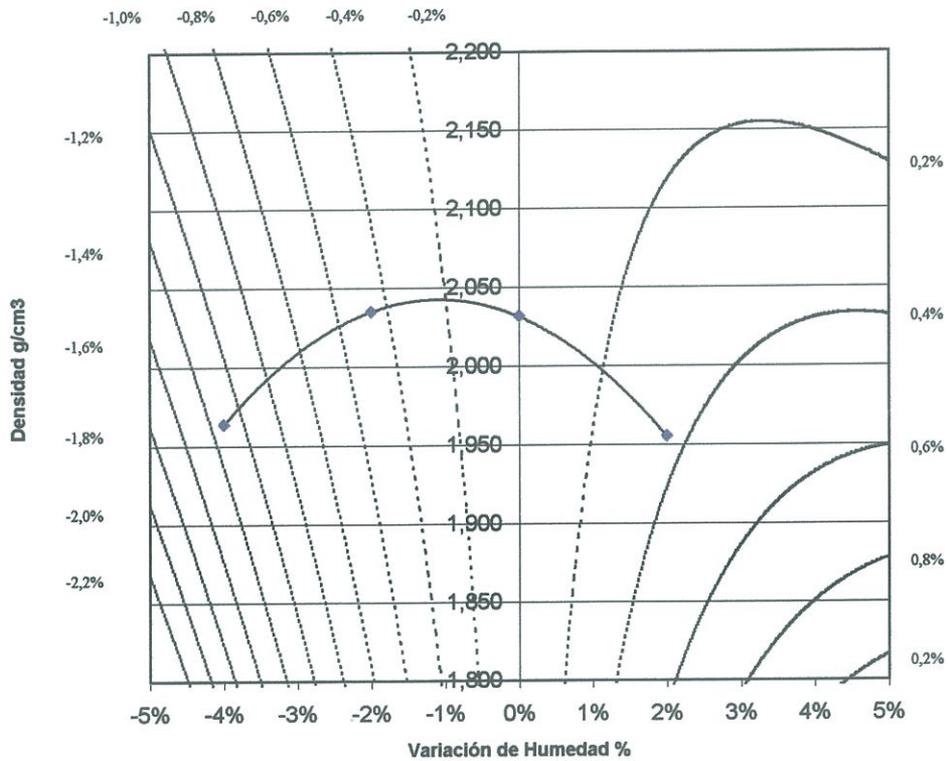
Punto:	1	2	3	4
Masa Inicial Mu (g):	2500	2500	2500	2500
Diferencia de Agua Ma (g):	0	50	-50	-100
Masa Final Mo:	2500,00	2550,00	2450,00	2400,00

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

Peso Suelo+Molde (g):	6142	6107	6107	6004
Peso Suelo Compactado Mh (g):	1914,00	1879,00	1879,00	1776,00
Densidad Aparente yu (g/cm³):	2,031	1,994	1,994	1,885

Parámetro Δ de Humedad z (%):	0,00%	2,00%	-2,00%	-4,00%
yaparente conv. yuc (g/cm³):	2,031	1,955	2,035	1,963

Curva de Compactación Hilf



DENSIDAD DE CAMPO (CONO Y ARENA)

Fecha:

Proyecto:

Ubicación:

DATOS DEL ENSAYO

Capa:

Ubicación:

Número de pasadas:

Diámetro del Cono:

Volumen del Cono:

Espesor de la capa:

Tipo de Rodillo:

Profundidad del hueco:

ENSAYO

Profundidad (cm):		
(1) Peso Arena + Frasco (Antes) (g):		
(2) Peso Arena + Frasco (Después) (g):		
(3)=(1)-(2) Peso Arena en Cavidad y Cono (g):		
(4) Peso de Arena en el Cono (Dato) (g):		
(5)=(3)-(4) Peso Arena en la Cavidad (g):		
(6) Peso Volumétrico Arena (g/cm³):		
(7)=(5)/(6) Volúmen de la Cavidad (cm³):		
(8) Peso Suelo Húmedo + Tara (g):		
(9) Peso Tara (g):		
(10)=(8)-(9) Peso Suelo Húmedo (g):		
(11)=(10)/(7) DENSIDAD HÚMEDA (g/cm³):		

CÁLCULO DE HUMEDADES

(12) Peso Suelo Húmedo + Cápsula (g):			
(13) Peso Suelo Seco + Cápsula (g):			
(14) Peso Cápsula (g):			
(15)= (((12)-(13))/((13)-(14))) *100 Humedades (%):			
(16) Promedio Humedades (%):			
(17)=(11)/(1+((15)/100)) DENSIDAD SECA (g/cm³):			

PROPIEDADES DE COMPACTACIÓN

(18) Densidad Seca Máxima (Proctor Modificado) (g/cm³):		
(19) Humedad Óptima (%):		
(20)=(17)/(18) Grado de Compactación (%):		
(21)=(19)-(16) Desvío de Humedad (%):		

DENSIDAD DE CAMPO (CONO Y ARENA)

Fecha: 28/09/2006

Proyecto: Tesis de Grado: "Compactación en Suelos Volcánicos del Sector del NAIQ"
 Ubicación: Tababela - Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito

DATOS DEL ENSAYO

Capa: S1FG19 P19-1
 Ubicación: Centro
 Número de pasadas: 8
 Diámetro del Cono:
 Volumen del Cono:
 Espesor de la capa:
 Tipo de Rodillo: 16 ton
 Profundidad del hueco: 10

ENSAYO		
Profundidad (cm):	0	7
Peso Arena + Frasco (Antes) (g):	4661,00	4875,00
Peso Arena + Frasco (Después) (g):	1737,00	2017,00
Peso Arena en Cavidad y Cono (g):	2924,00	2858,00
Peso de Arena en el Cono (Dato) (g):	1592,00	1592,00
Peso Arena en la Cavidad (g):	1332,00	1266,00
Peso Volumétrico Arena (g/cm³):	1,502	1,502
Volúmen de la Cavidad (cm³):	886,82	842,88
Peso Suelo Húmedo + Tara (g):	1769,00	1674,00
Peso Tara (g):	1	1
Peso Suelo Húmedo (g):	1768,00	1673,00
DENSIDAD HÚMEDA (g/cm³):	1,994	1,985

CÁLCULO DE HUMEDADES				
Peso Suelo Húmedo + Cápsula (g):	301,16	303,98	262,09	243,55
Peso Suelo Seco + Cápsula (g):	272,72	274,58	238,72	222,44
Peso Cápsula (g):	89,45	89,05	90,28	87,65
Humedades (%):	15,52	15,85	15,74	15,66
Promedio Humedades (%):	15,69		15,70	
DENSIDAD SECA (g/cm³):	1,723		1,716	

PROPIEDADES DE COMPACTACIÓN		
Densidad Seca Máxima (Proctor Modificado) (g/cm³):	1,776	1,776
Humedad Óptima (%):	13,78	13,78
Grado de Compactación (%):	97,03	96,60
Desvío de Humedad (%):	1,91	1,92

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR

Fecha:

Proyecto:

Ubicación:

DATOS DEL ENSAYO

Descripción:

Ubicación:

Gravedad Específica:

Diámetro del Molde (mm):

(1) Volumen del Molde (cm³):

(2) Peso del Molde (g):

Peso del Martillo (Kg):

Altura de Caída del Martillo (mm):

Número de Golpes:

Número de Capas:

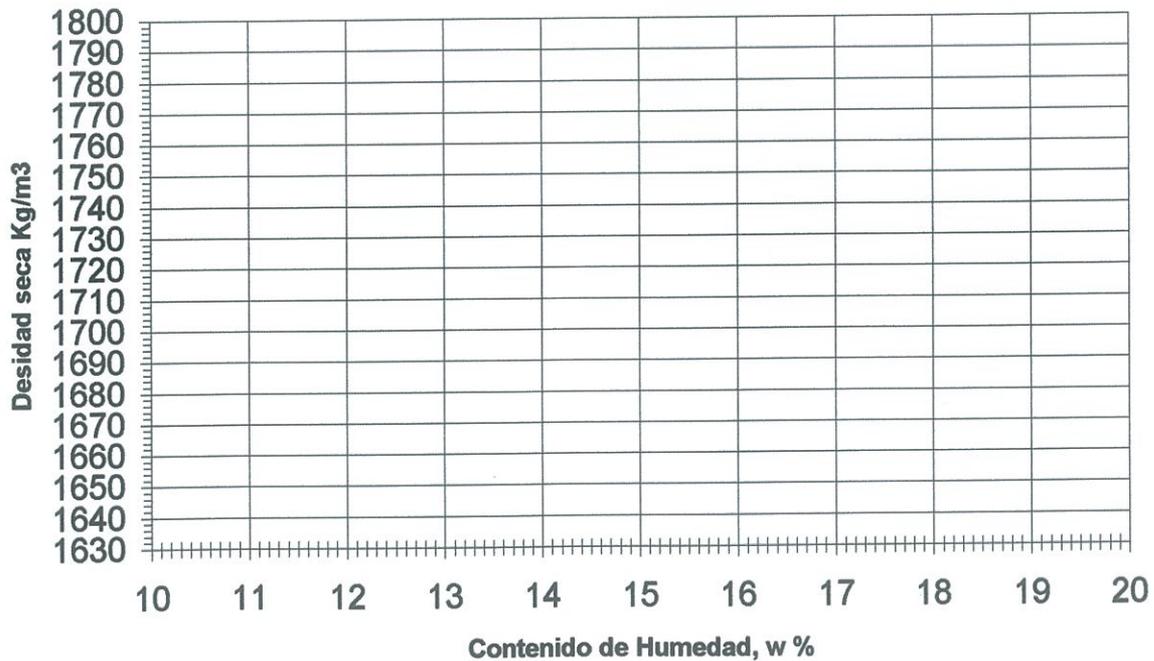
RESULTADOS

γ seco máx: Kg/m³
% w óptimo: %

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

Punto:	1	2	3	4	5
(3)Suelo Compactado+molde(g):					
Número deTarro:					
(4) Peso húmedo+tarro (g):					
(5) Peso seco+tarro (g):					
(6) Peso tarro (g):					
(7)= ((4)-(5))/((5)-(6))) *100 w(%):					
(8) Promedio w(%):					
(9)=((3)-(2))/(1) Densidad Húmeda(kg/m³):					
(10)=(9)/(1+((8)/100)) Densidad Seca(Kg/m³):					

Curva de Compactación



ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR

Fecha: 28/09/2006

Proyecto: Tesis de Grado: "Compactación en Suelos Volcánicos del Sector del NAIQ"
 Ubicación: Tababela - Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito

DATOS DEL ENSAYO

Descripción: S1FG19 P19-1

Ubicación: Centro

Gravedad Específica: 2,55

Diámetro del Molde (mm): 102

Volumen del Molde (cm³): 942,2

Peso del Molde (g): 4228

Peso del Martillo (Kg): 4,536

Altura de Caída del Martillo (mm): 45,72

Número de Golpes: 25

Número de Capas: 5

RESULTADOS

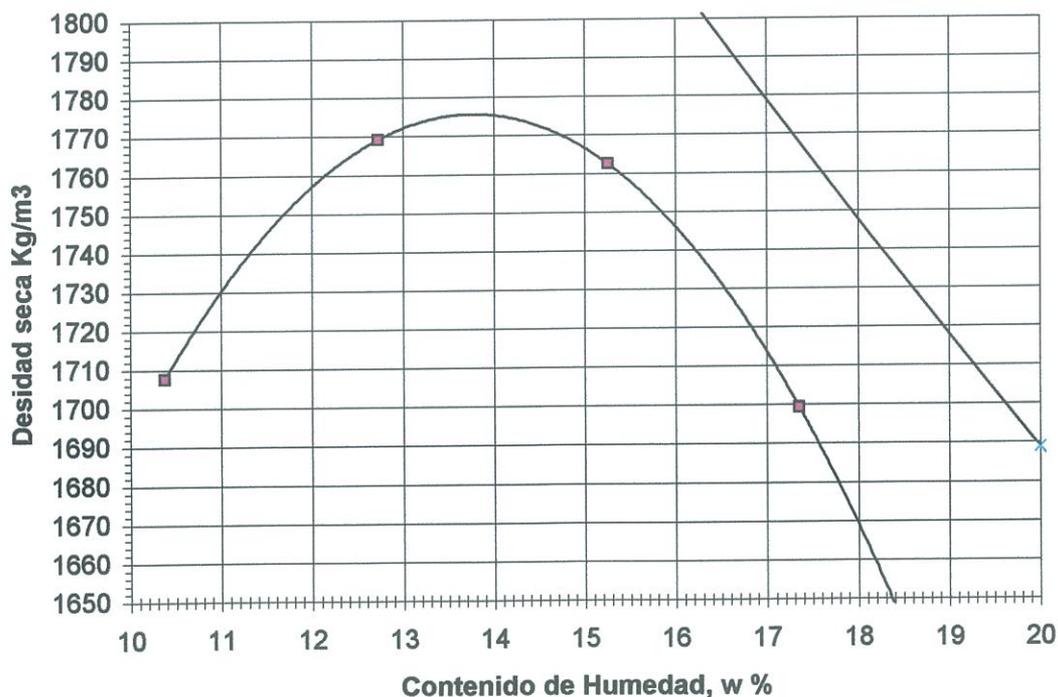
γ seco máx: 1775,6 Kg/m³

% w óptimo: 13,78 %

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

Punto:	1	2	3	4	5					
Suelo Compactado (g):	6142	6107	6107	6004						
Número de Tarro:										
Peso húmedo+tarro (g):	81,17	83,39	81,82	83,35	83,64	86,81	81,45	81,44		
Peso seco+tarro (g):	72,99	74,76	72,58	73,70	76,23	79,07	75,46	75,48		
Peso tarro (g):	19,30	18,25	19,14	18,28	17,96	18,27	17,62	18,15		
Humedad w(%):	15,24	15,27	17,29	17,41	12,72	12,73	10,36	10,40	#DIV/0!	#DIV/0!
Promedio w(%):	15,25	17,35	12,72	10,38	#DIV/0!					
Densidad Húmeda(kg/m³):	2031,42	1994,27	1994,27	1884,95	-4487,37					
Densidad Seca(Kg/m³):	1762,56	1699,40	1769,17	1707,75	#DIV/0!					

Curva de Compactación



ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR

Fecha: 28/09/2006

Proyecto: Tesis de Grado: "Compactación en Suelos Volcánicos del Sector del NAIQ"
 Ubicación: Tababela - Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito

DATOS DEL ENSAYO

Descripción: S1FG19 P19-1
 Descripción: Centro
 Gravedad Específica: 2,55
 Diámetro del Molde (mm): 102
 Volumen del Molde (cm³): 942,2
 Peso del Molde (g): 4228
 Peso del Martillo (Kg): 4,536
 Altura de Caída del Martillo (mm): 45,72
 Número de Golpes: 25
 Número de Capas: 5

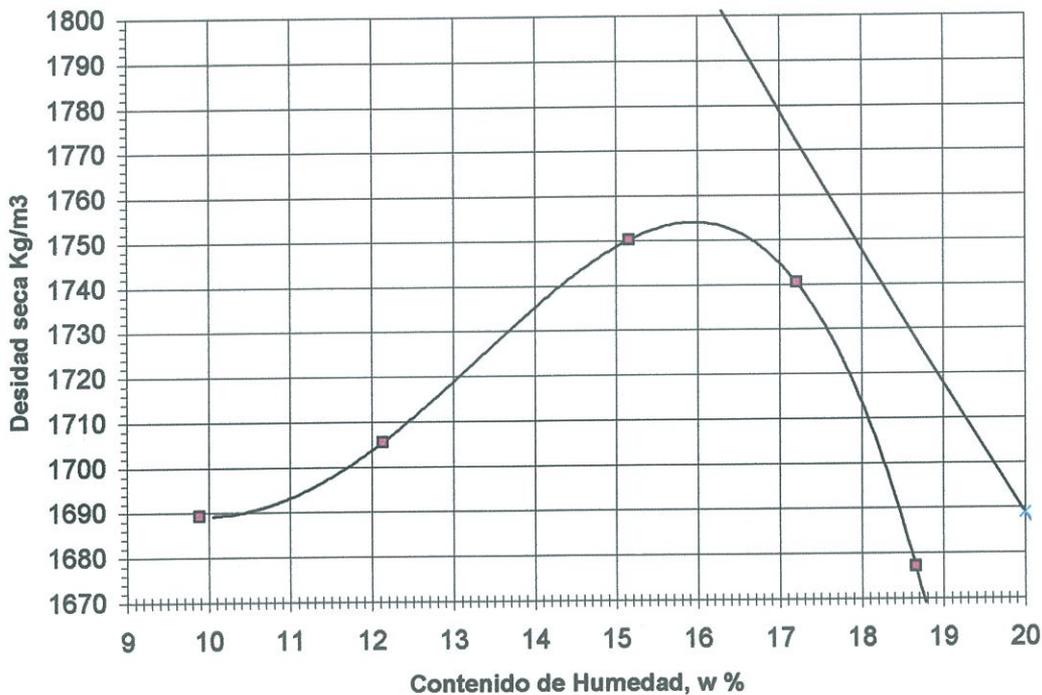
RESULTADOS

γ seco máx: 1754 Kg/m³
% w óptimo: 14,5 %

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

Punto:	1		2		3		4		5	
Suelo Compactado (g):	6.127		6.150		6.103		6.030		5.977	
Número de Tarro:										
Peso húmedo+tarro (g):	191,20	221,47	188,53	186,20	232,19	255,88	206,27	248,97	212,04	226,93
Peso seco+tarro (g):	177,81	203,67	173,75	171,70	209,99	229,48	193,88	231,48	201,05	214,39
Peso tarro (g):	87,66	88,54	87,39	87,87	89,74	89,46	90,29	89,41	88,10	89,52
Humedad w(%):	14,85	15,46	17,11	17,30	18,46	18,85	11,96	12,31	9,73	10,04
Promedio w(%):	15,16		17,21		18,66		12,14		9,89	
Densidad Húmeda(kg/m³):	2015,50		2039,91		1990,02		1912,55		1856,29	
Densidad Seca(Kg/m³):	1750,22		1740,45		1677,11		1705,56		1689,29	

Curva de Compactación



DENSIDAD DE CAMPO (METODO NUCLEAR)

Fecha:

Proyecto:

Ubicación:

DATOS DEL ENSAYO

Capa:

Ubicación:

Densímetro

Densímetro

Modelo:

Serie:

Espesor de Capa (m):

Número de Pasadas:

Tipo de Rodillo

DATOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo de Compactación:

Densidad Seca Máxima (kg/m³):

Humedad Óptima (%):

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

PUNTO	Profundidad (cm)	Descripción	γ seca (Kg/m³)	% Compactación	Húmedad (%)
1					
Ubicación:					
Promedios:					
2					
Ubicación:					
Promedios:					
3					
Ubicación:					
Promedios:					
4					
Ubicación:					
Promedios:					

DENSIDAD DE CAMPO (METODO NUCLEAR)

Fecha: 28/09/2006

Proyecto: Tesis de Grado: "Compactación en Suelos Volcánicos del Sector del NAIQ"

Ubicación: Tababela - Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito

DATOS DEL ENSAYO

Capa: S1FG19 P19-1
Ubicación: Norte
Densímetro Nuclear
Densímetro TROXLER
Modelo: 3430
Serie: 24208
Espesor de Capa (m): 0,176
Número de Pasadas: 8
Tipo de Rodillo Liso 16 Ton.

DATOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo de Compactación: Proctor Modificado
Densidad Seca Máxima (kg/m³): 1714,00
Humedad Óptima (%): 16,18

DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

PUNTO	Profundidad (cm)	Descripción	γ seca (Kg/m ³)	% Compactación	Humedad (%)
1	15	Limo Arenoso	1685	98,3	14,5
			1658	96,7	15,1
Ubicación:	Norte		1681	98,1	14,5
		Promedios:	1675	97,70	14,70
2		Limo Arenoso	1653	96,5	13,8
			1667	97,2	14,2
Ubicación:	Norte Junta		1647	96,1	14,1
		Promedios:	1656	96,60	14,03
3		Limo Arenoso	1647	96,1	17,3
			1684	98,2	17,1
Ubicación:	Centro		1672	97,5	17,4
		Promedios:	1668	97,27	17,27
4		Limo Arenoso	1648	96,10	15
			1639	95,6	16
Ubicación:	Centro Junta		1639	95,60	15,8
		Promedios:	1642	95,77	15,60

Anexo 6

Resultados obtenidos en los ensayos

RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS													
Tesis: Compactación de Suelos Volcánicos del Sector del NAIQ													
CAPA	PROCTOR		HILF		CONO Y ARENA								
	ys (kg/m ³)	wop(%)	GC(%)	Dh(%)	0 cm				7cm				
					ys (g/cm ³)	w(%)	GC(%)	Dh(%)	ys (g/cm ³)	w(%)	GC(%)	Dh	
31 julio-4 agosto													
S1FG1 P18-8 s	1743	14,84	97,08	0,41	1,679	15,78	96,31	0,94	1,702	15,30	97,66	0,46	
S1FG1 P22-6 s	1728	15,42	97,63	-1,48	1,701	13,60	98,43	-1,83	1,662	14,70	96,18	-0,72	
S1FG1 P23-6 n	1722	16,44	98,40	0,34	1,656	17,62	96,13	1,18	1,715	17,33	99,57	0,88	
S1FG1 P23-7 n	1719	16,78	95,74	1,56	1,651	17,67	96,06	0,89	1,651	17,76	96,02	0,97	
S1FG1 P24-7 c	1722	15,82	96,48	0,65	1,655	17,02	96,14	1,20	1,654	16,93	96,07	1,11	
S1FG1 P27-6 s	1729	16,12	98,13	0,92	1,694	17,25	97,99	1,13	1,688	17,15	97,66	1,03	
S1FG1 P27-7 c	1744	15,28	96,48	1,46	1,662	17,18	95,32	1,90	1,673	17,71	95,92	2,43	
S1FG2 P22-7 c	1722	15,98	96,80	-0,38	1,671	16,10	97,04	0,11	1,653	16,65	95,96	0,67	
S1FG2P27-8 n	1713	14,94	97,38	1,11	1,646	16,39	96,09	1,45	1,675	16,76	97,75	1,82	
S1FG2 P18-7 n	1713	15,98	96,07	2,07	1,661	17,31	96,99	1,33	1,656	16,40	96,71	0,42	
7 agosto-11 ago													
S1FG1 P17-8 c	1760	13,70	96,22	0,07	1,694	13,77	96,29	0,07	1,690	14,09	96,04	0,39	
S1FG1 P28-8 n	1750	14,54	97,18	1,11	1,686	16,38	96,31	1,84	1,687	16,48	96,40	1,94	
S1FG2 P17-9 s	1730	15,18	96,45	1,69	1,662	17,09	96,11	1,91	1,660	17,07	95,96	1,89	
S1FG1 P25-8 s	1766	14,86	95,43	1,66	1,679	16,02	95,08	1,16	1,695	16,41	95,98	1,55	
S1FG2 P18-9 s	1748	15,38	95,25	2,07	1,681	16,19	96,15	0,81	1,668	16,35	95,41	0,97	
S1FG2 P20-9 c	1758	15,76	95,94	0,26	1,686	16,04	95,90	0,28	1,695	15,64	96,40	-0,13	
S1FG2 P21-9 n	1780	16,42	96,20	1,18	1,702	15,01	95,59	-1,41	1,703	15,79	95,68	-0,64	
S1FG2 P24-9 s	1719	16,68	95,75	1,43	1,662	17,28	96,70	0,60	1,640	17,97	95,41	1,29	
14 al 18 agosto													
S1FG1 P19-10 c	1760	15,74	97,09	0,07	1,702	16,39	96,74	0,65	1,689	16,95	96,00	1,21	
S1FG1 P23-9 s	1715	15,36	96,92	0,54	1,651	15,98	96,27	0,62	1,669	16,27	97,30	0,91	
S1FG1 P20-10 c	1765	16,28	97,31	-1,94	1,707	14,80	96,74	-1,48	1,694	16,06	95,96	-0,22	
S1FG1 P22-9 n	1740	15,98	95,38	-0,47	1,669	14,32	95,95	-1,67	1,673	15,61	96,15	-0,38	
S1FG1 P23-10 c	1765	16,00	96,79	-0,07	1,721	16,48	97,48	0,48	1,678	17,28	95,06	1,28	
S1FG1 P24-10 s	1776	14,58	96,10	1,88	1,715	15,42	96,55	0,84	1,698	16,54	95,57	1,96	
S1FG1 P28-9 c	1719	16,46	96,95	0,39	1,665	16,49	96,87	0,02	1,675	16,63	97,46	0,16	
S1FG2 P18-10 n	1710	15,68	96,39	0,32	1,636	16,66	95,65	0,98	1,641	17,04	95,94	1,36	
S1FG2 P21-11 c	1731	16,82	96,41	-1,92	1,664	15,03	96,14	-1,80	1,665	15,29	96,16	-1,53	
S1FG2 P23-10 c	1719	14,76	96,68	1,55	1,650	16,60	96,00	1,84	1,665	16,64	96,83	1,88	
21 al 25 agosto													
S1FG1 P22-11 c	1733	16,32	97,65	-1,25	1,649	15,79	95,16	-0,53	1,690	17,34	97,52	1,02	
S1FG1 P27-11 s	1771	15,50	96,87	-1,31	1,686	14,19	95,19	-1,32	1,729	14,85	97,63	-0,65	
S1FG1 P28-11 c	1778	15,16	96,58	0,33	1,690	15,92	95,02	0,76	1,718	16,48	96,60	1,32	
S1FG2 P24-11 c	1766	15,90	97,25	-1,22	1,678	15,61	95,03	-0,29	1,703	16,35	96,41	0,45	

28 agosto-1 sept												
S1FG1 P19-12 s	1794	13,62	97,11	2,15	1,729	15,63	96,39	2,01	1,744	15,80	97,24	2,18
S1FG1 P22-12 n	1803	14,30	98,79	-1,09	1,757	13,64	97,41	-0,66	1,763	15,25	97,76	0,95
S1FG2 P18-12 c	1803	14,28	97,37	-1,73	1,747	12,47	96,88	-1,82	1,748	13,64	96,96	-0,64
S1FG2 P19-12 c	1782	13,94	96,77	1,27	1,703	15,93	95,57	1,99	1,724	15,77	96,76	1,83
S1FG2 P25-12 n	1795	14,26	97,90	-0,05	1,740	14,89	96,96	0,63	1,746	16,23	97,29	1,97
S1FG8 P5-1 n	1753	14,48	96,44	-0,52	1,710	13,62	97,55	-0,86	1,680	14,42	95,84	-0,06
S1FG8 P7-1 n	*	*	98,24	-0,74	1,695	14,38	*	*	1,703	15,90	*	*
4 al 8 de sept												
S1FG1 P12-14 c	1769	14,44	96,91	2,21	1,703	16,93	96,31	2,49	1,692	17,17	95,68	2,73
S1FG1 P1-14 n	1774	15,60	96,66	0,31	1,700	16,59	95,88	0,99	1,699	17,36	95,80	1,76
S1FG1 P16-14 s	1769	16,18	96,40	-2,28	1,716	13,15	97,02	-3,04	1,701	13,80	96,18	-2,38
S1FG1 P21-13 c	1776	15,12	96,64	0,31	1,696	16,54	95,53	1,42	1,702	16,78	95,86	1,66
S1FG1 P23-12 s	1793	14,46	95,85	1,86	1,723	16,32	96,06	1,86	1,710	16,67	95,34	2,21
S1FG1 P26-13 c	1770	15,56	99,25	0,57	1,721	16,85	97,25	1,29	1,755	18,00	99,14	2,44
S1FG2 P19-13 n	1740	16,04	95,72	0,74	1,669	16,62	95,90	0,58	1,656	17,36	95,17	1,32
S1FG2 P23-13 c	1739	16,30	96,27	1,49	1,669	17,44	95,93	1,14	1,683	17,53	96,77	1,23
S1FG2 P25-13 s	1762	15,08	96,78	0,48	1,697	15,66	96,31	0,57	1,695	16,74	96,15	1,66
S1FG2 P25-14 c	1776	14,20	96,11	1,71	1,687	16,09	95,02	1,89	1,721	15,92	96,95	1,72
S1FG2 P26-13 n	1711	16,75	99,66	-1,40	1,673	15,84	97,79	-0,91	1,706	17,26	99,72	0,50
S1FG2 P27-13 s	1768	14,60	98,18	-0,45	1,730	14,25	97,87	-0,36	1,715	15,28	97,01	0,68
11 al 15 de sept												
S1FG1 P6-14 s	1756	14,91	98,01	0,53	1,697	16,75	96,63	1,84	1,712	16,69	97,48	1,78
S1FG1 P15-14 n	1787	14,40	96,55	1,67	1,698	16,53	95,01	2,13	1,733	17,06	96,98	2,66
S1FG1 P8-15 s	1785	13,92	96,42	0,64	1,701	15,84	95,32	1,92	1,710	15,85	95,80	1,93
S1FG1 P11-15 n	1742	16,10	96,00	-0,56	1,666	16,98	95,65	0,88	1,656	17,13	95,08	1,03
S1FG1 P4-15 c	1736	16,72	96,62	-2,42	1,652	14,75	95,13	-1,98	1,676	15,94	96,52	-0,78
S1FG2 P6-15 s	1781	14,70	98,04	-0,02	1,711	16,13	96,11	1,43	1,741	16,69	97,77	1,99
S1FG2 P9-15 n	1795	14,38	98,09	0,40	1,759	15,58	98,00	1,20	1,744	15,34	97,20	0,96
S1FG2 P14-15 c	1789	13,96	95,76	1,26	1,702	15,32	95,13	1,36	1,712	15,92	95,68	1,96
S1FG8 P4-2 c	1776	15,62	95,69	0,52	1,694	16,41	95,39	0,79	1,687	17,18	94,97	1,56
S1FG8 P5-2 n	1789	14,62	97,56	-0,12	1,730	16,28	96,69	1,66	1,726	16,00	96,44	1,38
S1FG8 P12-2 s	1744	15,96	97,07	-2,23	1,679	14,30	96,22	-1,67	1,688	14,26	96,74	-1,70
S1FG8 P14-1 c	1728	15,40	96,28	0,83	1,676	16,27	96,98	0,87	1,651	16,19	95,56	0,78
S1FG8 P15-2 s	1760	14,50	96,58	0,45	1,711	14,84	97,20	0,34	1,714	13,93	97,35	-0,57
S1FG8 P17-1 s	*	*	97	-2,01	1,65	12,51	*	*	1,64	13,79	*	*
18 al 23 de sept												
S1FG8 P2-4 n	1768	16,02	96,86	-1,78	1,695	15,40	95,88	-0,63	1,687	15,54	95,41	-0,48
S1FG8 P4-4 c	1788	14,72	98,86	-1,72	1,728	14,25	96,67	-0,47	1,765	13,20	98,74	-1,53
S1FG8 P2-3 n	1779	14,92	96,12	1,46	1,705	16,38	95,83	1,46	1,696	16,86	95,31	1,94
S1FG8 P3-6 n	1774	16,28	96,29	-0,63	1,708	15,30	96,27	-0,98	1,686	15,67	95,06	-0,61
S1FG8 P5-5 c	1740	15,55	96,85	-0,60	1,672	16,05	96,10	0,50	1,656	15,85	95,19	0,30
S1FG8 P6-6 s	*	*	97,05	-0,21	1,686	17,40	*	*	1,686	16,77	*	*
S1FG8 P7-3 n	1759	15,36	97,10	-0,35	1,700	16,71	96,63	1,35	1,680	16,80	95,51	1,44
S1FG8 P8-5 n	1701	15,40	95,52	-0,53	1,619	15,05	95,21	-0,36	1,619	16,23	95,23	0,83
S1FG8 P9-6 c	1730	15,50	97,80	0,99	1,667	17,40	96,33	1,90	1,702	16,77	98,39	1,27
S1FG8 P11-5 n	1774	13,45	98,65	0,19	1,710	14,79	96,41	1,34	1,715	15,36	96,73	1,91
S1FG8 P12-4 s	1752	16,42	96,09	-1,33	1,670	15,51	95,32	-0,91	1,677	15,42	95,69	-1,01

S1FG8 P13-3 n	1800	14,54	97,61	-0,63	1,797	12,67	99,87	-1,87	1,740	14,23	96,67	-0,32
S1FG8 P14-4 c	1754	15,95	97,44	-0,68	1,689	15,47	96,28	-0,48	1,699	16,84	96,83	0,89
S1FG8 P15-5 s	1782	13,14	96,42	-0,21	1,694	14,39	95,10	1,25	1,695	15,11	95,14	1,97
S1FG8 P19-3 s	1734	17,02	95,93	-1,96	1,656	15,47	95,48	-1,56	1,657	15,11	95,58	-1,92
S1FG19 P1-1 n	1760	15,84	96,75	-0,66	1,705	15,11	96,91	-0,73	1,680	16,18	95,48	0,34
S1FG19 P5-1 s	1734	15,20	98,68	0,10	1,711	16,16	98,70	0,96	1,668	17,19	96,22	1,99
S1FG19 P9-1 n	1730	17,36	98,22	-0,28	1,710	16,66	98,81	-0,70	1,712	16,81	98,91	-0,56
S1FG28 P2-1 c	1740	15,55	98,76	-2,85	1,672	14,01	96,10	-1,55	1,669	16,07	95,97	0,52
S1FG28 P11-1 s	1756	14,85	97,68	-1,05	1,679	15,14	95,64	0,29	1,687	15,14	96,11	0,29
S1FG28 P2-1 c	1773	13,70	97,99	-0,82	1,736	13,93	97,88	0,23	1,712	14,90	96,55	1,20
25 al 29 de sept												
S1FG8 P1-7 s	1777	15,20	96,29	0,33	1,700	15,83	95,63	0,63	1,697	17,28	95,47	2,08
S1FG8 P5-7 c	1726	16,06	95,85	2,40	1,660	17,85	96,15	1,79	1,649	18,45	95,54	2,39
S1FG8 P6-7 s	1773	15,68	98,37	0,45	1,713	17,08	96,60	1,40	1,736	17,65	97,87	1,97
S1FG8 P12-6 n	1761	15,16	96,10	-0,47	1,683	16,25	95,60	1,09	1,679	16,03	95,36	0,86
S1FG8 P12-7 n	1711	15,80	95,18	1,77	1,645	16,47	96,15	0,66	1,630	17,12	95,29	1,32
S1FG8 P14-7 n	1758	15,66	96,10	-0,21	1,684	16,38	95,77	0,72	1,687	15,92	95,96	0,26
S1FG8 P17-7 c	1767	15,84	96,65	-0,16	1,686	16,79	95,41	0,95	1,705	16,90	96,50	1,06
S1FG12 P1-1 s	*	*	96,52	-0,33	1,728	13,90	*	*	1,728	14,65	*	*
S1FG12 P4-1 n	1800	13,56	96,52	-0,33	1,728	13,90	95,97	0,34	1,728	14,65	96,00	1,09
S1FG19 P10-1 s	1748	15,36	96,29	-0,43	1,662	15,67	95,05	0,31	1,676	16,68	95,86	1,32
S1FG19 P13-1 s	1771	15,62	96,44	-0,49	1,694	15,73	95,61	0,11	1,690	17,60	95,39	1,98
S1FG19 P18-1 s	1732	14,84	97,27	1,78	1,672	16,69	96,53	1,85	1,653	17,42	95,43	2,58
S1FG19 P19-1 c	1776	13,78	97,39	1,32	1,723	15,69	97,06	1,91	1,716	15,70	96,62	1,92
S1FG29 P1-A-1 c	1739	15,60	97,95	-1,30	1,673	16,69	96,21	1,09	1,651	17,42	94,97	1,82

Tabla 4.1.- Resumen de resultados de los ensayos realizados en el relleno del NAIQ.Proctor
Modificado, Hilf , Cono y Arena(Geosuelos Cia. Ltda.)

CAPA	PROCTOR		HILF		Cono y Arena	
	Ys (kg/m ³)	wop(%)	GC(%)	Dh(%)	GC(%)	Dh(%)
2 al 3 de oct						
S1.FG12.P2.1	1746	14,98	96,08	-2,16	95,18	-1,25
S1.FG12.P4.1	1800	13,60	96,54	-0,33	96,02	0,68
S1.FG12.P7.1	*	*	*	*	*	*
S1.FG8.P16.7	1764	15,68	97,30	0,09	96,41	1,05
S1.FG19.P3.2	1754	15,58	96,09	0,00	95,19	1,21
4 al 10 de oct						
S1.FG11.P9.1	1738	14,56	96,20	-1,40	95,68	-0,90
S1.FG11.P17.1	1736	14,07	96,64	-1,38	95,95	1,51
S1.FG8.P11.8	1762	14,80	95,83	1,43	95,50	1,69
S1.FG19.P11.2	1772	13,22	97,80	-0,09	96,78	2,25
S1.FG19.P17.2	1769	14,89	96,98	-0,47	95,29	1,39
S1.FG19.P1A-3	1782	14,77	97,54	-0,80	96,03	1,52
S1.FG12.P10.1	1784	13,01	96,25	0,05	96,09	0,16
S1.FG11.P8.1	1725	13,22	97,88	-2,37	96,27	-0,61
S1.FG8.P15.8	1763	16,06	99,52	-1,93	97,77	-0,02

S1.FG19.P14.2	1780	15,72	95,92	0,47	95,42	0,86
S1.FG19.P10.2	1776	15,11	98,47	-2,07	95,99	0,75
S1.FG8.P4.8	1780	13,80	96,68	0,62	95,76	1,79
S1.FG8.P20.8	1788	15,19	97,52	-0,14	95,94	1,70
S1.FG11.P6.1	1728	14,50	95,56	0,58	95,18	1,03
S1.FG8.P13.9	1780	14,48	96,52	0,42	95,37	1,38
S1.FG8.P21.8	1809	14,74	96,48	0,42	95,42	1,71
S1.FG12.P4.2	1765	14,20	97,19	0,00	96,57	1,10
S1.FG12.P8.2	1740	14,95	96,11	-0,34	96,29	-0,05
S1.FG8.P17.9	1786	14,93	96,45	0,47	95,78	1,41
11 al 17 de oct						
S1.FG19.P7.3	1774	15,34	98,03	-0,28	96,73	0,64
S1.FG19.P1.3	1762	14,25	95,32	2,33	96,10	2,40
S1.FG11.P24.1	1735	13,94	96,44	-0,78	95,78	0,45
S1.FG11.P26.1	*	*	*	*	97,06	0,13
S1.FG11.P4.1	*	*	96,69	-0,44	96,63	0,03
S1.FG19.P15.3	1781	15,40	97,52	-1,93	95,67	-0,07
S1.FG19.P13.3	*	*	*	*	95,79	0,43
S1.FG19.P9.3	*	*	*	*	97,77	-0,18
S1.FG11.P23.1	1743	15,28	95,43	-0,24	96,46	-1,09
S1.FG11.P25.1	*	*	*	*	96,24	-0,11
S1.FG8.P21.9	1775	15,31	97,53	-0,14	96,49	1,47
S1.FG19.P17.3	1772	15,03	98,10	-0,56	97,46	1,08
S1.FG12.P13.2	1754	15,45	95,00	-0,71	95,32	-0,91
S1.FG12.P5.2	1768	16,59	97,42	-2,15	95,96	-0,26
S1.FG12.P2.3	1790	14,29	96,80	0,14	97,71	-1,08
S1.FG12.P14.3	1778	14,93	96,09	0,05	95,81	-0,46
18 al 24 de oct						
S1.FG19.P6.3	*	*	*	*	95,67	1,88
S1.FG12.P1.3	*	*	*	*	97,59	0,78
S1.FG12.P3.3	*	*	*	*	96,23	2,10
S1.FG12.P6.4	*	*	*	*	95,89	0,72
S1.FG12.P5.3	*	*	*	*	95,36	2,25
S1.FG12.P9.3	1764	14,66	98,29	-1,18	96,26	0,94
S1.FG12.P14.4	1764	15,15	97,33	0,85	96,27	2,03
S1.FG12.P13.3	*	*	*	*	96,54	1,43
S1.FG12.P10.4	*	*	*	*	95,23	2,41
S1.FG12.P2.4	1776	15,85	98,15	0,14	98,10	0,11
S1.FG19.P10.3	1782	15,33	97,19	-1,31	95,84	0,62
S1.FG19.P16.3	*	*	*	*	99,07	1,45
S1.FG19.P12.3	*	*	*	*	95,27	0,06
S1.FG12.P11.4	*	*	*	*	95,55	-0,29
S1.FG12.P9.4	*	*	*	*	95,69	0,76
S1.FG12.P7.4	*	*	*	*	95,52	-0,25
S1.FG12.P3.4	*	*	*	*	95,87	-0,07
S1.FG11.P5.2	1762	15,68	96,14	1,09	96,01	1,08
S1.FG11.P17.2	1771	16,40	95,49	0,42	96,06	-0,60
S1.FG11.P13.2	*	*	*	*	96,07	-0,01
S1.FG19.P14.3	1772	14,48	96,94	1,42	96,51	1,56
S1.FG11.P2.2	*	*	*	*	95,34	0,85
S1.FG11.P6.2	*	*	*	*	95,57	1,47

S1.FG11.P10.2	1751	15,41	97,34	-0,14	95,92	1,30
S1.FG11.P14.2	*	*	*	*	96,28	1,22
S1.FG11.P19.2	1773	14,91	96,56	-0,14	96,54	0,20
S1.FG11.P23.2	*	*	*	*	95,54	-0,57
S1.FG11.P2.3	*	*	*	*	96,24	0,66
S1-FG11.P9.3	*	*	*	*	95,74	0,97
S1.FG11.P15.3	*	*	*	*	96,16	-1,04
S1.FG11.P18.2	*	*	*	*	95,47	0,70
S1.FG11.P22.2	*	*	*	*	94,98	2,20
S1.FG11.P25.2	1767	16,18	97,18	-1,60	95,99	-0,33
S1.FG11.P5.5	1773	14,37	97,66	-0,09	97,21	0,81
S1.FG11.P12.4	1787	15,79	97,08	-0,14	96,13	0,35
S1.FG11.P1.5	*	*	*	*	95,76	-1,78
S1.FG11.P14.4	*	*	*	*	95,51	0,93
S1.FG11.P5.4	*	*	*	*	97,32	0,85
S1.FG11.P25.3	1777	14,62	95,88	2,04	96,21	1,49
S1.FG11.P2.4	1779	15,78	96,65	-1,83	95,46	-0,67
S1.FG11.P6.4	*	*	*	*	96,12	0,20
S1.FG11.P10.4	*	*	*	*	95,50	0,35
S1.FG11.P28.1	*	*	*	*	95,79	1,66
S1.FG11.P21.3	*	*	*	*	96,93	0,42
S1.FG11.P17.3	*	*	*	*	96,10	-1,28
S1.FG11.P13.6	*	*	*	*	96,57	1,56
S1.FG11.P9.6	*	*	*	*	96,76	1,13
S1.FG11.P5.6	*	*	*	*	96,40	1,26
S1.FG11.P1.6	1769	15,74	96,17	0,14	95,78	0,24
S1.FG11.P28.2	*	*	*	*	97,03	1,90
S1.FG11.P10.5	1742	15,37	98,31	-3,16	95,62	-0,10
S1.FG11.P6.5	*	*	*	*	95,61	0,04
S1.FG11.P13.5	*	*	*	*	96,01	0,44
S1.FG11.P21.4	1763	16,05	96,41	-2,03	96,31	-2,09

Tabla 4.2.- Resumen de resultados de los ensayos realizados en el relleno del NAIQ.Proctor

Modificado, Hilf , Cono y Arena(QA QC Weekly October 2006 Report).

RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS													
Tesis: Compactación de Suelos Volcánicos del Sector del NAIQ													
CAPA	DENSÍMETRO NUCLEAR								DCP				
	PAÑOS				JUNTAS				Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR	
	UBIC.	γ _s (kg/m ³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	γ _s (kg/m ³)	GC(%)	w(%)					
31 julio-4 agosto													
S1FG1 P18-8 s	Centro	1642	95,83	13,87						46,2	24,2	16	13,94
	Sur	1640	95,73	15,20									
S1FG1 P22-6 s	Centro	1636	96,26	14,57	Centro	1650	97,10	14,47		43,5	21,5	22	21,78
S1FG1 P23-6 n	Norte	1647	96,90	15,90	Norte	1636	96,23	14,57		44,7	21,7	16	15,75
S1FG1 P23-7 n	Centro	1622	95,40	14,07	Centro	1647	96,86	14,30					
	*	*	*	*	*	*	*	*		43,3	21,3	19	19,49
S1FG1 P24-7 c	Centro	1648	95,67	14,90						44	21	16	16,33
	Norte	1691	98,17	14,87									
S1FG1 P27-6 s	Sur	1695	98,43	16,33	Sur	1658	96,23	15,60		44	21	17	17,48
	Norte	1652	95,85	14,33	Norte	1653	95,93	14,47					
S1FG1 P27-7 c	Centro	1651	95,24	15,13	Centro	1661	95,80	14,80		43,5	21,5	20	20,43
	Norte	1685	97,20	15,07	Norte	1675	96,59	15,10					
S1FG2 P18-7 n	Norte	1630	95,87	14,10	Norte	1622	95,43	17,83		44	21	13	12,95
	Sur	1630	95,90	14,73	Sur	1632	96,03	14,60					
S1FG2 P22-7 n	Norte	1638	95,10	15,03	Norte	1644	95,43	14,27		43,2	21,2	16	16,16
	Sur	1648	95,63	13,97	Sur	1649	95,73	14,60					
S1FG2P27-8 n	Norte	1637	95,57	14,73						43,2	21,2	17	17,30
	Centro	1633	95,27	16,43									
S1FG2 P18-7 n	Norte	1630	95,87	14,10	Norte	1622	95,43	17,83					
	Sur	1630	95,90	14,73	Sur	1632	96,03	14,60					
S1FG1 P19-6 n	Norte	1638	96,37	14,27	Norte	1668	99,10	14,37					
	Centro	1639	96,37	14,37	Centro	1672	98,34	14,23					

S1FG1 P26-6 c	Centro	1649	97,03	15,57				
	Sur	1663	97,78	15,70				
S1FG1 P24-6 n	Norte	1667	98,06	16,17				
	Sur	1663	97,78	15,70				
S1FG2 P27-6 n	Norte	1659	97,61	14,70	Norte	1678	98,69	14,23
	Centro	1636	96,19	14,23	Centro	1657	97,47	14,23
S1FG2 P25-6 s	Sur	1665	96,72	14,47	Sur	1711	99,41	14,40
	Centro	1639	95,27	14,23	Centro	1664	96,71	14,47
S1FG1 P21-6 s	Sur	1624	95,50	15,00	Sur	1639	96,40	14,83
	Norte	1650	97,07	15,23	Norte	1624	95,47	14,23
S1FG1 P25-6 s	Sur	1635	96,15	15,07	Sur	1636	96,22	15,07
	Centro	1635	96,20	14,43	Centro	1622	95,40	14,50
S1FG1 P28-6 n	Norte	1625	95,60	14,73				
	Centro	1633	96,08	14,67				
S1FG1 P29-6 s	Sur	1662	96,49	15,77	Sur	1656	96,17	15,30
	Centro	1684	97,72	15,33	Centro	1654	96,02	15,33
S1FG2 P19-7 s	Sur	1654	96,03	15,13	Sur	1651	95,81	14,47
	Centro	1680	97,50	14,93	Centro	1648	95,64	14,60
S1FG2 P19-7 s	Sur	1654	96,03	15,13	Sur	1651	95,81	14,47
	Centro	1680	97,50	14,93	Centro	1648	95,64	14,60
S1FG2 P19-7 s	Sur	1650	95,77	14,27				
	Norte	1666	96,70	15,27				
S1FG2 P23-7 c	Centro	1669	96,87	15,40				
	Norte	1678	97,40	16,77				
S1FG2 P25-7 n	Norte	1662	96,50	16,30				
	Centro	1676	97,23	16,67				
S1FG2 P27-7 s	Sur	1660	96,33	16,67				
	Norte	1649	95,70	16,03				
S1FG2 P20-7 n	Norte	1688	98,00	16,63	Norte	1677	97,34	15,97
	Centro	1697	98,47	15,60	Centro	1672	97,04	16,47
S1FG1 P26-7 s	Sur	1671	97,00	15,07				
	Centro	1661	96,37	14,90				
S1FG1 P21-7 c	Centro	1653	95,77	15,10	Centro	1661	96,40	15,00
	Sur	1660	96,33	15,20	Sur	1656	96,17	14,23
S1FG1 P19-7 n	Norte	1647	95,63	13,87	Norte	1643	95,37	13,37
	Sur	1656	96,07	15,53	Sur	1654	96,00	15,33
S1FG2 P24-7 n	Norte	1643	95,37	13,73	Norte	1669	96,83	13,53
	Sur	1683	97,67	15,40	Sur	1651	96,18	14,73
S1FG2 P28-7 n	Norte	1672	97,03	14,43	Norte	1686	97,85	14,90
	Centro	1684	97,69	15,00	Centro	1688	97,95	15,00
S1FG1 P18-7 s	Sur	1649	95,72	14,87	Sur	1652	95,90	13,33
	Centro	1665	96,60	14,80	Centro	1686	97,86	13,97
S1FG1 P20-7 n	Norte	1686	97,87	14,87				
	Centro	1657	96,13	14,77				
S1FG1 P22-7 s	Sur	1645	95,47	14,33				
	Norte	1668	96,80	15,00				
S1FG1 P25-7 n	Norte	1693	98,27	14,90	Norte	1654	96,00	14,97
	Sur	1661	96,40	15,23	Sur	1694	98,33	15,13
S1FG1 P29-7 s	Sur	1664	95,93	14,53	Sur	1665	95,97	14,90
	Centro	1672	96,40	15,30	Centro	1704	98,23	16,27

S1FG1 P28-7 c	Centro	1662	96,43	15,27								
	Sur	1668	96,57	14,50								
S1FG2 P17-8 n	Norte	1672	96,43	14,63	Norte	1662	95,83	14,83				
	Centro	1677	96,62	13,87	Centro	1651	95,20	13,73				
S1FG2 P19-8 c	Centro	1701	98,07	16,10								
	Norte	1661	95,77	14,57								
S1FG2 P21-8 c	Centro	1675	96,13	16,67								
	Sur	1704	97,83	15,93								
S1FG2 P23-8 n	Norte	1678	96,33	15,97								
	Sur	1674	96,07	15,57								
S1FG2 P25-8 c	Centro	1630	95,20	13,73								
	Sur	1651	96,37	13,33								
S1FG2 P18-8 c	Centro	1635	95,43	14,23	Centro	1680	98,10	16,40				
	Sur	1646	96,07	15,23								
S1FG2 P20-8 n	Norte	1638	95,57	13,77	Norte	1642	95,83	13,93				
	Sur	1638	95,50	14,60	Centro	1644	95,97	13,83				
S1FG2 P22-8 n	Norte	1634	95,40	16,33	Norte	1659	96,83	16,20				
	Centro	1667	97,27	14,47	Centro	1676	97,87	14,73				
S1FG2 P24-8 c	Centro	1655	96,60	13,73	Centro	1646	96,07	14,40				
	Sur	1654	96,23	14,37	Sur	1657	96,50	13,90				
S1FG2 P26-8 c	Centro	1679	98,00	16,93	Centro	1641	95,83	14,63				
	Sur	1648	96,23	15,97	Sur	1653	96,50	14,77				
S1FG1 P20-8 n	Norte	1678	98,00	15,27								
	Sur	1692	98,77	16,77								
S1FG1 P22-8 c	Centro	1699	99,17	16,27								
	Sur	1647	96,10	15,77								
S1FG1 P24-8 n	Norte	1659	96,87	15,50								
	Sur	1703	99,33	15,13								
	DENSÍMETRO NUCLEAR											
	PAÑOS				JUNTAS				DCP			
CAPA	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)	Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR
7 agosto-11 ago												
S1FG1 P17-8 c	Norte	1664	95,43	14,77	Norte	1680	96,33	13,87	43	21	20	22,15
	Centro	1681	96,43	13,07	Centro	1659	95,13	13,40				
S1FG1 P28-8 n	Norte	1651	96,40	14,60					43,3	21,3	14	13,84
	Centro	1651	96,40	15,87								
S1FG2 P17-9 s	Centro	1682	96,47	14,67	Centro	1676	96,13	15,53	44,1	21,6	17	16,94
	Sur	1681	96,40	14,50	Sur	1682	96,43	14,03				
S1FG1 P25-8 s	Centro	1668	97,50	14,00	Centro	1657	96,27	12,67	43,5	20,5	20	21,55
	Sur	1667	97,40	14,17	Sur	1636	95,63	14,40				
S1FG2 P18-9 s	Norte	1688	96,73	15,63	Norte	1693	96,83	14,70	44	21	21	21,78
	Sur	1712	97,93	16,53	Sur	1667	95,40	16,17				
S1FG2 P20-9 c	Centro	1637	95,93	14,80	Centro	1665	97,40	12,20	43	21	18	18,64
	Sur	1670	97,63	13,97	Sur	1635	95,60	14,53				
S1FG2 P21-9 n	Norte	1671	95,80	14,87					42,9	20,9	18	18,74
	Sur	1691	96,93	13,93								
S1FG2 P24-9 s	Centro	1673	97,80	14,13	Centro	1636	95,63	14,87	44	21	17	17,48
	Sur	1633	95,43	14,17	Sur	1646	96,17	14,00				
S1FG1 P19-8 c	Centro	1690	96,97	15,97	Centro	1662	95,33	15,90				
	Sur	1700	97,50	14,57	Sur	1670	95,77	14,17				

S1FG1 P26-8 c	Centro	1663	97,10	13,40								
	Sur	1659	96,87	14,40								
S1FG1 P21-8 n	Norte	1661	95,23	14,67	Norte	1667	96,63	14,97				
	Centro	1668	95,67	16,30	Centro	1684	96,57	13,80				
S1FG1 P23-8 n	Norte	1668	95,63	14,70	Norte	1681	96,37	13,43				
	Sur	1668	95,67	16,30	Sur	1684	96,57	14,07				
S1FG2 P19-9 n	Norte	1674	95,97	13,43								
	Centro	1687	96,73	14,03								
S1FG2 P22-9 c	Centro	1657	96,23	16,37	Centro	1660	96,37	16,30				
	Sur	1659	96,37	14,30	Sur	1708	99,20	14,33				
S1FG2 P25-9 n	Norte	1647	96,27	14,13								
	Centro	1671	97,63	15,43								
S1FG2 P23-9 n	Norte	1672	97,73	14,60	Norte	1655	96,73	14,80				
	Sur	1640	95,87	16,13	Sur	1634	95,50	15,13				
S1FG2 P27-9 n	Norte	1665	97,33	14,50								
	Sur	1658	96,87	14,27								
S1FG2 P26-9 n	Norte	1632	95,40	13,70	Norte	1645	96,13	13,27				
	Centro	1648	96,33	14,10	Centro	1640	95,80	12,83				
S1FG1 P27-8 c	Centro	1646	95,93	14,73								
	Sur	1657	96,87	14,70								
S1FG1 P21-9 c	Centro	1631	95,37	13,13								
	Sur	1642	96,00	13,80								
S1FG1 P19-9 n	Norte	1692	98,90	14,30								
	Centro	1639	95,77	14,37								
S1FG1 P17-9 n	Norte	1663	97,20	14,12								
	Sur	1633	95,47	14,33								
14 al 18 agosto												
S1FG1 P19-10 c	Norte	1672	97,07	15,40					43	20	23	24,32
	Centro	1686	97,53	15,57								

CAPA	DENSÍMETRO NUCLEAR								DCP			
	PAÑOS				JUNTAS				Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR
	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)				
S1FG1 P23-9 s	Centro	1640	95,37	14,97	Centro	1663	96,73	13,87	43	20	22	23,88
	Sur	1644	95,60	15,00	Sur	1646	95,77	14,77				
S1FG1 P20-10 c	Norte	1683	95,83	15,23	Norte	1675	95,33	15,43	43,2	21,2	18	18,44
	Sur	1677	95,53	15,07	Sur	1729	98,40	13,07				
S1FG1 P22-9 n	Norte	1653	95,53	15,53	Norte	1654	95,57	13,17	43,6	21,6	16	15,83
	Sur	1663	96,07	14,10	Sur	1657	95,70	12,67				
S1FG1 P23-10 c	Centro	1658	96,30	15,13					43,7	20,7	18	18,94
	Sur	1644	95,50	15,73								
S1FG1 P24-10 s	Centro	1671	98,27	16,30	Centro	1684	99,00	16,13	42,7	20,7	22	23,46
	Sur	1683	98,93	16,13	Sur	1684	98,97	16,23				
S1FG1 P28-9 c	Norte	1671	97,27	13,53					44,9	20,9	21	21,55
	Centro	1642	95,50	15,57								
S1FG2 P18-10 n	Norte	1657	96,40	14,60	Norte	1642	95,47	13,73	44	21,5	19	19,29
	Centro	1670	97,17	15,37	Centro	1663	96,73	13,87				
S1FG2 P21-11 c	Centro	1635	96,13	16,17					43,5	20,5	18	19,15
	Sur	1633	96,00	16,00								

S1FG8 P11-1 n	Norte	1700	98,20	12,57				
	Sur	1713	98,87	12,83				
S1FG1 P17- 12 c	Centro	1660	95,53	13,60				
	Sur	1675	96,37	13,37				
S1FG2 P17- 12 n	Norte	1709	98,23	14,10				
	Sur	1738	99,97	14,33				
S1FG8 P6-1 n	Norte	1667	96,30	13,13	Note	1672	96,60	13,77
	Sur	1648	95,23	12,30	Sur	1667	96,23	13,10
S1FG1 P22- 13 n	Norte	1659	96,67	15,93				
	Centro	1656	96,47	16,57				
S1FG1 P29- 13 n	Norte	1683	98,03	13,47				
	Centro	1637	95,40	14,07				
S1FG8 P8-1 c	Centro	1657	95,73	13,73	Centro	1663	96,07	14,63
	Sur	1653	95,50	12,57	Sur	1651	95,40	12,20
S1FG8 P10-1 n	Norte	1657	95,70	15,37	Norte	1669	96,43	15,40
	Centro	1654	95,53	13,10	Centro	1659	95,83	15,60
S1FG2 P27- 12 c	Centro	1717	98,63	16,57	Centro	1704	97,83	16,00
	Sur	1664	95,53	15,60	Sur	1680	96,50	15,23
S1FG2 P17- 13 n	Norte	1690	97,10	13,43	Norte	1673	96,07	13,87
	Sur	1697	97,47	16,50	Sur	1681	96,57	16,07
S1FG2 P20- 13 c	Centro	1663	96,90	13,90	Centro	1671	97,40	14,30
	Sur	1706	99,43	14,37	Sur	1666	97,10	14,87
S1FG2 P17- 13 n					Norte E	1692	98,63	15,20
					CentroE	1672	97,40	15,13
S1FG2 P17- 13 n					Norte E	1677	97,73	14,70
					Centro E	1684	98,13	15,00
S1FG1 P25- 13 c	Centro	1690	96,30	15,80				
	Sur	1690	96,33	15,40				
S1FG1 P18- 13 c	Centro	1695	96,57	14,93	Centro	1678	95,57	15,80
	Sur	1706	97,23	15,37	Sur	1693	96,50	16,00
S1FG1 P17- 13 n	Norte	1702	99,17	14,00	Norte	1704	99,27	13,93
	Sur	1694	98,73	13,47	Sur	1676	97,67	13,53
S1FG2 P22- 13 n	Norte	1679	97,80	15,17	Norte	1674	97,57	14,43
	Centro	1658	96,63	15,57	Centro	1712	99,77	14,21
S1FG2 P24- 13 n	Norte	1678	97,77	15,97	Norte	1649	96,13	16,67
	Centro	1648	96,07	16,40	Centro	1712	99,77	14,21
S1FG1 P20- 13 n	Norte	1686	96,07	14,27	Norte	1676	95,87	12,97
	Centro	1686	96,03	16,13	Centro	1677	95,57	15,13
S1FG1 P23- 13 n	Norte	1688	96,13	16,37	Norte	1682	95,87	16,17
	Centro	1688	96,17	16,27	Centro	1693	96,43	16,33
S1FG8 P12-1 n	Norte	1680	97,07	13,47	Norte	1670	96,43	13,30
	Sur	1651	95,37	13,83	Sur	1654	95,53	13,47
S1FG8 P3-1 n	Norte	1674	96,73	14,20	Norte	1655	95,63	13,77
	Sur	1658	95,73	12,40	Sur	1711	99,00	12,70
S1FG2 P27- 14 n	Norte	1688	97,43	17,10				
	Sur	1689	97,47	15,63				
S1FG2 P21- 14 n	Norte	1682	97,10	16,13				
	Sur	1669	96,30	16,33				

CAPA	DENSÍMETRO NUCLEAR								DCP			
	PAÑOS				JUNTAS				Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR
	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)				
S1FG2 P19-14 n	Norte	1693	97,67	14,80								
	Centro	1673	96,53	16,50								
S1FG1 P24-13 c	Centro	1684	97,17	15,13	Centro	1671	96,37	16,00				
	Sur	1691	97,57	16,67	Sur	1674	96,57	15,60				
S1FG1 P27-13 c	Centro	1680	96,97	16,93	Centro	1655	95,53	16,43				
	Sur	1674	96,63	15,97	Sur	1679	96,87	16,33				
S1FG2 P17-14 n	Norte	1696	97,87	16,03	Norte	1681	97,00	15,00				
	Centro	1702	98,23	15,57	Centro	1682	97,07	16,27				
S1FG2 P23-14 n	Norte	1692	97,63	17,07								
	Centro	1671	96,47	15,47								
S1FG1 P3-14 c	Centro	1683	96,20	15,77								
	Sur	1693	96,60	13,30								
S1FG1 P1-14 n	Norte	1683	96,03	15,33								
	Sur	1682	96,00	16,80								
S1FG2 P26-14 n	Norte	1704	98,33	16,30	Norte	1676	96,33	17,77				
	Sur	1701	98,17	15,00	Sur	1715	98,97	15,03				
S1FG2 P24-14 n	Norte	1689	97,43	15,00	Norte	1672	96,30	14,40				
	Centro	1688	97,40	14,20	Centro	1721	99,30	14,03				
S1FG2 P24-14 n	Norte	1689	97,43	15,00	Norte	1671	96,40	12,50				
	Centro	1698	97,93	15,53	Centro	1691	97,70	15,97				
S1FG2 P22-14 c	Centro	1689	97,43	15,00	Centro	1671	96,40	12,50				
	Sur	1698	97,93	15,53	Sur	1691	97,70	15,97				
S1FG2 P20-14 c	Centro	1687	97,33	16,90	Centro	1682	97,07	17,27				
	Sur	1667	96,17	16,87	Sur	1695	97,80	16,13				
S1FG2 P18-14 c	Centro	1662	95,90	16,57	Centro	1698	98,00	15,77				
	Sur	1677	96,77	17,47	Sur	1675	96,67	16,97				
S1FG1 P17-13 c	Centro	1679	95,73	13,57	Centro	1691	96,47	13,00				
	Sur	1671	95,37	15,17	Sur	1684	96,07	14,83				
S1FG1 P26-13 n	Norte	1712	98,77	16,53	Norte	1717	99,10	15,00				
	Centro	1683	97,07	17,17	Centro	1697	97,93	16,47				
S1FG1 P10-14 n	Norte	1673	97,30	17,27								
	Sur	1676	95,60	17,73								
S1FG1 P9-14 n	Norte	1716	99,77	14,77	Norte	1695	98,60	15,27				
	Centro	1702	98,90	15,90	Centro	1694	98,53	15,97				
S1FG1 P5-14 n	Norte	1738	99,13	14,03								
	Centro	1744	99,47	14,33								
S1FG1 P7-14 n	Norte	1665	96,83	17,43								
	Centro	1668	96,97	17,43								
S1FG1 P14-14 c	Centro	1663	96,67	15,67								
	Sur	1680	97,70	16,30								
S1FG1 P18-14 n	Norte	1697	98,67	15,83								
	Sur	1666	96,90	15,80								
S1FG1 P4-14 n	Norte	1669	97,03	14,47	Norte	1657	96,30	14,27				
	Centro	1675	97,40	14,53	Centro	1696	98,63	14,47				
S1FG1 P4-14 n	Norte	1713	99,60	15,57	Norte	1720	100,00	14,23				
	Centro	1705	99,23	15,43	Centro	1656	96,30	14,80				

S1FG1 P15-15 c	Centro	1685	95,93	14,23									
	Sur	1682	95,80	14,73									
S1FG1 P17-15 n	Norte	1698	96,73	16,87									
	Centro	1707	97,20	13,57									
S1FG1 P19-15 c	Centro	1679	95,63	14,20									
	Centro	1680	95,67	13,57									
S1FG2 P19-15 n	Norte	1702	99,07	16,93									
	Centro	1662	96,70	17,83									
S1FG8 P16-1 n	Norte	1634	97,17	14,30	Norte	1662	98,87	13,67					
	Centro	1620	96,37	15,20	Centro	1606	95,50	13,77					
	DENSÍMETRO NUCLEAR												
	PAÑOS				JUNTAS				DCP				
CAPA	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)	Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR	
S1FG8 P10-2 n	Norte	1696	97,13	15,73									
	Sur	1680	96,20	17,00									
S1FG8 P8-2 n	Norte	1686	96,57	13,37									
	Centro	1667	95,50	12,50									
S1FG8 P6-2 n	Norte	1681	96,30	17,73									
	Sur	1698	97,27	15,73									
S1FG8 P2-2 n	Norte	1690	96,80	15,27									
	Centro	1703	97,53	15,23									
S1FG1 P18-15 n	Norte	1691	96,87	13,93	Norte	1676	95,97	14,23					
	Centro	1716	98,30	15,27	Centro	1682	96,33	15,07					
S1FG1 P16-15 n	Norte	1721	98,57	14,47	Norte	1717	98,30	14,40					
	Centro	1716	98,30	15,27	Centro	1693	96,93	14,53					
S1FG1 P14-15 n	Norte	1671	95,70	12,70	Norte	1678	96,13						
	Sur	1666	95,43	14,13	Sur	1670	95,63						
S1FG1 P12-15 c	Centro	1669	95,57	14,73	Centro	1665	95,37	13,27					
	Sur	1679	96,20	15,00	Sur	1720	98,53	15,20					
S1FG1 P10-15 c	Centro	1685	95,93	16,33	Centro	1705	97,10	16,30					
	Sur	1699	96,73	16,27	Sur	1707	97,27	15,83					
S1FG1 P6-15 n	Norte	1678	95,53	14,90	Norte	1734	98,73	12,57					
	Sur	1670	95,10	14,90	Sur	1682	95,77	16,90					
S1FG1 P2-15 c	Centro	1691	96,30	12,13	Centro	1671	95,20	12,60					
	Sur	1676	95,43	13,50	Sur	1691	96,33	12,93					
S1FG8 P18-2 c	Centro	1682	96,33	13,57									
	Sur	1696	97,13	13,30									
S1FG8 P19-2 c	Centro	1666	96,17	13,83	Centro	1724	99,47	12,93					
	Sur	1668	96,23	12,53	Sur	1687	97,37	12,43					
S1FG8 P17-2 n	Norte	1660	95,80	13,07	Norte	1658	95,70	13,43					
	Centro	1657	95,63	13,33	Centro	1664	96,00	13,13					
S1FG8 P13-2 n	Norte	1653	95,33	11,33	Norte	1664	96,03	10,77					
	Centro	1656	95,53	12,30	Centro	1657	95,63	13,27					
S1FG8 P11-2 n	Norte	1679	96,90	16,03	Norte	1678	96,83	15,40					
	Centro	1704	98,30	15,67	Centro	1678	96,83	15,20					
	Centro	1669	96,30	15,10	Centro	1665	96,10	15,60					
S1FG8 P9-2 c	Sur	1667	96,20	17,70	Sur	1684	97,13	16,57					
	Centro	1663	95,97	15,80	Centro	1702	98,23	15,60					
S1FG8 P7-2 c	Sur	1704	98,33	14,30	Sur	1661	95,87	15,83					

S1FG28 P2-1 c	Norte	1706	97,77	13,50	Norte	1691	96,87	12,20	42,8	20,8	19	20,02
	Centro	1695	97,13	14,00	Centro	1708	97,90	13,63				
S1FG28 P11-1 s	Norte	1654	95,93	14,33					42,8	19,8	17	18,67
	Sur	1668	96,67	13,40								
S1FG28 P2-1 c	Norte	1703	97,60	12,90	Norte	1679	96,23	12,47	42,8	20,8	19	20,02
	Centro	1704	97,63	13,03	Centro	1691	96,90	12,07				
S1FG8 P16-3	Norte	1684	96,50	13,87								
	Centro	1703	97,60	14,50								
S1FG8 P14-3	Norte	1683	96,40	15,53								
	Sur	1710	97,97	14,83								
S1FG8 P8-3 n	Norte	1693	97,03	14,23								
	Sur	1687	96,70	13,53								
S1FG8 P6-3 n	Norte	1703	97,60	16,50								
	Centro	1696	97,17	17,57								
S1FG8 P1-3 n	Norte	1697	97,27	17,13								
	Sur	1701	97,43	16,60								
S1FG28 P23-1 n	Norte	1687	97,33	15,07								
	Centro	1689	97,43	15,83								
CAPA	DENSÍMETRO NUCLEAR								DCP			
	UBIC.	PAÑOS			JUNTAS				Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR
		ys (kg/m ³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	ys (kg/m ³)	GC(%)	w(%)				
S1FG28 P1-1 n	Norte	1685	97,20	15,37								
Sur	1682	97,03	14,70									
S1FG8 P21-1 n	Norte	1603	95,33	17,23	Norte	1611	95,80	16,23				
	Centro	1611	95,83	17,07	Centro	1615	96,07	15,70				
S1FG28 P5-1 c	Centro	1716	98,37	13,70								
	Sur	1722	98,73	12,80								
S1FG8 P18-3 n	Norte	1714	98,23	13,70								
	Centro	1717	98,37	15,83								
S1FG8 P12-3 n	Norte	1681	96,33	13,27								
	Centro	1687	96,67	12,20								
S1FG8 P10-3 n	Norte	1672	95,83	14,10								
	Sur	1672	95,83	15,37								
S1FG8 P4-3 n	Norte	1672	95,83	14,10								
	Centro	1672	95,83	15,37								
S1FG8 P20-2 n	Norte	1674	95,97	12,00								
	Sur	1681	96,40	12,13								
S1FG8 P21-2 n	Norte	1677	96,10	15,73	Norte	1690	96,83	15,40				
	Sur	1683	96,47	14,30	Sur	1699	97,37	15,90				
S1FG8 P3-3 c	Centro	1733	99,33	15,20	Centro	1678	96,13	14,47				
	Sur	1701	97,47	15,30	Sur	1690	96,70	15,67				
S1FG8 P5-3 c	Centro	1687	96,67	15,70	Centro	1706	97,73	13,83				
	Sur	1670	95,70	14,90	Sur	1665	95,43	14,67				
S1FG8 P9-3 c	Centro	1701	97,50	13,57	Centro	1709	97,93	15,53				
	Sur	1664	95,37	15,63	Sur	1678	96,13	14,73				
S1FG8 P11-3 c	Centro	1691	96,90	14,80	Centro	1742	99,83	13,30				
	Sur	1679	96,23	13,70	Sur	1705	97,70	13,50				
S1FG8 P15-3 c	Centro	1702	97,53	15,87	Centro	1666	95,47	16,47				
	Sur	1687	96,67	14,00	Sur	1705	97,73	12,70				

S1FG8 P17-3 c	Centro	1663	95,30	12,57	Centro	1676	96,07	12,00				
	Sur	1702	97,53	11,47	Sur	1664	95,37	11,47				
S1FG28 P4-1 n	Norte	1671	95,73	13,17	Norte	1708	97,90	14,13				
	Centro	1675	96,00	12,43	Centro	1672	95,80	13,17				
S1FG8 P1-4 n	Norte	1676	96,33	14,70								
	Centro	1668	95,87	14,07								
S1FG8 P3-4 c	Centro	1675	96,00	14,87								
	Sur	1675	95,97	14,57								
S1FG8 P5-4 c	Centro	1674	95,93	15,70								
	Sur	1689	96,77	16,53								
S1FG8 P7-4 n	Norte	1672	95,80	15,53								
	Centro	1680	96,30	15,97								
S1FG8 P7-4 n	Norte	1672	95,80	15,53								
	Centro	1680	96,30	15,97								
S1FG8 P9-4 n	Norte	1668	95,90	15,93								
	Centro	1667	95,83	14,57								
S1FG8 P11-4 n	Norte	1671	96,03	14,10								
	Centro	1669	95,93	13,33								
S1FG8 P13-4 c	Centro	1673	96,17	12,97								
	Sur	1674	96,20	13,80								
S1FG8 P15-4 c	Centro	1655	95,10	14,53								
	Sur	1674	96,27	14,33								
CAPA	DENSÍMETRO NUCLEAR								DCP			
	UBIC.	PAÑOS			JUNTAS				Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR
		ys (kg/m³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	ys (kg/m³)	GC(%)	w(%)				
S1FG8 P17-4 n	Norte	1678	96,43	16,67								
	Sur	1663	95,57	13,53								
S1FG28 P8-1 n	Norte	1669	95,63	14,23								
	Sur	1667	95,57	13,80								
S1FG8 P6-4 c	Centro	1709	99,07	14,87	Centro	1680	97,40	15,23				
	Sur	1700	98,50	14,43	Sur	1687	97,80	14,00				
S1FG8 P8-4 n	Norte	1673	96,97	15,90	Norte	1667	96,60	15,93				
	Sur	1696	98,30	15,13	Sur	1653	95,80	14,53				
S1 FG8 P10-4 n	Norte	1675	97,07	13,90	Norte	1655	96,00	14,17				
	Centro	1663	96,40	14,23	Centro	1677	97,27	13,63				
S1FG8 P20-3 c	Centro	1664	95,60	14,30	Centro	1685	96,83	12,90				
	Sur	1670	95,97	13,23	Sur	1665	95,70	13,80				
S1FG28 P7-1 c	Centro	1684	97,57	14,03	Centro	1661	96,27	13,53				
	Sur	1671	96,87	11,53	Sur	1645	95,33	11,77				
S1FG28 P17- 1 c	Centro	1672	96,93	13,47								
	Sur	1666	96,60	13,80								
S1FG28 P15- 1 n	Norte	1667	96,67	13,77								
	Centro	1669	96,87	13,97								
S1FG28 P23- 1 n	Norte	1673	96,97	13,00								
	Centro	1657	96,07	15,00								
S1FG8 P21-3 n	Norte	1658	96,10	18,20								
	Sur	1693	98,10	16,50								
S1FG8 P19-4 n	Norte	1676	96,30	12,30								
	Sur	1678	96,40	13,97								

S1FG8 P13-5 c	Centro	1646	95,43	14,97									
	Sur	1643	95,27	15,03									
S1FG8 P9-5 c	Centro	1677	96,33	14,37									
	Sur	1666	95,70	14,47									
S1FG8 P7-5 c	Centro	1672	95,80	15,53									
	Sur	1697	97,23	13,47									
S1FG8 P3-5 n	Norte	1690	97,10	14,50									
	Centro	1722	98,90	14,00									
S1FG8 P1-5 n	Norte	1690	97,10	14,50									
	Centro	1722	98,90	14,00									
S1FG8 P2-5 c	Centro	1684	97,67	18,07	Centro	1678	97,30	15,37					
	Sur	1648	95,53	14,27	Sur	1661	96,23	13,83					
S1FG8 P4-5 n	Norte	1659	96,17	16,33	Norte	1689	97,90	12,97					
	Sur	1654	95,87	16,30	Sur	1667	96,60	16,50					
S1FG8 P16-4 n	Norte	1660	96,23	13,90	Norte	1663	96,43	14,50					
	Centro	1663	96,40	14,43	Centro	1670	96,80	14,93					
S1FG8 P18-4 c	Centro	1682	97,50	16,73	Centro	1645	95,37	16,60					
	Sur	1679	97,30	15,67	Sur	1662	96,33	14,50					
S1FG19 P3-1 n	Norte	1663	96,80	13,37									
	Centro	1652	96,07	14,37									
S1FG8 P5-6 c	Centro	1675	97,43	17,70									
	Sur	1669	97,13	15,13									
S1FG8 P19-5 n	Norte	1655	96,30	15,30									
	Centro	1652	96,10	15,50									
S1FG28 P19-1 n	Norte	1684	96,63	12,90									
	Sur	1669	95,90	15,70									
	DENSÍMETRO NUCLEAR												
	PAÑOS				JUNTAS				DCP				
CAPA	UBIC.	ys (kg/m³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	ys (kg/m³)	GC(%)	w(%)	Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR	
S1FG8 P17-5 n	Norte	1659	96,50	15,77									
	Centro	1650	95,97	15,50									
S1FG28 P16-1 n	Norte	1646	95,77	15,73	Norte	1664	96,83	14,90					
	Sur	1656	96,33	14,37	Sur	1664	96,87	13,50					
S1FG28 P14-1 c	Centro	1646	95,77	15,57	Centro	1672	97,27	15,90					
	Sur	1674	97,40	15,50	Sur	1652	96,13	15,80					
S1FG28 P12-1 c	Centro	1677	96,30	16,90	Centro	1675	96,23	15,73					
	Sur	1679	96,43	14,20	Sur	1675	96,17	15,30					
S1FG28 P10-1 c	Centro	1680	96,50	13,43	Centro	1690	97,10	13,30					
	Sur	1665	95,60	12,13	Sur	1684	96,73	14,97					
S1FG28 P18-1 n	Norte	1673	97,33	14,13	Norte	1658	96,47	14,70					
	Centro	1644	95,57	14,40	Centro	1648	95,87	15,57					
S1FG8 P21-4 n	Norte	1647	95,83	16,87	Norte	1671	97,17	15,87					
	Sur	1684	97,97	16,93	Sur	1667	96,97	16,63					
S1FG8 P20-4 c	Centro	1678	96,40	14,77	Centro	1689	97,03	15,57					
	Sur	1675	96,17	12,90	Sur	1691	97,13	15,33					
S1FG8 P16-5 n	Norte	1647	95,83	14,63	Norte	1655	96,23	14,17					
	Sur	1664	96,83	15,33	Sur	1678	97,60	16,13					
S1FG8 P14-5 n	Norte	1657	96,37	15,80	Norte	1669	97,10	16,07					
	Centro	1654	96,23	16,73	Centro	1663	96,73	16,13					

S1FG8 P12-5 n	Norte	1674	97,37	17,77	Norte	1670	97,13	16,50					
	Centro	1650	95,97	15,73	Centro	1660	96,60	15,40					
S1FG8 P10-5 c	Centro	1667	96,93	14,73	Centro	1666	96,93	13,77					
	Sur	1680	97,77	14,20	Sur	1657	96,40	14,23					
S1FG8 P6-5 n	Norte	1662	95,50	14,63	Norte	1677	96,30	15,37					
	Centro	1663	95,57	16,53	Centro	1699	97,57	15,27					
S1FG8 P1-6 n	Norte	1649	95,90	13,93									
	Centro	1654	96,23	16,17									
S1FG8 P7-6 c	Centro	1660	96,53	17,17									
	Sur	1653	96,17	17,10									
S1FG8 P11-6 n	Norte	1673	97,33	16,30									
	Centro	1665	96,83	17,10									
S1FG8 P13-6 n	Norte	1660	96,57	16,70									
	Centro	1654	96,23	15,03									
S1FG8 P15-6 n	Norte	1675	95,90	15,57									
	Centro	1670	95,67	15,90									
S1FG8 P20-5 n	Norte	1680	96,20	14,17									
	Sur	1680	96,27	14,97									
S1FG19 P7-1 n	Norte	1686	98,23	16,60									
	Centro	1689	98,27	16,80									
S1FG19 P11-1 n	Norte	1674	97,33	17,03									
	Centro	1657	96,40	14,77									
S1FG19 P4-1 c	Centro	1641	95,47	15,87	Centro	1662	96,67	14,27					
	Sur	1650	95,97	15,80	Sur	1672	97,23	14,47					
S1FG8 P2-6 n	Norte	1700	97,37	13,43	Centro	1689	96,70	13,73					
	Sur	1679	96,20	11,87	Sur	1673	95,80	14,60					
S1FG8 P4-6 n	Norte	1666	95,43	13,83	Norte	1676	95,97	13,93					
	Sur	1682	96,30	14,33	Sur	1677	96,07	13,60					
DENSÍMETRO NUCLEAR													
CAPA	PAÑOS				JUNTAS				DCP				
	UBIC.	ys (kg/m³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	ys (kg/m³)	GC(%)	w(%)	Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR	
	25 al 29 de sept												
S1FG8 P1-7 s	Centro	1658	97,27	16,93					33,5	20,5	15	15,61	
	Sur	1634	95,83	17,57					34	21	15	15,20	
S1FG8 P5-7 c	Norte	1652	96,67	19,40									
	Centro	1675	98,00	17,83									
S1FG8 P6-7 s	Centro	1669	97,33	16,97	Centro	1689	98,50	16,57	32,5	20,5	14	14,45	
	Sur	1670	97,43	17,93	Sur	1682	98,17	15,97					
S1FG8 P12-6 n	Norte	1638	95,83	16,63	Norte	1634	95,60	16,87	32,5	20	17	18,46	
	Sur	1635	95,70	17,13	Sur	1668	97,57	16,13					
S1FG8 P12-7 n	Norte	1633	95,53	16,97					33	21	14	14,07	
	Sur	1633	95,53	16,97									
S1FG8 P14-7 n	Norte	1673	98,13	15,97					32	20	16	17,25	
	Centro	1659	97,27	15,17									
S1FG8 P17-7 c	Norte	1653	96,93	17,93					33	21	14	14,07	
	Centro	1651	96,80	17,20									
S1FG12 P1-1 s	Norte	1680	96,27	15,27	Sur	1676	96,10	16,23	34,5	22,5	13	11,98	

S1FG12 P4-1 n	*									32,3	20,3	18	19,36
	*												
S1FG19 P10-1 s	Norte	1652	96,67	15,03	Norte	1653	96,70	16,10		34	21	15	15,20
	Centro	1695	99,17	16,37	Centro	1693	99,10	16,60					
S1FG19 P13-1 s	Norte	1679	98,00	14,53	Norte	1642	95,80	14,67		33,6	20,6	15	15,53
	Sur	1686	98,40	15,47	Sur	1688	98,50	16,27					
S1FG19 P18-1 s	Centro	1651	96,83	18,70						32	20	16	17,25
	Sur	1662	97,53	15,53									
S1FG19 P19-1 c	Norte	1675	97,70	14,70	Norte	1656	96,60	14,03		32,2	20,2	17	18,26
	Centro	1668	97,27	17,27	Centro	1642	95,77	15,60					
S1FG29 P1-A-1 c	Centro	1662	97,27	15,43	Centro	1648	96,43	14,60		32	20	20	22,15
	Sur	1665	97,40	14,17	Sur	1649	96,50	14,17					
S1FG19 P6-1 n	Norte	1657	96,40	14,90	Norte	1675	97,40	15,33					
	Centro	1648	95,90	11,90	Centro	1643	95,57	14,00					
S1FG19 P8-1 c	Centro	1683	98,50	16,33	Centro	1709	99,60	17,60					
	Sur	1664	97,37	17,23	Sur	1682	98,43	18,53					
S1FG19 P2-1 c	Centro	1666	96,93	11,90	Centro	1664	96,77	12,13					
	Sur	1663	96,70	11,97	Sur	1646	95,83	12,77					
S1FG8 P16-6 n	Norte	1666	97,47	17,63	Norte	1662	97,27	17,60					
	Sur	1647	96,37	17,50	Sur	1642	96,03	17,77					
S1FG8 P14-6 c	Centro	1643	96,17	14,80	Centro	1631	95,43	16,33					
	Sur	1635	95,67	17,40	Sur	1650	96,57	15,63					
S1FG8 P10-6 c	Centro	1672	95,70	17,53	Centro	1676	95,97	17,10					
	Sur	1683	96,37	16,50	Sur	1681	96,27	17,07					
S1FG8 P21-5 c	Centro	1651	96,60	16,07	Centro	1653	96,73	15,80					
	Sur	1656	96,87	16,13	Sur	1637	95,77	16,17					
S1FG8 P18-5 c	Centro	1667	95,50	13,40	Centro	1673	95,83	12,90					
	Sur	1671	95,67	14,20	Sur	1685	96,53	14,47					
S1FG19 P14-1 n	Norte	1668	97,10	13,63									
	Centro	1651	96,87	15,00									
S1FG19 P16-1 n	Norte	1626	95,37	16,10									
	Centro	1657	97,20	16,53									
S1FG8 P20-6 n	Norte	1658	97,00	16,00									
	Sur	1643	96,13	13,50									
	DENSÍMETRO NUCLEAR												
	PAÑOS				JUNTAS				DCP				
CAPA	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)	UBIC.	γs (kg/m³)	GC(%)	w(%)	Penetr. (cm)	Espesor (cm)	No. Golpes	%CBR	
S1FG8 P18-6 n	Norte	1641	96,00	16,77									
	Centro	1653	96,73	17,07									
S1FG8 P9-7 c	Centro	1636	95,97	17,93									
	Sur	1658	97,27	18,07									
S1FG8 P7-7 n	Norte	1648	96,67	14,30									
	Centro	1629	95,57	14,93									
S1FG8 P3-1 n	Norte	1632	95,47	15,30									
	Centro	1633	95,53	16,33									
S1FG8 P2-1 n	Norte	1655	98,50	12,00									
	Centro	1631	96,93	12,30									
S1FG8 P2-7 n	Norte	1654	97,07	17,40	Norte	1663	97,53	16,63					
	Centro	1677	98,33	17,40	Centro	1667	97,77	17,27					

S1FG8 P4-7 n	Norte	1636	96,00	16,60	Norte	1668	97,83	15,93
	Sur	1653	96,97	17,83	Sur	1647	96,63	17,70
S1FG8 P8-6 n	Norte	1691	96,87	15,23	Norte	1691	96,80	16,03
	Sur	1684	96,43	16,07	Sur	1676	95,97	15,33
S1FG8 P13-7 c	Centro	1643	96,33	17,30	Centro	1630	95,60	15,33
	Sur	1650	96,80	17,23	Sur	1623	95,17	16,77
S1FG8 P17-6 c	Centro	1641	96,27	14,73	Centro	1664	97,63	15,17
	Sur	1658	97,20	14,33	Sur	1639	96,17	14,33
S1FG28 P2A-1 n	Norte	1640	95,93	14,17	Norte	1681	98,37	14,23
	Sur	1671	96,97	12,70	Sur	1632	95,47	15,77
S1FG19 P2A-1 n	Norte	1664	97,60	15,73	Norte	1636	95,97	18,90
	Centro	1637	96,03	17,50	Centro	1654	97,00	17,40
S1FG28 P1A-2 n	Norte	1686	98,90	16,50		1678	98,43	17,90
	Sur	1642	96,27	16,23		1667	97,83	17,73
S1FG8 P21-6 n	Norte	1663	97,03	17,57	Norte	1682	98,13	16,37
	Centro	1681	98,07	16,13	Centro	1647	96,03	16,47
S1FG8 P19-6 c	Centro	1646	96,53	16,53	Centro	1659	97,33	14,63
	Sur	1647	96,63	16,03	Sur	1656	97,13	15,40
S1FG8 P15-7 c	Centro	1652	96,93	16,77	Centro	1635	95,90	15,47
	Sur	1630	95,60	14,73	Sur	1674	98,20	16,37
S1FG8 P11 -7 n	Norte	1677	98,33	14,33	Norte	1661	97,43	15,20
	Centro	1656	97,07	13,83	Centro	1666	97,67	13,43
S1FG19 P4-2 c	Centro	1642	95,80	14,43	Sur	1682	98,13	13,53
S1FG19 P2-2 c	Centro	1648	96,13	15,10	Sur	1649	96,27	15,00
S1FG19 P17-1 n	Norte	1655	96,57	15,93	Norte	1641	95,77	15,87
	Sur	1672	97,53	12,83	Sur	1641	95,77	14,93
S1FG19 P15-1 c	Centro	1661	96,87	16,10	Centro	1704	99,40	16,47
	Sur	1661	96,93	13,93	Sur	1672	97,53	13,10
S1FG28 P2A-2 c	Centro	1668	97,30	15,97	Centro	1677	97,80	15,03
	Sur	1675	97,73	16,33	Sur	1698	99,07	15,40
S1FG19 P1A-2 n	Norte	1682	98,13	13,77	Norte	1711	99,73	14,50
	Sur	1646	96,00	14,87	Sur	1703	99,33	14,07
S1FG19 P3A-1 n	Norte	1709	99,70	14,23	Norte	1698	99,07	14,77
	Centro	1657	96,67	16,07	Centro	1651	96,30	14,47

Tabla 4.3.- Resumen de datos obtenidos de los ensayos realizados en el relleno del NAIQ,

Densímetro Nuclear y DCP (Geosuelos Cia. Ltda.).

PROCTOR MODIFICADO FEBRERO 2006-MARZO 2007					
PROCTOR			PROCTOR		
ys máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)	ys máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)
Feb-06			Jun-06		
1728,00	14,58	1980	1732,00	16,13	2011
1734,00	13,51	1968	1757,00	15,44	2028
1679,00	15,86	1945	1751,00	15,45	2022
1768,00	12,87	1996	1726,00	16,17	2005
1737,00	14,20	1984	1747,00	15,59	2019
1746,00	13,55	1983	1649,00	21,85	2009
1741,00	15,01	2002	1761,00	13,28	1995
1731,00	15,54	2000	1726,00	16,21	2006
Mar-06			1665,00	21,13	2017
1679,00	14,06	1915	1739,00	14,40	1989
1690,00	15,11	1945	1747,00	15,69	2021
May-06			1745,00	15,64	2018
1740,00	15,01	2001	1731,00	14,01	1974
1730,00	15,58	2000	1726,00	16,17	2005
1732,00	16,50	2018	1700,00	15,88	1970
1744,00	15,58	2016	1724,00	14,52	1974
1727,00	15,50	1995	1734,00	13,81	1973
1736,00	14,27	1984	1717,00	16,60	2002
1742,00	15,22	2007	1710,00	16,27	1988
1741,00	14,75	1998	1723,00	15,63	1992
1727,00	15,50	1995	1729,00	15,28	1993
1742,00	13,82	1983	1706,00	16,78	1992
1747,00	15,93	2025	1728,00	15,40	1994
1742,00	15,23	2007	1728,00	15,15	1990
1763,00	15,48	2036	1735,00	16,00	2013
Jun-06			1710,00	14,96	1966
1727,00	15,50	1995	1709,00	16,72	1995
1744,00	15,58	2016	Jul-06		
1731,00	15,61	2001	1701,00	16,84	1987
1740,00	15,24	2005	1743,00	15,34	2010
1727,00	15,50	1995	1711,00	13,03	1934
1751,00	14,98	2013	1734,00	13,81	1973
1727,00	15,50	1995	1749,00	14,70	2006
1751,00	14,98	2013	1738,00	16,00	2016
1727,00	16,66	2015	1758,00	14,64	2015
1756,00	15,29	2024	1783,00	11,74	1992
1753,00	15,51	2025	1758,00	15,32	2027
1746,00	14,52	2000	1735,00	15,66	2007
1756,00	15,00	2019	1739,00	15,72	2012
1732,00	16,13	2011	1737,00	15,86	2012
1742,00	15,97	2020	1723,00	16,88	2014
1761,00	15,52	2034	1723,00	15,12	1984
1760,00	15,75	2037	1714,00	14,79	1968
1755,00	14,24	2005	1745,00	15,96	2024
1753,00	15,51	2025	1758,00	13,18	1990

γ_s máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)	γ_s máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)
Jul-06			Ago-06		
1715,00	14,45	1963	1845,00	14,27	2108
1649,00	15,72	1908	1832,00	13,30	2076
1751,00	14,38	2003	1789,00	15,05	2058
1746,00	15,49	2016	1738,00	14,64	1992
1722,00	15,14	1983	1761,00	14,64	2019
1748,00	14,38	1999	1777,00	15,90	2060
1744,00	13,85	1986	1723,00	15,10	1983
1687,00	16,72	1969	1742,00	13,16	1971
1727,00	15,42	1993	1723,00	13,79	1961
1752,00	15,87	2030	1713,00	15,19	1973
1758,00	13,18	1990	1701,00	15,39	1963
1733,00	14,57	1985	1744,00	14,47	1996
1744,00	14,58	1998	1711,00	13,03	1934
1736,00	15,35	2002	1748,00	14,36	1999
1757,00	15,42	2028	1731,00	14,50	1982
1733,00	14,57	1985	1719,00	14,18	1963
1740,00	15,13	2003	1724,00	14,59	1976
1777,00	15,09	2045	1776,00	14,47	2033
1752,00	15,44	2023	1757,00	13,86	2001
1751,00	14,48	2005	1752,00	13,47	1988
1733,00	15,65	2004	1701,00	16,84	1987
1734,00	14,53	1986	1743,00	15,34	2010
1741,00	14,42	1992	1722,00	14,48	1971
1746,00	15,88	2023	1777,00	13,95	2025
1734,00	16,09	2013	1731,00	13,64	1967
1745,00	15,77	2020	1775,00	14,14	2026
1745,00	14,78	2003	1681,00	13,73	1912
1743,00	14,49	1996	1701,00	16,84	1987
1756,00	13,84	1999	1743,00	15,34	2010
1721,00	16,04	1997	1723,00	18,44	2041
1763,00	14,03	2010	1733,00	16,35	2016
1752,00	14,52	2006	1771,00	14,13	2021
1740,00	15,86	2016	Sep-06		
1727,00	16,05	2004	1741,00	15,06	2003
1741,00	16,19	2023	1716,00	15,11	1975
1739,00	15,56	2010	1733,00	15,51	2002
1750,00	15,08	2014	1733,00	15,56	2003
1764,00	14,34	2017	1753,00	14,43	2006
1749,00	15,38	2018	1720,00	16,15	1998
1756,00	14,77	2015	1750,00	14,38	2002
Ago-06			1755,00	14,46	2009
1861,00	13,00	2103	1734,00	16,40	2018
1720,00	17,95	2029	1756,00	14,50	2011
1801,00	15,21	2075	1792,00	15,48	2069
1803,00	14,13	2058	1718,00	16,20	1996

γ_s máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)	γ_s máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)
Sep-06			Dic-06		
1745,00	14,74	2002	1754,00	14,72	2012
1762,00	15,17	2029	1748,00	16,59	2038
1765,00	13,38	2001	1761,00	15,14	2028
1733,00	14,80	1989	1759,00	16,71	2053
1664,00	19,13	1982	1776,00	15,29	2048
1746,00	14,64	2002	1797,00	13,74	2044
1754,00	12,63	1976	1792,00	13,80	2039
1746,00	15,07	2009	1751,00	14,74	2009
1769,00	14,48	2025	1772,00	15,16	2041
1719,00	16,76	2007	1752,00	15,30	2020
1740,00	15,09	2003	1689,00	17,06	1977
1741,00	15,85	2017	1750,00	14,92	2011
1746,00	14,99	2008	1728,00	16,10	2006
1725,00	14,20	1970	1733,00	15,73	2006
1771,00	14,27	2024	1737,00	15,64	2009
1745,00	14,99	2007	1761,00	15,09	2027
1705,00	16,86	1992	1768,00	14,92	2032
1714,00	16,18	1991	1755,00	15,55	2028
1709,00	16,58	1992	1754,00	16,06	2036
1717,00	14,68	1969	1766,00	15,94	2048
Dic-06			1786,00	13,62	2029
1747,00	14,37	1998	1746,00	15,24	2012
1750,00	13,68	1989	1753,00	15,54	2025
1744,00	14,60	1999	1750,00	15,33	2018
1720,00	14,70	1973	1780,00	15,01	2047
1731,00	15,37	1997	1735,00	15,98	2012
1771,00	15,35	2043	1757,00	15,21	2024
1786,00	15,42	2061	1744,00	15,67	2017
1762,00	15,68	2038	1782,00	13,37	2020
1773,00	14,56	2031	1740,00	15,31	2006
1730,00	16,13	2009	1773,00	14,13	2024
1767,00	14,99	2032	1791,00	13,95	2041
1789,00	14,59	2050	1746,00	15,26	2012
1763,00	13,54	2002	1717,00	16,62	2002
1787,00	14,16	2040	1729,00	15,81	2002
1737,00	14,45	1988	1723,00	15,22	1985
1730,00	14,68	1984	1762,00	17,25	2066
1752,00	13,10	1982	Ene-07		
1739,00	13,71	1977	1799,00	13,58	2043
1780,00	14,05	2030	1759,00	12,19	1973
1735,00	15,15	1998	1785,00	14,65	2047
1750,00	14,71	2007	1718,00	16,20	1996
1787,00	14,95	2054	1672,00	15,10	1924
1774,00	13,73	2018	1727,00	15,33	1992
1720,00	14,25	1965	1694,00	15,78	1961

γ_s máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)	γ_s máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)
Ene-07			Feb-07		
1702,00	15,90	1973	1720,00	16,83	2009
1730,00	15,53	1999	1814,00	13,11	2052
1719,00	16,40	2001	1713,00	17,62	2015
1724,00	14,34	1971	1762,00	14,33	2014
1724,00	15,80	1996	1705,00	15,92	1976
1739,00	16,00	2017	1789,00	13,50	2031
1732,00	15,47	2000	1703,00	17,26	1997
1766,00	15,03	2031	1736,00	15,67	2008
1683,00	16,33	1958	1716,00	16,53	2000
1687,00	16,76	1970	1709,00	17,42	2007
1720,00	16,63	2006	1694,00	15,98	1965
1744,00	14,49	1997	1714,00	16,55	1998
1703,00	17,48	2001	1720,00	15,74	1991
1703,00	15,78	1972	1720,00	15,76	1991
1765,00	14,30	2017	1742,00	16,38	2027
1739,00	15,42	2007	1740,00	13,71	1979
1726,00	15,22	1989	1806,00	14,02	2059
1701,00	18,44	2015	1719,00	16,13	1996
1751,00	15,76	2027	1774,00	14,48	2031
1760,00	15,28	2029	1717	16,73	2004
1735,00	16,47	2021	1782,00	13,48	2022
1736,00	15,34	2002	1746,00	14,41	1998
1699,00	16,40	1978	1716,00	17,20	2011
1723,00	15,16	1984	1750,00	14,57	2005
1731,00	15,54	2000	1727,00	14,87	1984
1752,00	15,04	2016	1733,00	16,04	2011
1764,00	14,71	2023	1758,00	14,57	2014
1764,00	15,64	2040	1747,00	13,96	1991
1850,00	13,08	2092	1741,00	15,61	2013
1736,00	16,17	2017	1693,00	16,57	1974
1743,00	15,79	2018	1793,00	14,00	2044
1693,00	15,71	1959	1801,00	14,30	2059
1699,00	12,39	1910	1746,00	14,31	1996
1735,00	15,71	2008	1800,00	13,88	2050
1738,00	16,25	2020	1710,00	15,93	1982
1703,00	17,48	2001	1735,00	14,97	1995
1745,00	15,58	2017	1695,00	14,69	1944
1691,00	17,21	1982	1752,00	16,11	2034
Feb-07			1705,00	16,12	1980
1756	14,67	2014	1761,00	14,93	2024
1689,00	17,48	1984	1804,00	13,82	2053
1752,00	14,57	2007	1713,00	16,68	1999
1782,00	14,66	2043	1684,00	16,86	1968
1729,00	17,11	2025	1700,00	15,92	1971
1740,00	14,33	1989	1780,00	14,62	2040

ys máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)	ys máx (kg/m ³)	wop(%)	γ máx (kg/m ³)
Feb-07			Feb-07		
1736,00	15,34	2002	1726,00	15,92	2001
1800,00	13,10	2036	Mar-07		
1762,00	14,84	2023	1664,00	19,39	1987
1758,00	15,39	2029	1791,00	14,36	2048
1733,00	15,61	2004	1799,00	14,00	2051
1738,00	14,68	1993	1676,00	18,51	1986
1704,00	15,91	1975	1759,00	15,35	2029
1753,00	13,62	1992	1727,00	16,58	2013
1769,00	13,99	2016	1701,00	16,86	1988
1777,00	13,96	2025	1832,00	13,63	2082
1717,00	15,32	1980	1665,00	18,31	1970
1710,00	16,35	1990	1747,00	14,47	2000
1769,00	14,00	2017	1756,00	12,72	1979
1712,00	16,07	1987	1737,00	16,63	2026
1691,00	14,53	1937	1690,00	18,80	2008
1712,00	16,00	1986	1758,00	11,77	1965
1719,00	16,13	1996	1747,00	17,21	2048
1747,00	14,87	2007	1725,00	16,28	2006
1751,00	12,91	1977	1730,00	16,31	2012
1766,00	12,71	1990	1720,00	17,34	2018
1791,00	12,52	2015	1771,00	15,16	2039
1793,00	14,67	2056	*	*	*

Tabla 4.4.- Resumen de datos obtenidos de los ensayos realizados en el relleno del NAIQ,
Proctor Modificado: Densidad Seca Máxima, Humedad Óptima y Densidad Húmeda Máxima
(Geosuelos Cia. Ltda.).