

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



PROYECTO DE GRADO:

**“ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE
COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DEL CONO DE ARENA,
DEFLECTÓMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEOGAUGE EN LA CAPA
SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DOBLE VÍA EL ALTO - VIACHA”**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

POSTULANTE: Ariel Raul Bedoya Castro

TUTORES: Ing. Carlos Alex Arteaga Vargas

Ing. Oscar Jose Valencia Gutierrez

Ing. Gelbin Leonardo Botello Segarrundo

LA PAZ – BOLIVIA
2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco principalmente a Dios por haberme otorgado el entendimiento, paciencia, sabiduría y perseverancia para obtener este título tan soñado y anhelado

A mi ángel, Gustavo Bedoya Castro que desde el cielo siempre me cuida para seguir adelante.

A mis Padres, Raul Bedoya Heredia y Leonor Castro López por el sacrificio por su esfuerzo para brindarme una educación y por sobre todo con su apoyo incondicional en los momentos más difíciles de nuestras vidas a lo largo de todo este proceso.

A mi Hermana, Fabiola Bedoya Castro por su apoyo y motivación en todo momento

A mis verdaderos amigos que me brindaron su amistad, consejos, ánimo, apoyo, compañía y conocimiento.

A mis Tutores, Ing. Carlos Alex Arteaga Vargas, Ing. Oscar José Valencia Gutierrez, Ing. Gelbin Leonardo Botello Segarrundo, que me brindaron su tiempo y ayuda en el proceso de este Proyecto de Grado.

A los docentes del tribunal por su apoyo y paciencia en la realización de este proyecto.

A la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés, por brindarme la oportunidad de tener un estudio de calidad.

Ariel Raul Bedoya Castro

DEDICATORIA:

A Dios por haberme dado todas las virtudes para poder alcanzar esta meta en mi vida.

A mis Padres, Raul y Leonor, ya que, sin su apoyo, no se hubiera logrado este objetivo.

A mi Hermanos, Gustavo que en vida me brindo su apoyo en todo momento para culminar esta etapa y a Fabiola por compartir este momento tan importante en mi vida.

A mis Amigos (as), que en esta etapa final me mostraron su apoyo para seguir adelante.

Ariel Raúl Bedoya Castro

Nombre: Ariel Raul Bedoya Castro

CI: 8311032 LP

Celular: 67067214

Dirección: Calle Pioneros Rochdale No.609, Zona San Pedro

Correo: arbedoya04@gmail.com

RESUMEN

El presente Proyecto de Grado, consiste en un estudio teórico-práctico, para el control de calidad en la compactación de los materiales granulares de la capa subbase, que conforma la estructura del pavimento rígido de la "Construcción Doble Vía El Alto - Viacha".

Para poder llevar a cabo el desarrollo del proyecto, primeramente, se realizaron en laboratorio ensayos de suelos mediante los métodos convencionales, tanto físicos como mecánicos, utilizando muestras representativas de la capa subbase, cuyos ensayos son Granulometría, Límites de Consistencia, Contenido de Humedad, Proctor Modificado, Relación Soporte California (CBR), para así caracterizar y evaluar las propiedades de dichas muestras.

Para determinar el grado de compactación se realizó una serie de mediciones en campo, durante la construcción de la vía, en un tramo de prueba a nivel subbase, para lo cual se realizaron tres pruebas estandarizadas: Método Cono de Arena, GeoGauge, Deflectómetro Liviano de Impacto; los cuales contribuyeron con la información necesaria para establecer el grado de concordancia entre los métodos especificados anteriormente.

Para ello, se analizaron los parámetros que conforma cada método realizado, mediante correlaciones estadísticas, relacionando la densidad de suelos con los módulos de rigidez con los respectivos ensayos que se ejecutaron en campo. Asimismo, se realizó un análisis de correlación de los resultados de la compactación obtenida por los tres métodos.

Palabras clave: Control de calidad, subbase, compactación, humedad, Cono de Arena, densidad, GeoGauge, módulos, rigidez y LWD.

ABSTRACT

This Degree Project consists of a theoretical-practical study for quality control in the compaction of the granular materials of the subbase layer, which makes up the structure of the rigid pavement of the "El Alto - Viacha Double Track Construction".

In order to carry out the development of the project, soil tests were first carried out in the laboratory using conventional methods, both physical and mechanical, using representative samples of the subbase layer, whose tests are Granulometry, Consistency Limits, Moisture Content, Modified Proctor, California Support Ratio (CBR), in order to characterize and evaluate the properties of said samples.

To determine the degree of compaction, a series of measurements were carried out in the field, during the construction of the road, in a test section at the subbase level, for which three standardized tests were carried out: Sand Cone Method, GeoGauge, Light Deflectometer of Impact; which contributed with the information necessary to establish the degree of agreement between the methods specified above.

To do this, the parameters that make up each method carried out were analyzed, through statistical correlations, relating the density of soils to the rigidity modules with the respective tests that were carried out in the field. Likewise, a correlation analysis was carried out on the compaction results obtained by the three methods.

Keywords: Quality control, subbase, compaction, humidity, Sand Cone, density, GeoGauge, rigidity, modules and LWD.

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN GENERAL.....	2
1.3. GENERALIDADES	3
1.3.1. Ubicación del proyecto	3
1.3.2. Geografía.....	4
1.3.3. Rasgos geomorfológicos de la región.....	5
1.3.4. Suelos.....	6
1.3.5. Topografía	6
1.3.6. Clima	7
1.4. ESTADO DE ARTE.....	8
1.5. OBJETIVOS	10
1.5.1. Objetivo General	10
1.5.2. Objetivos Específicos	10
1.6. ALCANCE Y LIMITACIONES	11
1.6.1. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	13
1.6.2. Primera Fase	14
1.6.3. Segunda Fase	15
1.6.4. Tercera Fase	15
1.6.5. Métodos y Equipos utilizados:	17
1.6.6. Diagramas de Investigación:.....	18
1.7. ENSAYOS DE LOS MATERIALES	22
1.7.1. Ensayos Físicos de Caracterización.....	22
1.7.2. Ensayos Mecánicos de Resistencia	22
1.8. ENSAYOS MÉTODOS ALTERNOS PARA LA OBTENCIÓN DE MÓDULOS DE RIGIDEZ..	22
1.8.1. Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD) (E2583-07 AASTHO TP123-01 TP456-01).	22
1.8.2. GeoGauge H-4140 Humboldt (ASTM D6758-02)	23
CAPITULO 2. SUELOS	24
2.1. GENERALIDADES SOBRE EL SUELO.....	24
2.1.1. Mecánica de suelos	24
2.1.2. Importancia de la mecánica de suelos en carreteras.....	24
2.1.2.1. Suelos Granulares	24
2.2. CLASIFICACIÓN DE SUELOS	25
2.2.1. Sistema de Clasificación AASHTO	25
2.2.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS	28
2.3. ANÁLISIS GRANULOMETRICO	32
2.3.1. Coeficiente de curvatura.....	32
2.3.2. Coeficiente de uniformidad.....	33
2.3.3. Gradación del Material para Subbase Granular.....	33
2.4. CONSISTENCIA DEL SUELO - LÍMITES DE ATTERBERG	34
2.4.1. Límite Líquido (LL).....	34
2.4.2. Límite Plástico (LP).....	35
2.4.3. Índice de Plasticidad (IP).....	35
2.5. INFLUENCIA DE MÓDULOS EN SUELOS GRANULARES	36
2.5.1. Módulo de Deformación o Elasticidad	36
2.5.2. Módulo de rigidez o corte de una capa estructural del Pavimento.....	37
2.5.3. Módulo de Young.....	38
2.5.4. Módulo Resiliente (para triaxiales).....	39
2.5.5. Módulo de Reacción	40
2.6. IMPORTANCIA DE LOS SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES.....	41
2.6.1. Pavimentos	41
2.6.2. Preparación de la subrasante, base y subbase	42

CAPITULO 3. COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS	45
3.1. GENERALIDADES	45
3.1.1. Peso Unitario	45
3.1.1.1. Peso unitario húmedo o densidad húmeda.....	45
3.1.1.2. Peso unitario seco o densidad seca.....	46
3.1.2. Compactación y Consolidación.....	46
3.1.2.1. Ventajas.....	46
3.1.3. Factores que influyen en la compactación de Laboratorio.....	48
3.1.3.1. Tipo de Suelo.....	48
3.1.3.2. Energía Específica.....	49
3.1.3.3. Método de Compactación.....	50
3.1.3.4. Humedad.....	50
3.1.3.5. Sentido de recorrido de la escala de humedad.....	50
3.1.3.6. Temperatura y presencia de otras sustancias.....	50
3.1.4. La curva de saturación.....	51
3.1.5. Elección del tipo de Compactadora.....	51
3.1.5.1. Compactación por vibración.....	51
3.1.6. Control de calidad en la compactación.....	53
3.1.7. Métodos para el control de la compactación.....	54
CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA SUBBASE.....	55
4.1. DESCRIPCIÓN, IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DEL SUELO CAPA SUBBASE (ASTM D4220)	55
4.1.1. Descripción.....	55
4.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA POR CUARTEO (AASHTO T248).....	56
4.2.1. Descripción.....	56
4.2.2. Método por Cuarteo Mecánico.....	56
4.2.3. Procedimiento.....	56
4.3. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HÚMEDAD (ASTM D2216).....	57
4.3.1. Descripción.....	57
4.3.2. Preparación y procedimiento.....	57
4.3.3. Fórmula para la determinación de la humedad.....	57
4.3.4. Análisis y resumen de los resultados.....	58
4.4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (AASHTO T88 ASTM D422).....	58
4.4.1. Descripción.....	58
4.4.2. Preparación y procedimiento.....	58
4.4.3. Análisis y resumen de los resultados.....	61
4.5. LÍMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D4318 AASHTO T89 - ASTM D4318 AASHTO T90).....	62
4.5.1. Descripción.....	62
4.5.2. Preparación de las muestras y procedimiento Limite Líquido y Limite Plástico.....	62
4.5.3. Determinación del Límite Líquido y Plástico.....	64
4.5.4. Análisis y resultados.....	64
4.6. RELACIONES DE PESO UNITARIO - HUMEDAD EN SUELOS - MÉTODO MODIFICADO (ASTM D422 AASHTO T180) - ENSAYO DE COMPACTACIÓN.....	65
4.6.1. Descripción.....	65
4.6.2. Diferencia y Elección de la energía de compactación.....	65
4.6.3. Preparación y procedimiento.....	66
4.6.4. Análisis y resumen de los resultados.....	68
4.7. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR DE LABORATORIO) (ASTM D1883 AASHTO T193).....	69
4.7.1. Descripción.....	69
4.7.2. Preparación y procedimiento.....	69
4.7.3. Análisis y resumen de los resultados.....	72
CAPITULO 5. METODOLOGÍAS DE ENSAYOS EN SITIO DESPUES DE LA COMPACTACIÓN ...	73

5.1.	DENSIDAD EN SITIO – CONO DE ARENA (ASTM D1556 - AASHTO T191)	73
5.1.1.	Equipos y materiales que constituyen el método cono de arena	74
5.1.2.	Procedimiento	78
5.2.	ENSAYO POR EL MÉTODO GEOGAUGE HUMBOLDT H-4140 (ASTM D6758-02)	82
5.2.1.	Funcionamiento	83
5.2.2.	Bases de Cálculo de Módulo y Rigidez	86
5.2.3.	Características y Especificaciones Técnicas	87
5.2.4.	Funciones de los Botones – Iconos – Muestra de Mensajes	88
5.2.5.	Determinación de la comprobación, funcionamiento o calibración del GeoGauge	91
5.2.6.	Procedimiento de medición	92
5.2.7.	Rigidez y Densidad	94
5.2.8.	Correlación rigidez y contenido de humedad	94
5.3.	ENSAYO DEFLECTÓMETRO LIVIANO DE IMPACTO LWD PRIMA 100 (ASTM 2583-07) (AASHTO TP123-01) (AASHTO TP456-01)	95
5.3.1.	Piezas estándar PRIMA100 LWD:	99
5.3.2.	Manipulación y almacenamiento	100
5.3.2.1.	Transporte	100
5.3.2.2.	Transporte de punto de medida a punto de medida	100
5.3.2.3.	Ensamblaje del Equipo	101
5.3.3.	Selección plato de carga	102
5.3.3.1.	Verificación de la Calibración	103
5.3.4.	Factores generales que influyen en la medición con PRIMA100	103
5.3.5.	Operación	104
5.3.6.	Cableado	104
5.3.7.	Carga de la batería en la caja electrónica	104
5.3.8.	Bluetooth	104
5.3.9.	GPS	105
5.3.10.	Encender - PRIMA100	105
5.3.11.	Administración de la unidad de recolección de datos Android (ACU)	106
5.3.11.1.	Verificación de la configuración de PRIMA 100	106
5.3.12.	Definiciones de íconos	117
5.3.13.	Características y Especificaciones Técnicas	118
5.3.14.	Preparación y Operación	118
5.3.15.	Procedimiento para uso del LWD según el manual M-MMP-1-16/20	119
5.3.16.	Obtención del Módulo de Rigidez Objetivo, <i>E_{Obj.}</i> , en Laboratorio	120
5.3.16.1.	Obtención del Módulo Superficie LWD en campo	126
5.3.16.2.	Cálculo del Grado de Compactación (Relación de Rigideces)	129
5.3.16.3.	Determinación del Grado de Compactación	130
5.3.16.4.	Deflectómetro de Impacto Pesado (FWD)	130
CAPITULO 6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO		132
6.1.	COEFICIENTES DE CORRELACIÓN	132
6.2.	COEFICIENTES DE CORRELACIÓN SEGÚN LA NATURALEZA DE LAS VARIABLES	132
6.2.1.	Pruebas de Correlación	134
6.2.1.1.	Prueba de Correlación de Pearson	134
6.2.1.2.	Prueba de Correlación de Spearman	135
6.2.1.3.	Coefficiente de Determinación (R ²)	136
6.2.1.4.	Modelos de Regresión Lineal	136
6.2.1.5.	Bondad de Ajuste	136
6.2.1.6.	Coefficiente de Correlación múltiple R	137
6.2.1.7.	Significancia estadística p	137
6.3.	VALOR DE P DE SIGNIFICACION DE R	137
6.4.	TIPOS DE VARIABLES	137
6.4.1.	Variables Cualitativas	137
6.4.2.	Variables Cuantitativas	138

6.5.	ANÁLISIS DE VARIABLES	138
6.6.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA NORMALIDAD DE LAS VARIABLES Y ELECCIÓN DE LA PRUEBA DE CORRELACIÓN ADECUADA	140
6.6.1.	Correlación de la Densidad Seca del Suelo Mediante el Método Cono de Arena y Densidad Estimada Mediante el Método GeoGauge Humboldt H-4140.....	140
6.6.1.1.	Cálculo de Estadísticos de las Variables	141
6.6.1.2.	Prueba de Hipótesis de Normalidad de las Variables	144
6.6.1.3.	Prueba de Correlación entre Densidad Seca en Campo y Densidad Estimada Humboldt.	145
6.6.1.4.	Modelo de Regresión Lineal para el Valor: Densidad Seca en Campo y Densidad Estimada Humboldt.....	147
6.6.2.	Validación del Modelo y Comparación con los Valores Medidos	150
6.6.3.	Prueba de Correlación de Entre Módulo de Young Mediante el Método GeoGauge Humboldt H-4140, Densidad Seca en Campo Mediante el Método Cono de Arena y Rigidez Mediante el Método GeoGauge Humboldt H-4140.....	152
6.6.3.1.	Cálculo de Estadísticos de las Variables	152
6.6.3.2.	Prueba de Hipótesis de Normalidad de las Variables	155
6.6.3.3.	Prueba de Correlación entre Módulo Young / Cono de Arena y Módulo de Rigidez GeoGauge.	157
6.6.3.4.	Modelo de Regresión Polinómica para el Valor: Entre Módulo Young / Cono de Arena y Módulo de Rigidez GeoGauge.	159
6.6.3.5.	Validación del Modelo y Comparación con los Valores Medidos	160
6.6.4.	Prueba de Correlación de entre la Variable Densidad Seca en Campo Mediante el Método Cono de Arena [KN/m ³] y Módulo de Campo Mediante el Método LWD.....	162
6.6.4.1.	Prueba de Hipótesis de Normalidad de las Variables	162
6.6.4.2.	Validación del Modelo y Comparación con los Valores Medidos	164
CAPITULO 7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	167	
7.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS	167
7.1.1.	Contenido de Humedad	167
7.1.2.	Granulometría	167
7.1.3.	Límites de Atterberg	168
7.1.4.	Clasificación de la Capa Subbase del Tramo de Prueba según la AASTHO y ASTM.....	169
7.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS.....	171
7.2.1.	Ensayo de Compactación – Relaciones de Peso Unitario y Humedad en los Suelos Método Modificado.	171
7.2.2.	Ensayo Relación de Soporte del Suelo en el Laboratorio (CBR de Laboratorio).....	172
7.2.3.	Ensayo Densidad en Sitio por el Método Cono de Arena	173
7.3.	ENSAYO DEFLECTÓMETRO LIVIANO DE IMPACTO (LWD) PRIMA - 100	174
7.4.	ENSAYOS GEOGAUGE HUMBOLDT H-4140	181
7.5.	ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES OBTENIDAS ENTRE SUS PARÁMETROS DE LOS MÉTODOS LWD, GEOGAUGE Y CONO DE ARENA.	185
7.5.1.	Análisis de Distribución Normal o Método de Gauss Obtenido de las Variables de los Métodos GeoGauge, Cono de Arena, LWD.....	187
7.6.	CORRELACIONES OBTENIDAS ENTRE SUS PARÁMETROS DE LOS MÉTODOS LWD, GEOGAUGE Y CONO DE ARENA.	192
7.7.	COMPARACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN ENTRE LOS TRES MÉTODOS	197
CAPITULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	201	
8.1.	CONCLUSIONES	201
8.2.	RECOMENDACIONES.....	208
CAPITULO 9. BIBLIOGRAFÍA.....	211	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa Político del Estado Plurinacional de Bolivia	3
Figura 2. Mapa Provincia Murillo – Viacha	3
Figura 3. Mapa Departamento de La Paz	3
Figura 4. Municipio de Viacha	4
Figura 5. Región de El Alto – Viacha	4
Figura 6. Mapa Geológico Municipio El Alto	5
Figura 7. Mapa Geológico Municipio de Viacha	6
Figura 8. Topografía El Alto- Viacha	7
Figura 9. Terminadora Pavimento Rígido, Construcción El Alto - Viacha.....	8
Figura 10. Frecuencia y Distribución de los puntos de sondeo de prueba	14
Figura 11. Sección Tipo de la Vía El Alto – Viacha	15
Figura 12. Modelo de diagramación para la distribución de puntos de ensayo	16
Figura 13. Límites de Consistencia del suelo	34
Figura 14. Esfuerzo - Deformación	37
Figura 15. Esquema de medición del esfuerzo cortante	38
Figura 16. Diagrama Tensión – Deformación	39
Figura 17. Acumulación de la deformación con el número de ciclos	40
Figura 18. Diagrama Tensión – Deformación	41
Figura 19. Principio de Compactación	47
Figura 20. Tipos de Curvas de Compactación.....	49
Figura 21. Compactación en campo	53
Figura 22. Muestreo de la capa subbase.....	55
Figura 23. Equipo y procedimiento del Cuarteo Mecánico.....	56
Figura 24. Determinación de la masa de suelo seco.....	57
Figura 25. Separación parte gruesa y fina.....	59
Figura 26. Cuarteo de la parte fina.....	59
Figura 27. Lavado parte gruesa	59
Figura 28. Lavado parte fina.....	60
Figura 29. Secado de la muestra	60
Figura 30. Tamizado manual y automático de la muestra.....	60
Figura 31. Preparación y acondicionamiento de la muestra	62
Figura 32. Porción de muestra colocada en copa de Casagrande	63
Figura 33. Determinación de la masa de suelo con recipiente.....	63
Figura 34. Determinación de la masa de suelo con recipiente.....	63
Figura 35. Separación de la muestra en los tamices.....	66
Figura 36. Determinación de la masa de suelo	67
Figura 37. Mezclado de la muestra	67
Figura 38. Verificación del molde, compactado de la muestra	67
Figura 39. Enrasado de la muestra	68
Figura 40. Preparado de la muestra.....	69
Figura 41. Armado del molde, compactado de la muestra	70
Figura 42. Colocado del molde espaciador	70
Figura 43. Determinación de la masa total	70
Figura 44. Lectura del dial al inicio.....	70
Figura 45. Lectura del dial al final, Drenaje del agua	71
Figura 46. Registro de penetraciones	71
Figura 47. Verificación de la penetración en el suelo, determinación de su humedad.....	71
Figura 48. Equipo Cono de Arena – Construcción doble vía El Alto – Viacha	73
Figura 49. Equipo Cono de Arena.....	75

Figura 50. Procedimiento para la determinación de la masa del cono	76
Figura 51. Molde y Llenado del aparato.....	77
Figura 52. Procedimiento para determinar la densidad de la arena	78
Figura 53. Excavación del suelo	79
Figura 54. Finalización del ensayo en campo.....	80
Figura 55. Determinación del contenido de humedad	80
Figura 56. Equipo GeoGauge H-4140	83
Figura 57. Sección Transversal del Equipo GeoGauge H-4140	84
Figura 58. Calibración H-4140	92
Figura 59. Superficie limpia y nivelada con arena fina	93
Figura 60. Configuración del sistema operativo.....	93
Figura 61. Equipo Deflectómetro Liviano de Impacto LWD.....	96
Figura 62. Esquema del equipo LWD	97
Figura 63. Armado del equipo	100
Figura 64. Transporte de punto de medida a punto de medida LWD	100
Figura 65. Caja electrónica.....	105
Figura 66. Ejecución del ensayo	119
Figura 67. Concepción del LWD	120
Figura 68. Configuración alturas de caída	121
Figura 69. Equipo LWD sobre molde AASHTO	122
Figura 70. Distribución propuesta para muestrear en campo capas compactadas de subbase	126
Figura 71. Ensayo en campo Deflectómetro Liviano de Impacto.....	128
Figura 72. Ensayo de Deflectometría FWD Prog. 11+233	130
Figura 73. Cuenco de deflexiones medidas por FWD	131
Figura 74. Grado de correlación entre variables.....	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Columna Geomorfológica	5
Tabla 2. Métodos y Equipos Utilizados	17
Tabla 3. Clasificación AASHTO	26
Tabla 4. Símbolos de Grupo	29
Tabla 5. Tipología de suelos.....	29
Tabla 6. Características de los suelos.....	30
Tabla 7. Sistema de Clasificación de Suelos SUCS	31
Tabla 8. Granulometría para Capa Subbase de Material Granular	33
Tabla 9. Valores típicos de consistencia del suelo	35
Tabla 10. Tipos de maquinaria según al tipo de suelo.....	52
Tabla 11. Resumen Ensayo Contenido de Humedad ASTM D1556.....	58
Tabla 12. Resumen del Análisis Granulométrico	61
Tabla 13. Resumen del Ensayo de Limites de Consistencia	64
Tabla 14. AASTHO T99	65
Tabla 15. Energías de Compactación ASSTHO T99, T180	66
Tabla 16. Resumen del Ensayo de Compactación Proctor Modificado	68
Tabla 17. Resumen del Ensayo CBR.....	72
Tabla 18. Resumen Ensayo CBR de Laboratorio	72
Tabla 19. Características Generales	87
Tabla 20. Características Mecánicas	87
Tabla 21. Características Generales y Mecánicas.....	87
Tabla 22. Características Generales y Mecánicas.....	87
Tabla 23. Características Generales y Mecánicas.....	87
Tabla 24. Ecuaciones de "C" para diferentes tipos de suelo	95
Tabla 25. Características de las diferentes marcas del Deflectómetro Liviano de Impacto ..	98
Tabla 26. Piezas Deflectómetro Liviano de Impacto – PRIMA 100	99
Tabla 27. Montaje del equipo.....	101
Tabla 28. Características de los platos de carga	102
Tabla 29. Significado de los iconos	117
Tabla 30. Características Generales del equipo	118
Tabla 31. Valores típicos a considerar para el coeficiente de Poisson de un suelo	124
Tabla 32. Factor de distribución de esfuerzos para diferentes tipos de suelo	127
Tabla 33. Valores de referencia del módulo de rigidez de superficie en campo para diferentes materiales	129
Tabla 34. Interpretación de r.....	135
Tabla 35. Interpretación de p.....	135
Tabla 36. Valores de las variables obtenidas según a cada metodología	138
Tabla 37. Valores de las variables obtenidas según a cada metodología	139
Tabla 38. Requisito de las pruebas de correlación	140
Tabla 39. Resumen del Ensayo GeoGauge del material granular para la capa subbase ...	141
Tabla 40. Resumen de los Estadísticos de la variable Densidad seca en campo	142
Tabla 41. Resumen de los Estadísticos de la variable Densidad seca estimada	143
Tabla 42. Resumen de las pruebas de normalidad	145
Tabla 43. Resumen de las pruebas de correlación.....	147
Tabla 44. Densidad Cono de Arena, densidad seca Humboldt.....	150
Tabla 45. Modelo de correlación GeoGauge	151
Tabla 46. Cuadro de Estadísticos de las variables	153
Tabla 47. Cuadro de Estadísticos de las variables	154
Tabla 48. Cuadro de Normalidad de las variables	156

Tabla 49. Dispersión de los valores de las variables	158
Tabla 50. Módulo de Young del equipo GeoGauge	161
Tabla 51. Modelo de correlación obtenida para la Densidad Cono de Arena Módulo de Young - Rigidez	161
Tabla 52. Pruebas de normalidad.....	163
Tabla 53. Densidad seca en campo y Módulo de Elasticidad LWD	165
Tabla 54. Modelo de correlación para la Densidad seca mediante Módulo de Elasticidad LWD	165
Tabla 55. Resumen Ensayo Contenido de Humedad ASTM D1556.....	167
Tabla 56. Resumen del Análisis Granulométrico	167
Tabla 57. Composición de la muestra	168
Tabla 58. Resumen del Ensayo de Limites de Consistencia	169
Tabla 59. Resumen de la Clasificación del suelo.....	170
Tabla 60. Resumen del Ensayo Proctor Modificado	171
Tabla 61. Resumen Ensayo CBR de Laboratorio	173
Tabla 62. Resumen de la Calibración del Equipo y de la Arena	173
Tabla 63. Resumen de los ensayos de Densidad seca en campo – Cono de Arena y el Grado de Compactación	174
Tabla 64. Tabla resumen del promedio de los módulos en laboratorio.....	175
Tabla 65. Resultados de los módulos en campo	177
Tabla 66. Resultados de los módulos E_2 FWD	178
Tabla 67. Módulo corregido para una $hmáx$	179
Tabla 68. Módulo corregido para una $hmedia$	179
Tabla 69. Módulos en campo corregido	180
Tabla 70. Sustitución de los valores de la densidad estimada de Humboldt	184
Tabla 71. Grado de compactación GeoGauge.....	185
Tabla 72. Parámetros obtenidos en Campo del Tramo de Prueba 10+260 - 10+470	186
Tabla 73. Prueba de normalidad	188
Tabla 74. Correlaciones entre las variables	192
Tabla 75. Modelos matemáticos para el cálculo de la densidad en campo	193
Tabla 76. Planilla Resumen - Grado de Compactación	197
Tabla 77. Cuadro resumen de los ensayos físico - mecánicos del tramo de prueba.....	202
Tabla 78. Planilla Resumen - Grado de Compactación	203
Tabla 79. Rigidez medida	205
Tabla 80. Ventajas y Desventajas	208

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Rango del límite líquido y el índice de plasticidad para suelos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7.....	27
Gráfica 2. Curva Granulométrica de un suelo.....	32
Gráfica 3. Curva Granulométrica.....	61
Gráfica 4. Módulo Objetivo LWD mediante la curva de Compactación	125
Gráfica 5. Dispersión de los valores de las variables	146
Gráfica 6. Correlación Lineal entre las variables	149
Gráfica 7. Correlación Polinómica entre las variables	149
Gráfica 8. Correlación Densidad estimada Humboldt - Densidad seca en campo CA.....	152
Gráfica 9. Dispersión de los valores de las variables	157
Gráfica 10. Modelo de Correlación entre las variables	160
Gráfica 11. Modelo de Correlación entre las variables	162
Gráfica 12. Gráfica del modelo de regresión polinómica.....	164
Gráfica 13. Correlación Densidad seca en campo CA vs. Módulo de Elasticidad LWD	166
Gráfica 14. Curva Granulométrica - Tramo de Prueba 10+260 - 10+480.....	168
Gráfica 15. Curva de Escurrimiento - Tramo de Prueba	169
Gráfica 16. Curva de Compactación - Tramo de Prueba	172
Gráfica 17. LWD vs. Peso Unitario Seco (Media h).....	176
Gráfica 18. LWD vs. Peso Unitario Seco (Max. h).....	177
Gráfica 19. Correlación Eobjetivo vs. Ecampo (Altura Máxima de Caída).....	181
Gráfica 20. Correlación Eobjetivo vs. Ecampo (Altura Media de Caída).....	181
Gráfica 21. C vs. $K/m^{0.25}$	182
Gráfica 22. Ecuación: $C=1(K/m)^{0.25} +1E-11$	183
Gráfica 23. Parámetros obtenidos en Campo del Tramo de Prueba 10+260 - 10+470	186
Gráfica 24. Comparación del Grado de Compactación - Capa Subbase - Tramo de Prueba.....	198
Gráfica 25. Calidad de Compactación Subbase Granular.....	199
Gráfica 26. Correlación Cono de Arena - GeoGauge y LWD.....	200
Gráfica 27. Correlación Grado de Compactación Cono de Arena vs. GeoGauge.....	206
Gráfica 28. Correlación Grado de Compactación Cono de Arena vs. LWD	207

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Tamaño de la muestra	13
Ecuación 2. Índice de Grupo.....	27
Ecuación 3. Índice de Grupo.....	28
Ecuación 4. Coeficiente de curvatura (SUCS)	32
Ecuación 5. Coeficiente de uniformidad (SUCS).....	33
Ecuación 6. Limite Líquido	34
Ecuación 7. Limite Plástico	35
Ecuación 8. Índice de Plasticidad	35
Ecuación 9. Coeficiente de balasto.....	36
Ecuación 10. Módulo de Rigidez	38
Ecuación 11. Módulo de Young	38
Ecuación 12. Energía Específica	49
Ecuación 13. Grado de compactación.....	53
Ecuación 14. Determinación de la humedad.....	57
Ecuación 15. Determinación de la humedad para el Limite Liquido y Plástico	64
Ecuación 16. Masa del cono	77
Ecuación 17. Densidad de la arena	78
Ecuación 18. Volumen de excavación.....	81
Ecuación 19. Contenido de humedad del suelo	81
Ecuación 20. Masa seca del suelo	81
Ecuación 21. Contenido de humedad del suelo	81
Ecuación 22. Grado de compactación.....	82
Ecuación 23. Rigidez del suelo	83
Ecuación 24. Fuerza aplicada suelo mediante los sensores	84
Ecuación 25. Rigidez estática sobre un espacio homogéneo.....	86
Ecuación 26. Rigidez estática sobre un espacio homogéneo.....	86
Ecuación 27. Ecuación Humboldt.....	94
Ecuación 28. Ecuación Correlación rigidez y contenido de humedad.....	94
Ecuación 29. Coeficiente de Variación	122
Ecuación 30. Coeficiente de reacción o Rigidez "k"	123
Ecuación 31. Módulo de rigidez para laboratorio	123
Ecuación 32. Módulo de rigidez corregido	125
Ecuación 33. Intervalo del contenido de agua en campo	127
Ecuación 34. Módulo de rigidez en campo.....	128
Ecuación 35. Comprobación del Grado de compactación mediante módulo de rigidez	129
Ecuación 36. Coeficiente de correlación Pearson.....	134

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

En la construcción de carreteras para pavimentos flexibles y rígidos, es de suma importancia que se conozcan las características propias de los materiales que se van a utilizar, es por eso que en las especificaciones técnicas del proyecto y los manuales de la Administradora Boliviana de Carreteras, se exigen controles de calidad en la ejecución y supervisión en la conformación de las capas de la estructura del pavimento a construir, donde en estas secciones se realizan las operaciones de producción, distribución, mezcla, humedecimiento, ensayos de densidad para la obtención del grado de compactación, ensayos de caracterización de los materiales, entre otros. Dichos controles para estas actividades son:

- **Control de Calidad** en los materiales para la capa subrasante, base y subbase que son de varios espesores, de materiales compactados y que componen la estructura de un pavimento. Estas capas deben estar formadas por suelos y áridos con un buen comportamiento al desgaste, corte, compresión, deformabilidad (en un pavimento rígido no se considera la capa base). Dicho control se verifica antes y durante la ejecución de la obra, mediante los ensayos descritos en los manuales y normas vigentes que serán aprobados por la supervisión.
- **Control Geométrico**, que se establece después de la ejecución, donde se realiza la nivelación, del eje, bordes, bombeos, pendientes longitudinales en las diversas capas de la estructura del pavimento, mismas que deben cumplir con el diseño geométrico. Estos controles son de carácter obligatorio.

Para las capas que componen la estructura del pavimento, los controles de calidad, se realizan con ensayos en laboratorio y campo, cuyos resultados son comparados con las especificaciones técnicas del proyecto. Los manuales de ensayos para dichos controles están basados en las normas ASTM, AASTHO que permiten determinar la calidad de los materiales que se utilizan en un proyecto vial.

En el transcurso del tiempo la tecnología ha evolucionado de una manera significativa en todas las áreas. Esto exige que el profesional se mantenga al día con los avances tecnológicos relacionados con dichos controles, uno de los ensayos más comunes en la construcción es la densidad en campo, el cual es utilizado para determinar el grado de compactación de las capas que conforman el pavimento. Para dicho ensayo existen varios métodos, donde el más utilizado es el Cono de Arena, en cambio actualmente los métodos, GeoGauge y Deflectómetro Liviano de Impacto, son más avanzados con respecto al tiempo de ejecución, los cuales miden la rigidez del suelo y está directamente relacionado con la densidad del mismo material.

1.2. JUSTIFICACIÓN GENERAL

El presente proyecto se orienta al control de calidad en la ejecución de los materiales granulares compactados que componen la estructura de un pavimento, mediante los ensayos convencionales y no convencionales, y que a través de correlaciones estadísticas se relacione los métodos utilizados en el control de compactación, y así poder calcular directamente la magnitud de un parámetro cualquiera, por medio de la medición de otro parámetro que esté directamente asociado a éste.

Para poder llevar a cabo el desarrollo de este proyecto de grado, se necesitó una serie de mediciones en campo, las cuales se realizaron durante la construcción de la vía El Alto – Viacha, en un tramo de prueba a nivel subbase, definido según al avance de la obra, a través de la implementación de cada método poco aplicados en nuestro medio, el cual aportó la información necesaria para establecer el grado de concordancia entre los métodos convenientemente utilizados.

Para este fin, se realizaron las siguientes actividades en el laboratorio de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), mediante los ensayos convencionales tanto físicos como mecánicos:

Se realizó la caracterización del suelo con los ensayos de Granulometría, Límites de Consistencia y Contenido de Humedad. Por otro lado, las características mecánicas se determinaron con los ensayos del Proctor Modificado y Relación Soporte California (CBR), con los cuales, se procedió a evaluar las propiedades de los materiales que conforman la subbase, y posteriormente, con el ensayo **de Densidad en Sitio – Cono de Arena** y con los métodos de ensayos propuestos, **GeoGauge Humboldt H-4140 y Deflectómetro Liviano de Impacto (PRIMA 100 LWD)**, realizar un análisis comparativo para la determinación del grado de compactación en campo.

Para esto se realizaron mediciones en el tramo de prueba con los tres equipos mencionados, para luego verificar el grado de compactación en trabajos de conformación de suelos mediante los cálculos dispuestos en cada metodología, y que, además se desarrolló correlaciones estadísticas entre estos métodos utilizados que, a pesar de ser distintas tiene una relación directa.

El ensayo del cono de arena es utilizado para medir la densidad de un material, el método del Deflectómetro y el GeoGauge son dispositivos de medición no destructivos, que son utilizados para medir la rigidez del suelo, dado que la rigidez de un material está directamente relacionada con la densidad del mismo material. Resulta de interés desarrollar un modelo matemático que proyecte valores medidos de rigidez a valores de densidad, ya que nos permitirá obtener un beneficio que se traduce en ahorro de tiempo, igualmente de contar con métodos alternativos de control durante la construcción de carreteras para así asegurar una alta calidad en la capa subrasante, subbase y base, en los materiales granulares.

1.3. GENERALIDADES

1.3.1. Ubicación del proyecto

El desarrollo de los ensayos en sitio y la extracción del material, se realizaron en un tramo de prueba perteneciente a la construcción "Doble Vía El Alto – Viacha", ubicado en el Municipio de Viacha provincia Ingavi del Departamento de La Paz – Bolivia.



Figura 1. Mapa Político del Estado Plurinacional de Bolivia
Fuente: Bolivia Informa 2012



Figura 2. Mapa Provincia Murillo – Viacha
Fuente: Mapa Referencial SEDALP – SIMRED

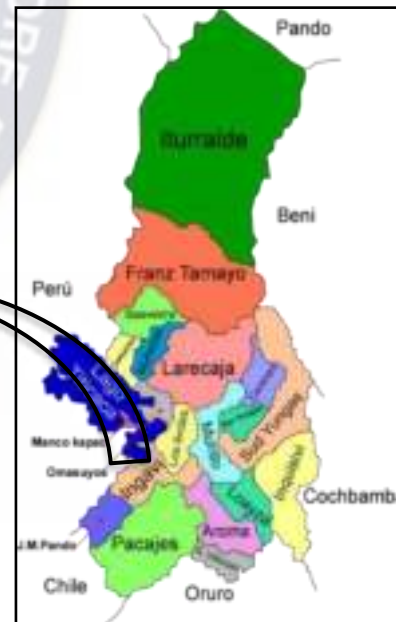


Figura 3. Mapa Departamento de La Paz
Fuente: Mapa Referencial SEDALP – SIMRED

Geográficamente el proyecto se encuentra a una altura promedio de 3891,11 [msnm], en las siguientes coordenadas:

- Inicio: E: 582.799,80 m, N: 8.167.796,66 m
- Final: E: 576.454,07 m, N: 8.160.726,90 m.

El proyecto inicia en el límite de los municipios de El Alto y Viacha progresiva 5+147, hasta la progresiva 14+647 en una longitud de 9.5 (Km). Ejecutado por la Empresa Boliviana de Construcción (EBC).



DE:	A:	Longitud (km)
5+147	14+647	9.50

Figura 4. Municipio de Viacha
Fuente: Google Earth

1.3.2. Geografía

La ciudad de El Alto y el municipio de Viacha, presentan un relieve ondulado, con presencia de serranías, un clima predominantemente frío con una temperatura promedio de 8°C, y precipitaciones de 500 [mm].



Figura 5. Región de El Alto – Viacha
Fuente: Google Earth

1.3.3. Rasgos geomorfológicos de la región

A continuación, se presenta el mapa geomorfológico de la ciudad de El Alto, en el que se detalla las características de sus formaciones principales.

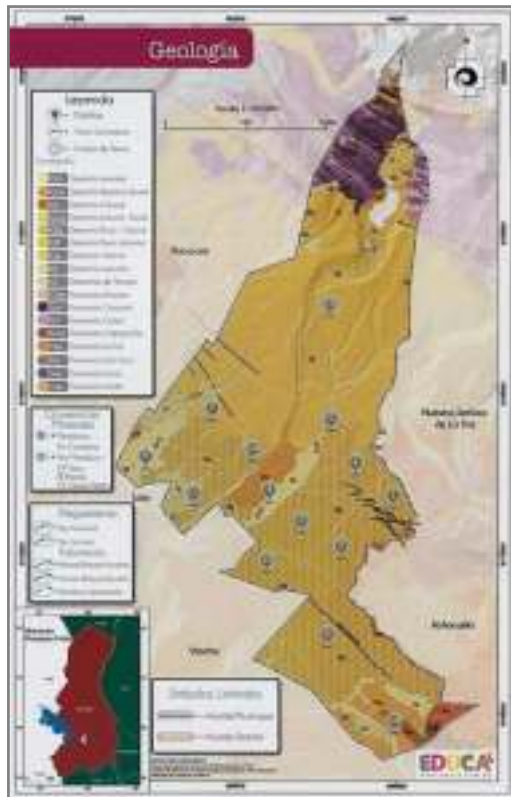


Figura 6. Mapa Geológico Municipio El Alto
Fuente: Educa

Estratigrafía	Descripción	Código Mapa
Depósitos aluviales	Cantos, gravas, arenas, limos y arcillas	Qa
Depósito abanico aluvial	Cantos, gravas, arenas y limos	Qaa
Depósito Coluvial	Bloques y gravas	Qc
Depósito Coluvio-Fluvial	Gravas, arenas, limos y arcillas	Qcg
Depósito Fluvio-Glacial	Gravas, arenas, arcillas.	Qfg
Depósito Fluvio Lacustre	Gravas, arenas, limos y arcillas	Qfl
Depósito Glacial	Bloques, gravas y arcillas	Qg
Depósito Lacustre	Limos, arcillas, arenas	Ql
Depósito de Terraza	Cantos, gravas, arenas, limos y arcillas	Qt
Formación Amutara	Metacuarcitas, metalimolitas, meta areniscas y pizarras	Oam
Formación Cancañiri	Diamictitas, cuarcitas lenticulares y pizarras.	Sc
Formación Catavi	Areniscas micáceas gris verdosas intercaladas con lutitas.	Sct
Formación Colpacucho	Areniscas marrón amarillentas y rojizas con niveles de limolitas grises.	Dclp
Formación La Paz	Areniscas arcillosas, arcilitas, tobas y gravas.	Tlpz
Formación Sica Sica	Limolitas, lutitas y areniscas grises a marrón amarillentas.	Dss
Formación Umala	Limolitas y arcilitas marrón rosáceas, con tobas hacia el tope.	Tum
Formación Uncía	Lutitas grises a verdosas, niveles de areniscas y limolitas verde olivo.	Sun

Tabla 1. Columna Geomorfológica
Fuente: Educa

En el sector norte (distrito 13), se destacan yacimientos filonianos de estaño (Sn), distribuidos en sedimentitas del Ordovícico y Silúrico. Entre los minerales no metálicos se tienen yesos de origen diapírico, pizarras y cuarcitas en sedimentitas Silúricas (distrito 13). La arena y grava de los ríos Negro, Seque y Seco (distritos 3, 4, 5, 7) son explotados como material de construcción.

También se muestra el mapa geológico del Municipio de Viacha, el cual tiene formaciones de:

- Recursos metálicos: Cobre (Cu.), Calcio (Ca)
- Recursos no metálicos: arcilla, puzolana, rocas ornamentales (dacitas, granito chacoma), arenas y gravas.

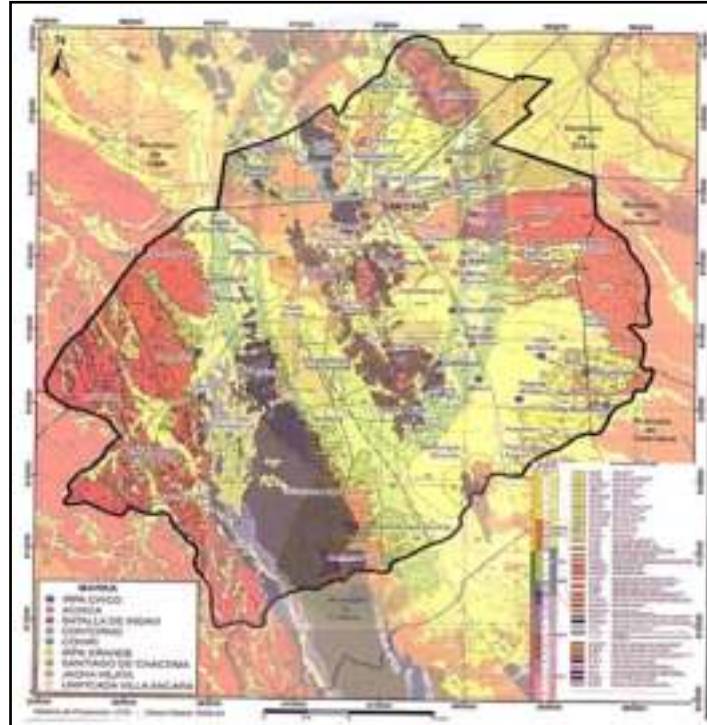


Figura 7. Mapa Geológico Municipio de Viacha
Fuente: Municipio de Viacha

1.3.4. Suelos

Las geoformas presentes, se encuentran en ambos lados del río Seque y son cordones alargados con crestas redondeadas y puntiagudas.

Los sedimentos y suelos del El Alto son: depósitos aluviales (cantos, gravas y arenas principalmente), depósitos de abanicos aluviales, depósitos coluviales, depósitos fluvio-glacial y glacial (bloques, gravas, arenas y arcillas de baja plasticidad). En los sectores ubicados en el norte de El Alto, existen afloramientos de las formaciones Uncia (Silúrico) y Catavi (Silúrico). La primera corresponde a lutitas grises a verdosas con niveles de areniscas y limolitas verdosas, mientras que la Formación Catavi, está formada por areniscas micáceas intercaladas con lutitas. En el sector sur, aparecen algunos afloramientos de la Formación Sica Sica (Devónico), que son rocas plegadas y falladas, principalmente limolitas alternadas con areniscas.

1.3.5. Topografía

La topografía que se tiene en el lugar de estudio, comprende de relieve ondulado, con presencia de serranías entre 3500 a 4500 [msnm]. En la figura 9, se muestra más detalladamente esta afirmación.

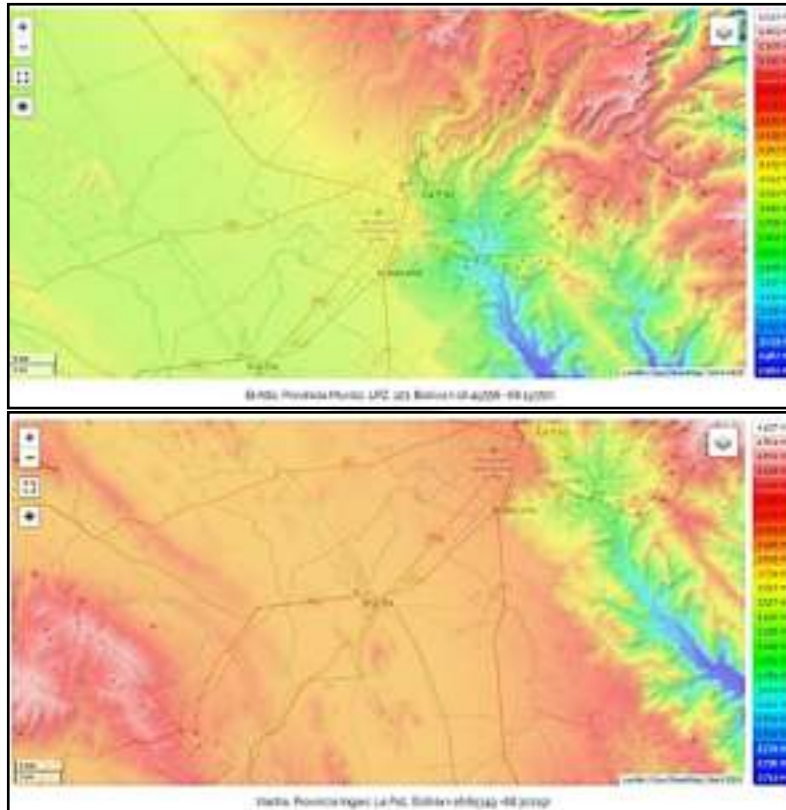


Figura 8. Topografía El Alto- Viacha
Fuente: Topographic-map.com

Esta información ayudo para tener una planificación con el tipo de topografía que se iba afrontar el estudio.

1.3.6. Clima

Viacha se encuentra en el altiplano boliviano y posee un clima frío y seco, con una temperatura promedio de 8 [°C], la mayor parte del año con una estación lluviosa entre diciembre y febrero.

El Alto se ubica sobre los 4000 metros de altitud, es la parte más alta del área metropolitana de La Paz. Según la clasificación climática de Köppen, se puede clasificar como clima subpolar oceánico con invierno seco (menos de 4 meses tienen una temperatura media superior a 10 ° C), bordeando un clima frío de alta montaña y por lo tanto, es frío y seco, con un promedio anual de 8.1 [°C] de temperatura y 600 [mm] de precipitación. Las nevadas pueden ocurrir en cualquier época del año, aunque habitualmente ocurren entre julio y septiembre, en horas de la madrugada y de la mañana. En promedio, se tienen 7 días con caída de nieve por año. El otoño es frío y más lluvioso. El invierno es muy frío y algo seco con nevadas ocasionales. Las heladas son muy comunes desde finales de marzo hasta principios de noviembre. La primavera es fría con lluvias y nevadas ocasionales, el verano frío y lluvioso.

Esta información es importante, debido a que se tomó en cuenta el clima al momento de realizar los ensayos, es así que se hizo en una época donde no hubo lluvias, como se trata de determinar grados de compactación, la humedad es importante al momento de realizar este tipo de estudios.

1.4. ESTADO DE ARTE

Las bases y subbases son capas estructurales de pavimentos, compuestos de material granular que son adecuadamente seleccionados para transmitir las cargas de la capa de rodadura a la subrasante, puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad. La ubicación de estos materiales dentro de la estructura de un pavimento está dada por sus propiedades físico-mecánicas; actualmente en nuestro medio.

Se construyen los pavimentos siguiendo cada especificación técnica, para cumplir con los parámetros de los materiales que conforman la estructura del pavimento, razón por la cual es importante conocer y estar al tanto del control, que permitan incrementar la vida útil y la calidad de éste.



Figura 9. Terminadora Pavimento Rígido, Construcción El Alto - Viacha
Fuente: Elaboración Propia

En los últimos años, se ha puesto mucho énfasis en profundizar el conocimiento de los materiales que componen la estructura del pavimento, ya que los materiales de las capas son susceptibles a las cargas vehiculares y a deformaciones.

A medida que avanza la tecnología, nuevos equipos van surgiendo, los cuales pueden ser utilizados para el control de calidad en campo, donde se pretende evaluar las propiedades mecánicas en las capas de su estructura en una construcción vial y que indiquen de una forma más rápida y precisa, los parámetros de control en la calidad de los materiales, además de una correcta ejecución en campo.

A principios de los años 1970, a medida que los métodos mecanicistas (o analíticos) en ingeniería de pavimentos empezaban a recibir más apoyo internacional, Dynatest introdujo el primer Deflectómetro Liviano LWD portátil del mundo, como un nuevo método para determinar el módulo elástico de materiales no-ligados en pavimentos.

El Deflectómetro Liviano es un dispositivo de medición no destructivo utilizado para evaluar la rigidez del suelo. Gracias a su movilidad y rapidez de medición, los LWD están siendo más utilizados a lo largo del mundo para el control de calidad a gran escala y evaluación en nuevas zonas de construcción, y para la evaluación de pavimentos en sitios existentes.

A nivel mundial, las experiencias que se tienen son:

- De la Universidad de Piura de Lima, Facultad de Ingeniería, en la cual se estudió la "Comparación en campo con el empleo del Deflectómetro liviano para la evaluación de la rigidez in situ usado en el control de compactación con los resultados obtenidos del Densímetro Nuclear", de (Jiménez, M. 2017). Como resultado de dicha investigación, bajo regresión lineal, se determinó que un incremento o disminución de una unidad del porcentaje de compactación obtenido con el Densímetro Nuclear ocasiona una variación del 10.30% y 12.34% en el valor respectivamente, además se observó que la baja correlación, se debe a la mala posición del plato del LWD, que genera distorsión y deflexiones erróneas.
- En la Universidad de la Costa CUC, Programa Ingeniería Civil Barranquilla (2012), se realizó un estudio de la "Correlación entre el método GeoGauge y el método del Cono de Arena para determinar la densidad del suelo en campo". Como resultado durante el desarrollo de la investigación, se logró obtener bajo los parámetros estadísticos la siguiente correlación, $\rho_{DHumboldt} = -1,2025 (\rho D) + 281,01$; con la cual se ha podido probar que existe una asociación directa y confiable entre las mediciones tomadas en campo y las mediciones proyectadas por el modelo, técnicamente la correlación con un 99%, nos indica que existe una variabilidad casi nula entre las variables medidas. Esto aplicado al modelo de correlación se obtiene que: $\rho_{Geogauge} = (1 - 0,000719 + 0,000067 * \rho_{DHumboldt})$.
- También se realizó la siguiente investigación sobre "Métodos de evaluación in-situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimentos flexibles con el Deflectómetro de impacto liviano", en la Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, de Alelí Osorio Lird (2008). Como resultado, se analizaron las tensiones a las que se encuentran sometidas las capas granulares de un pavimento flexible y se definieron las presiones adecuadas para evaluar cada capa. Estas presiones se utilizaron en las mediciones realizadas en esta investigación. El LWD se puede utilizar como instrumento de evaluación de la capacidad de soporte de materiales granulares aplicando una metodología experimental en cada proyecto en particular.

En el aspecto nacional, se sabe que se realizaron "Evaluaciones de calidades de terraplén ejecutado y la capa estructural efectuado en el tramo I y II de la carretera Rurrenabaque – Riberalta", de la empresa Tecnología y Construcción (T&C) (2019), en el cual se determinó el análisis de las matrices de resultados ordenados del CBR, obtenido con el Deflectómetro de Impacto Liviano, los resultados de CBR de las calicatas fueron ensayadas en laboratorio. Para la correlación de Mr. (Módulo resiliente) vs CBR, considerando que desde la Progresiva PK 36+500 hasta PK 84+700, el material utilizado para la construcción de los terraplenes tiene similitud en sus características geotécnicas, y desde la progresiva PK 85+000 hasta PK 134+000, se trata de suelo laterítico usado para la conformación del terraplén, por lo que ambos casos se evaluarán independientemente.

Frente a la necesidad de implementar una mejor alternativa en cuanto al control de calidad de los grados de compactación en campo con equipos electrónicos, se realizaron las investigaciones tanto nacionales como internacionales, que determinen adecuadamente las características fundamentales del material y definan los requisitos mínimos de los mismos en cuanto a sus propiedades mecánicas, en el menor tiempo posible y con la mayor exactitud, también una de las razones por la cual se requiere implementar estos equipos es que, en la actualidad los pavimentos se diseñan en base a módulos, siendo así, la calidad de compactación. Estos equipos son basados de acuerdo a los módulos de rigidez, siendo así, se tendría una relación directa, que pueda analizar la influencia de sus módulos de un suelo.

Para lo cual, por temas de logística, se realizó el estudio con tres métodos, los cuales fueron: Cono de Arena, Deflectómetro Liviano de Impacto, GeoGauge H-4140, en un tramo de prueba compactado a nivel subbase durante la "Construcción de la doble vía El Alto – Viacha", con un espesor de 20 [cm] determinado en las especificaciones técnicas del proyecto. La longitud del tramo de prueba fue de 220 [m], que se determinó según al avance de obra, y el número de ensayos con 8 puntos, esto según a la longitud y que generalmente se realiza por el método tres bolillos, según a la experiencia relacionada a este tipo de ensayos.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

Realizar un análisis comparativo para la determinación del grado de compactación estimando correlaciones estadísticas entre los métodos del Cono de Arena, Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD) y GeoGauge H-4140, para el tramo de prueba en la capa subbase de la construcción "Doble Vía El Alto – Viacha Progresiva 5.1", cumpliendo con las respectivas normas vigentes.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Reconocer las características del suelo, mediante la realización de los ensayos y cálculos respectivos de Análisis Granulométrico por tamizado (ASTM D422 – AASTHO T27), Límites de Consistencia (ASTM D423, D424 – AASTHO T89, T90), Contenido de humedad (ASTM D2216), que

serán ensayos para obtener el tipo de suelo a trabajar, asimismo, evaluar las propiedades mecánicas, mediante los ensayos de resistencia que son el Proctor Modificado (ASTM D1557 - AASHTO T180D), Relación Soporte del Suelo en Laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 - AASTHO T193), Cono de Arena (ASTM D1556 –AASHTO T191).

- Realizar los ensayos con las metodologías, GeoGauge y Deflectómetro Liviano de Impacto, que son ensayos poco convencionales para el análisis del grado de compactación, pese a que los procedimientos son diferentes con cada equipo electrónico, estos son equivalentes al determinar sus parámetros.
- Realizar los ensayos con los equipos GeoGauge Humboldt H-4140, Deflectómetro Liviano de Impacto PRIMA 100 y Cono de Arena en la capa subbase en un tramo de prueba entre las progresivas 10+260 – 10+470 en la “Construcción de la Doble Vía El Alto – Viacha”, registrando datos suficientes para el estudio de la calidad en la compactación.
- Analizar los datos obtenidos de los ensayos con los equipos GeoGauge H-4140 Humboldt y Deflectómetro Liviano de Impacto, en la capa subbase de un tramo de prueba en la construcción de la doble vía El Alto – Viacha, y evaluar la influencia de sus valores expresados en módulos de rigidez y módulos de elasticidad para un control de compactación, respectivamente.
- Evaluar los valores de las densidades y los módulos obtenidos con cada uno de los ensayos, para posteriormente realizar el cálculo necesario para la determinación de los grados de compactación del tramo de prueba.
- Determinar el Grado de Compactación con los ensayos Cono de Arena y GeoGauge H-4140 Humboldt, en base a las normas respectivas vigentes en la actualidad.
- Determinar la relación de los módulos de laboratorio y campo con el ensayo del Deflectómetro Liviano de Impacto, en base a las normas respectivas vigentes en la actualidad.
- Realizar un análisis estadístico con los parámetros obtenidos con cada equipo utilizado con el cual se obtuvo en campo y laboratorio, para determinar las correlaciones entre los métodos, mediante el análisis de Pearson y Spearman para verificar si son estadísticamente significativos.
- Comparar los resultados de los grados de compactación entre los métodos aplicados en un tramo de prueba de la “Construcción Doble Vía El Alto – Viacha”.

1.6. ALCANCE Y LIMITACIONES

- En el presente trabajo se llegará a determinar el grado de relación que existe entre los resultados de los ensayos en campo del, Cono de Arena, GeoGauge, y Deflectómetro Liviano de Impacto, correspondientes en un tramo de prueba de la “Construcción Doble Vía El Alto – Viacha”.

- La ubicación del tramo de prueba se determinó en la calzada izquierda que cuenta con dos carriles en un solo sentido de Viacha hacia el Alto. **(Ver Figura 11)**.
- Los ensayos se realizaron a nivel subbase de la “Construcción la Doble Vía El Alto – Viacha”.
- Los trabajos de ensayos en sitio, se realizaron durante la construcción, donde una vez terminada la compactación de la capa subbase del tramo en estudio, se hizo uso de los equipos de Cono de Arena, Deflectómetro Liviano de Impacto, GeoGauge H-4140, con los respectivos controles en cada ensayo para tener datos de manera confiable.
- Para los ensayos convencionales de suelos, se obtuvo muestras de material de capa subbase que fueron transportadas a laboratorio de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) y según a las normas respectivas se clasificó y se evaluó dicho material.
- Se eligió un tramo compactado a nivel subbase, para esto se revisó los cronogramas de ejecución específicamente de capa subbase, que fueron elaborados por parte de la Empresa Constructora, finalmente de esta manera se realizó toda la parte logística para estar presente el día y hora indicada, a fin de desarrollar los ensayos en sitio.
- La longitud del tramo de prueba se estableció según al avance de obra, desde la progresivas 10+260 hasta la 10+480, teniendo un total de 220 [m] de capa subbase compactado con un volumen de 378.4 [m³].
- La distribución de los puntos a ensayar se definió en función de la longitud del tramo de prueba.
- El número de ensayos, se calculó por métodos probabilísticos y con la ayuda del *Manual N-MMP-1-16/20* de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del país de México, con esto se determinó la ubicación del punto a ensayar.
- La evaluación y análisis de los valores obtenidos en campo y laboratorio, de los ensayos de caracterización físico – mecánicos del suelo y de las metodologías propuestas para el control de calidad en la compactación, Cono de Arena, GeoGauge y Deflectómetro Liviano de Impacto, se realizó mediante cálculos según a la según a las normas.
- En cuanto a los equipos, fueron provenientes del laboratorio de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).
- En el proyecto desarrollado, se utilizó las normas vigentes en el país, las especificaciones técnicas del proyecto, basados en las normas ASTM y AASTHO y los manuales de la ABC.
- Con los resultados del Grado de Compactación con cada metodología según al equipo utilizado, se logró realizar la comparación entre cada una de ellas, además de estimar correlaciones estadísticas de sus parámetros para hallar densidades secas en campo mediante módulos de rigidez, dándonos

resultados satisfactorios según a las especificaciones técnicas del apartado de compactación de dicha obra.

1.6.1.METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El presente proyecto que es de investigación analítico experimental descriptivo, la cual está enfocada a desarrollar un análisis comparativo de la calidad de la compactación de un tramo de prueba, estimando correlaciones estadísticas que relacione la densidad medida con el cono de arena, la rigidez medida con el GeoGauge, y el módulo medido por el Deflectómetro de Impacto Liviano.

Se propuso para el cálculo del número de ensayos, por el método probabilístico de Munich, L y Ángeles, E (1997:102) con un nivel de confianza admitido:

$$n = \frac{Z^2 N p q}{N e^2 + Z^2 p q}$$

Ecuación 1. Tamaño de la muestra

Siendo:

n = tamaño de la muestra

Z = Es el parámetro de la distribución normal que está en correspondencia con un nivel de confianza, este valor es colocado según al investigador con el grado de certeza que se quiera la investigación, por lo tanto se tiene un nivel de confianza al 90% donde el z calculado es 1.65.

N = Universo o población

p = probabilidad a favor (0,5 ó 0,10)

q = probabilidad en contra (0,5 ó 0,10)

e = error de estimación (0,1)

Reemplazando los valores en la ecuacion 1, tenemos que :

$$n = \frac{1.65^2 * 8 * 0.5 * 0.5}{8 * 0.1^2 + 8^2 * 0.5 * 0.5} = 8 \text{ [ensayos]}$$

El universo o población se conoció dividiendo la longitud de tramo de prueba de 240 [m] en tramos iguales, la cual nos confirma con esta ecuación, que la frecuencia de los ensayos a realizar son 8 , a un nivel de confianza del 95% , cada 30 [m]. Cabe hacer notar que según el control de supervisión descritos en el Manual de Especificaciones Técnicas de Construcción, sección capa subbase, ETG 2-06 (ABC) , el espaciamiento máximo de ensayo son 100 [m] lineales en el orden de borde derecho, eje, borde izquierdo, eje , borde derecho , etc a 60 [cm] del borde , por lo cual nuestro análisis de espaciamiento y ubicación cumple con las especificaciones, pero no así con la frecuencia o el número de ensayos en un tramo.

Para la presente investigación se adoptó un espaciamiento en distancias iguales del tramo de prueba , para así tener una mayor cantidad de datos y así realizar un estudio más adecuado. (Ver figura 12). Es por eso que este proceso de cálculo, para la determinación del espaciamiento, fue tomado en cuenta para fines académicos y por experiencia en ensayos similares.

También se tomó como referencia el manual del Secretaría de Comunicaciones y Transportes del País de México N-MMP-1-16/20, en la sección métodos de muestreo y prueba de materiales con LWD , que describe claramente la distribución y frecuencia de los puntos de prueba para subbases que considera, a cada 50 [m] o menos, para un tramo de 500 [m] de longitud. Como se muestra en la figura:

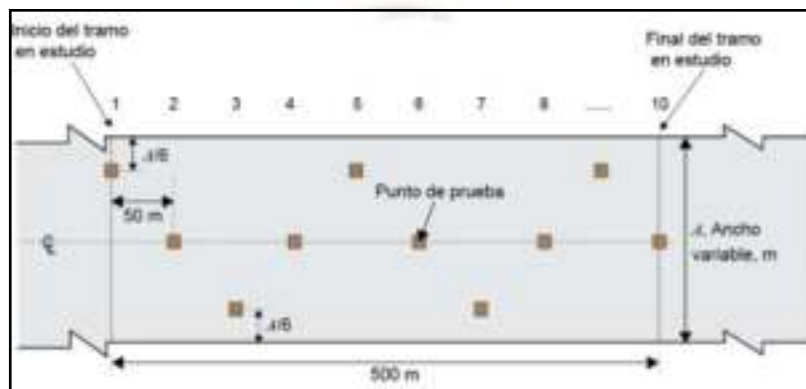


Figura 10. Frecuencia y Distribución de los puntos de sondeo de prueba
Fuente: Manual N-MMP-1-16/20

El procedimiento general, se lo realizó en tres fases; cada fase describe en forma priorizada los procedimientos empleados para la toma de datos de los tres métodos empleados:

1.6.2. Primera Fase

En esta fase se compiló toda la información y solicitudes efectuadas a la Empresa Pública Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), donde se estableció el estado de la vía a evaluar.

El tipo de calzada en la construcción es de pavimento rígido, donde se verificó los puntos de ensayo en la progresiva indicada, para así establecer el equipamiento a ser empleado y proceder con la evaluación del suelo con los tres métodos descritos en el proyecto de investigación.

Cabe hacer notar que en el carril izquierdo se realizaron cambios de material, reconfigurando la capa subrasante y la capa subbase, donde el empleo de los ensayos se los realizó en dicho lado de la vía.



Figura 11. Sección Tipo de la Vía El Alto – Viacha
Fuente: Empresa Boliviana de Construcción (EBC)

1.6.3. Segunda Fase

En esta fase se realizó la revisión de los cronogramas de ejecución de parte de la Empresa Boliviana de la Construcción (EBC), para así poder elegir el tramo de prueba conformado por material granular para la capa subbase compactado, una vez identificado el tramo de prueba con la ayuda de los diagramas de estudio elaborados en base a toda la información recolectada, se utilizó en la ejecución de los ensayos en campo, como se puede observar en el apartado 1.6.6. Asimismo, se eligió el método al tresbolillo para la ubicación de los puntos de ensayo en el carril izquierdo de la vía, descritos anteriormente.

Se procedió con el muestreo de suelo de la capa subbase del tramo de prueba, recolectado muestras de material granular para realizar los ensayos físico - mecánicos en laboratorio y determinar sus propiedades del material.

También se registraron los datos y parámetros obtenidos, con los equipos **Cono de Arena**, **Deflectómetro Liviano de Impacto** y **GeoGauge**, en la capa subbase del tramo de prueba de la "Construcción de la Doble Vía El Alto – Viacha". Cabe recalcar que el orden del ensayo será del menos destructivo hasta el ensayo más destructivo.

1.6.4. Tercera Fase

Una vez recopilados los datos y los resultados de los ensayos en laboratorio, se realizó el análisis comparativo del grado de compactación aplicando métodos correlacionales estadísticos, para cada uno de los métodos descritos anteriormente.

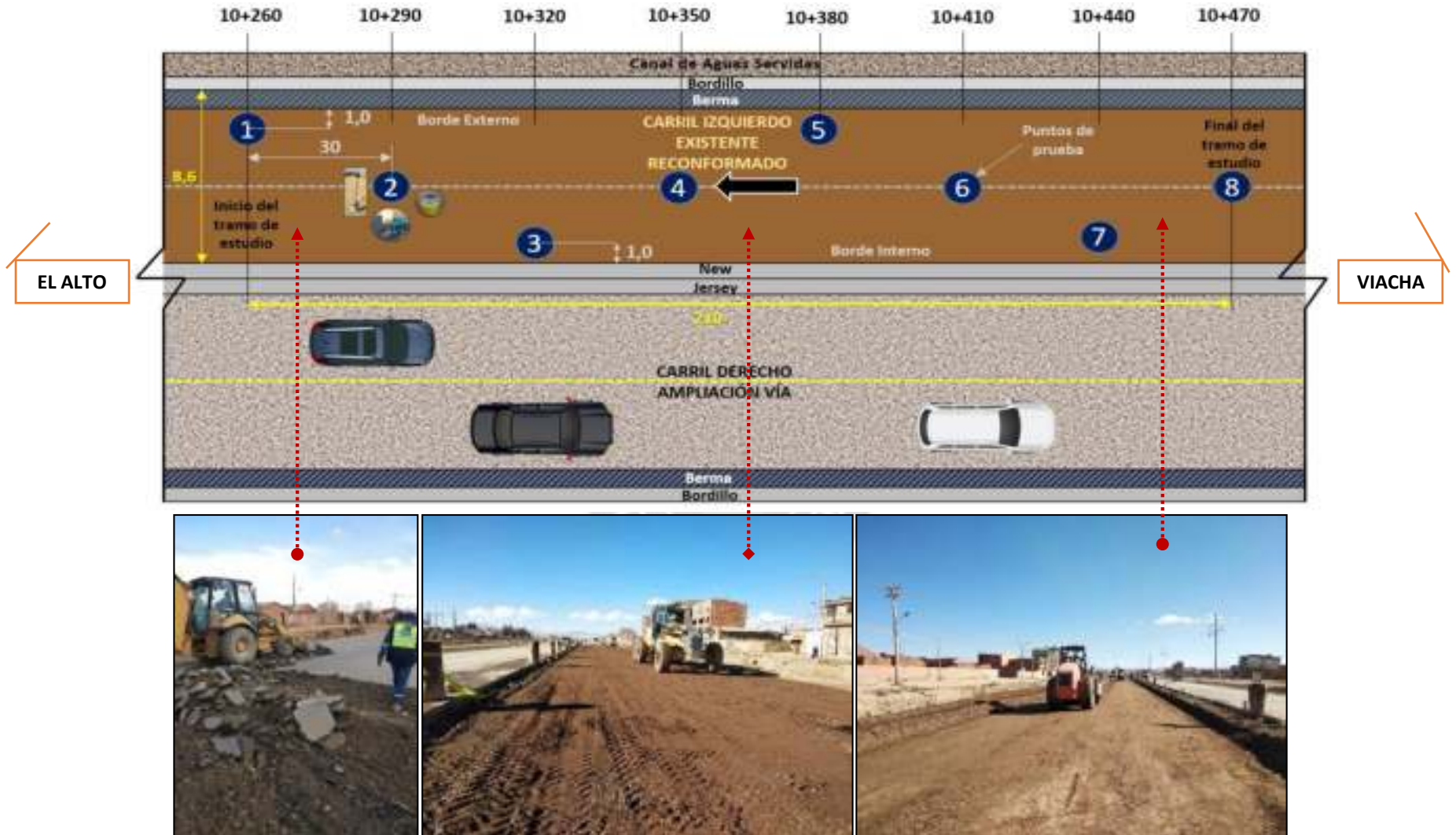


Figura 12. Modelo de diagramación para la distribución de puntos de ensayo
Fuente: Elaboración Propia

1.6.5. Métodos y Equipos utilizados:




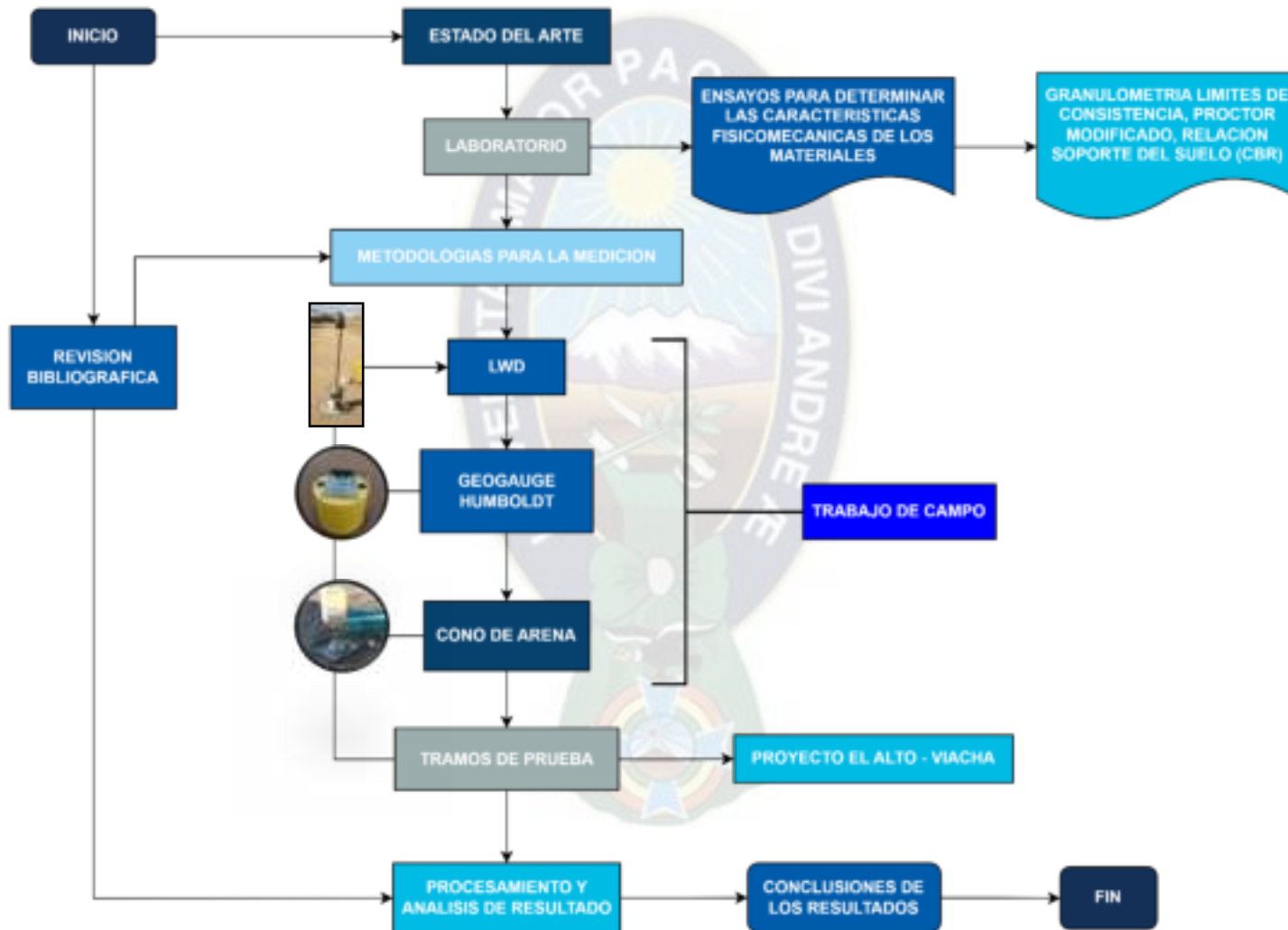
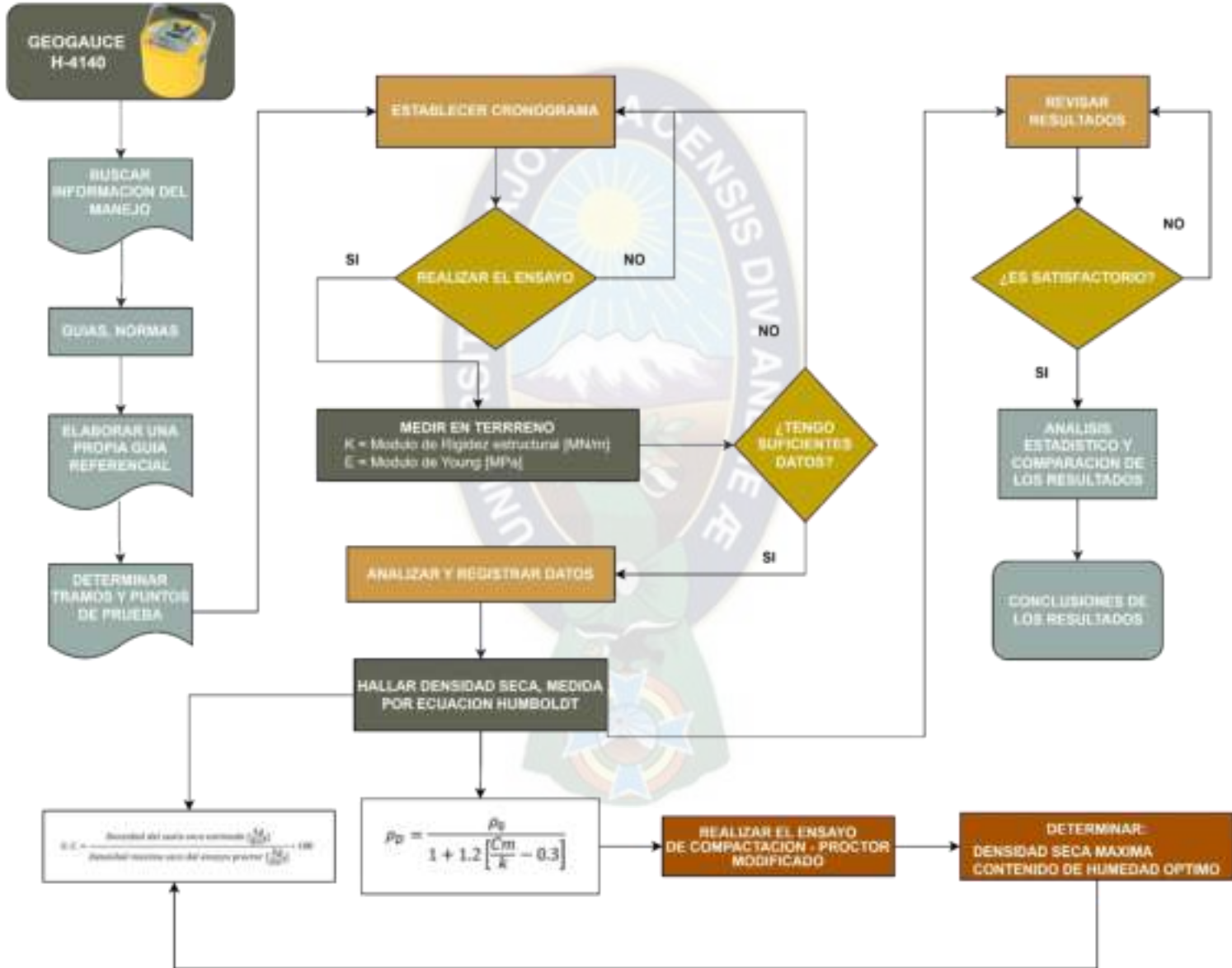
DESCRIPCIÓN	MARCA	MODELO	NORMA		CARACTERÍSTICAS	PROPIEDADES QUE MIDE	GRÁFICO
			ASTM	AASTHO			
GeoGauge	HUMBOLDT	H-4140	D6758-02	---	Dinámicamente mide en terreno las propiedades mecánicas de diseño del suelo usando la rigidez estructural de capa.	Módulo de rigidez [MN/m] (klbf/pulg) y el módulo de Young, [MPa] (kpsi).	
LWD Deflectómetro de Impacto Liviano	PRIMA	100	E2583-07	TP123-01 TP456-01	Evaluación de la compactación y rigidez del material. Control de calidad de las capas base, subbase, subrasante, y capa de rodadura.	Módulo elástico [MPa]	
Cono de Arena	DISPONIBLE EN LABORATORIO	---	D1556	T191	El método del cono y arena es un ensayo destructivo ya que para determinar el peso específico seco de campo a partir de material extraído de una muestra se realiza sobre la capa de material ya compactado.	Densidad seca del suelo en sitio [g/cm ³]	

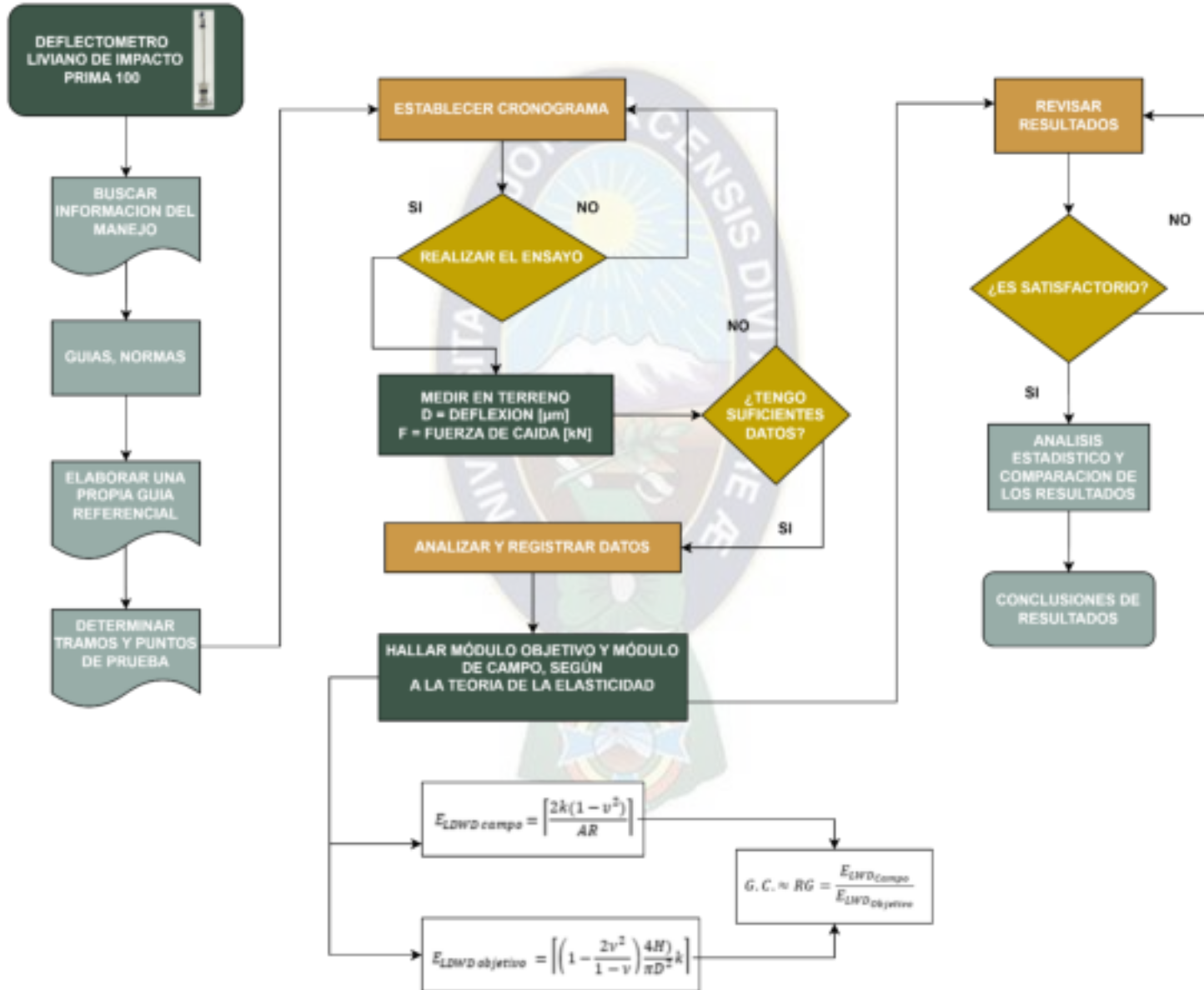
Tabla 2. Métodos y Equipos Utilizados
 Fuente: Elaboración Propia

Los siguientes diagramas de flujo, fueron elaborados con el fin de facilitar visualmente el flujo de los datos que se obtuvieron en campo, los cuales siguen un análisis de los procedimientos que requerimos para realizar el estudio general con cada uno de los equipos que se utilizó.

1.6.6. Diagramas de Investigación:







1.7. ENSAYOS DE LOS MATERIALES

1.7.1. Ensayos Físicos de Caracterización

A continuación, se nombrará los ensayos ejecutados para este estudio:

- Conservación y transporte de muestras de suelos (ASTM D4220)
- Contenido de humedad (ASTM D2216)
- Análisis Granulométrico de suelos por tamizado (ASTM D422 – AASTHO T87-70, T27-93)
- Límites de Consistencia (ASTM D4318 – AASTHO T89, T90)

1.7.2. Ensayos Mecánicos de Resistencia

- Compactación Proctor Modificado (ASTM D422 – AASHTO T180)
- Relación Soporte del Suelo en Laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASTHO T193)
- Densidad en Sitio Método del Cono de Arena (ASTM D1556 –AASHTO T191)

1.8. ENSAYOS MÉTODOS ALTERNOS PARA LA OBTENCIÓN DE MÓDULOS DE RIGIDEZ.

La investigación realizada está enfocada a comparar los métodos empleados para los controles de calidad en un tramo de prueba de subbase compactado, además de desarrollar correlaciones estadísticas que proyecte valores de rigidez a valores de densidad y así poder incorporar con confiabilidad a los equipos del Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD, por sus siglas en inglés) y GeoGauge Humboldt H-4140, como métodos alternativos en el control de la calidad de compactación ya que se debe prestar la debida atención a las características de los materiales que se emplean para estas capas granulares, pues de lo contrario cualquier deficiencia puede traducirse en fallas prematuras, desempeños deficientes y bajos índices de condición de los pavimentos.

1.8.1. Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD) (ASTM E2583-07 ; AASTHO TP123-01 TP456-01)

Mediante este método, se realizó la medición del módulo de laboratorio ($E_{LWD_{Laboratorio}}$) sobre un molde modificado de compactación, módulo ajustado a condiciones de frontera, y el módulo de campo ($E_{LWD_{Campo}}$) obtenido a partir de la ejecución del ensayo del Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD) sobre la capa subbase en el tramo de prueba de la estructura de pavimento en la "Construcción Doble Vía El Alto – Viacha", como la estructura está compuesto por más de dos capas se realizó la corrección para los módulo de laboratorio, mediante la ecuación que propone el Manual M-MMP-1-16/20 y las normas AASTHO, para esto se necesitó incluir los valores de los módulos medidos en la subrasante ($E_{2_{FWD}}$), con los ensayos realizados mediante el Deflectómetro Pesado de Impacto (FWD), efectuado

por la Empresa Consultora Mecanicista Ltda., para lo cual se utilizó los valores como referencia en el cálculo de las correcciones, para luego efectuar la relación de rigideces $E_{LWD_{Campo}}$ respecto al $E_{LWD_{Laboratorio}}$, y determinar un grado de compactación según al Manual M-MMP-1-16/20.

1.8.2. GeoGauge H-4140 Humboldt (ASTM D6758-02)

Con este método se realizaron las mediciones de las rigideces de la capa subbase en el tramo de prueba, para luego utilizar la ecuación de Humboldt Hryciw & Toman y determinar la densidad seca estimada en campo. Esta ecuación está en función de la Densidad Máxima realizado en Laboratorio, el contenido de humedad en sitio y el "C" de la región del terreno analizada, que es un factor según al tipo de suelo, este factor se determinó despejando "C" y reemplazando los valores que depende de dicha ecuación. Finalmente se determinó los grados de compactación con relación a la densidad seca máxima de laboratorio y se comparó con los otros dos métodos.

Así mismo el equipo nos proporciona valores de Módulo de Young, con el cual se realizó un análisis estadístico con la densidad seca en campo, módulos de elasticidad según el Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD), para determinar si existe alguna correlación entre estas variables.

CAPITULO 2. SUELOS

2.1. GENERALIDADES SOBRE EL SUELO

Para propósitos de ingeniería, el suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se utiliza como material de soporte último en diversos proyectos de construcción de Ingeniería Civil. Por lo tanto, los Ingenieros Civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como el origen, la distribución de tamaño de grano, la capacidad de drenar el agua, compresión, resistencia al corte y la capacidad de soporte de carga. "Braja M. Das"

2.1.1. Mecánica de suelos

La mecánica de suelos es la aplicación de la ciencia física que se ocupa del estudio de las propiedades físicas del suelo y el comportamiento de las masas de suelos sometidos a diferentes tipos de fuerzas. La ingeniería de suelos es la aplicación de los principios de la mecánica de suelos a problemas prácticos. La ingeniería geotécnica es la rama de la ingeniería civil que enfoca su estudio en las propiedades mecánicas e hidráulicas de suelos y rocas, tanto en superficie como en el subsuelo, incluyendo la aplicación de los principios de la mecánica de suelos y mecánica de rocas en el diseño de los cimientos, estructuras de contención y las estructuras de tierra. "Braja M. Das".

2.1.2. Importancia de la mecánica de suelos en carreteras

Un estudio de Mecánica de Suelos en obras de carreteras se realiza con la finalidad de determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo, estudiar la factibilidad técnica del alineamiento horizontal y vertical, clasificar los tipos de materiales para corte, conocer la ubicación del nivel freático, localizar y caracterizar los materiales de cantera.

La Mecánica de suelos en obras de carreteras es de suma importancia tanto para la determinación de las características del suelo como para el diseño estructural del pavimento; esto nos conllevan a realizar una buena ejecución en obra y un buen control en la carretera.

2.1.2.1. Suelos Granulares

Estos suelos están formados por partículas gruesas de gran tamaño y sin cohesión, son suelos estables cuando se encuentran confinados y permeables, lo que permite una rápida evacuación del agua en presencia de cargas externas. Esta capacidad de drenaje es proporcional al tamaño de sus partículas, es decir, al volumen de huecos o porosidad del suelo, además es apreciable que para un determinado contenido de humedad las partículas más finas presentan cohesión aparente que desaparece al cambiar el contenido de agua.

Para estos suelos se diferencian dos grandes grupos: las gravas y las arenas, su diferencia entre estos dos grupos esta dado por su granulometría, considerando arena la fracción de suelo de tamaño inferior a 2 [mm].

Las propiedades mecánicas y resistentes de los suelos granulares en su gran mayoría son determinadas por el ángulo de rozamiento interno de las partículas, así como por su módulo de compresibilidad.

2.2. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Los suelos con propiedades similares pueden clasificados según a sus características físicas y/o mecánicas y su relación con las actividades ingenieriles.

La correcta clasificación permite garantizar obras de infraestructura adecuada, segura y de bajo impacto al suelo donde se cimientan.

Para ello se requiere una clasificación precisa de acuerdo a su comportamiento para la estructura de un pavimento.

En este capítulo se describirá los dos sistemas de clasificación de suelos más usuales empleados en la actualidad que son: el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el Sistema de Clasificación propuesta por la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO).

2.2.1. Sistema de Clasificación AASHTO

Este sistema de clasificación de suelos fue desarrollado en 1929 como el Sistema de Clasificación de Administración de Carreteras. Ha sido objeto de varias revisiones, con la actual versión propuesta por la Comisión de Clasificación de Materiales para los Tipos de Carreteras Subrasantes y Granulares de la Junta de Investigación de Carreteras en 1945 (Norma ASTM D-3282; método AASHTO M145).

Esta clasificación se utiliza en la construcción de la estructura de un pavimento de carreteras y vías de comunicación, en especial para el manejo de subrasantes y terraplenes.

Este sistema clasifica a los suelos en siete grupos mayores del A-1 al A-7, de acuerdo al tamaño de grano y la plasticidad al siguiente análisis, también se desarrolla un índice de grupo, como se describe a continuación:

- a) Materiales gruesos granulares donde el 35% o menos pasa el Tamiz-200.
- A-1, si menos del 20% pasa el tamiz N°200 y menos del 50% pasa el tamiz N°40, pero en el Paso N° 40 el $IP < 6\%$.
 - A-2, si menos del 35% pasa el tamiz N°200, (limoso o arcilloso), y el material no cumple con A-1 ni A-3.

- A-3, si menos del 10% pasa el tamiz N°200 y 51% o más pasa el tamiz N°40, pero si el Paso número 40 no es plástico.

Clasificación general	Materiales granulares (20% o menos del total de la muestra pasada por el tamiz 200)						
Grupo de clasificación	A-1			A-2			
	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso):							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.				
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 máx.	40 máx.	41 máx.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 máx.	11 máx.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subbase	Excelente a buena						
Clasificación general	Materiales granulares (20% o menos del total de la muestra pasada por el tamiz 200)				A-7		
Grupo de clasificación		A-4	A-5	A-6	A-7	A-7-5*	
Análisis de tamiz (porcentaje de paso):						A-7-6*	
Núm. 10							
Núm. 40							
Núm. 200		36 máx.	36 máx.	36 máx.		36 máx.	
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido		40 máx.	41 máx.	40 máx.		41 máx.	
Índice de plasticidad		10 máx.	10 máx.	11 máx.		11 máx.	
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes		Suelos limosos		Suelos arcillosos			
Clasificación general de la subbase		Regular a mala					

Tabla 3. Clasificación AASHTO
Fuente: Braja M. Das – Cuarta edición

b) Suelos fino granulares (grupo limo arcilla): más del 35% pasa el tamiz N°200.

- A-4 si IP =10 (limo) y LL = 40%
- A-5 si IP = 10 (limo) y LL = 41%
- A-6 si IP = 11 (arcilla) y LL = 40%
- A-7 si IP = 11 (arcilla) y LL = 41%

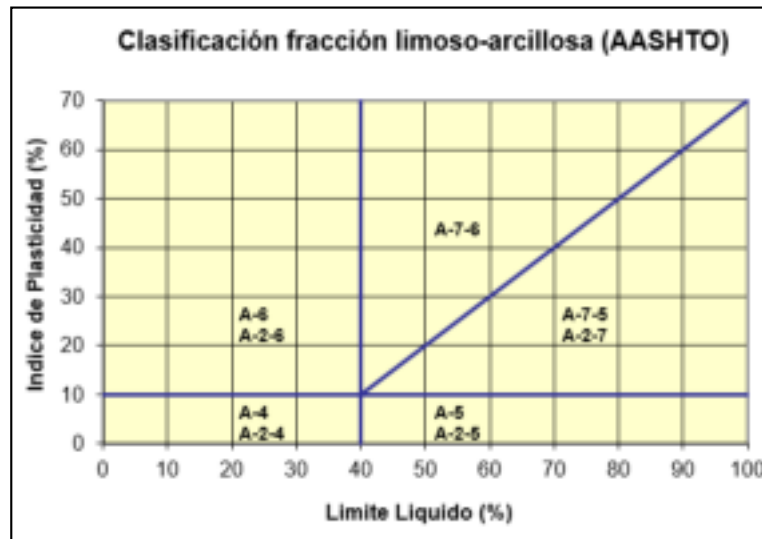
Siendo A-1 = cascajo y arena; A-3 = arena fina; A-2 = cascajos y arenas limosas o arcillosas; A-4 y A-5 suelos limosos, y A-6 y A-7 suelos arcillosos.

A-1 y A-3 son suelos excelentes y buenos, A-2 buenos y moderados, y A-6 y A-7 son suelos de moderados a pobres.

Pero estos suelos tienen subclases:

- A-1-a: si IP <6% Además los porcentajes máximos que pasan son: tamiz N°200 = 15%, tamiz N°40 = 30% y tamiz N°10 = 50%.

- A-1-b: si es del grupo A1 y no cumple con A-1-a.
- A-2-4; A-2-5, A-2-6, y A-2-7: donde la fracción fina se encuentre en las zonas 4, 5, 6 o 7 de la Carta de Plasticidad AASHTO.
- A-3 no tiene subclases.



Gráfica 1. Rango del límite líquido y el índice de plasticidad para suelos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7
Fuente: Braja M. Das – Cuarta edición

Además, clasifica los suelos altamente orgánicos (turba) dentro del grupo A-8, estos materiales se clasifican en base a una inspección visual y no depende del porcentaje que pasa la malla N° 200, límite líquido o índice de plasticidad.

Los únicos ensayos necesarios para encuadrar un suelo dentro de un grupo u otro son el análisis granulométrico y los límites de Atterberg. Si queremos determinar su posición relativa dentro del grupo, es necesario introducir el concepto de índice de grupo (IG), expresado como un número entero con un valor comprendido entre 0 y 20 en función del porcentaje de suelo que pasa a través del tamiz #200. (Blázquez y García, 2004).

$$I.G. = \underbrace{(Pasa\ N^{\circ}200 - 35)}_a \underbrace{[0,2 + 0,005(LL - 40)]}_b + 0,01 \underbrace{(Pasa\ N^{\circ}200 - 15)}_c \underbrace{(IP - 10)}_d$$

Ecuación 2. Índice de Grupo
Fuente: Elaboración Propia

Donde:

a: Si % pasa TN° 200 es 75% o más, se anota: a=75-35=40.

a: Si % pasa TN° 200 es 35% o menos, se anota: a=35-35=0.

b: Si % pasa TN° 200 es 55% o más, se anota: $b=55-15=40$

b: Si % pasa TN° 200 es 15% o menos, se anota: $b=15-15=0$

c: Si LL es 60 o más, se registra $c=60-40=20$

c: Si LL es 40 o menos, se registra, $c=40-40=0$

d: Si IP es 30 o más, se anota, $d=30-10=20$

d: Si IP es 10 o menos, se anota, $d=10-10=0$

En otras palabras:

$$IG = (F-35) * (0.2 + 0.005(LL-40)) + 0.01 (F-15) * (IP-1)$$

Ecuación 3. Índice de Grupo
Fuente: Braja M. Das (2015)

Dónde:

IG = Índice de grupo

F = Porcentaje que pasa por el tamiz No. 200 expresado en números enteros.

LL = Límite Líquido.

IP = Índice de plasticidad.

2.2.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS

La forma original de este sistema fue propuesta por Casagrande en 1948 para su uso en los trabajos de construcción del aeródromo realizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial. En colaboración con el U.S. Bureau of Reclamation, este sistema fue revisado en 1952. En la actualidad, es ampliamente utilizado por los ingenieros, en edificaciones y construcciones civiles.

El Sistema Unificado de Clasificación se clasifica los suelos en dos grandes categorías:

1. Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural con menos de 50% que pasa a través del tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de G o S, G es para el suelo de grava o grava, y S para la arena o suelo arenoso.

2. Suelos de grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de M, que es sinónimo de limo inorgánico, C para la arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. El símbolo Pt se utiliza para la turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos. Otros símbolos que también se utilizan para la clasificación son:

- W: bien clasificado
- P: mal clasificado

- L: baja plasticidad (límite líquido menor de 50)
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor de 50)

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrementemente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Limite liquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Limite liquido bajo (<50)	M

Tabla 4. Símbolos de Grupo
Fuente: Blázquez y Beviá (2004)

SIMBOLO	CARACTERISTICAS GENERALES		
GW	GRAVAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Fino <5%)	Bien graduadas
GP			Pobrementemente graduadas
GM		Con finos (Finos >12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW	ARENAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Fino <5%)	Bien graduadas
SP			Pobrementemente graduadas
SM		Con finos (Finos >12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	LIMO	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	ARCILLA	Baja plasticidad (LL<50)	
CM		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	SUELOS ORGANICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

Tabla 5. Tipología de suelos
Fuente: Blázquez y Beviá (2004)

Para la clasificación adecuada de acuerdo con este sistema, una parte o toda la siguiente información debe conocerse:

- 1) Porcentaje de grava, esto es, la fracción que pasa el tamiz de 76.2 mm y retenida en el tamiz núm. 4 (4.75 mm de apertura)
- 2) El porcentaje de arena, es decir, la fracción que pasa el tamiz núm. 4 (4.75 mm de apertura) y es retenida en el tamiz núm. 200 (0.075 mm de apertura)

- 3) El porcentaje de limo y arcilla, esto es, la fracción más fina que el tamiz núm. 200 (0.075 mm de abertura)
- 4) El coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de gradación (Cc)
- 5) El límite líquido y el índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa el tamiz núm. 40. Los símbolos de los grupos de los suelos de grava de grano grueso son GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM y GP-GC. Del mismo modo, los símbolos de los grupos de suelos de grano fino son CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML y Pt. Los nombres de los grupos de los distintos suelos clasificados bajo el Sistema de Clasificación Unificado se pueden determinar usando las siguientes tablas. Al usar estas tablas, hay que recordar que en un suelo dado:
 - Fracción fina = % que pasa el tamiz núm. 200
 - Fracción gruesa = % retenido en el tamiz núm. 200
 - Fracción grava = % retenido en el tamiz núm. 4
 - Fracción arena = (% retenido en el tamiz núm. 200) – (% retenido en el tamiz núm. 4)

DIVISIONES PRINCIPALES	SÍMBOLO	COMPORTAMIENTO ORTAM MECÁNICO	CAPACIDAD DE DRENAJE	DENSIDAD ÓPTIMA P.M.	CBR IN SITU	
SUELOS GRANO GRUESO	Gravas	GW	Excelente	Excelente	2.00 - 2.24	60 - 80
		GP	$\left\{ \begin{array}{l} d \\ u \end{array} \right.$ Bueno a excelente	Excelente	1.76 - 2.06	25 - 60
		GM		Aceptable a mala	2.08 - 2.32	40 - 80
		GC	Bueno	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
			Bueno	Mala a impermeable	1.92 - 2.24	20 - 40
	Arenas	SW	Bueno	Excelente	1.76 - 2.08	20 - 40
		SP	$\left\{ \begin{array}{l} d \\ u \end{array} \right.$ Aceptable a Bueno	Excelente	1.60 - 1.92	10 - 25
		SM		Aceptable a mala	1.92 - 2.16	20 - 40
			Aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
		SC	Malo a aceptable	Mala a impermeable	1.68 - 2.08	10 - 20
SUELOS GRANO FINO	Limos y arcillas (LL <50)	ML	Malo a aceptable	Aceptable a mala	1.60 - 2.00	5 - 15
		CL	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.60 - 2.00	5 - 15
		OL	Malo	Mala	1.44 - 1.70	4 - 8
	Limos y arcillas (LL >50)	MH	Malo	Aceptable a mala	1.28 - 1.60	4 - 8
		CH	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.44 - 1.76	3 - 5
		CM	Malo a aceptable	Casi impermeable	1.28 - 1.68	3 - 5
SUELOS ORGÁNICOS	Pt	Inaceptable	Aceptable a mala	-	-	

Tabla 6. Características de los suelos
Fuente: Blázquez y Beviá (2004)


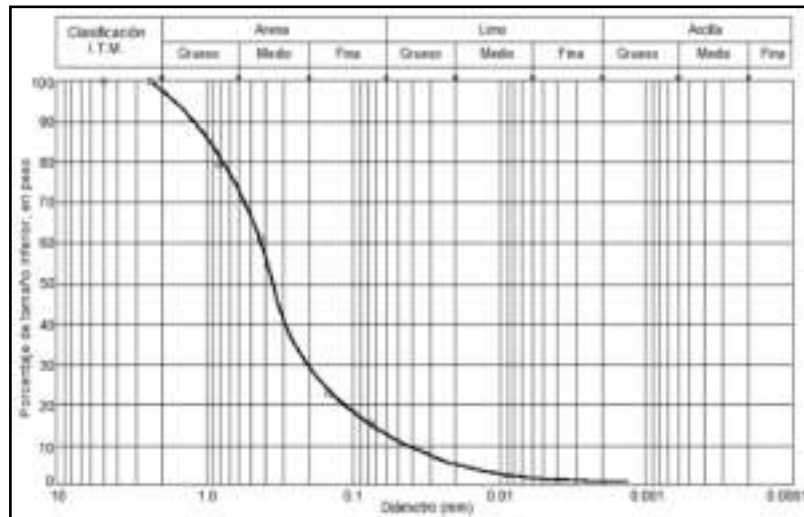
DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO		
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5%->GW,GP,SW,SP. >12%->GM,GC,SM,SC. 5 al 12%->casos límite que requieren usar doble símbolo.	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3	
			GP Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.	
		Gravas con finos (apreciable cantidad de finos)	GM Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$.	Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
			GC Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.	
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3	
			SP Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.	
		Arenas con finos (apreciable cantidad de finos)	SM Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$.	Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.
			SC Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.	
SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50	ML Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.				
		CL Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.				
		OL Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.				
	Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	MH Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.				
		CH Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.				
		OH Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.				
	Suelos muy orgánicos			PT Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.		

Tabla 7. Sistema de Clasificación de Suelos SUCS
Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja M. Das.

2.3. ANÁLISIS GRANULOMETRICO

El análisis granulométrico de una muestra de suelo se realiza con el fin de determinar el tamaño de las partículas constituyentes de dicho suelo, expresado en porcentaje de masa seca total. Este análisis consiste en el tamizado del suelo y su determinación mediante el trazo de curvas granulométricas en hojas semi logarítmicas. Existen un sin número de escalas, para nuestro medio se adopta la escala propuesta por la American Society for Testing and Materials (ASTM).



Gráfica 2. Curva Granulométrica de un suelo
Fuente: Lambe (1951)

La interpretación de una curva granulométrica puede proporcionarnos información acerca del comportamiento del suelo. Si estudiamos la regularidad de la curva podremos diferenciar dos tipos de granulometría:

- Granulometría discontinua: La que corresponde a un suelo al que le faltan tamaños intermedios.
- Granulometría continua: La que corresponde a un suelo uniformemente graduado en todos sus tamaños, desde lo más grueso hasta los más finos. De cara a determinar numéricamente la graduación de un suelo se emplea el coeficiente de curvatura, definido por la siguiente expresión:

2.3.1. Coeficiente de curvatura.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Ecuación 4. Coeficiente de curvatura (SUCS)

En carreteras, es importante que el suelo este bien graduado para al compactarlo, las partículas más finas ocupen los huecos que dejan los áridos de mayor tamaño, reduciendo de esta forma el número

de huecos y alcanzando una mayor estabilidad y capacidad portante. Un suelo bien graduado presenta valores de CC comprendidos entre 1 y 3.

Otro parámetro muy empleado para dar idea del grado de uniformidad de un suelo es el llamado coeficiente de uniformidad, definido por Hazen como la relación entre las aberturas de tamices por donde pasan el 60% y el 10% en peso de la totalidad de la muestra analizada:

2.3.2. Coeficiente de uniformidad.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 5. Coeficiente de uniformidad (SUCS)

2.3.3. Gradación del Material para Subbase Granular

El material de la capa subbase estará constituido por fragmentos de roca, gravas, arenas y limos, producidos por acciones erosivas o por trituración artificial. Se puede extraer de sitios muy variados como son los fondos de los valles, acumulaciones volcánicas, canteras de bancos in situ, lechos de ríos, lagos y mares. Dada su distribución granulométrica y el bajo índice de plasticidad que deben poseer, es frecuente utilizarlos como material de soporte en obras de infraestructura vial, como son la base, subbase y sub rasante, las cuales forman la estructura de un pavimento en carreteras.

La subbase en el proyecto "Construcción Doble Vía El Alto – Viacha" será ejecutada con materiales que cumplan requisitos exigidos por las Especificaciones Técnicas del Proyecto y las Especificaciones Técnicas Generales de Construcción de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). Al respecto las Especificaciones Técnicas del Proyecto establece y recomienda una composición granulométrica encuadrada en una de las columnas de la siguiente tabla, recomendada por la AASHTO M-147 de 1990, u de otra manera se deberá realizar combinación de materiales para que ingrese dentro de los límites.

TAMIZ	TIPO DE GRADACIÓN (% en peso del material que pasa por tamices)			
	Nº	A	B	C
3"	100			
2"	-		100	
1 1/2"	-		-	100
1"	-		-	-
3/4"	-		-	-
3/8"	-		-	-
No. 4	15-45		20-50	25-55
No. 10	-		-	-
No. 40	-		-	-
No. 200	0-10		0-10	0-10

Tabla 8. Granulometría para Capa Subbase de Material Granular

Fuente: Especificaciones Técnicas Generales ETG 2 – 06, Especificaciones Generales del Proyecto Const. Doble vía El Alto - Viacha

2.4. CONSISTENCIA DEL SUELO - LÍMITES DE ATTERBERG

Es la firmeza con que se unen los materiales finos que lo componen o la resistencia a la deformación y la ruptura. La consistencia del suelo se mide por muestras de suelo mojado, húmedo y seco.

En 1990, un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg desarrollo un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido. Existen cuatro formas de consistencia en los suelos excluyendo el estado viscoso, la consistencia pegajosa, la consistencia plástica, la consistencia blanda o suave y, la consistencia sólida. (Atterberg, 1911).

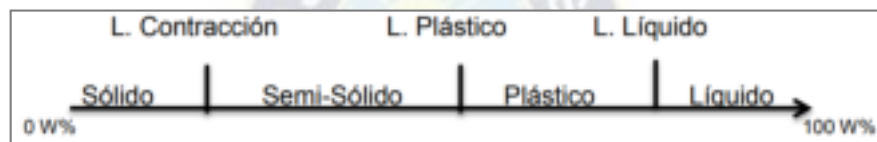


Figura 13. Límites de Consistencia del suelo
Fuente: Elaboración Propia

El contenido de humedad se determina como la relación entre la masa del agua contenida en el suelo y la masa del suelo seco, este valor se expresa en porcentaje.

Para la caracterización de un suelo se deben realizar los análisis de los límites líquido y plástico para así poder establecer el contenido de humedad con el cual el suelo presenta un comportamiento plástico.

2.4.1. Límite Líquido (LL).

El proceso para la determinación del límite líquido de un suelo se basa en la mezcla homogénea de suelo y agua capaz que esta sea moldeada, dicha mezcla se la coloca en la cuchara del equipo Casagrande, con ayuda de una manivela ubicada al costado de este se realiza 25 golpes hasta que parte del material separado anteriormente se une en una porción de 12 milímetros.

$$LL = W_N \left(\frac{N}{25} \right)^{tag\beta}$$

Ecuación 6. Limite Líquido

Dónde:

LL = Límite Líquido

W_N = Contenido de humedad natural

N = Número de golpes

tag_{β} = Pendiente de la línea de flujo (0.121 es una buena aproximación)

Las especificaciones técnicas del proyecto y las especificaciones técnicas generales de construcción de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) para la capa subbase con material granular establece que la fracción que pasa el tamiz N° 40 deberá tener un límite líquido o igual a 25%.

2.4.2. Límite Plástico (LP).

El proceso para determinar el límite plástico de un suelo consiste en medir el menor contenido de humedad para el cual un suelo es imposible de moldear y presentar agrietamientos.

El ensayo consiste en tomar una muestra de 200 [g] de suelo seco y pasarla por el tamiz N° 40, agregamos agua hasta formar una masa, tomamos una porción de masa y con la mano rodamos la masa sobre una superficie lisa hasta obtener cilindros de hasta 3 [mm] de diámetro.

$$LP = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} * 100$$

Ecuación 7. Límite Plástico

2.4.3. Índice de Plasticidad (IP).

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite Líquido y el límite Plástico que nos sirve como indicador del grado de plasticidad que presenta el suelo.

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 8. Índice de Plasticidad

En la siguiente tabla se muestran los rangos de valores más frecuentes de todos estos parámetros en diferentes tipos de suelos:

PARAMETRO		TIPO DE SUELO		
		ARENA	LIMO	ARCILLA
LL	Límite líquido	15 - 20	30 - 40	40 - 150
LP	Límite plástico	15 - 20	20 - 25	25 - 50
LR	Límite de retracción	12 - 18	14 - 25	8 - 35
IP	Índice de plasticidad	0 - 3	10 - 15	10 - 100

Tabla 9. Valores típicos de consistencia del suelo
Fuente: Blázquez y Beviá (2004)

2.5. INFLUENCIA DE MÓDULOS EN SUELOS GRANULARES

La estimación de los desplazamientos verticales a una carga aplicada de una estructura de pavimento es uno de los problemas que el ingeniero geotecnista debe resolver en estos casos.

Para discretizar esta interacción suelo – carga se ha empleado el módulo de reacción del suelo también conocido como el coeficiente de balasto (K) o método de Winkler (1867). El método tiene como hipótesis que el desplazamiento producido en un punto del terreno es proporcional a la tensión transmitida σ es proporcional al desplazamiento resultante por un valor (k) o coeficiente de balasto.

Muchas investigaciones se han dedicado a desarrollar una expresión analítica con más variables para estimar el valor del módulo de reacción en diferentes geometrías para un suelo elástico. Estas hipótesis asumidas para simplificar el cálculo pueden dar lugar a resultados de módulo de reacción muy conservadoras. Algunas simplificaciones no ejemplifican lo que pasa en la realidad en los casos de interacción suelo – carga.

Actualmente gracias a la informática y los métodos numéricos es común realizar estudios que engloban en un mismo modelo la interacción suelo – carga.

El análisis del coeficiente de balasto nace del método de Winkler, la cual se basa en que el desplazamiento δ producido en un punto es proporcional a una tensión σ transmitida por los equipos utilizados al suelo. Se puede escribir este concepto en la siguiente ecuación:

$$\sigma = k \cdot \delta$$

Ecuación 9. Coeficiente de balasto

La variable k hace referencia a la rigidez del punto en el cual se aplica la carga. A esta variable se le conoce como coeficiente de balasto o modulo reacción del suelo. Gibson (1967-1974) demostró que la ecuación de Winkler es un caso particular de un modelo de suelo elástico lineal. Además, cumple para suelos isótropos y heterogéneo. También se le considera incompresible y que el valor del módulo de Young (E) crece linealmente en proporción a la profundidad.

Entonces se puede apreciar las incongruencias más obvias entre la hipótesis y el comportamiento del suelo. Es cierto que el módulo de Young crece en proporción a la profundidad, pero no lo hace linealmente. Además, el modelo elástico no considera la resistencia del suelo y asume que es infinita lo cual es incorrecto.

2.5.1. Módulo de Deformación o Elasticidad

El módulo de deformación o módulo de elasticidad es una constante de proporcionalidad entre tensiones y deformaciones que nos aproxima a describir el comportamiento de un suelo.

El módulo de deformación es un parámetro característico de un material que indica la entre el esfuerzo a la deformación. Este módulo nos indica la rigidez del suelo: cuanto más rígido es un suelo mayor es su módulo de deformación.

El módulo del suelo es útil para una variedad de aplicaciones dentro de la ingeniería geotécnica incluyendo cimentaciones superficiales, cimentaciones profundas y estabilidad de taludes y estructuras de contención.

En suelos el módulo de deformación aumenta con la profundidad y varía con la presión de confinamiento.

El módulo se calcula dividiendo el esfuerzo longitudinal entre la deformación longitudinal de cualquier objeto.

Esfuerzo: Es la razón de una fuerza aplicada F al área A sobre la que actúa.

Deformación: Es el cambio relativo en las dimensiones o forma de un cuerpo como resultado de un esfuerzo aplicado.

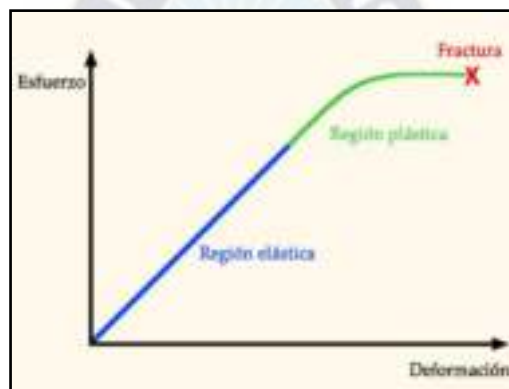


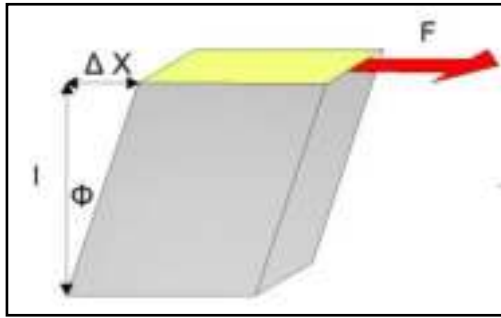
Figura 14. Esfuerzo - Deformación
Fuente: C. Ingg (2008)

2.5.2. Módulo de rigidez o corte de una capa estructural del Pavimento

La rigidez es una medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas producidas por un material, que contempla la capacidad de un elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones.

El módulo de rigidez de un suelo es la deformación que presenta el suelo cuando a este se le aplican esfuerzos cortantes. Además, que las propiedades mecánicas de los suelos compactados no solo dependen del tipo de suelo sino de la microestructura generada durante la compactación.

Aquí también hay que tener presente el material constituyente del suelo, si este es un material elástico o inelástico. Una forma para determinar el módulo de rigidez de un suelo sometido a fuerzas cortantes es considerando al suelo como un cubo y someterlo a pequeñas deformaciones tal como muestra la figura 15.



$$G = \frac{\tau_m}{\theta} \approx \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta x}{l}} = \frac{Fl}{\Delta_x A}$$

Figura 15. Esquema de medición del esfuerzo cortante
Fuente: C. lingg (2008)

Ecuación 10. Módulo de Rigidez

Siendo:

τ_m = tensión de corte

θ = deformación angular

Experimentalmente también puede medirse a partir de experimentos de torsión, por lo que dicha constante no sólo interviene en los procesos de cizalladura.

2.5.3. Módulo de Young

El módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Es uno de los métodos más extendidos para conocer la elasticidad de un material. El módulo de Young, también llamado de elasticidad longitudinal, es un parámetro que consigue revelar el comportamiento de un material elástico en función de la tipología de fuerza que se le aplique y el consiguiente aumento o disminución de la longitud de ese material. Por lo tanto, lo que busca es obtener la relación que se da entre la tensión que se le aplica al objeto en su eje longitudinal y la deformación medida en ese mismo eje. Así, mide su comportamiento elástico y pronostica también el estiramiento de un material determinado.

La forma de calcular el módulo de Young es:

$$E = \sigma / \epsilon$$

Ecuación 11. Módulo de Young

Siendo:

E = módulo de Young, en Pascal.

σ = tensión uniaxial o fuerza uniaxial por superficie de la unidad, en pascal.

ϵ = deformación o deformación proporcional (esto quiere decir el cambio de longitud dividido por la longitud original). Adimensional

Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero. Tanto el módulo de Young como el límite elástico son distintos para los diversos materiales.

El módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede encontrarse empíricamente mediante ensayo de tracción del material. Además de este módulo de elasticidad longitudinal, puede definirse el módulo de un material. El Módulo de Young viene representado por la tangente a la curva en cada punto.

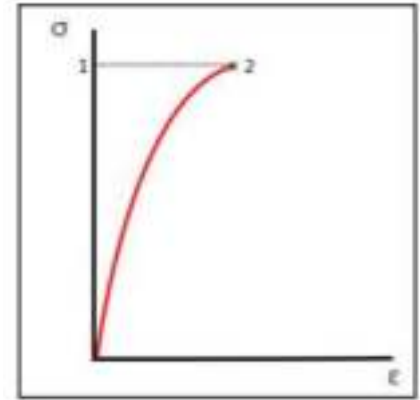


Figura 16. Diagrama Tensión – Deformación
Fuente: Toiyabe (2005)

2.5.4. Módulo Resiliente (para triaxiales)

Es bien sabido que la mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos ya que experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparada con la resistencia del material y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga llega a ser casi completamente recuperable y proporcional a la magnitud de la carga, pudiendo considerarse elástica.

En los primeros ciclos de carga, la deformación permanente es considerable, como lo indica la deformación plástica, en la Figura 16 al incrementar el número de repeticiones, la deformación plástica debida a cada aplicación de carga decrece. Después de algunos miles de repeticiones de carga, la deformación es casi totalmente recuperable, como lo indica la deformación recuperable, llegando a una condición de equilibrio, siempre que el esfuerzo desviador sea lo suficientemente pequeño para no llevar la muestra a la falla. Esta figura corresponde a una curva típica de los datos obtenidos en los primeros ciclos de carga de una prueba de compresión dinámica en condiciones edométricas. En la Figura 16 se aprecia que la acumulación de la deformación permanente presenta tres fases: la primera es casi instantánea, se presenta en las primeras decenas de ciclos de carga, y en ella se produce aproximadamente el 70% de la deformación total. Posteriormente se presenta una fase transitoria en la que la deformación se acumula gradualmente durante los primeros miles de ciclos de aplicación de la carga. Finalmente se alcanza una fase estable en la que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña y la deformación permanente tiende a su máximo valor. A partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene prácticamente ningún efecto adicional.

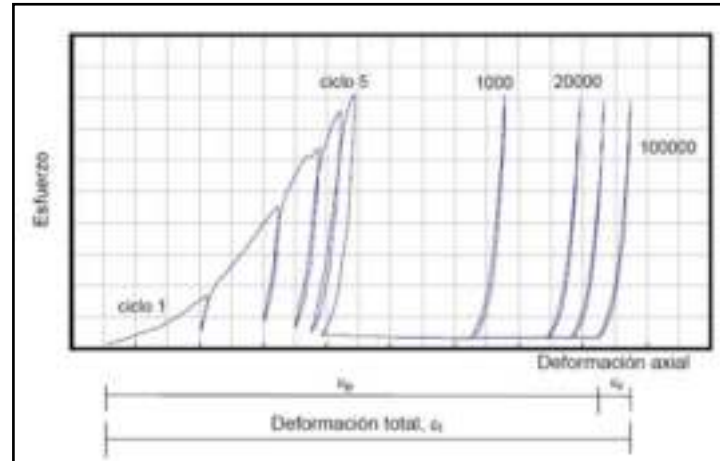


Figura 17. Acumulación de la deformación con el número de ciclos
Fuente: (Garnica et.al., 2002)

La deformación recuperable, es una deformación elástica o resiliente, condición en la cual el material es considerado en estado resiliente, permitiendo, en esas condiciones, determinar el denominado "Módulo de Resiliencia". Este módulo es definido como el cociente entre la tensión desviadora dinámica aplicada y deformación unitaria resiliente producida por esta tensión dinámica. En otras palabras, el módulo resiliente es el módulo elástico medido cuando el material alcanza su etapa de resiliencia

2.5.5. Módulo de Reacción

En todo análisis estructural es necesario conocer o estimar las deformaciones asociadas con las cargas que transfieren al suelo. Para realizar el análisis de los equipos que se utilizaron para este proyecto se modela el suelo representándola por un número infinito de resortes cada uno de los cuales no es afectado por el otro. La constante que define la función fuerza - desplazamiento de estos resortes es conocida como módulo de reacción del suelo o módulo de reacción vertical, dependiendo de la dirección de las fuerzas analizadas.

El módulo reacción del suelo no es un parámetro intrínseco del suelo, sino que el mismo depende de las dimensiones de las capas analizadas y de las propiedades mecánicas del terreno. Esto se debe a que cuando el tráfico está en movimiento genera esfuerzos en la masa de los suelos los cuales para este tipo de ensayos dependen, de las placas que transmiten las cargas para el caso del equipo GeoGauge y para el Deflectómetro Liviano de Impacto a través del plato de carga y el espesor de la capa en análisis.

El módulo de reacción se define como: la relación entre la tensión capaz de generar una penetración de la placa en el terreno de 0.05" que equivale a una deformación de 0.127 [cm], es decir que este coeficiente es la pendiente de la recta que une el origen de coordenadas con el punto de la curva tensión - deformación que genera un asentamiento de la placa de 0.127 [cm]

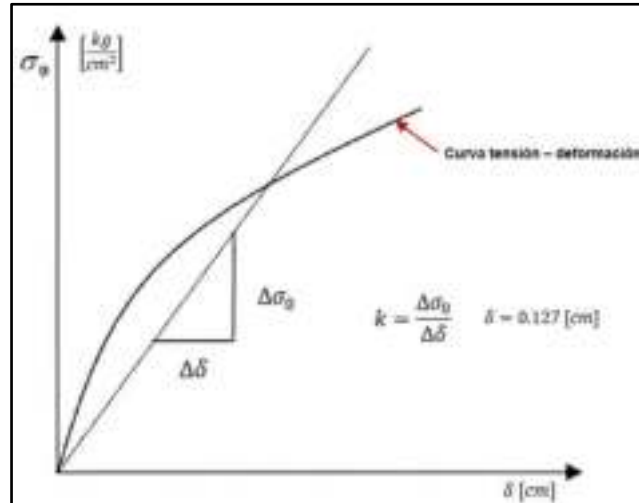


Figura 18. Diagrama Tensión – Deformación
Fuente: Elaboración Propia

Cabe hacer notar que las unidades del módulo de reacción del suelo se expresan en $[\frac{kg^2}{cm}]/[cm]$, lo cual indica que el cambio en el esfuerzo por cada $[cm]$, de desplazamiento.

2.6. IMPORTANCIA DE LOS SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES

Dentro de un proyecto carretero, es necesario y fundamental, un reconocimiento preliminar geológico, así se tendrá certeza del tipo de suelo, su composición y características generales sobre el que se construirá el camino, además, la ubicación de posibles bancos de préstamo, entre otros.

La estructura de un pavimento formada sobre un conjunto de capas superpuestas, se encuentra apoyada sobre un suelo de fundación nombrado subrasante. Las capas de la estructura de un pavimento llegan a conformarse con una elevada proporción de áridos.

Los áridos naturales son los más usados dentro la construcción de carreteras, se los selecciona o procesa siempre que cumplan las especificaciones técnicas y por su disponibilidad dentro de la zona de construcción. Para que un árido sea seleccionado como material de construcción, dependerá de sus propiedades físicas.

Por razones ambientales y económicas se impone la necesidad de aprovechar los materiales locales. Entonces el suelo es el último soporte de toda obra de infraestructura y se comporta como una estructura más, por tal razón la importancia de conocer sus características y propiedades físicas, así como aquellos procedimientos para caracterizarlos.

2.6.1. Pavimentos

Se entiende por pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito, es decir, de los vehículos que las transmiten a los estratos o capas inferiores en forma proporcional, obteniendo una superficie de rodamiento formada por una capa o franja.

Dependiendo del tipo de pavimento, puede ser de asfalto o rígida, el cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas y críticas. Así mismo, deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua, también debe tener color y textura apropiadas.

Pasando a las funciones que tienen los pavimentos además de proporcionar una superficie de rodamiento, otra muy importante es la estructural que consiste en recibir y distribuir las cargas y disipar los esfuerzos transmitidos por los vehículos. Por este motivo es muy importante estudiar perfectamente el tipo de material que se va a utilizar, los de mayor capacidad de carga se colocarán en las capas superiores ya que los esfuerzos se van disipando conforme a la profundidad, los materiales de menor capacidad se colocarán en las capas inferiores.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo la compactación y la humedad dos factores importantes, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

2.6.2.Preparación de la subrasante, base y subbase

La subrasante está conformada por el suelo natural o la mezcla de ellos con ligantes químicos, puede provenir de préstamos laterales o yacimientos. Se la compacta y nivela para que esté en condiciones de a la base y subbase. La compactación debe realizarse a humedad óptima y densidad máxima asegurando un soporte estable y uniforme y dentro de las tolerancias especificadas.

En función a las solicitaciones externas (tráfico pesado) y baja resistencia de la subrasante, se considera incluir debajo del pavimento (base y subbase). La base proporciona estabilidad, uniformidad de apoyo y previene el bombeo de finos, además de proporcionar una plataforma estable al equipo de construcción. También se usa para controlar el efecto de suelos expansivos y la susceptibilidad al congelamiento, en algunos casos trabajan como capa drenante.

Las bases y subbases granulares pueden provenir de piedra chancada o materiales de canto rodado combinados y homogéneamente mezclados con materiales locales o alternativamente suelos de yacimientos tipo A1-a o A1-b con menos del 15% que pasa por el tamiz #200. La preparación/dosificación se la realiza en plantas fijas o alternativamente en la plataforma, ambos procedimientos exigen cuidados para evitar la segregación, la pérdida de humedad y formación de sectores no homogéneos. Completada la distribución y extendido se considera una revancha por el

esponjamiento para que con el compactado posterior se logre densificar el material. Este trabajo se lo realiza con rodillos lisos vibratorios combinados con rodillos de neumáticos. Seguidamente se realiza el corte y perfilado con motoniveladoras o equipos cortadores fresadores.

Las bases y subbases tratadas con cemento proporcionan un excelente soporte y principalmente resistencia al efecto de erosión (pérdida de finos).

En el aspecto constructivo se consideran dos procedimientos para el mezclado, estos son en planta o en sitio. En planta se puede tener; un mejor control de las proporciones y adecuada uniformidad además del transporte en volquetas con las protecciones debidas (carpas) para evitar la pérdida de humedad y equipos como las extendedoras de asfalto para el colocado sobre la plataforma. El mezclado en sitio se puede realizar con una recicladora que pulverice y mezcle el material de forma uniforme y buscando garantizar un espesor constante de la capa base.

Una vez concluido el proceso de mezclado y/o extendido del material, con uno de los procedimientos antes explicados, se debe controlar la humedad y la granulometría y efectuar los ajustes que correspondan para garantizar uniformidad de compactación.

La compactación es ejecutada con los equipos tradicionales mencionados en la ejecución de subbases granulares más rodillos pata de cabra en caso de suelos finos. En este último caso es necesario reparar con mayor cuidado con una motoniveladora cuidando controlar las diferencias en la densificación. Finalmente debe ingresar el compactador de neumáticos para sellar la superficie de tal modo que quede lisa, densa y húmeda, libre de grietas y uniforme en su terminado.

En ciertas circunstancias se prefiere compactar a un 90% de la densidad requerida para seguir con el corte y perfilado final de la base con motoniveladora y concluir con la compactación y sellado con rodillos lisos y neumáticos.

Finalmente es necesario realizar un curado, previo barrido y soplado de la superficie, con riego bituminoso con una tasa entre 0.5 y 1.10 [lt/m], para mantener la humedad en la mezcla y posteriormente realizar el extendido del pavimento ya sea rígido o flexible.

El sobreebanco de pavimentación es el área fuera de la orilla del pavimento que soporta la circulación de los equipos de pavimentación.

La mayoría de los contratistas creen que este carril es la clave para que un pavimento uniforme y debe abarcar las siguientes características:

- La subbase misma debe ser extendida a una distancia de al menos un metro más allá del borde exterior del pavimento.

- La subbase debe estar construida o perfilada paralela a la pendiente transversal proyectada de la subbase. La creación de los planos paralelos es esencial para minimizar pérdida de rendimiento. Además, los planos paralelos asegurarán a la agencia y al contratista que se colocará el espesor apropiado del pavimento sobre toda la capa de rodamiento.
- La subbase debe ser suficientemente duradera para ofrecer un tránsito uniforme a todo el tren de pavimentación, incluyendo el equipo de texturizado y curado.

La función más importante de la capa subbase es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende por bombeo a la fluencia de material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas.

El agua que penetra a través de las juntas licúa el suelo fino de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.



CAPITULO 3. COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS

3.1. GENERALIDADES

La compactación de suelos, es un método de mejora del terreno, por el cual las partículas de suelos y otros componentes son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, el cual el material se densifica, empleando medios mecánicos tanto en campo como en laboratorio, por lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades físico-mecánicas.

La importancia de la compactación de suelos consiste en el aumento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al someter el suelo a técnicas convenientes, que aumentan el peso específico seco, disminuyendo sus vacíos.

Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordes de defensas, muelles, pavimentos, etc. La consolidación es de gran importancia en las obras civiles más en el caso de suelos saturados ya que se presentan con mayor ocurrencia en la práctica de la ingeniería. El proceso de consolidación transfiere carga, y origina cambios de volumen en la masa de suelo.

R. Proctor en 1933 desarrollo los principios de la compactación en una serie de artículos. Proctor estableció que la compactación está en función de cuatro variables:

- a) Densidad del material, ρ_d .
- b) Contenido de humedad, w .
- c) Esfuerzo de compactación.
- d) Tipo de suelo (gradación, presencia de minerales de arcilla, etc.)

La Densidad de Campo sirve para conocer y controlar la compactación de terraplenes y diferentes capas para la construcción de carreteras, también se usa para determinar la densidad "en sitio" y porcentajes de contracción o hinchamiento de los materiales.

3.1.1. Peso Unitario

Se encuentra dos tipos de peso unitario:

3.1.1.1. Peso unitario húmedo o densidad húmeda.

Es el peso del material húmedo, en el sitio, por unidad de volumen.

3.1.1.2. Peso unitario seco o densidad seca.

Es el peso del material seco por unidad de volumen, en el sitio. Este es el que determina en la prueba de densidad de campo y el que se compara con el valor máximo obtenido en la prueba de Proctor modificado para obtener el grado (%) de compactación.

Este ensayo permite obtener la densidad del terreno y de esta manera verificar los resultados obtenidos de la compactación de suelos, en las que existen especificaciones en cuanto a la humedad y la densidad. También se determina la densidad de campo por diferentes métodos, mostrando aproximadamente resultados similares, variando únicamente la forma de determinar el volumen. Teniendo en cuenta que el éxito de una buena compactación en la construcción de carreteras, dependerá de la buena ejecución de las siguientes operaciones:

- La compactación adecuada.
- Ejecución y determinación correcta de la densidad máxima y húmeda óptima del material (Proctor).
- Control, en cada capa, de la densidad alcanzada en el terreno por medio de repetidas pruebas de laboratorio, a fin de comprobar si el material utilizado ha sido perfectamente compactado.

3.1.2. Compactación y Consolidación

La compactación de suelos, es un método de mejora del terreno, por el cual las partículas de suelos y otros componentes son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, el cual el material se densifica, empleando medios mecánicos tanto en campo como en laboratorio, por lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades físico-mecánicas.

La importancia de la compactación de suelos consiste en el aumento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al someter el suelo a técnicas convenientes, que aumentan el peso específico seco, disminuyendo sus vacíos.

Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordes de defensas, muelles, pavimentos, etc. La consolidación es de gran importancia en las obras civiles más en el caso de suelos saturados ya que se presentan con mayor ocurrencia en la práctica de la ingeniería. El proceso de consolidación transfiere carga, y origina cambios de volumen en la masa de suelo.

3.1.2.1. Ventajas

- Aumento de resistencia y capacidad de carga.
- Reducción de la compresibilidad (reducción de los asentamientos en la estructura).

- Disminución de vacíos.
- Mejora el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo.
- Incremento de estabilidad de taludes de terraplenes o cortes.
- Reducción de la permeabilidad del suelo, escurrimiento y la penetración del agua.

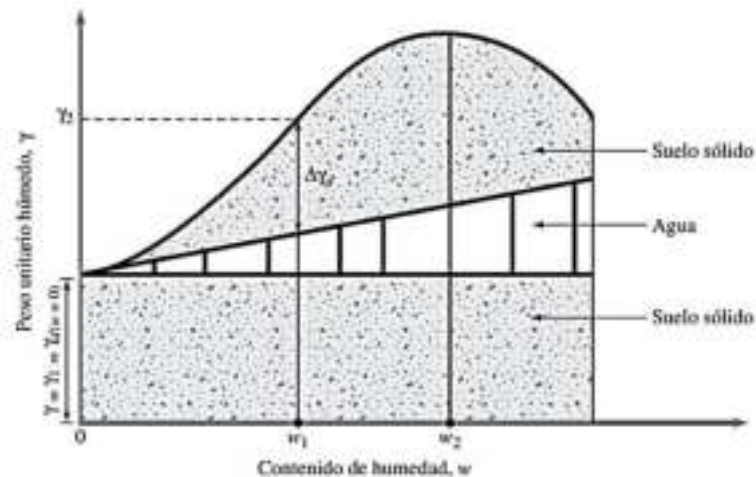


Figura 19. Principio de Compactación
Fuente: Braja. M. Das – 4ta. Edición

El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco. Cuando se añade agua a la tierra durante la compactación, ésta actúa como agente suavizante sobre las partículas del suelo, lo que facilita que las partículas del suelo se deslicen una sobre la otra y pasen a una posición densamente empaquetadas, es decir que el peso específico seco después de la compactación al principio aumenta con el aumento del contenido de humedad como muestra en la figura. Sin embargo, llegado un momento se alcanza un contenido de humedad donde la densidad ya no aumenta. En este punto el agua comienza a sustituir los espacios que deberían ser ocupados por las partículas sólidas del suelo y como se sabe la densidad del agua es mucho menor que de las partículas sólidas, $p_w < p_s$ debido a esto es que la curva de la densidad seca comienza a descender. Este fenómeno es ilustrado en la Figura 19. No importa la cantidad de agua que se agregue, el suelo nunca se satura completamente por la compactación.

En la figura, está formado por tres diferentes alturas de peso específico, el peso específico de sólidos en la parte inferior del gráfico simboliza a los sólidos presentes en un volumen unitario de suelo al inicio del proceso de compactación, el peso específico del agua en la parte media simboliza el aumento de agua en el mismo volumen de suelo que se da a medida que se va compactando el suelo y por último el peso específico de los sólidos en la parte superior simboliza el aumento de sólidos que se produce en el mismo volumen de suelo durante el proceso de compactación.

En la Figura 19 se ve que con un contenido de humedad $w=0$, el peso específico húmedo γ , es igual al peso específico seco γ_d que es lógico ya que no hay agua en el suelo. Cuando el contenido de humedad aumenta gradualmente y se utiliza el mismo esfuerzo para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario aumenta gradualmente. Por ejemplo, en $w=w_1$:

$$\gamma = \gamma_2$$

El peso específico seco para un contenido de humedad, en $w=w_1$, se obtiene sumando las alturas del peso específico de los sólidos mostrados en la Figura 19.

$$\gamma_{d(w=w_1)} = \gamma_{d(w=0)} + \Delta\gamma_d$$

Más allá de cierto contenido de humedad $w=w_2$, cualquier aumento en el contenido de humedad tiende a reducir el peso específico seco (Figura 19). Este fenómeno ocurre como ya se dijo debido a que el agua empieza a ocupar espacios que debían haber sido ocupados por las partículas sólidas. Por lo tanto, mientras más compacto este el suelo habrá menos espacios vacíos ocupados por aire y entonces se tendrá un mayor peso específico del suelo que es lo que se prefiere. El contenido de humedad en el cual se alcanza el peso específico seco máximo se llama generalmente contenido de humedad óptimo. En la Figura 19.

$$w_1 = w_{\text{óptimo}}$$

3.1.3. Factores que influyen en la compactación de Laboratorio

3.1.3.1. Tipo de Suelo

Tiene influencia la granulometría del suelo, forma de sus partículas, contenido de finos, cantidad y tipo de minerales arcillosos, peso específico relativo, entre otros. De acuerdo a la naturaleza del suelo se aplicarán técnicas adecuadas en el proceso de compactación en laboratorio, un suelo grueso alcanzará densidades secas altas para contenidos óptimos de humedad bajos, en cambio los suelos finos presentan valores bajos de densidades secas máximas y altos contenidos óptimos de humedad.

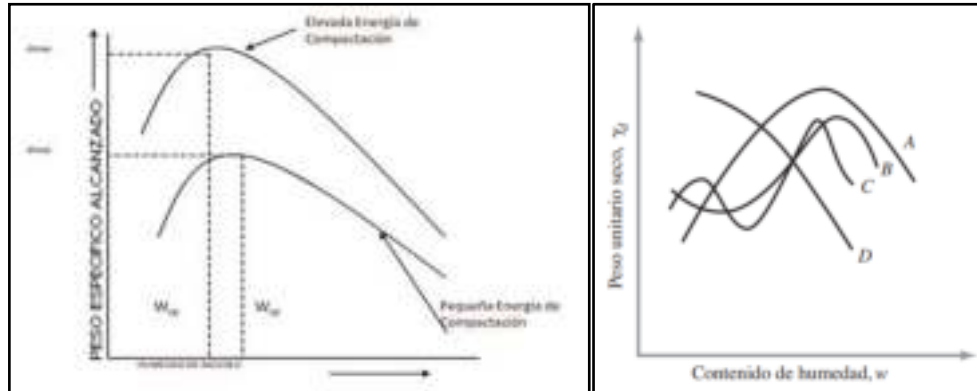


Figura 20. Tipos de Curvas de Compactación
Fuente: Braja M. Das 4ta. Edición

Estas curvas se muestran en la figura. Las curvas de compactación tipo A son las que tienen un solo pico. Este tipo de curva se encuentra generalmente en los suelos que tienen un límite líquido entre 30 y 70. El tipo de curva B es con un pico y medio, y el tipo de curva C es una curva de doble pico. Las curvas de compactación de los tipos B y C se pueden encontrar en los suelos que tienen un límite líquido inferior a 30. Las curvas de compactación de tipo D son las que no tienen un pico definido. Se denominan de forma extraña. Los suelos con un límite líquido mayor a 70 pueden exhibir curvas de compactación de suelos de tipos C o D. Los suelos que producen curvas tipos C y D no son muy comunes.

3.1.3.2. Energía Específica

La energía específica es la presión aplicada al suelo por unidad de volumen, durante cualquier proceso de compactación. En laboratorio, la compactación por impacto queda definida por:

$$E_c = \frac{N * n * W * h}{V}$$

Ecuación 12. Energía Especifica
Fuente: Elaboración Propia

Dónde:

E : Energía Específica

N : Número de golpes del pisón por capas

n : Número de capas

W : Peso del pisón compactador

H : Altura de caída del pisón

V : Volumen total del molde de compactación.

Ensayo Proctor Modificado T-180: $E_c = 27.2$ [kg-cm/cm], obras viales de alto tráfico (D).

Ensayo Proctor Estándar T-99: $E_c = 6.1$ [kg-cm/cm]

El empleo de una mayor energía de compactación permite alcanzar densidades secas mayores y óptimos contenidos de humedad menores, esto se comprueba al analizar los resultados obtenidos con las pruebas Proctor Estándar y Proctor Modificado.

3.1.3.3. Método de Compactación

En el campo y laboratorio existen diferentes métodos de compactación. La elección de uno de ellos influirá en los resultados a obtenerse.

3.1.3.4. Humedad

Como elemento lubricante para pasar de una compacidad abierta a una cerrada o para densificar de un material fino en término de la relación de sus vacíos, imbricación para suelos granulares, en caso de finos por aumento de consistencia del material.

La humedad proporciona alcanzar una compactación óptima que es el óptimo contenido de humedad, la cual permitirá alcanzar la densidad seca máxima. Si el contenido de humedad está por debajo del óptimo, el suelo es rígido y difícil de comprimir, originando densidades bajas y la relación de vacíos es elevado. Cuando está por encima del óptimo, la relación de vacíos se mantiene, pero aumenta la humedad produciendo la disminución de la densidad seca.

3.1.3.5. Sentido de recorrido de la escala de humedad

En las pruebas de laboratorio, tiene influencia también el sentido en que se recorre la escala de humedades al efectuar la compactación, se obtienen curvas diferentes si se compacta comenzando con un suelo húmedo y luego se va agregando agua, o si se empieza con un suelo húmedo y luego se va secando. En el primer caso se obtienen densidades secas mayores ya que al agregar el agua está tenderá a quedar en la periferia de los grumos, penetrando en ellos después de un tiempo, por lo tanto, la presión capilar entre los grumos es pequeña favoreciendo la compactación. En el segundo caso se obtienen densidades secas menores, ya que al evaporarse el agua e irse secando el suelo, la humedad superficial de los grumos se hace menor que la interna, aumentando la presión capilar haciendo más difícil la compactación.

3.1.3.6. Temperatura y presencia de otras sustancias

Dependiendo de la temperatura puede producirse la evaporación o condensación del agua, la presencia de sustancias extrañas, puede también producir variación del resultado en la obtención de la densidad seca.

3.1.4. La curva de saturación

La curva de saturación representa las densidades de un suelo en estado de saturación, es decir cuando el volumen de vacíos es cero, razón por la cual se le conoce también como "Curva de cero vacíos de aire" o de "saturación completa" Esta curva es prácticamente paralela a la rama derecha de la curva de compactación y varía en función del peso específico de sólidos del material. El valor típico para una gravedad específica es $G_s = 2.6$ para suelos granulares según Braja M. Das.

3.1.5. Elección del tipo de Compactadora

Todos los equipos que se conducen sobre un terraplén, desde las volquetas hasta los cargadores frontales contribuyen en la compactación del mismo. Sin embargo, generalmente no se puede confiar sólo en esta compactación accidental por qué la mayoría de los equipos de construcción son diseñados intencionalmente para tener presiones de contacto bajas entre los neumáticos o huellas y el suelo. Esto permite que viajen más rápida y fácilmente a través del suelo suave, por ejemplo, un cargador frontal tiene una presión de contacto de solo 83 kPa, el tráfico casual usualmente sigue las rutas comunes, así que su energía de compactación no se distribuye uniformemente en el terraplén. De esta manera, algunas áreas pueden recibir suficiente compactación, mientras que otras no reciben virtualmente ninguna. Por lo tanto, es necesario el uso de equipos de compactación específicamente diseñados para esta tarea. El equipo de compactación común en campo incluye los piones de impacto, los rodillos pata de cabra, los rodillos neumáticos, y otros tipos de equipo pesado para la compactación. Sin embargo, también pueden ser obtenidas compactaciones considerables por la asignación de la ruta apropiada del equipo de transporte sobre el terraplén durante la construcción. Todos estos equipos emplean cuatro métodos de compactación en obras viales las cuales son: estática por presión, impacto, amasado, vibración, que se relacionan por el tipo de maquinaria, equipamiento y suelo las cuales se utilizan, en el caso de la Construcción de la Doble Vía El Alto – Viacha", se realizó el siguiente procedimiento de compactación:

3.1.5.1. Compactación por vibración

Este método de compactación es el más utilizado en la actualidad, se basa en utilizar una masa excéntrica que gira dentro de un rodillo liso, dicha masa produce una fuerza centrífuga, que se suma o se resta al peso de la máquina, para producir una presión sobre el suelo, que depende de varios factores como el peso de los contrapesos, la distancia al centro de rotación y la velocidad de rotación. Los equipos por vibración están representados por los rodillos vibrantes o placas vibrantes.

La elección del tipo de rodillo se elige según al tipo de suelo:

- *Rodillos Lisos*, se utilizan en gravas y arenas mecánicamente estables.
- *Rodillos Neumáticos*, se utilizan en arenas uniformes y suelos cohesivos con humedad cerca al límite plástico.

- *Rodillos pata de cabra*, se utiliza en suelos finos, humedad entre 7 a 20% por debajo del límite plástico.
- *Rodillo vibratorio*, se utiliza especialmente en suelos granulares.

Selección del tipo de maquinaria según al tipo de suelo, el cual es indicativo en el siguiente cuadro:

	A - 1 - a	A - 1 - b	A - 3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Rodillo Liso	1	2	2	1	1	1	2	2	3	3	4
Rodillo Neumático	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	3
Rodillo Pata De Cabra	5	5	5	4	4	3	2	2	1	1	1
Pisón Impacto	2	2	1	2	2	2	4	4	4	4	4
Rodillo Vibratorio	1	1	1	1	1	3	4	3	3	5	5

Clasificación del comportamiento del equipo: **1 Excelente**
2 Bueno
3 Regular
4 Deficiente
5 Inadecuado

Tabla 10. Tipos de maquinaria según al tipo de suelo
Fuente: Dujisin y Rutland, 1974

La densidad seca de un suelo sometido a compactación es afectada por el número de pasadas del rodillo. Un número de pasadas inferior al requerido no logrará producir los valores de laboratorio en campo, en cambio un exceso del número de pasadas será antieconómico para el contratista. Es por esta razón que se debe determinar el número preciso de pasadas que se tienen que realizar con el rodillo especificado.

En general se tiene un aumento considerable de la densidad entre una a seis pasadas, que se va haciendo más lento para las pasadas siguientes. Si no se tiene la experiencia se puede realizar terraplenes de prueba y se ajusta el número de pasadas según al tipo de equipo.

Para iniciar las operaciones de compactación de la capa subbase del proyecto en estudio se utilizaron los equipos de rodillo liso vibratorio, en trayectoria equidistantes al eje avanzando gradualmente en los alineamientos rectos se realizó desde los bordes hacia el eje y en los tramos de curvas desde el borde inferior al exterior paralelamente al eje de la vía traslapando uniformemente a la mitad del ancho de la pasada de las curvas.



Figura 21. Compactación en campo
Fuente: Elaboración Propia

La selección del compactador se seleccionó en función al tipo de suelo según recomendaciones de la clasificación AASHTO (Dujisin y Rutland, 1974), así mismo por las exigencias de compactación establecidas en las Especificaciones Técnicas del Proyecto "Construcción Doble Vía El Alto - Viacha" y al Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

3.1.6. Control de calidad en la compactación

Con el fin de reproducir en laboratorio las condiciones de compactación en obra, y a su vez, tener en cuenta la energía de compactación de estos equipos, es usado el ensayo modificado de compactación-Proctor (ASTM D-1557, AASTHO T180), difundido por el Dr. Proctor en 1933. En esta prueba se aplican 56 golpes con una masa de 10 libras desde una altura de 18 a cinco capas de igual espesor dentro de un molde de 4 o 6, a partir de la distribución de partículas presentada por el suelo a analizar. La energía aplicada equivale a 56200 lb/ft³, que se compara a la energía aplicada por equipos de compactación pesada, (Segura, 2010), como resultado de este ensayo, se obtiene el peso unitario seco máximo y la humedad óptima para cada tipo de material en una curva de compactación. Se presenta una curva de compactación típica.

El grado de compactación de un suelo se define a la relación entre la densidad seca alcanzado en obra y densidad seca máximo obtenido en laboratorio, es un requisito indispensable que indica la especificación técnica, para liberar capas compactadas, tal como se presenta:

$$G.C. = \frac{\text{Densidad del suelo seca en sitio } \left[\frac{kg}{dm^3} \right]}{\text{Densidad maxima seca del ensayo proctor } \left[\frac{kg}{dm^3} \right]} * 100$$

Ecuación 13. Grado de compactación
Fuente: Elaboración Propia

3.1.7. Métodos para el control de la compactación

El control de calidad de la compactación del suelo, consiste en la comprobación que las capas granulares cumplan con condiciones como, mitigación del hundimiento del suelo, la deformación y/o contracción del suelo, (Juárez Badillo, 2005), y no solo con la capacidad para soportar cargas. A continuación, se describen los métodos convencionales empleados para el control de la calidad de compactación en campo:

- Método del cono de arena
- Método del balón de caucho
- Método de trozos inalterados por medio de la parafina
- Método del cilindro biselado.
- Método del Tubo Shelby
- Método nuclear

En la actualidad se emplean los siguientes métodos indirectos:

- Método LWD
- Método Densímetro electrónico
- Método GeoGauge

Las pruebas de control utilizado en esta investigación son: el Cono de Arena, GeoGauge, Deflectómetro Liviano de Impacto como se mencionó son métodos indirectos para determinar el grado de compactación.

El valor del grado de compactación se expresa en porcentaje, en el proyecto de la "Construcción de la Doble Vía El Alto – Viacha", según las especificaciones técnicas indica que el valor es mayor o igual al 97% para capa subbase, que debe cumplir en obra, para poder liberar así los tramos compactados.

CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA SUBBASE

Es la capa de rodadura de la estructura del pavimento que tiene como función primordial, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tráfico vehicular a la capa la subbase. El material de la capa subbase deberá estar constituido por fragmentos de roca, gravas, arenas y limos, producidos por acciones erosivas o por trituración artificial. Se puede extraer de sitios muy variados como son las, acumulaciones volcánicas, canteras de bancos in situ, lechos de ríos, lagos y mares.

En el presente capítulo se describen los trabajos efectuados del material de capa subbase, los parámetros y procedimientos utilizados de los ensayos físico – mecánicos en laboratorio según a las especificaciones técnicas del proyecto “Construcción Doble Vía El Alto – Viacha” y el Manual de Especificaciones Generales de Construcción de la Administradora Boliviana de Carreteras (ETG-06) (ABC). Este estudio pretende determinar la calidad del suelo usada en la capa subbase del proyecto, así como analizar los ensayos, procedimientos son suficientes para garantizar el buen comportamiento del suelo.

4.1. DESCRIPCIÓN, IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DEL SUELO CAPA SUBBASE (ASTM D4220)

4.1.1. Descripción

Para poder recolectar las muestras de suelo se revisó previamente las especificaciones técnicas del proyecto, para poder identificar, seleccionar y reunir la cantidad del material adecuado para el estudio.



Figura 22. Muestreo de la capa subbase
Fuente: Elaboración Propia

La norma ASTM D4222, establece métodos para la conservación de muestras obtenidas en el terreno, así como su manejo y transporte del material. La selección del método dependió del tipo de muestra obtenida, del ensayo y las propiedades de ingeniería requerida. Las muestras de suelo fueron colocadas en bolsas plásticas y selladas, se identificó el material adecuadamente, colocando el nombre del sector de localización del material y la profundidad en la cual se recolecto.

4.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA POR CUARTEO (AASHTO T248)

4.2.1. Descripción

Mediante este procedimiento, se puede dividir las muestras de suelos obtenidas en el campo, para obtener porciones que sean representativas y que tengan los tamaños adecuados para los diferentes ensayos que se desarrollaron. Según a la norma AASHTO T248, hay procedimientos manuales y mecánicos; de acuerdo con el tamaño de la muestra de campo y el de la muestra requerida, se pueden aplicar los métodos que se describen más adelante.

El material provisto para realizar todos los ensayos para este proyecto de grado fue aproximadamente de 80 [kg].

4.2.2. Método por Cuarteo Mecánico

El método elegido para el estudio de los suelos, es el de los cuarteadores mecánicos ya que cuando se trata de muestras que están más secas que la condición de "saturadas superficialmente secas"; o muestras de áridos que previamente al cuarteo se secan a temperaturas inferiores a las establecidas para los ensayos a que se someterán.

4.2.3. Procedimiento

La muestra que llega del campo una vez se encuentre a las condiciones de humedad adecuadas, se coloca en una bandeja plana o en la tolva del cuarteador distribuida uniformemente de extremo a extremo, de forma que el material cuando pase por los ductos caiga aproximadamente en igual cantidad por cada uno. La variación por unidad de volumen a la cual se descarga el material debe ser tal, que permita el flujo libre a través de los ductos sin obstrucciones hasta los recipientes. El material de un recipiente, nuevamente se descarga a través del cuarteador y se reserva el del otro para obtener muestras para otros ensayos Se Repite el proceso tantas veces como sea necesario para obtener la muestra del tamaño deseado. Con el propósito de tener una muestra representativa para los posteriores ensayos.



Figura 23. Equipo y procedimiento del Cuarteo Mecánico
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC

4.3. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HÚMEDAD (ASTM D2216)

4.3.1. Descripción

Este ensayo tiene como fin, obtener la humedad que contiene el suelo, para lo cual se con el propósito de ser utilizada como dato complementario para los ensayos de Granulometría, Cono de Arena, LWD.

Para lo cual requiere un tamaño máximo y una cantidad mínima de muestra según a la norma ASTM D2216, lo cual indica que el tamiz que retiene más del 10% de la muestra será la cantidad de masa de la muestra húmeda. Para el presente estudio al tratarse de un suelo granular, las partículas se retienen desde el tamiz No. 3/4" (19 mm), entonces la masa recomendada para el ensayo es de 500 a 1000 [g].

4.3.2. Preparación y procedimiento

Para la preparación de las muestras y el procedimiento del ensayo, se realizó en el marco de la norma ASTM D2216-98.



Figura 24. Determinación de la masa de suelo seco
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC

4.3.3. Fórmula para la determinación de la humedad

(La planilla de los resultados y los registros obtenidos se encuentra en el anexo A). Para el efecto se utilizaron las siguientes formulas:

- Humedad Higroscópica:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

Ecuación 14. Determinación de la humedad
Fuente: Elaboración propia

Donde:

w: es el contenido de humedad del suelo

W_w : es la masa de agua presente en el suelo

W_s : es la masa seca de los sólidos del suelo

4.3.4. Análisis y resumen de los resultados

Para el análisis del contenido de humedad, para la capa subbase se realizó tres ensayos (muestra "1", muestra "2" y muestra "3") que se tomaron muestras sueltas de suelo del tramo de prueba, y para el ensayo del cono de arena se tomó la muestra una vez terminada el ensayo, de acuerdo a las ETG 2-06, siguiendo el procedimiento de ensayo de la ASTM D2216-98, el resumen de los ensayos de laboratorio se presenta en la tabla:

Resumen Ensayo Contenido de Humedad ASTM D1556	
Ensayo	Promedio Contenido de Humedad [%]
Granulometría	1,47
Cono de arena	3,5

Tabla 11. Resumen Ensayo Contenido de Humedad ASTM D1556
 Fuente: Elaboración propia

4.4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (AASHTO T88 ASTM D422)

4.4.1. Descripción

Este ensayo determina la distribución de tamaño de partículas mayores a 0,075 mm, por medio de un proceso de tamizado. Es necesario para una clasificación de suelos, además que estima la resistencia de la capa de rodadura en la que se empleará; un suelo fino tiene menor resistencia a uno grueso. De acuerdo a la norma AASHTO T27-93, indica que, dependiendo de las características de la muestra, puede realizarse el análisis granulométrico por vía seca o vía húmeda.

Según a las especificaciones técnicas del proyecto, el material de subbase, deberá presentar un diámetro máximo igual o menor a 7.5 cm., y un porcentaje máximo del 10%, en peso de las partículas que pasen por el tamiz No. 200. Un mínimo de 4% en peso de las partículas, deberá pasar por el tamiz No. 200, cuando el material no presente plasticidad. Si el material presentara plasticidad, este porcentaje, será por lo menos de un 2%.

4.4.2. Preparación y procedimiento

Para la preparación de la muestra, se realizó en marco de la norma AASHTO T87- ASTM D421, y para el procedimiento AASHTO T27 – ASTM D422.



Figura 25. Separación parte gruesa y fina
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 26. Cuarteo de la parte fina
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 27. Lavado parte gruesa
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 28. Lavado parte fina
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 29. Secado de la muestra
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



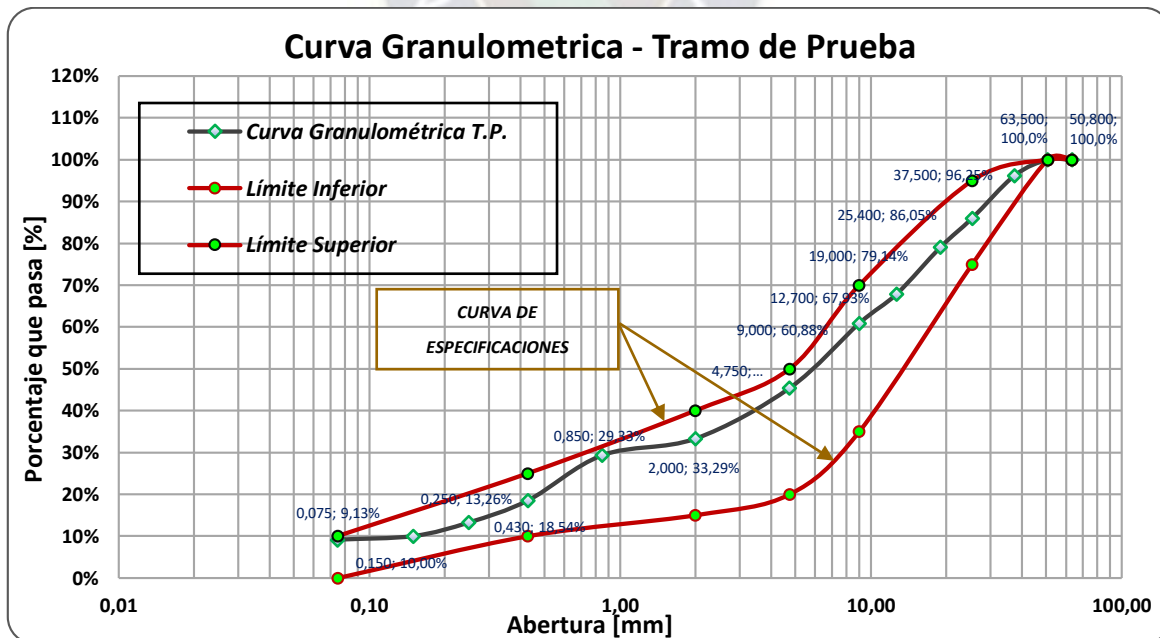
Figura 30. Tamizado manual y automático de la muestra
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC

4.4.3. Análisis y resumen de los resultados

Para el análisis granulométrico del material granular para la capa subbase, se realizó en base a un ensayo de la muestra que se tomó cuando se estaba extendiendo en el tramo de prueba, siguiendo el procedimiento del ensayo AASHTO T88, ASTM D422, es muy importante por establecer la cantidad de tamaños de las partículas del suelo, el resumen se presenta el siguiente cuadro:

Resumen del Análisis Granulométrico				
Tamices	Aberturas	% que Pasa	Especificación ETG2-06 Gradación B	
No.	[mm]		100	100
2"	50,8	100,00	100	100
1 1/2"	38,1	96,25		
1"	25,4	86,05		
3/4"	19,1	79,14		
1/2"	12,7	67,93		
3/8"	9,52	60,88		
No. 4	4,76	45,41	25	55
No. 10	2	33,29		
No. 20	0,84	29,33		
No. 40	0,42	18,54		
No. 60	0,25	13,26		
No. 100	0,105	10,00		
No. 200	0,074	9,13	0	10
ETG 2-06		Cumple		

Tabla 12. Resumen del Análisis Granulométrico
 Fuente: Elaboración propia



Gráfica 3. Curva Granulométrica
 Fuente: Elaboración propia en base a ensayos de laboratorio. Ver Anexo A

4.5. LÍMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D4318 AASHTO T89 - ASTM D4318 AASHTO T90)

4.5.1. Descripción

Este ensayo es necesario para determinar la clasificación de los suelos finos, el límite líquido puede utilizarse para estimar asentamientos y problemas de consolidación.

La manera en que actuará un suelo, dependerá de la presencia de agua. Al estudiar los límites, tenemos una idea de los estados de consistencia, que se dan en función de su grado de humedad: líquido, plástico, semisólido y sólido.

- Líquido. - la presencia de mucha agua en el suelo elimina su cohesión transformándolo a un líquido denso sin capacidad resistente.
- Plástico. - el suelo es blando y flexible, dúctil ante la aplicación de esfuerzos moderados, no es adecuado para soportar cargas importantes.
- Semisólido. - el suelo presenta fisuras previo su cambio de forma, el volumen disminuye si aún pierde agua
- Sólido. - el suelo es firme por no cambiar su volumen

Las humedades respectivas entre los estados mencionados definen los límites líquido (LL), límite plástico (LP) y de retracción (LR).

Los límites líquido y plástico son los utilizados en el presente proyecto, ya que sus principales objetivos son los de identificación y clasificación de los suelos.

4.5.2. Preparación de las muestras y procedimiento Limite Líquido y Limite Plástico

Para la preparación de las muestras y el procedimiento se realizó en marco a la norma, ASTM D4318 y AASHTO T89, para determinar el Límite Líquido, como se muestra en las siguientes figuras:



Figura 31. Preparación y acondicionamiento de la muestra
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 32. Porción de muestra colocada en copa de Casagrande
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 33. Determinación de la masa de suelo con recipiente
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC

De acuerdo a la norma ASTM D4318, AASHTO T90, se determinó el límite plástico según al procedimiento.



Figura 34. Determinación de la masa de suelo con recipiente
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC

4.5.3. Determinación del Límite Líquido y Plástico

El Límite Líquido se determina por medio del valor de la humedad de la muestra con el número de golpes determinado como 25.

$$\%h = \frac{P_a}{P_{ss}} \times 100$$

Ecuación 15. Determinación de la humedad para el Límite Líquido y Plástico
Fuente: Elaboración propia

Dónde:

$\% h$ = Porcentaje de humedad

P_a = Masa del agua (g)

P_{ss} = Masa del suelo seco (g)

El Límite Plástico se determinó mediante la humedad que presenta la muestra luego de realizar el ensayo de Límite Líquido, mediante la relación del peso de agua que presenta la muestra y su respectivo peso seco. El índice de plasticidad es la diferencia de índice líquido y plástico. La planilla de los resultados y los registros obtenidos se encuentra en el **anexo A**.

4.5.4. Análisis y resultados

Para el ensayo de límites de consistencia del material granular para la capa subbase se realizó en base a tres ensayos de tres muestras que se recolectó cuando se estaba extendiendo en el tramo de prueba cada 300 m de acuerdo a las ETG 2- 06, siguiendo el procedimiento de ensayo de la AASHTO T – 89, ASTM D4318; AASHTO T-90, ASTM D4318, el resumen de los ensayos de laboratorio se presenta en la tabla:

Resumen del Ensayo de Límites de Consistencia						
Límites de Consistencia	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio [%]	Especificación ETG2-06	
Límite Líquido	17,72	16,53	16,27	16,85	≤ 25 %	Cumple
Límite Plástico	11,2	10,84	10,53	10,86		
Índice de Plasticidad	IP = LL – LP = 16,85 – 10,85			5,99	≤ 6 %	Cumple

Tabla 13. Resumen del Ensayo de Límites de Consistencia
Fuente: Elaboración propia

Analizando los ensayos de límites de consistencia del material granular para la capa subbase, se evidencia que la fracción que pasa por el tamiz N° 40 tienen un límite líquido promedio inferior a 25% y un índice de plasticidad promedio inferior a 6%, por lo tanto, el suelo analizado, cumple con las

exigencias de las Especificaciones Técnicas Generales EGT 2-06 para la conformación de la capa subbase

4.6. RELACIONES DE PESO UNITARIO - HUMEDAD EN SUELOS - MÉTODO MODIFICADO (ASTM D422 AASHTO T180) - ENSAYO DE COMPACTACIÓN

4.6.1. Descripción

La humedad en el suelo es importante a la hora de compactar. Si se necesita que un suelo seco supere los rozamientos internos entre sus partículas se requerirá una precisa energía de compactación, sin embargo, al añadir algo de agua esta actuará como aceite alrededor de las partículas, reduciendo la fricción entre ellos y este suelo exigirá menor esfuerzo que el inicial. Al aumentar más agua, llegará un momento en que los huecos se llenen de este, no será posible su evacuación, el volumen del suelo incrementará y la compacidad disminuirá. Al momento que la compacidad sea máxima se obtendrá una humedad óptima para una misma energía de compactación.

El ensayo de Compactación de Proctor Modificado es utilizado para la determinación de la relación que existe entre el contenido de humedad y el peso unitario seco de un suelo. Además, mediante la anterior relación se determina el peso unitario seco máximo para un valor óptimo del contenido de humedad. Este ensayo se aplica únicamente, a suelos con mayor del 20% en peso de partículas retenidas en el tamiz de 3/8" y menos del 30 % en peso de partículas retenidas en el tamiz de 3/4", señalar que para el presente ensayo del material granular analizado se encuentra en el rango establecido anteriormente,

4.6.2. Diferencia y Elección de la energía de compactación

La diferencia entre el Proctor normal y Proctor modificado es la energía de compactación empleada, siendo en el orden de 4.5 veces superior el segundo caso que el primero. El Proctor modificado es una evolución del Proctor normal, creada por emplear maquinaria de compactación más pesada debido al aumento de la carga por eje de vehículos. Para esto la norma AASTHO propone dos sub-métodos que se muestran en los siguientes cuadros:

AASTHO T99				
Método	A	B	C	D
Suelo	pasa el tamiz N°4	pasa el tamiz N°4	pasa el tamiz 3/4"	pasa el tamiz 3/4"
N° de Capas	3	3	3	3
N° de golpes/capa	25	56	25	56
Diámetro del molde	4" (100 mm)	6" (150 mm)	4" (100 mm)	6" (150 mm)
Martillo de compactación o pisón: 5,5 [lb] (2,5 kg) en caída libre desde una altura de 12 [plg] (30.5 cm)				

Tabla 14. AASTHO T99
 Fuente: Elaboración propia

AASHTO T180				
Método	A	B	C	D
Suelo	pasa el tamiz N°4	pasa el tamiz N°4	pasa el tamiz 3/4"	pasa el tamiz 3/4"
N° de Capas	5	5	5	5
N° de golpes/capa	25	56	25	56
Diámetro del molde	4" (100 mm)	6" (150 mm)	4" (100 mm)	6" (150 mm)
Martillo de compactación o pisón: 10 [lb] (4,5 kg) en caída libre desde una altura de 18 [plg] (46 cm)				

Tabla 15. Energías de Compactación ASSTHO T99, T180
Fuente: Manual ABC Volumen 4, Ensayos de Suelos y materiales SO402_1

De acuerdo a las especificaciones técnicas de la obra para el material granular, el método elegido para esta investigación fue el Método T180-D.

4.6.3.Preparación y procedimiento

Para la preparación de las muestras y el procedimiento se realizó en marco a la norma, ASTM D422 y AASHTO T180,



Figura 35. Separación de la muestra en los tamices
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 36. Determinación de la masa de suelo
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 37. Mezclado de la muestra
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 38. Verificación del molde, compactado de la muestra
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 39. Enrasado de la muestra
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC

4.6.4. Análisis y resumen de los resultados

Para el ensayo de las relaciones peso unitarios y humedad del material granular para la capa subbase mediante el método modificado, se realizó en base a un ensayo de cuatro muestras que se recolectó cuando se estaba extendiendo en el tramo de prueba de acuerdo a las ETG 2- 06, siguiendo el procedimiento de ensayo de la AASHTO T – 180, ASTM D422, el resumen de los ensayos de laboratorio se presenta en la tabla:

Resumen del Ensayo de Compactación Proctor Modificado	
<i>Humedad óptima [%]</i>	4,78
<i>Densidad seca máxima [kN/m3]</i>	22,32

Tabla 16. Resumen del Ensayo de Compactación Proctor Modificado
Fuente: Elaboración propia

Analizando el ensayo de la relación de peso unitario y humedad en los suelos método modificado del material granular para la capa subbase, se realizó con la energía de compactación AASHTO T180D, donde las muestras fueron obtenidas en el extendido, en el tramo de prueba, presentaron una homogeneidad en el material, ya que en las densidades máximas secas y las humedades optimas tuvieron una variación mínima, para la densidad máxima seca fue de 0,05 g/cm³ y de la humedad de 1,28%, por lo tanto, cumple con las exigencias de las Especificaciones Técnicas Generales ETG 2-07 para la conformación de la capa subbase.

4.7. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DEL SUELO EN EL LABORATORIO (CBR DE LABORATORIO) (ASTM D1883 AASHTO T193)

4.7.1. Descripción

Con este ensayo se determina las propiedades expansivas del suelo y la relación resistencia penetración mediante el empleo de muestras compactadas al contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo Proctor modificado. Para una estructura vial el comportamiento mecánico del suelo es el factor de mayor importancia, y debe ser una estructura resistente. Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, así también de materiales empleados en la construcción de subbases, bases y capas de rodadura granulares.

La capacidad portante de un suelo se define como la carga que puede soportar sin que se produzcan asentamientos excesivos, se lo determina mediante el índice CBR (California Bearing Ratio), nombrado así por ser aplicado por primera vez en el estado de California), realizado a suelos compactados en laboratorio con la humedad óptima y niveles de energía variable. Este ensayo normalizado consiste en un procedimiento de hinchamiento y penetración. El hinchamiento es un procedimiento en el que se sumerge la muestra en agua durante 4 días con una sobrecarga equivalente a la real aplicada en una carretera. Se realizan dos lecturas una inicial y otra final mediante un equipo calibrado. El hinchamiento es importante en suelos arcillosos por llegar a producir asentamientos diferenciales de importancia. La penetración determina la capacidad portante del suelo. Se ejecuta ejerciendo una presión creciente mediante una prensa que va unida a un pistón sobre la muestra de suelo compactada con la humedad óptima. La velocidad de penetración normalizada es de 1.27 [mm/min].

4.7.2. Preparación y procedimiento

Para la preparación de las muestras y el procedimiento se realizó en marco a la norma, ASTM D1883 y AASHTO T193.



Figura 40. Preparado de la muestra
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 41. Armado del molde, compactado de la muestra
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 42. Colocado del molde espaciador
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 43. Determinación de la masa total
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 44. Lectura del dial al inicio
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 45. Lectura del dial al final, Drenaje del agua
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 46. Registro de penetraciones
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC



Figura 47. Verificación de la penetración en el suelo, determinación de su humedad
Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio ABC

4.7.3. Análisis y resumen de los resultados

Para el ensayo relación de soporte del suelo (CBR de Laboratorio) para la capa subbase, se realizó en base a un ensayo de tres muestras que se recolectó en el momento que se extendió el material en el tramo de prueba de acuerdo a las ETG 2- 06, siguiendo el procedimiento de ensayo de la ASTM D1883 y AASHTO T193, el resumen de los ensayos de laboratorio se presenta en la tabla:

Resumen del Ensayo CBR			
Número golpes por capa	10	25	56
Peso unitario muestra húmeda [KN/m ³]	21,89	22,85	23,60
Peso unitario muestra seca [KN/m ³]	20,95	21,91	22,59
Contenido de humedad [%]	4,47	4,29	4,50
Prueba de expansión [%]	0,02	0,02	0,04
CBR, [%] (2,54 mm)	0,30	0,70	1,25

Tabla 17. Resumen del Ensayo CBR
 Fuente: Elaboración propia

Resumen Ensayo CBR de Laboratorio				
Capa	Detalle CBR %	CBR %	Según ETs.	
SUBBASE	100	98	≥ 90%	Cumple
SUBBASE	97	58	≥ 40%	Cumple

Tabla 18. Resumen Ensayo CBR de Laboratorio
 Fuente: Elaboración propia

Analizando el ensayo de relación de soporte del suelo (CBR de laboratorio) del material granular para la capa subbase, se puede evidenciar que el CBR para 0.1 [plg] tiene como promedio mayor al 90% para el 100% de la densidad máxima con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180, por lo tanto, cumple con las exigencias de las Especificaciones Técnicas Generales ETG 2-06 para la conformación de la capa base.

CAPITULO 5. METODOLOGÍAS DE ENSAYOS EN SITIO DESPUES DE LA COMPACTACIÓN

5.1. DENSIDAD EN SITIO – CONO DE ARENA (ASTM D1556 - AASHTO T191)

El método del cono y arena, se lleva a cabo para verificar el peso unitario del suelo, para que las condiciones de compactación que se han fijado como óptimas, se estén cumpliendo en el terreno. Como bien se conoce, el método se aplica a partir de la superficie del material compactado mediante una pequeña perforación de forma cilíndrica y cuya exactitud y dimensiones exactas dependen del tipo de material que generalmente es de 15 [cm] y el diámetro del hoyo de extracción de suelo es 16 [cm] y relativo a la abertura de la placa base del cono metálico de ensayo; este método se centra en la determinación de volumen de una pequeña excavación de forma cilíndrica de donde se ha retirado todo el suelo compactado ya que el peso del material retirado dividido por el volumen del hueco cilíndrico nos permite determinar la densidad húmeda, determinándose la humedad de esa muestra nos permite obtener la densidad seca.



Figura 48. Equipo Cono de Arena – Construcción doble vía El Alto – Viacha
Fuente: Elaboración Propia

Los usos más comunes del método cono y arena son obras de construcción de terraplenes de tierra, rellenos de carretera y estructuras de relleno.

Acerca del método de cono y arena se tienen las siguientes consideraciones:

- Es adecuado para suelos formados por materiales granulares sueltos, que contengan cantidades apreciables del material grueso superior a 38 [mm], ni suelos granulares con altas relaciones de vacíos, los cuales no mantienen estables las paredes del hueco de ensayo.
- La arena óptima utilizada para el ensayo sería la arena de Ottawa, pero es normal que muchos de los laboratorios por economía y poca accesibilidad a la misma, realicen el ensayo con arena de fuentes cercanas, en este estudio se realizó con arena que se encuentra en cercanías a la población

de Uyuni. Siendo una arena uniforme estandarizada (arena compuesta por partículas cuarzosas, sanas, no cementadas de granulometría redondeada y comprendida entre las mallas N°10 (2.0 mm) y N° 30 (0.6 mm) para llenar el hueco excavado en terreno.

- Se considera un ensayo con alto margen de error, por lo que se recomienda que, en el momento de llevarlo a cabo, la zona donde este se realice esté libre de vibraciones, lo cual es muy común en obra.
- Suelos saturados, orgánicos o muy plásticos, no son aptos para realizar este ensayo. Lo anterior debido a que, en el momento de realizar la excavación, las paredes de la misma pueden sufrir cambios en su geometría por deformación o compresión.

Este ensayo proporciona un medio para comparar las densidades secas en obras en construcción con las obtenidas en el laboratorio. Para ello se tiene que la densidad seca obtenida en el campo se fija con base a una prueba de laboratorio. Al comparar los valores de estas densidades, se obtiene un control de la compactación, conocido como grado de compactación, que se define como la relación en porcentaje, entre la densidad seca obtenida por el equipo en el campo y la densidad máxima correspondiente a la prueba de laboratorio.

Aunque el procedimiento permite deducir que el método es muy simple, se recomienda ser llevado a cabo por personal capacitado y con conocimiento sobre el tema.

Este método de ensayo tiene como propósito obtener datos por medio de los cuales se puedan determinar las siguientes constantes de los suelos:

- Contenido de Humedad de la muestra
- Densidad seca in-situ
- Grado de compactación

5.1.1. Equipos y materiales que constituyen el método cono de arena

Arena: como se mencionó en las generalidades, aunque no sea posible realizar el ensayo con arena de Ottawa, el material que se seleccione debe presentar por lo menos las siguientes características:

- Debe ser arena con el mayor porcentaje posible de uniformidad en su tamaño. Joseph Bowles (1980) recomienda en su manual que la arena presente un tamaño comprendido entre el tamiz No. 20 y No. 30 y expone además que esa uniformidad previene fenómenos de segregación.
- Teniendo en cuenta que la arena es reutilizable, se debe garantizar que esta no presente impurezas, resultado de trabajos anteriores.
- En el momento de llenar tanto el recipiente como la excavación, esta debe fluir libremente por lo que se necesita que no haya ningún grado de adherencia o cementación entre sus granos y que estos sean de forma redondeada.

- No se debe combinar arenas de diferentes fuentes, aun cuando ambas cumplan con gradación y demás características.
- Se debe prestar especial cuidado a su almacenamiento, pues su alta capacidad de absorber humedad de la atmosfera puede producir cambios en su densidad y cuyo dato es necesario para determinar el resultado final del ensayo.
- El cálculo de su densidad se debe llevar a cabo con la misma exactitud y rigurosidad con la que se realiza el ensayo en campo.

Aparato Cono y Arena

El aparato cono y arena es un equipo compuesto por tres partes principales que a continuación se explican de manera detallada:

- **Cono Metálico:** su material normalmente de aluminio u otro material que no presente resistencia al deslizamiento libre de la arena. En su parte inferior cuenta con una válvula cilíndrica de un diámetro que varía entre los 12,5 [mm] y 13,00 [mm] y que se encuentra en la parte central separando el embudo grande del embudo pequeño que permite la conexión con la boca del frasco.

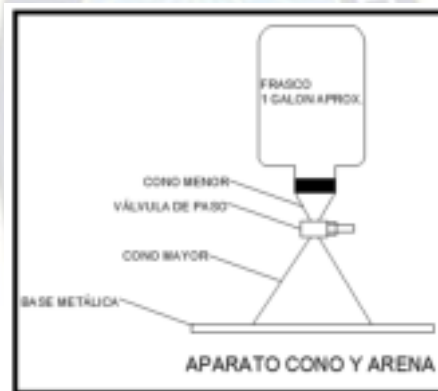


Figura 49. Equipo Cono de Arena
Fuente: Manual de procedimientos de ensayos

- **Frasco contenedor de arena:** el frasco del aparato tiene una capacidad estándar de 1 galón (3785 cm³), aunque en diferentes laboratorios suelen usarse frascos de mayor o menor tamaño, teniendo en cuenta que el contenido del mismo sea suficiente para llenar el hueco que se hace en el terreno para llevar a cabo el ensayo. Su material puede ser de plástico y vidrio, siendo el primero el más utilizado por facilidades de maniobrabilidad y menos opción de rotura.
- **Base:** corresponde a una platina de forma cuadrada, con un orificio en su centro y cuyo diámetro es ligeramente mayor al diámetro del cono metálico superior. Sus características deben permitir que una vez puesto en el terreno, su superficie de contacto sea total y no permita que la arena que fluye tome otro rumbo diferente al interior del hueco o perforación.

Equipo menor: se debe contar como mínimo con un martillo y un cincel para realizar la perforación, así como con una cuchara o cucharón para retirar la totalidad del suelo y una brocha de mecha fina para manejar con precisión la arena.

Balanza 1: balanza con capacidad de mínimo 10 kilogramos para llevar a cabo la determinación de la constante del cono, la densidad de la arena y los pesos propios de los materiales recuperados, con precisión de 1,0 g.

Balanza 2: balanza con capacidad de 1000 [g] para determinación de contenido de humedad, con precisión de 0,1 [g].

Horno o estufa de terreno: se debe trabajar y mantener una temperatura de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Determinación de la calibración del aparato y la arena

- Se llena el aparato cono y arena y se determina su masa. (*Mo*)
- Sobre una superficie que sea totalmente plana, se coloca la base metálica asegurándose que no se vaya a deslizar o a mover una vez sobre esta se coloque el aparato cono y arena.
- Cuando se esté seguro de la situación anterior, se coloca el aparato cono y arena sobre la placa de modo que el cono superior coincida con el orificio de la placa. Se abre la válvula y se deja fluir la arena hasta que pare. (*Mf*)
- Una vez pare la arena de fluir se cierra de nuevo la válvula y el aparato se lleva a la balanza para tomar su nueva masa. La diferencia de masas del aparato lleno con el peso del aparato después de dejar fluir la arena hasta parar, será la masa del cono.



Figura 50. Procedimiento para la determinación de la masa del cono
Fuente: Elaboración Propia

- El procedimiento se realiza mínimo tres veces, promediando así las masas obtenidas y lograr una mayor precisión en los resultados. Se debe comprobar que la variación entre masas no debe ser mayor al 1 % y en dado caso que se presente tal situación se deben descartar los datos y hacer de nuevo el procedimiento.

La masa del cono se calcula de la siguiente manera:

$$M_c = M_o - M_f$$

Ecuación 16. Masa del cono

Donde:

M_c : Masa del Cono (promedio de los tres ensayos)

M_o : Masa aparato cono y arena lleno

M_f : Masa aparato cono y arena después de dejar fluir la arena hasta parar.

- Se toma un recipiente de volumen y peso conocido. Normalmente para esta operación se utiliza un recipiente que se asemeja al molde del ensayo de Proctor Modificado.
- Se llena el aparato cono y arena hasta el nivel de la válvula y posteriormente se cierra la misma. Se registra el peso total del aparato cono y arena lleno.



Figura 51. Molde y Llenado del aparato
Fuente: Elaboración Propia

- Teniendo en cuenta que el diámetro del molde del cono superior del aparato es muy similar, se coloca la base metálica en el borde superior del recipiente y sobre esta se coloca el aparato cono y arena cuidando que encajen con la mayor exactitud posible.
- Una vez el sistema este montado se abre la válvula y se deja fluir la arena hasta que deje de hacerlo.

- Luego se toma la masa del aparato cono y arena y teniendo en cuenta que ya se conoce la masa del cono, se puede conocer también la masa de la arena necesaria para llenar el recipiente.



Figura 52. Procedimiento para determinar la densidad de la arena
Fuente: Elaboración Propia

- El procedimiento se realiza mínimo tres veces, promediando así las masas obtenidas y lograr una mayor precisión en los resultados. Se debe comprobar que la variación entre masas no debe ser mayor al 1 % y en dado caso que se presente tal situación se deben descartar los datos y hacer de nuevo el procedimiento.

La densidad de la arena se calcula de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{M_0 - M_f - M_c}{V_r}$$

Ecuación 17. Densidad de la arena

Donde:

ρ : Densidad de la Arena

M_0 : Masa aparato cono y arena lleno

M_f : Masa aparato cono y arena después de llenar el recipiente

M_c : Masa del Cono.

V_r : Volumen del recipiente

5.1.2. Procedimiento

El procedimiento para la determinación de la densidad de un suelo por el método cono y arena se lleva a cabo en dos etapas: campo y laboratorio. Del cuidado, la precisión y la técnica con la que se lleven a cabo cada una de ellas dependerá el resultado final del ensayo. Como se enuncio en las generalidades

al comienzo del capítulo, es un ensayo que da la aprobación o desaprobación a las condiciones de compactación de las obras, por ende, debe tomarse con mucha seriedad y profesionalismo.

En campo:

- Es importante aclarar que una vez se esté en campo y el aparato de cono y arena este lleno hasta la válvula, el operario debe conocer esta masa, además de la densidad de la arena, el cual debió ser tomado previamente en el laboratorio.
- Determinar la zona específica donde se va a realizar el ensayo y preparar la superficie para que presente una condición plana y pueda hacer juego de la manera más precisa con la placa de base. Se debe tener especial cuidado en no cambiar las condiciones de la estructura de suelo en el momento de buscar que su superficie quede plana.
- Una vez se tenga una superficie plana se coloca la base metálica sobre el suelo y se verifica lo siguiente: Que los bordes del orificio de la base metálica estén totalmente en contacto con el suelo, para evitar el flujo de arena por debajo de la placa. Que la placa no se vaya a correr una vez se esté realizando el ensayo.

Para esto cuando sea necesario se colocarán clavos en los extremos de la base metálica que impidan su movimiento.

- Haciendo uso del cincel y el martillo se lleva a cabo la excavación teniendo en cuenta la altura de 15 [cm].
- A medida que se realiza la excavación, el material resultante se deposita en un recipiente o bolsa hermética que garantice que se conservara su humedad natural. Es importante que las paredes de la excavación no presenten irregularidades considerables con el fin de obtener resultados los más reales posibles.



Figura 53. Excavación del suelo
Fuente: Elaboración Propia

- A continuación, teniendo la válvula cerrada se voltea boca-abajo el aparato cono y arena sobre la base metálica y se abre la válvula dejando fluir libremente la arena hasta que pare. Se cierra la válvula y se retira el aparato cono y arena. (M1)



Figura 54. Finalización del ensayo en campo
Fuente: Elaboración Propia

- Se registra la masa del aparato cono y arena después de dejar fluir hasta parar y la masa del material excavado. Es necesario conocer la masa inicial del recipiente donde este va a ser almacenado.

De Laboratorio:

- Una vez se hayan terminado las labores de campo, se procede en el laboratorio a determinar el contenido de humedad del suelo resultante de la excavación.



Figura 55. Determinación del contenido de humedad
Fuente: Elaboración Propia

Volumen de excavación:

$$V_e = \frac{M_0 - M_1 - M_c}{\rho}$$

Ecuación 18. Volumen de excavación

Donde:

V_e : Volumen de la excavación

M_0 : Masa inicial de aparato cono y arena lleno

M_1 : Masa de aparato cono y arena después de dejar fluir hasta parar

M_c : Masa del cono

ρ : Densidad de la arena

Contenido de humedad del suelo:

$$W_{\%} = \frac{W_h - W_s}{W_s - W_r} * 100$$

Ecuación 19. Contenido de humedad del suelo

Donde:

$W_{\%}$: Porcentaje de humedad del suelo

W_h : Masa húmedo de la muestra para humedad + recipiente

W_s : Masa seco de muestra para humedad + recipiente

W_r : Masa del recipiente

Masa Seca del Suelo:

$$W_{seco} = \frac{W_h}{1 + w}$$

Ecuación 20. Masa seca del suelo

Donde:

W_{seco} : Masa seco del suelo de excavación

W_h : Masa húmedo del suelo de excavación

w : Contenido de humedad

Densidad Seca In-Situ:

$$\rho = \frac{W_{seco}}{V_e}$$

Ecuación 21. Contenido de humedad del suelo

Donde:

ρ : Densidad seca in-situ

W_{seco} : Masa seco del suelo de excavación

V_e : Volumen de la excavación

Grado de Compactación:

$$\%C = \frac{\rho}{\rho_{max}} * 100$$

Ecuación 22. Grado de compactación

Donde:

%C: Porcentaje de compactación

ρ : Densidad Seca in-situ

$\rho_{m\acute{a}x}$: Densidad Seca máxima en laboratorio

Informe:

En el informe debe presentar la siguiente información:

- Nombre del proyecto, localización, número de ensayo- Descripción y Clasificación del Suelo
- Contenido de Humedad inicial
- Equipos utilizados durante el ensayo.
- Densidad seca in-situ
- Porcentaje de Compactación

5.2. ENSAYO POR EL MÉTODO GEOGAUGE HUMBOLDT H-4140 (ASTM D6758-02)

El equipo GeoGauge H-4140 es un aparato electromagnético que evalúa la compactación de los suelos en forma no destructiva rápida y segura, sirve para la evaluación de asfaltos, bases, subbases, subrasantes y cualquier material granular que vaya a ser utilizado en terraplenes y carreteras, este aparato determina las propiedades del suelo inclusive cercano a lugares de vibración sin que estos tengan influencia en las medidas desplegadas de este equipo, por lo que este aparato no interfiere ni retarda la construcción de vías y carreteras. Es un medidor de rigidez que es usada para asegurar la transferencia uniforme y efectiva de cargas desde el pavimento a la base, subbase y subrasante. El GeoGauge no mide la resultante de la desviación producida por el peso del aparato sino más bien, vibra, produciendo pequeños cambios en la fuerza que producen pequeñas deflexiones. El suelo se deforma una cantidad "δ", la cual es proporcional al radio externo del pie del anillo (R), al Módulo de Young (E), Modulo de Corte (G) y al Radio de Poisson (u), del suelo. La rigidez es el radio de la fuerza de desplazamiento.



Figura 56. Equipo GeoGauge H-4140
Fuente: Elaboración Propia

5.2.1. Funcionamiento

El principio de funcionamiento consiste en medir la impedancia mecánica a nivel superficial del suelo, mediante la medición de tensión provocada y la velocidad de respuesta en función del tiempo.

En otras palabras, se mide la fuerza impartida al suelo y la deflexión superficie resultante como una función de la frecuencia de rigidez, la fuerza sobre la desviación, se desprende directamente de la impedancia.

Permite la medición in situ de la rigidez de capas de suelo compactadas provocando una pequeña fuerza dinámica al suelo mediante una base de forma anular con 25 frecuencias estacionarias que varían entre 100 y 196 Hz de la cual la medida es el promedio de las mediciones a las 25 frecuencias. La deformación impuesta al suelo es inferior a deformación impuesta al suelo es inferior a $1.27 \times 10^{-6} m$.

Estudios de laboratorio (Sawangsurya, 2001) indican que la fuerza generada por el equipo es de 9 [N]. La rigidez del suelo en estudio se calcula mediante la expresión:

$$k = \frac{P}{\delta}$$

Ecuación 23. Rigidez del suelo

Donde:

$$k = \text{Rigidez medida con Geogauge} \left(\frac{MN}{m} \right)$$

$P =$ Fuerza Aplicada

$\delta =$ Deflexión provocada por Geogauge

El proceso entero toma acerca de un minuto. A estas frecuencias bajas, el esfuerzo impartido a la superficie del suelo es la rigidez controlada y es proporcional al módulo de Young del suelo. Con el radio de Poisson, el Módulo de Young pueden ser derivado.

El pie lleva directamente sobre el suelo sin penetrar en ella y soporta el peso del GeoGauge a través de aisladores de goma. También unido a los pies están el agitador que mueve el pie y sensores que miden la fuerza y el desplazamiento de frecuencia del pie.

El GeoGauge se coloca en el suelo para hacer una medición con poca o ninguna preparación de la superficie. Típicamente, se necesita una ligera rotación del GeoGauge obtener el 100% de contacto entre el pie y el suelo. Particularmente en las superficies duras y ásperas el asentamiento del pie es asistido por el uso mínimo de una capa de 10 mm (1/4") de espesor de arena húmeda o refinada.

La única forma de determina el contacto mínimo directo, es después de la medida levantando el GeoGauge del punto de medida y observando la impresión que realizo. Se puede realizar la práctica de campo común en el GeoGauge para la medición del rendimiento del material.

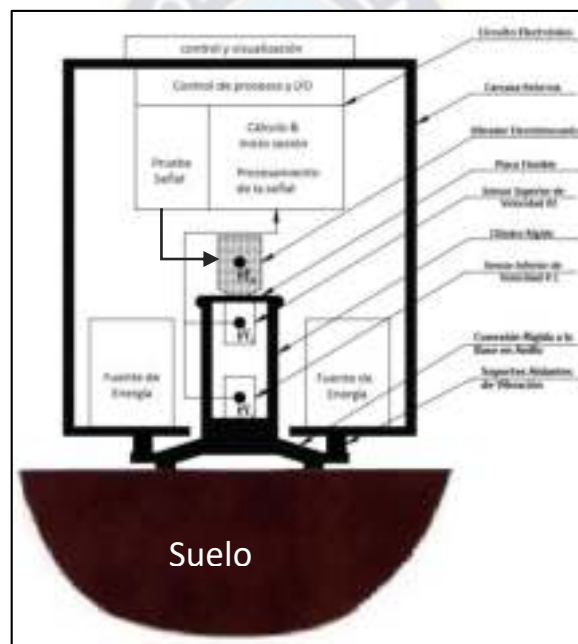


Figura 57. Sección Transversal del Equipo GeoGauge H-4140
Fuente: Manual Humboldt GeoGauge H-4140

El vibrador del GeoGauge aplica una fuerza que se transmite al suelo y la cual se mide mediante la placa flexible a través de los sensores de velocidad, se mide y calcula mediante el desplazamiento diferencial a través de la placa flexible:

$$F_{dr} = K_{flex}(X_2 - X_1) + \omega^2 m_{int} X_1 = K_{flex}(V_2 - V_1) + \omega^2 m_{int} X_1$$

Ecuación 24. Fuerza aplicada suelo mediante los sensores

Donde:

F_{dr} = Fuerza aplicada por el vibrador, N

K_{flex} = Rigidez de la placa flexible, MN/m

X_1 = Desplazamiento de la Placa Rígida, m

X_2 = Desplazamiento de la Placa Flexible, m

$\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia, Hz

m_{int} = masa de los componentes internos unidos al pie rígido y al pie mismo, kg

V_1 = Velocidad de la Placa Rígida, m/s

V_2 = Velocidad de la Placa Flexible, m/s

En las frecuencias de operación, la impedancia de entrada a tierra está predominantemente controlada por la rigidez.

$$K_{gr} = \frac{F_{dr}}{X_1}$$

Donde:

K_{gr} = Rigidez de la capa de suelo que se esta midiendo, MN/m

F_{dr} = Fuerza aplicada por el vibrador, N

Si se promedian las frecuencias de operación y se substituyen velocidad por desplazamiento, la rigidez puede expresarse de la manera siguiente:

$$\bar{K}_{gr} = K_{flex} \frac{\sum_1^n \left(\frac{X_2 - X_1}{X_1} \right)}{n} + \frac{\sum_1^n \omega^2}{n} m_{int} = K_{flex} \frac{\sum_1^n \left(\frac{V_2 - V_1}{V_1} \right)}{n} + \frac{\sum_1^n \omega^2}{n} m_{int}$$

Donde:

n = número de frecuencias empleadas en el ensayo

V_1 = Velocidad de la placa flexible $\left(\frac{m}{s}\right)$

V_2 = Velocidad de la placa rígida $\left(\frac{m}{s}\right)$

Este enfoque evita la necesidad de una referencia fija para el desplazamiento del suelo y permite la medición precisa de pequeños desplazamientos. También asume las siguientes condiciones

Un número significativo de frecuencias de medición discreta (por ejemplo, >20) debe estar por encima de las frecuencias operativas típicas de los equipos de construcción y por debajo de las frecuencias en las que la impedancia del suelo ya no está controlada por rigidez (por ejemplo, 100 a 200 Hz).

La profundidad de medición es del orden del doble del diámetro exterior del pie. La profundidad de la medición se puede confirmar midiendo la rigidez de una capa de material en un contenedor confinado según este método y comparándola con la rigidez de la capa calculada a partir de la relación de vacíos medida, la tensión efectiva media estimada bajo el pie del aparato. y el índice de Poisson estimado.

5.2.2. Bases de Cálculo de Módulo y Rigidez

Egorov (1965) propuso la siguiente expresión para determinar la rigidez estática K de un anillo rígido sobre un semi espacio homogéneo e isotrópico:

$$k = \frac{E * R}{(1 - \nu^2) * \omega(n)}$$

Ecuación 25. Rigidez estática sobre un espacio homogéneo

Donde:

E = Módulo Elástico

ν = Relación de Poisson

R = Radio Interno del Anillo (57.15 mm o 2.25")

$\omega(n)$ = función de la razón de radios interno y externo

$n = \frac{r(int)}{r(ext)}$, $\omega(n) = 0.565$ para el anillo del Geogauge

El módulo de distorsión transversal puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$E = \frac{P(1 - \nu)}{3.54R\delta}$$

Ecuación 26. Rigidez estática sobre un espacio homogéneo

Donde:

δ = Deflexión superficial inducida.

El módulo de Poisson debe asumirse para poder realizar los cálculos. Para una relación de 0.35, un factor de alrededor de 8.67 puede emplearse para convertir la rigidez (MN/m) a Módulo (MPa). El fabricante recomienda el uso del equipo hasta rigideces de 70 MN/m 610 MPa.

5.2.3. Características y Especificaciones Técnicas








Características Generales		
Rango de medición del suelo	Desde	Hasta
Rigidez	3 [MN/m]	70 [MN/m]
	17 [klbf/in]	399 [klbf/in]
Módulo de Young	26.2 [MPa]	610 [MPa]
	3.8 [kpsi]	89 [kpsi]
Medición de precisión (tipo., Coeficiente de variación)	< 10%	
Profundidad de medida radio de influencia (desde la superficie)	220 [mm] 9 [in]	310 [mm] 12 [in]
Precisión Calibración (% masa real)	< 1%	
Duración de la batería	500 mediciones	1500 mediciones

Tabla 19. Características Generales
Fuente: Elaboración propia



Características Mecánicas	
Materiales externos	Caja de aluminio y pie, aisladores de goma y sello
Vibración	< 1.27 x 10 ⁶ [m] < 0.0005 [in]
Nivel vertical	+/- 5°
Temperatura del funcionamiento	0 [°C] hasta 38 [°C] (ambiente)
Temperatura de almacenaje	-20 [°C] hasta 50 [°C]
Humedad	98 % , sin condensación
Dimensión del GeoGauge	Diámetro: 280 [mm], 11 [plg] Altura sin mango: 255 [mm] , 10 [plg]
Peso	Neto: 10 [kg] , 22 [lb] Gastos de envío con caja: 17.7 [kg] , 39 [lb]

Tabla 20. Características Mecánicas
Fuente: Manual GeoGauge H-4140 Humboldt

5.2.4. Funciones de los Botones – Iconos – Muestra de Mensajes

ÍCONO	DESCRIPCIÓN
	<p>Enciende el GeoGauge. Cuando se presiona la tecla, el GeoGauge hace un chequeo electrónico, despliega el voltaje actual de las baterías y finalmente despliega el valor de última medición. Una vez efectuado este chequeo el GeoGauge está listo para medir.</p>
	<p>Apaga el GeoGauge.</p>
	<p>Se utiliza para ejecutar cualquiera de las funciones de los cuatro botones con fondo azul ("ERASE", "PRINT", "TEST", "UNIT"). Primero se debe presionar el botón "SHIFT" y esperar hasta que en la pantalla display se muestre la palabra "SHIFT", sólo entonces presione el botón correspondiente a la función que desea utilizar. Nota: El botón de STOP no requiere de primero presionar el botón SHIFT.</p>
	<p>Borra todos los datos almacenados e inicia el sistema como si fuera la primera medición.</p>
	<p>Almacena las medidas actuales recientes. Este botón debe ser presionado para guardar cada medida; si no se lo presiona, los datos de la última medida son descartados.</p> <p>Nota: Cuando la memoria del GeoGauge está vacía, las primeras 20 medidas guardadas contendrán la identificación (ID), frecuencias y partes reales e imaginarias de la fuerza y desplazamiento (formato de investigación). Para los 480 restantes, sólo se almacenará ID, la rigidez mostrada en el display en unidades SI, la fecha y hora. En este punto la memoria está llena y en el display se mostrará db full.</p>
	<p>Inicia la transmisión de datos por medio del puerto IR COM.</p>
	<p>En la ventana ID/TARGET se muestra el valor del Módulo de Young que se desea obtener, sólo en unidades SI, y en la ventana STIFFNESS la razón entre la rigidez medida y la que se desea obtener. El valor que se desea obtener puede ser cambiado en forma incremental en graduaciones de 0.5 MN/m subiendo o bajando mediante los botones INCR o DECR respectivamente. Para volver al display anterior presione de nuevo MODE.</p>

	<p>Inicia con la medida de rigidez actual. Se presiona el botón v luego se da un paso atrás para prevenir cualquier influencia del peso del cuerpo de la persona que realiza el ensayo en la medida. La medida será completada en más o menos 70 segundos. Presionando SHIFT y luego MEAS se podrá ingresar el valor del radio de Poisson. Cada pulsación sucesiva de los botones SHIFT y luego MEAS se podrá ingresar la hora y techa. Se presiona SAVE para guardar los nuevos datos.</p>
	<p>Comienza la revisión mediante los datos de medición almacenados. Se necesita presionar INCR o DECR para subir o bajar a través de los valores medidos y su correspondiente ID. No se pueden efectuar mediciones mientras se está revisando la memoria. Para salir de esta base de datos presione el botón STOP.</p>
	<p>Sale del modo revisión de los datos de medición almacenados. Presionando este botón, se vuelve al modo normal del instrumento. El botón SHIFT no se usa en este caso.</p>
	<p>El sistema corre un auto examen. Despliega el número de serie. del tablero del circuito electrónico, el voltaje de batería "batt", y efectúa un chequeo interno del circuito electrónico, "SELF" "TEST" y entonces muestra el resultado "no" "Error\$". El sistema corre la misma evaluación cuando el GeoGauge es encendido.</p>
	<p>Alterna las unidades entre el Sistema internacional de medidas SI y las unidades de medidas inglesas.</p>
	<p>En combinación con el botón START se desplaza a través de la Información de las medidas almacenadas. Presionado solo, alterna entre los valores de rigidez y Modulo de Young. El botón DECR cumple las mismas funciones que INCR.</p>
	<p>Con "START" se desplaza a través de los datos de medición guardados en orden decreciente de valor, consulte acerca del botón "START".</p>

ÍCONO	DESCRIPCIÓN
	<p>Anuncia el valor medido de la rigidez (MN/m), (desplegado en la ventana 1D). El valor medido de la rigidez es mostrado simultáneamente en la ventana de STIFFNESS.</p>
	<p>Indica que la medida actual ha sido abortada debido a los sensores que han sido sobre cargados. La palabra "SENS" se muestra en la ventana ID/TARGET y la palabra "OvLOAD" se muestra en la ventana de STIFFNESS. Esto puede ser causa de tener un suelo demasiado blando, suelo demasiado rígido (fuera del rango de medida), que el aparato se encuentra demasiado próximo a un equipo de construcción o que el pie no fue asentado en forma apropiada. La medida que se está efectuando debe repetirse.</p>

<p style="text-align: center;">Sd</p>	<p>Anuncia la desviación Standard de todas las 25 frecuencias dependientes de la medida de rigidez relativas al promedio del valor medido de la rigidez (mostrada en la ventana ID/TARGET) al final de la medida actual. La desviación Standard es mostrada simultáneamente en la ventana STIFFNESS.</p>
<p style="text-align: center;">noiS</p>	<p>Indica que el GeoGauge está midiendo el ruido ambiente en el plato (mostrado en la ventana ID/TARGET). La medición del ruido toma aproximadamente 10 segundos después de presionar el botón MEAS. En este caso, nada se muestra simultáneamente en la ventana de STIFFNESS.</p>
<p style="text-align: center;">dAtA</p>	<p>Indica que el GeoGauge está recopilando información de rigidez sobre las 25 frecuencias entre 100 y 196 Hz (mostrado en la ventana ID/TARGET). Esta acción sigue a la medición del ruido que toma aproximadamente 55 segundos. Nada se muestra simultáneamente en la ventana de STIFFNESS.</p>
<p style="text-align: center;">Snr</p>	<p>Anuncia el despliegue del signal Noise Ratio para la medida actual (se muestra en la ventana ID/TARGET) una vez terminada la medición. La signal Noise Ratio en dB se muestra en la ventana STIFFNESS.</p>
<p style="text-align: center;">5l or Eg</p>	<p>Este mensaje indica el modo listo (ready mode) y las unidades de la rigidez que se muestran (en la ventana ID/TARGET). El geogauge está listo para realizar la próxima medida. La venta STIFFNESS muestra el valor de la última medida en unidades SI (MN/m) o inglés (Eg) (klbf/in).</p>
<p style="text-align: center;">ALrE StorEd</p>	<p>Indica que el valor actual de la medida a sido guardado en la memoria. La palabra ALrE se observa en la ventana ID/TARGET y la palabra StorEd en la ventana de STIFFNESS. Si no sabe si la última medida ha sido guardada, el Geogauge le avisara.</p>
<p style="text-align: center;">OVFLO</p>	<p>Indica que la memoria de la base de datos está llena. No se pueden realizar medidas adicionales. Se necesita transmitir o borrar antes de realizar las medidas adicionales.</p>
<p style="text-align: center;">0.00</p>	<p>Indica que la medida no ha sido aceptada debido a una de dos razones:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) que los sensores se hallan sobre cargados debido a la suavidad o a la dureza extrema (mucho movimiento) 2) que seis o más del total de las 25 frecuencias fueron inaceptables por una señal baja del noise ratio.

db - on	Indica que el modo revisión de la memoria de la base de datos se ha ingresado. Es mostrada momentáneamente en la ventana STIFFNESS. Después que aparece, presionando los botones INCR o DECR se puede ir a través de los datos almacenados. Secuencialmente se mostrarán el número de identificación y la correspondiente medición en el orden en que fueron tomadas en las ventanas ID/TARGET y STIFFNESS respectivamente.
Db - off	Indica que se ha salido del modo de revisión de la base de datos. Se muestra momentáneamente en la ventana STIFFNESS.
StorEd	Anuncia que la medida actual ha sido almacenada (se muestra en la ventana STIFFNESS) el número ID asignado a la medición se muestra simultáneamente en la ventana ID/TARGET.
bAtt	Indica el valor del voltaje de las seis baterías el cual se muestra en la ventana ID/TARGET. El voltaje se muestra también en la ventana STIFFNESS.
SELF TEST	Indica que el GeoGauge está realizando un auto examen de su sistema eléctrico, la palabra SELF se muestra en la ventana ID/TARGET y la palabra TEST se presenta en la ventana STIFFNESS.
No ErrOrS	Indica que el resultado del auto examen (self test) está dentro de los límites especificados que se muestra en la ventana ID/ TARGET.
POI5	Indica que el valor de radio de Poisson está desplegado. Puede ir desde 0.20 hasta 0.70 en incrementos de 0.05. Presionando el botón SAVE después de ingresar el radio de Poisson, este valor se retendrá en la memoria para subsecuentes mediciones del módulo de Young.
51-5	Rigidez en valores del Sistema Internacional SI, MN/m. (mega Newton por metros)
51-Y	Módulo de Young en valores del Sistema Internacional SI, MPa. (mega Pascales)
Eg-5	Rigidez en valores del Sistema Ingles, klf/in. (Kilo libra fuerza por pulgadas)
Eg-y	Módulo de Young en valores de Sistema Ingles, Ksi or kpsi. (kips por pulgada cuadrada)

5.2.5. Determinación de la comprobación, funcionamiento o calibración del GeoGauge

Se sugiere la calibración mediante la relación fuerza-desplazamiento producida al mover una masa, ya que proporcionará una referencia absoluta para las mediciones de rigidez. Esto se puede hacer uniéndose rigidamente una masa de valor conocido al pie del aparato y uniéndose la masa a soportes de aislamiento con un corte de alta frecuencia de aproximadamente 5 Hz. Una medición de rigidez en esta

configuración debe coincidir con la siguiente ecuación dentro del 61 %. Se sugiere la calibración del aparato cada 12 meses.

$$K_{eff} = \frac{\sum_1^n M(\omega)^2}{n}$$

k_{eff} = rigidez efectiva de la masa en movimiento, MN/m

M = masa en movimiento, 10 kg

$\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia, Hz

n = número de frecuencias empleado

En el proceso de verificación se debe tomar 5 mediciones, rotando el equipo entre 45 a 90 grados entre mediciones. La lectura debe estar entre -8.6 a -9.8 MN/m. El signo negativo significa la masa del equipo. El GeoGauge está funcionando correctamente si la rigidez promedio se encuentra dentro de +/- 5%.



Figura 58. Calibración H-4140
Fuente: Elaboración Propia

5.2.6. Procedimiento de medición

- Limpiar y nivelar la superficie de suelo donde se va a realizar la medición.
- Si la superficie contiene agregado grueso se coloca arena húmeda, formando una pequeña capa de 5,0 a 10,0 [mm], mediante pequeños golpes para que el anillo tenga contacto directo con el suelo, se gira el equipo de 45 a 90 grados (Nota: el pie del equipo debe estar limpio y libre de tierra y otros escombros).



Figura 59. Superficie limpia y nivelada con arena fina
Fuente: Elaboración Propia

- Se ingresa el Radio de Poisson predefinido designado si es necesario, mediante la lista desplegada (suelo 0.35, subbase 0.40 y base 0.45).



Figura 60. Configuración del sistema operativo
Fuente: Elaboración Propia

- Al encender el GeoGauge, se correrá un auto examen automáticamente (funcionalidad electrónica).
- Presionamos el botón MEAS (ubicado en la parte inferior derecha del equipo), este generará frecuencias de baja intensidad por aproximadamente 1 minuto.
- Por defecto el equipo antes de darnos los valores medirá el ruido ambiental (Noise), para enseguida desplegar el valor de la Rigidez de la capa estructural del suelo (letra S), esta rigidez puede ser expresada en dos unidades ya sea en el Sistema Ingles o en el Sistema Internacional (para nuestro caso escogemos el Sistema internacional (MN/m).
- Para tomar las medidas del módulo de Young basta con presionar la tecla Test y automáticamente se desplegará el módulo de Young (este viene expresado también en los dos sistemas de unidades el Internacional y el Ingles) (MPa o KPsi).

- Se registrarán 3 valores los cuales la ubicación del equipo estará los más próximo al anterior registro esto para no tener valores alejados.

Nota: Si la construcción o el ruido ambiente (vibración de compactadores, el equipo pesado u otro equipo) están presentes y son intermitentes, es recomendable realizar las medidas a una distancia mayor de 10 m del equipo que está operando. En caso de que la medida del SNR este bajo de 10 dB o sea negativo, este valor deberá ser rechazada y repetir el proceso.

5.2.7. Rigidez y Densidad

La mayor parte de los datos evaluados inicialmente se enfocaron en confirmar la relación entre rigidez y densidad. Se presenta aquí la relación propuesta por Hryciw y Thomann (Ecuación de Humboldt):

$$\rho_D = \frac{\rho_0}{1 + 1.2 \left[\frac{c m}{k} - 0.3 \right]^{0.5}}$$

Ecuación 27. Ecuación Humboldt

Donde:

$\rho_D =$ densidad seca estimada $\left[\frac{KN}{m^3} \right]$

$\rho_0 =$ densidad ideal libre de vacíos de laboratorio $\left[\frac{KN}{m^3} \right]$ (densidad seca máxima)

$m =$ Porcentaje de humedad en peso [%] (contenido de humedad óptima)

$k =$ Rigidez [MN/m]

$$c = n \left(\frac{k}{m^{0.25}} \right) + b$$

Donde n es la pendiente y b la intercepción

5.2.8. Correlación rigidez y contenido de humedad

A partir de la expresión analítica-experimental desarrollada por Humboldt, podemos determinar los valores para C de la región del terreno analizada, a partir de los valores medidos en campo, en este caso la rigidez del material, el contenido de humedad del mismo y sustituyendo la ρ_D por la densidad del terreno analizado mediante el método de Cono de Arena, ρ_{CA} .

$$C = K/m \left(\left[\frac{\left(\frac{\rho_0}{\rho_{CA}} - 1 \right)}{1.2} \right]^2 + 0.3 \right)$$

Ecuación 28. Ecuación Correlación rigidez y contenido de humedad

El enfoque básico es primero definir C para una región geográfica y un tipo de suelo, independiente de todo excepto de la humedad de la rigidez paralela, contenido de humedad y las mediciones de densidad. Luego se usa la C definida, la rigidez y el contenido de humedad medidos para estimar la densidad seca. Este enfoque nos permite incluir el contenido de humedad en cada estimación de la densidad seca. También nos permite introducir los valores de C determinados de las mediciones paralelas en una ecuación lineal con nuestras dos variables independientes, K y m.

Esta relación lineal entre C, K y m da lugar a usar un C más apropiado en la estimación de cada densidad seca en lugar de seleccionar un número limitado de C para usarlas en varios rangos de humedad. La figura que hallará es típica de la relación lineal que se logra con los datos de terreno. "C" debe ser definida para cada región geográfica única y para el tipo de suelo a fin de obtener una alta precisión.

Propuesta de ecuaciones para C en el reporte FHWA-NJ-2002-002:

Ecuaciones de regresión utilizadas en el análisis		
Investigador/Institución	Tipo de Suelo	Ecuaciones de Regresión
California. Instituto Politécnico	Suelo arenoso	$C = 4.4561 (K/m^{0.25}) + 12.704$
	Suelo arcilloso	$C = 2.9946 (K/m^{0.25}) + 23.61$
FHWA	Suelo agregado	$C = 5.8177 (K/m^{0.25}) - 25.173$
	Suelo arenoso	$C = 3.1862(K/m^{0.25}) + 2.5947$
	Suelo arenoso	$C = 33.626 (K/m^{0.25}) - 69.423$
H.C. Nutting Co.	Suelo arenoso	$C = 3.1484 (K/m^{0.25}) + 2.6727$
	Suelo arenoso	$C = 2.8146 (K/m^{0.25}) + 10.44$

Tabla 24. Ecuaciones de "C" para diferentes tipos de suelo
Fuente: FHWA-NJ-2002-002

5.3. ENSAYO DEFLECTÓMETRO LIVIANO DE IMPACTO LWD PRIMA 100 (ASTM 2583-07) (AASHTO TP123-01) (AASHTO TP456-01)

Este método de prueba cubre la determinación de las deflexiones de la superficie como resultado de la aplicación de una carga de impulso. Las deflexiones resultantes se miden en el centro de la aplicación carga y también se puede medir a varias distancias de la carga. Las deflexiones pueden estar correlacionadas directamente con el desempeño del pavimento o se utiliza para determinar las características de material in situ de las capas de pavimento.

Mediante este método de prueba se puede determinar el módulo (E) elástico o de superficie de las distintas capas que conforman la estructura de un pavimento. El LWD es ideal para el control de calidad y aseguramiento de la calidad del material compactado de las capas de terraplén, subrasante, subbase, base y capas delgadas de pavimento, también con los datos se puede realizar una evaluación

estructural de la capacidad de carga y determinación de los requisitos de espesor para carreteras y pavimentos de aeródromos.

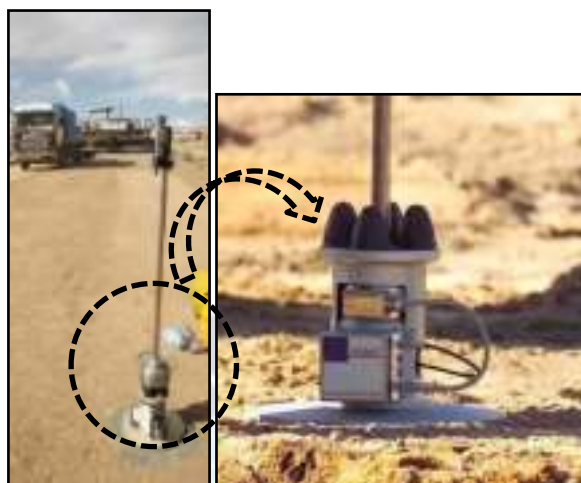


Figura 61. Equipo Deflectómetro Liviano de Impacto LWD
Fuente: Elaboración Propia, Manual del Usuario (LWD – PRIMA100)

Este método de prueba es un tipo de prueba de soporte de placas. La carga es un pulso de fuerza generado por un peso (masa) que cae sobre un sistema buffer que transmite el pulso de carga a través de una placa apoyado sobre el material a ensayar. El equipo de prueba puede sostenerse manualmente o moverse con un dispositivo tipo plataforma rodante.

El peso se eleva a la altura que, cuando se deja caer, impartirá el impulso de fuerza deseado, se deja caer el peso y el movimiento vertical resultante o la desviación de la superficie se mide utilizando instrumentos adecuados. Se pueden realizar múltiples pruebas a una misma altura de caída o a diferentes alturas en el mismo lugar. La deflexión máxima resultante de pulso de fuerza en cada ubicación se registra en micrómetros, milímetros o pulgadas según corresponda.

La fuerza máxima impartida por el peso que cae es registrada como la fuerza en [kN] o [lbf] o como la tensión media dividida por el área de la placa de carga en $[kN/m^2]$, [kPa] o [psi] según corresponda.

Es un ensayos dinámico pero con un enfoque estático, según la teoría de elasticidad multicapa de tensiones y deformaciones, además teniendo en cuenta que este representa un módulo de elasticidad de varias capas es decir compuesto o equivalente de diferentes capas de materiales y características individuales, sin embargo los diferentes procedimientos de diseño de pavimentos asumen mediante correlaciones, el módulo de resiliencia como módulo de elasticidad equivalente por lo que la medición de los módulos mediante LWD pueden considerarse módulos de resiliencia de campo compuestos los cuales han demostrado una adecuada correlación para el control de calidad de compactación.

El equipo cuenta con las siguientes partes, las cuales cumplen una función en el proceso de medición, como se describe a continuación:

Dispositivo generador de fuerza con un sistema guía. El dispositivo generador de fuerza al ser elevado a una altura predeterminada debera ser capaz de proporcionar una carga en forma senoidal con un tiempo de carga entre 20 y 40 [ms].

El peso en caída funciona con una intensidad insignificante fricción o resistencia.

La placa de carga es el que distribuye uniformemente la carga de impulso en la superficie, donde permite medir las deflexiones de la capa en análisis de la estructura de un pavimento en el centro del punto de impacto, a través de un orificio en el centro de la placa de carga.

Sensores de deflexión que son los que miden el máximo movimiento vertical y montado de tal manera de minimizar la rotación angular con respecto al plano de medición en el máximo movimiento esperado.

Celda de carga donde mide la carga aplicada de cada impacto. Se coloca en una posición que minimice la masa entre la celda de carga, es resistente al agua y a golpes mecánicos provenientes de impactos durante las pruebas o el traslado del equipo.

Sistema de procesamiento y almacenamiento de datos, donde se muestran y registran los datos de la carga y deflexión, como la temperatura del aire, la temperatura de la superficie, las mediciones de distancia y los datos de identificación para cada punto de prueba.

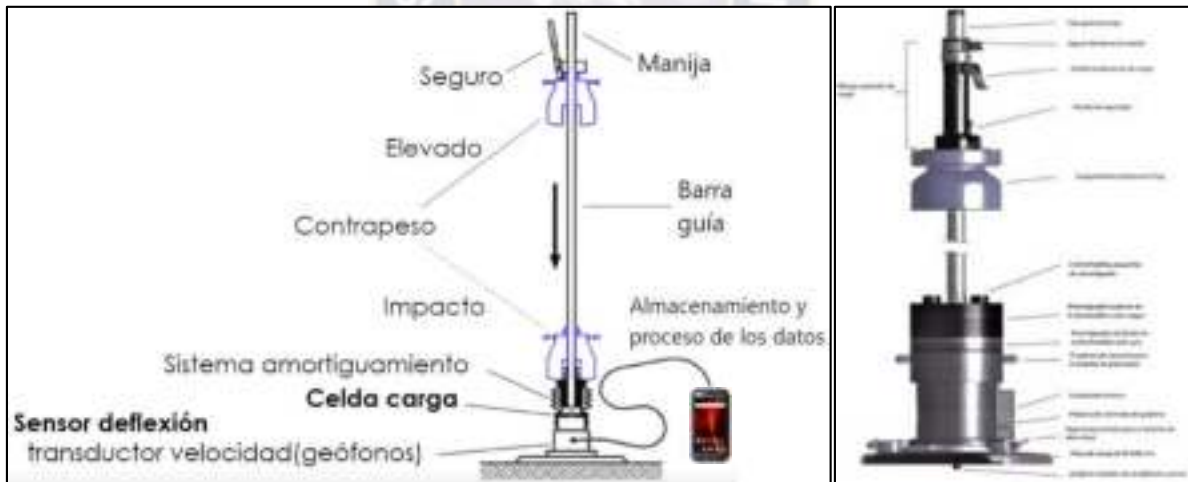


Figura 62. Esquema del equipo LWD
Fuente: CICM, Dynatest-2019

Existen variedad de marcas en el mercado los cuales se diferencian por sobre todo en que algunos cuentan con una celda de carga y otros que no cuentan con una celda de carga, entonces aún no se han uniformizado los diferentes tipos de equipos. El siguiente cuadro nos muestra algunas diferencias:





LWD	Masa de Caída	Altura de caída	Celda de Carga	Sensor para medir deformación		Placa de carga	Tipo de amortiguador	Gráfica
				Tipo	Rango			
	[kg]	[mm]	-	-	[mm]	-	-	-
Zorn	10	724 (fija)	No	Acelerómetro	0.2-30(± 0.02)	Sólido	Resorte	
Dynatest	10 (ajustable)	838 (ajustable)	Si	Geófono + 2 adicionales	0-2.2(± 0.02)	Anillos con opción de acoplado	Buffer caucho ajustable	
Olson	11 (ajustable)	610 (ajustable)	Si	Geófono + 1 adicional	0.1-2(± 0.02)	Sólido	Resorte	
PRIMA 100	10 (ajustable)	850 (ajustable)	Si	Geófono + 2 adicionales	1-2.2(± 0.02)	Anillos con opción de acoplado	Buffer caucho ajustable	

Tabla 25. Características de las diferentes marcas del Deflectómetro Liviano de Impacto
Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, para el presente proyecto, **se utilizó el Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD) modelo PRIMA 100.**

5.3.1. Piezas estándar PRIMA100 LWD:

DESCRIPCIÓN	IMAGEN DE LA PIEZA
<ul style="list-style-type: none"> - Cuerpo con carcasa de geófono, célula de carga y caja electrónica 	
<ul style="list-style-type: none"> - Plato de carga de Ø 100 mm (compuesto al cuerpo del geófono) - Plato de carga de Ø 200 mm - Plato de carga de Ø 300 mm 	
<ul style="list-style-type: none"> - Tapa con cuatro amortiguadores 	
<ul style="list-style-type: none"> - Barra guía dividida en dos partes - Mango de desbloqueo 	
<ul style="list-style-type: none"> - 10 [kg] de caída de peso 	
<ul style="list-style-type: none"> - CAT 41S Smartphone para la recogida de datos - Carro de transporte del equipo 	
<ul style="list-style-type: none"> - Cable USB para la carga - Dispositivo USB con software y manual (archivos PDF) - Cargador de batería integrado en la caja electrónica - Llave Allen T / 5mm 	

Tabla 26. Piezas Deflectómetro Liviano de Impacto – PRIMA 100
 Fuente: Elaboración Propia

5.3.2. Manipulación y almacenamiento

5.3.2.1. Transporte

El equipo no debe estar sujeto a golpes o impactos. Se debe tener cuidado al viajar largas distancias y al trasladar con un tercer transportista. Para esto cuenta con un maletín de transporte especialmente diseñado para la PRIMA100. Cuando camine con el equipo en el campo, y cuando lo transporte en un coche, se sugiere que asegure la carga de caída por medio de la manija de liberación en la parte inferior de la barra guía justo encima de los amortiguadores, para evitar lesiones en las manos o extremidades del usuario, mediante el siguiente procedimiento:

- Colocar la carga de caída sobre los amortiguadores.
- Colocar el mango de desbloqueo justo por encima de la carga de caída
- Bloquear la manilla de desbloqueo
- Levante la carga de caída hasta que encaje en el mango de desbloqueo.

Cuando el equipo no se utilice con frecuencia, se recomienda almacenarlo en un lugar seco a temperatura ambiente para evitar la exposición a la humedad, que puede causar corrosión en las piezas eléctricas.

La batería de iones de litio integrada en la caja de control del equipo PRIMA100 debe cargarse con el cargador (dispositivo USB) al 100% antes de guardar el equipo, cuando no se utilice durante períodos prolongados. Compruebe la batería con frecuencia y recárguela si es necesario para garantizar un rendimiento y una vida útil.

5.3.2.2. Transporte de punto de medida a punto de medida.

Se recomienda transportar el equipo sólo para distancias cortas con el carro del equipo. En sitios de medición grandes, se recomienda, transportarlo en un carro grande o de otra forma de transporte como un pequeño todo terreno/ATV (peso operativo del Prima100: 20 kg).



Figura 63. Armado del equipo
Fuente: Elaboración Propia



Figura 64. Transporte de punto de medida a punto de medida LWD
Fuente: Elaboración Propia

- Deje la carga de caída en los amortiguadores.
- Baje la manija de liberación, hasta que toque la carga de caída, fije la manija.
- Fijar la carga de caída en el mango de liberación. Un pequeño chasquido demuestra que la carga de caída está bloqueada.
- Eleve la unidad utilizando el anillo de elevación.
- Cambie de lado izquierdo a lado derecho para proteger la espalda y los brazos.

5.3.2.3. Ensamblaje del Equipo

Descripción	Imagen de la pieza
<p><u>1</u></p> 	<p>- Fijar un plato de carga (según el tipo de terreno) al cuerpo con el tornillo Allen suministrado utilizando la llave allen T.</p>
<p>- Colocar la tapa con amortiguadores en la parte superior del cuerpo con la cerda de carga - Insertar los tres tornillos guía con la llave Allen T y asegúrelos tornillos.</p>	<p><u>2</u></p> 
<p><u>3</u></p> 	<p>- Monte la parte inferior de la barra guía y coloque la caída de carga de 10 kg sobre la barra guía - No apriete la barra guía más fuerte de lo que se puede volver a desmontar.</p>
<p>- Montar el mango de desbloqueo - Montar la parte superior de la barra guía</p>	<p><u>4</u></p> 

Tabla 27. Montaje del equipo
Fuente: Elaboración Propia

5.3.3. Selección plato de carga

El equipo LWD Prima 100, se puede aplicar con tres tamaños diferentes de platos de carga. Se suministra de forma estándar un plato de carga de 300 [mm] de diámetro. Al ser una placa de 300 [mm], esta debería ser la primera opción para todas las bases no consolidadas. Si no hay placas montadas (200 o 300 mm) - se utilizará automáticamente el siguiente tamaño: placa de carga de 100 (mm).

La siguiente tabla muestra un resumen general de las combinaciones de estructuras de pavimento y placas.



Plato de carga	Tipo de Capa
D 100**	<p>Estructuras de carreteras pavimentadas.</p> <p>**En general, se recomienda no aplicar PRIMA100 en áreas pavimentadas, en parte porque es difícil mantener un contacto adecuado con una placa de 100 mm, porque la carga de impacto que puede transmitir la PRIMA100 producirá deformaciones limitadas. El impacto de profundidad también será limitado, por lo que las mediciones no darán ningún dato sobre la estructura en general, sólo sobre las capas superiores. Por lo tanto, un estudio que utiliza PRIMA100 en estructuras ligadas sólo da una indicación de las áreas fuertes y débiles.</p>
<p>D 200*</p> 	<p>Capa de base, hormigón / asfalto triturado, estructuras de carreteras poco firmes.</p> <p>*El plato de carga D200 mm no está incluido en el equipamiento de serie, pero es un accesorio.</p>
<p>D 300</p> 	<p>Subrasante, sub base, capa de base, hormigón / asfalto triturado, suelo estabilizado con cal, estructuras con geomallas.</p> <p>El plato de carga de 300 mm forma parte de la entrega estándar.</p>

Tabla 28. Características de los platos de carga
Fuente: Manual Deflectómetro Liviano de Impacto - PRIMA 100

5.3.3.1. Verificación de la Calibración

El equipo LWD PRIMA 100, se entrega de fábrica con el geófono calibrado y la celda de carga.

Para asegurar la recolección de datos correctos, el geófono y la celda de carga deben calibrarse una vez al año. Esto es particularmente importante con respecto a los valores de la celda de carga.

Para el uso diario, la calibración puede ser verificada usando uno o más puntos de referencia. Los puntos de referencia deben seleccionarse en un lugar donde la capacidad portante no cambie con el tiempo. Esto podría ser, por ejemplo, un punto con arena/grava bien compactada que no esté sujeta a ninguna carga de tráfico o a una carga mínima.

Es muy importante que el punto de referencia esté protegido contra lluvia excesiva o humedad variable.

Se puede utilizar estos puntos de referencia con frecuencia, por ejemplo, cada mes, y se debe realizar una medición normal con el LWD PRIMA100. Los valores medidos deben ser constantes de vez en cuando. Tenga en cuenta que la humedad variable (contenido de arena y grava) puede influir en la capacidad portante.

Si los valores se desvían mucho de los valores anteriores después de repetidas mediciones, se debe enviar el equipo LWD PRIMA100 para su comprobación y recalibración inmediatamente. Una desviación repentina también puede deberse a un uso extremadamente intenso del equipo LWD PRIMA100 o a una manipulación brusca o a daños.

5.3.4. Factores generales que influyen en la medición con PRIMA100

Algunas condiciones básicas que influyen en las mediciones con el equipo LWD PRIMA 100:

- Las mediciones deben realizarse (normalmente) a temperaturas del aire entre 5 y 50 grados centígrados.
- El módulo E de la superficie medida puede depender del contenido de agua del material. Si el contenido de agua es muy alto, el E_o puede ser sobreestimado. En el momento de la medición, el contenido de agua debe estar lo más cerca posible del óptimo para la compactación o del futuro contenido de agua esperado.
- Con relación a las mediciones en excavaciones, el operador debe observar cuidadosamente que las mediciones no se realicen en la parte superior de las tuberías, cableado o similares, ya que dichas mediciones no serán representativas.
- En general, no se recomienda la medición en suelo congelado, ya que la capacidad portante medida en suelos congelados no es representativa para las mediciones realizadas en suelo descongelado. Sin embargo, en casos especiales se aprovecha la mayor capacidad de carga del suelo congelado el equipo LWD PRIMA 100 puede ser aplicado para la determinación de esto.

5.3.5. Operación

- Siempre se recomienda revisar el equipo antes de una sesión de medición.
- El equipo cuenta con un robusto y resistente Smartphone - el llamado Android Collection Unit (ACU).
- La ACU se utiliza para la comunicación con el equipo LWD PRIMA 100 vía Bluetooth, para recoger, mostrar y almacenar datos mientras se trabaja en el campo. Se recomienda instalar la tarjeta SIM antes del inicio.
- Además, la ACU se aplica para exportar los datos recogidos a través de una tarjeta SIM de datos móvil o a través del acoplamiento WIFI integrado. Esto se puede hacer a cualquier dirección de correo electrónico seleccionada por el operador.
- Si se va a utilizar la ACU como teléfono móvil, esto es posible sustituyendo la tarjeta SIM de datos por una tarjeta SIM de suscripción móvil ordinaria. Además, es posible insertar dos (2) tarjetas SIM.

5.3.6. Cableado

El cableado del geófono y de la celda de carga debe ser verificado para asegurar que están conectados correctamente a la caja electrónica:

- La celda de carga está conectada al enchufe inferior
- Centrar el geófono en el segundo tapón desde abajo.

5.3.7. Carga de la batería en la caja electrónica

Una batería de iones de litio está integrada en la caja electrónica, que está completamente cargada y lista para su uso cuando se entrega de la fábrica de Sweco.

- Sin embargo, antes de iniciar un trabajo de medición en el campo, se recomienda cargarlo con el cable cargador USB suministrado (6-8 horas).
- Conectar el cable al enchufe USB en el lado izquierdo de la caja electrónica del equipo PRIMA 100.
- En el momento de la entrega, la PRIMA100 se carga completamente a través de la batería de iones de litio de 3,6 voltios integrada. El operador puede recargar la batería con el cable USB adjunto con rosca y cargador. El tiempo normal de carga es de 6-7 horas.
- Es posible utilizar un puerto USB en una computadora para cargar la batería, pero esto tomará más tiempo.

5.3.8. Bluetooth

- El Bluetooth está integrado en la caja electrónica del equipo LWD PRIMA 100.
- Se comprueba la conexión.

- El equipo LWD PRIMA 100 tiene un Bluetooth integrado - versión 4.1.
- El equipo LWD PRIMA 100 y ACU siempre están configurados y conectados por defecto, y listos para su puesta en marcha y uso cuando se suministran desde SWECO A/S.
- El equipo LWD PRIMA 100 está encendida y Bluetooth parpadeará en la parte frontal de la caja electrónica de la PRIMA100 y al tocar la aplicación PRIMA 100 en la ACU, las unidades se conectarán entre sí.

5.3.9. GPS

Las posiciones GPS son registradas por el CAT 41S no por la unidad PRIMA 100.

La precisión del GPS es según las especificaciones CAT 41S (típicamente +/- 5 metros)

ON: Se activa el PRIMA 100 pulsando el botón de la izquierda. Los diodos luminosos en la parte frontal de la caja electrónica parpadearán / se encenderán y se activará el Bluetooth integrado para la conexión a la ACU.

OFF: Se mantiene pulsado durante unos segundos (la luz se apagará).

5.3.10. Encender - PRIMA100

La figura 63 muestra la parte frontal de la caja electrónica del LWD PRIMA 100 tal y como se ve detrás de la etiqueta frontal del LWD PRIMAs100. Las ranuras están ocultas detrás de la etiqueta y no son visibles, pero contribuyen a optimizar la conexión a la ACU y la hacen más constante.

Diodos LED en la parte frontal de la PRIMA100:

Diodo rojo: ON: Cargando, OFF: Caja apagada o completamente cargada

Diodo azul: Parpadea lentamente: Conectado al HP o Laptop, parpadea rápido: Sin conexión,

Luz constante: Modo de carga de arranque / sólo utilizado por el taller Sweco



Figura 65. Caja electrónica
Fuente: Elaboración Propia

5.3.11. Administración de la unidad de recolección de datos Android (ACU)

5.3.11.1. Verificación de la configuración de PRIMA 100



Standard ACU Botones

laterales:

Arriba a la derecha: Encender / apagar ACU

**Arriba a la izquierda
precinto de goma:** Tarjeta SD micro y tarjeta SIM

Botones parte inferior delantera:


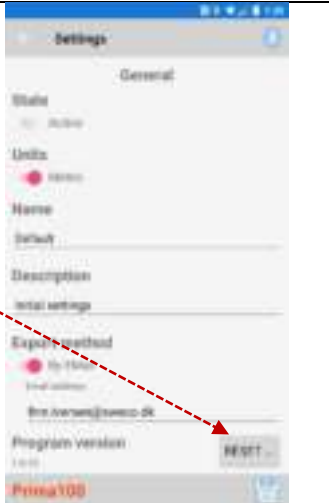


Botón izquierdo: Un paso atrás

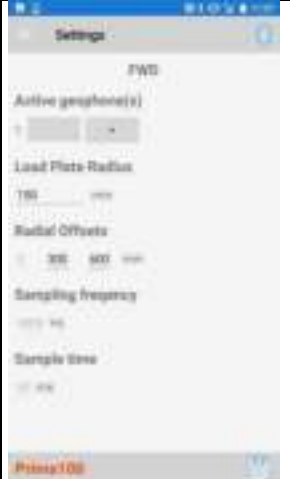

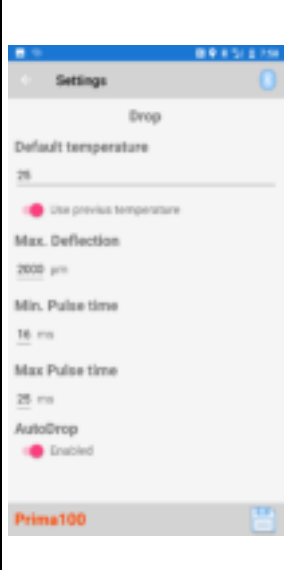
Botón en el medio: Volver a la pantalla de inicio


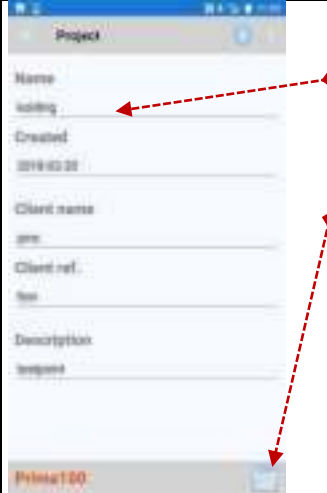

Botón derecho: Aplicaciones abiertas y activas

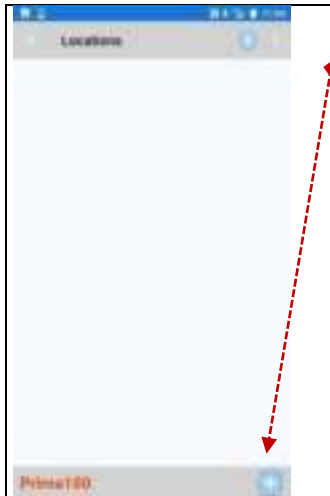
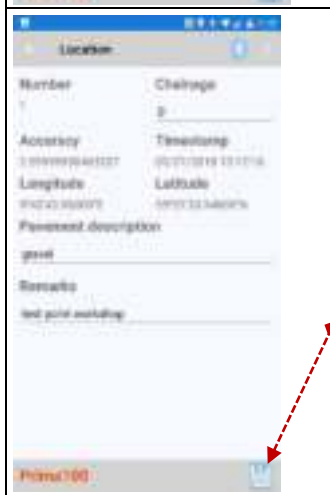


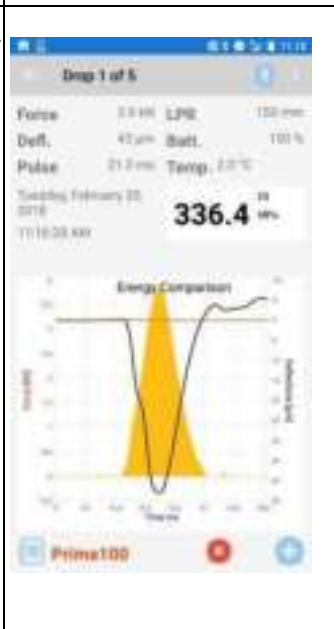
Para tener una configuración adecuada y realizar las mediciones correspondientes en campo y laboratorio, se propone seguir los siguientes pasos que se describen detalladamente:

	<p>1. Haga clic en el icono de la aplicación PRIMA100 en la esquina superior izquierda de la pantalla</p>	<p>2. Haga clic en el icono con tres puntos en la esquina superior derecha junto al icono azul de Bluetooth</p>	
	<p>3. Haga clic en Settings</p>		

	<p>4. El botón RESET en la esquina inferior derecha permite restablecer todos los ajustes a los valores predeterminados (ajustes de fábrica).</p>	
	<p>5. Significado y Asignación de Valores en cada pestaña State (Estado): Opciones para varios ajustes preestablecidos Esta opción no está activa o seleccionable en este momento. Units (Unidades): Seleccione Metric for Europa Seleccione Imperial para EE.UU Name (Nombre): Asigne un nombre a la configuración seleccionada. Description (Descripción): Descripción de la configuración seleccionada Export method (Método de Exportación): Seleccione si desea exportar el archivo *.fw2 a E-mail o a un archivo en ACU</p>	
	<p>Poisson ratio (Coeficiente de Poisson): Hormigón 0.15, Asfalto 0.35, Arena, Base, Grava 0.50. Triggerlevel (Nivel de disparo): 2 % (por defecto) Units (Unidades): Stress distribution factor (Factor de distribución de tensiones): 2 (por defecto) Low Pass frequency (Baja frecuencia de paso): 0Hz (por defecto)</p>	

	<p>LWD</p> <p>Active geophones(s) (Geófonos activos): Puedes aplicar desde 1 hasta 3 geófonos.</p> <p>Load Plate Radius (Radio del plato de carga): Plato de 100 mm ~ Radio 50 del plato de carga Plato de 200 mm ~ Radio 100 del plato de carga Plato de 300 mm ~ Radio 150 del plato de carga</p> <p>Sampling frequency (Frecuencia de muestreo): por defecto 4000 Hz</p> <p>Sample time (Tiempo de muestreo): por defecto 60 ms</p>
	<p>Location (Ubicación)</p> <p>Default Chainage (Progresiva por defecto): Si es necesario ingrese su propia progresiva</p> <p>Auto Increment (Aumento automático): Añadirá automáticamente +100 al siguiente punto de medida</p> <p>Default Pavement Description (Descripción predeterminada del pavimento): Su propia información. Por ejemplo.: Asfalto o Grava</p> <p>Default Remarks (Observaciones por defecto): Sus propias observaciones. Por ejemplo.: Arcilla húmeda</p> <p>Show (Mostrar): Elija entre Fuerza o Presión</p> <p>GPS Format (Formato GPS): DMS - grado minuto segundo o grado decimal</p>
	<p>Drop (Caída)</p> <p>Default temperatura (Temperatura por defecto): Dato asumido</p> <p>Use default temperatura (Usar temperatura por defecto): Utilizar dato asumido</p> <p>Use previous temperature (Usar la temperatura previa): Datos de temperatura de la Web. Esto requiere que se inserte una tarjeta de datos/celular en las AUC.</p> <p>Max. Deflection (Deflexión máxima): Si mide más de 2000 micras (geófono central), aparece una advertencia.</p> <p>Min. Pulse time (Min. Tiempo del pulso): Si mide menos de 16 ms, aparece una advertencia</p> <p>Max Pulse time (Max. Tiempo del pulso): Si mide más de 25 ms, aparece una advertencia.</p> <p>AutoDrop: Seleccione entre Enabled/Disabled (Habilitado/Desabilitado)</p> <p>Disabled (Desabilitado) Antes de cada caída de medición individual, se debe activar manualmente</p> <p>Enabled (Habilitado) se activa para la primera caída. Después de esto, el sistema espera automáticamente a que se realicen las siguientes mediciones con la LWD</p>

	<p>6. Mediciones en campo</p> <p>Ingrese al programa PRIMA 100</p> <p>Un icono azul de Bluetooth es visible en la esquina superior derecha. Esto indica que se ha establecido una conexión inalámbrica entre PRIMA100 LWD y ACU.</p> <p>Haga clic en el icono '+' en la esquina inferior derecha para crear un nuevo proyecto</p>
	<p>En este caso el nombre de proyecto será "kolding"</p> <p>Cuando se exporta el archivo de medición obtendrá el nombre: kolding.fw2</p> <p>Una vez que haya terminado de rellenar todas las pestañas en Proyecto, haga clic en el icono del disco "Guardar" en la esquina inferior derecha para guardar los detalles</p>
	<p>Ingrese en el proyecto creado "kolding"</p> <p>(Si hace click nuevamente en el ícono + se creará un nuevo proyecto)</p>

	<p>Ubicaciones: Se puede crear cuando el equipo y el usuario han llegado a la ubicación. Es importante que las posiciones se creen en la posición de medición real, ya que los datos GPS se posicionan en el momento en que se hace clic en el icono "+".</p> <p>Haga clic de nuevo en el icono "+" para crear una ubicación.</p> <p>Si los datos GPS no se muestran en la siguiente pantalla, retroceda un paso con el icono de la flecha blanca en la esquina superior izquierda de la pantalla y haga clic de nuevo en "+" hasta que la ACU haya capturado suficientes satélites para recopilar datos de posición de Longitud/Latitud.</p>	
	<p>Chainage (Progresiva): Ingrese su progresiva</p> <p>Acuracy (Precisión): GPS. Cuanto menor sea el valor, mayor será la precisión. El valor se muestra en el medidor.</p> <p>La descripción del pavimento permite al usuario describir los tipos de material medidos y cualquier comentario sobre el punto de medición en particular.</p> <p>Haga clic en el icono "Guardar" en la esquina inferior derecha para guardar los datos. Haga clic en la línea naranja "test point workshop" para pasar al siguiente paso "Drop".</p>	
	<p>Eleve el peso hasta la mitad de la barra guía y presione "+" y deje caer el peso</p> <p>En ACU se lee lo siguiente:</p> <p>Fuerza: 3.9 kN: Impacto del peso sobre la celda de carga (en ajustes kN puede cambiarse a presión para que se muestre la presión en lugar del impacto)</p> <p>Defl: 43µm Impacto del geófono central en micras.</p> <p>Pulso: 21.3: En milisegundos (tiempo de subida de la célula de carga).</p> <p>LPR : 150 mm: Radio de la placa de carga.</p> <p>Temp.: 2.0 °C: Medido a través de GPS / tarjeta de datos en ACU</p> <p>La fecha y la hora de la medición en cuestión se leen en ACU</p> <p>E0 : 336.4 E – modulus: CBR también se puede mostrar en % - haciendo clic en la pestaña Módulo E.</p>	



7. Las siguientes Mediciones en campo

El peso se eleva de nuevo a la altura de caída media.
Repita el procedimiento de caída anterior.
Repita el procedimiento de caída anterior con el peso elevado a la altura máxima

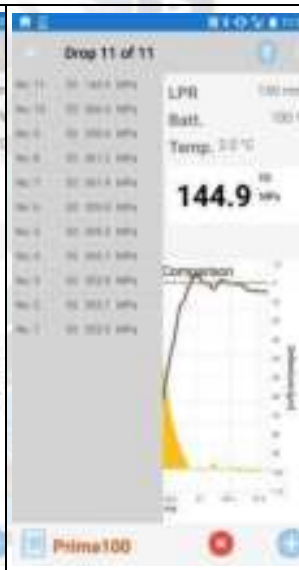
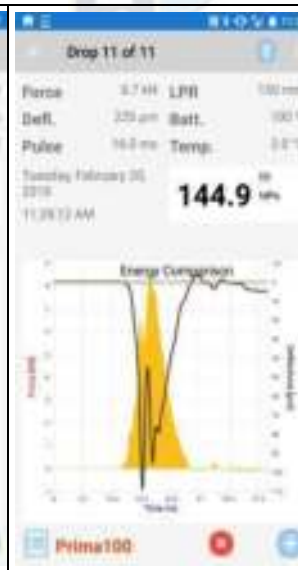
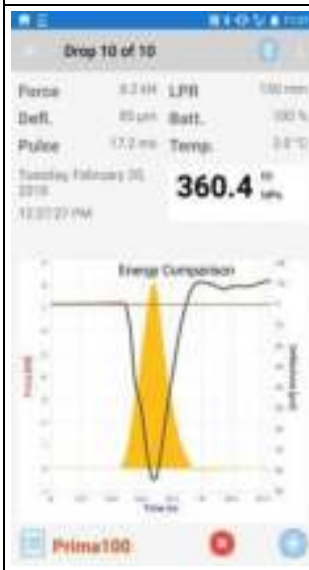
Haga clic en el icono "formulario de lista" para cambiar entre el formulario de lista y la presentación gráfica.
Toca con un dedo en el área del gráfico para que las 10 caídas se muestren en un solo gráfico.


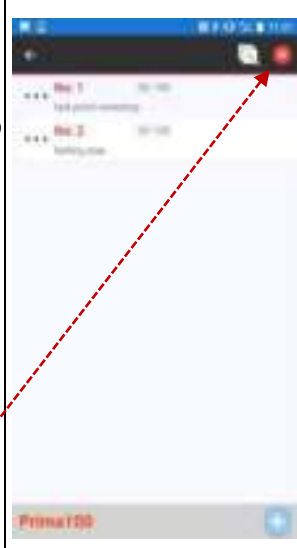


8. Deshacer / borrar caída

Si una caída debe ser borrada o deshecha, esto siempre es posible si usted - en la pantalla - se encuentra en la ubicación del punto en cuestión.

Esto puede ser necesario si la medición se sale de lo normal por alguna razón u otra, o si se han efectuado más caídas que las 10 deseadas. Haz click en el ícono "x"



	<p>9. Rechazar / borrar ubicación</p> <p>Si una ubicación debe borrarse o deshacerse, esto siempre es posible si usted - en la pantalla - se encuentra en la ubicación en cuestión. Esto puede ser necesario si una ubicación se ha establecido en una ubicación incorrecta o no es necesaria.</p> <p>Toca y mantén tu dedo en la ubicación.</p> <p>Hasta que aparezca el siguiente cuadro de diálogo - en la parte superior Haga clic en el icono "x"</p>	
---	---	---

10. Deshacer / borrar proyecto




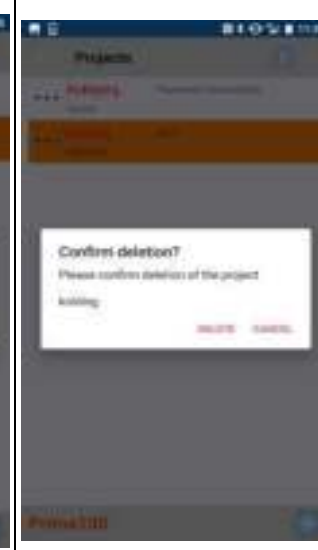
Si desea borrar un proyecto el procedimiento es el siguiente:



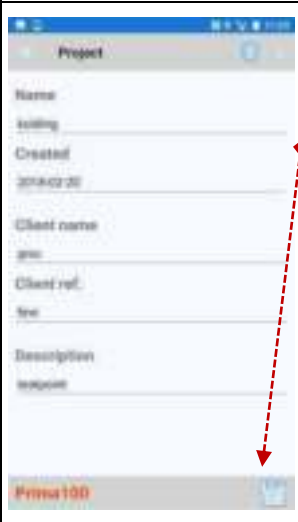


Toque y mantenga presionado el proyecto en cuestión hasta que aparezca el cuadro de diálogo negro en la parte superior.

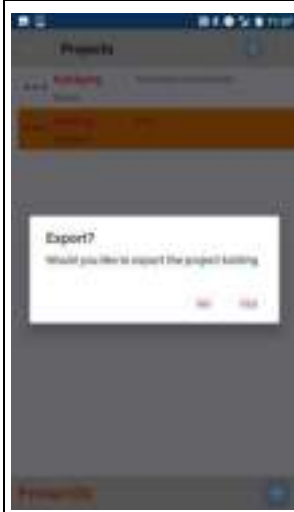
Haz click en el ícono "X"

Aparece un cuadro de diálogo blanco - confirme si desea o no borrar el proyecto

Aparece un nuevo cuadro de diálogo blanco que le permite considerar si realmente desea eliminar.

			
---	---	--	---

	<p>11. Editar proyecto o ubicación existente</p> <p>Para editar un proyecto o una ubicación, el procedimiento es el mismo que se muestra a continuación. Mantenga el dedo en el área hasta que aparezca el icono de edición en la barra superior.</p> <p>Toque y mantenga presionado el proyecto en cuestión hasta que aparezca el cuadro de diálogo negro en la parte superior.</p> <p>Haz click</p>	
	<p>Ahora se pueden editar los datos introducidos.</p> <p>Después de la edición: RECUERDE hacer clic en Guardar en el ícono.</p>	
	<p>12. Exportar el archivo de medición de la unidad ACU después de finalizar la sesión de medición con PRIMA100 LWD</p> <p>Toque y mantenga su dedo en el proyecto en cuestión.</p> <p>Aparece la siguiente ventana de diálogo en la parte superior de la pantalla</p> <p>Toque y mantenga el dedo en el icono de exportación.</p>	



Aparece el cuadro de diálogo "EXPORTAR".

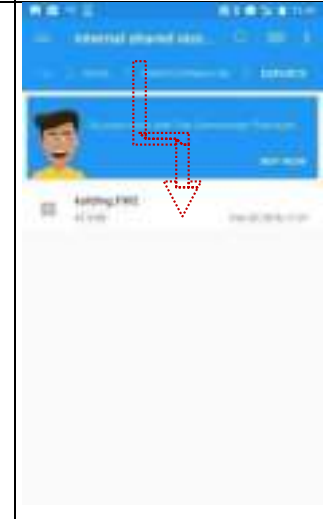
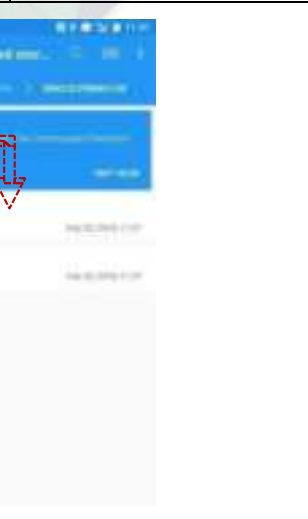
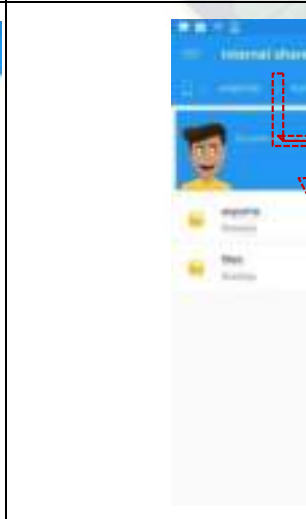
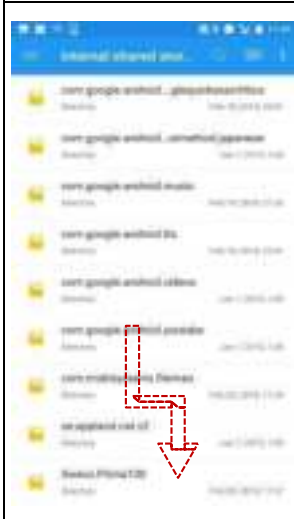
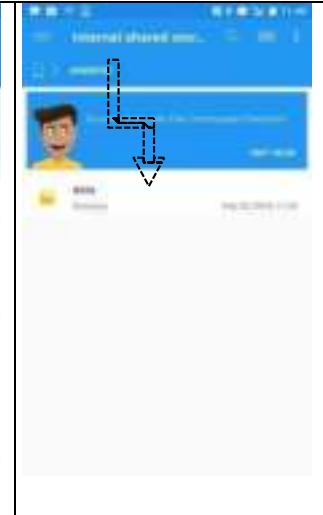
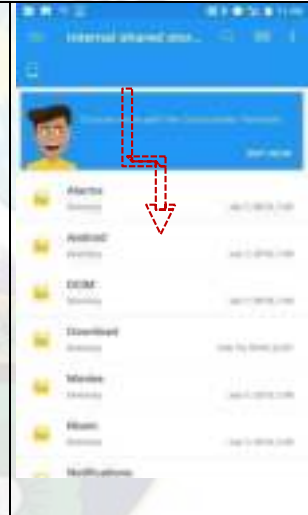
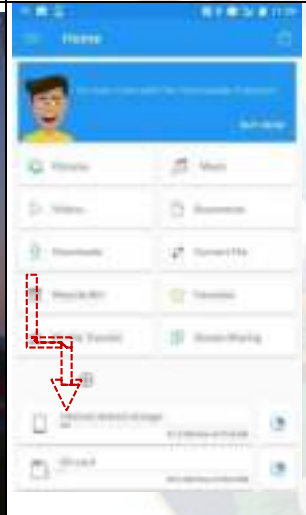
Seleccione si desea iniciar o interrumpir la exportación.

Haga clic en SÍ para iniciar la exportación.

El archivo de medición FW2 se exportará a la ACU donde se encontrará en el Explorador.

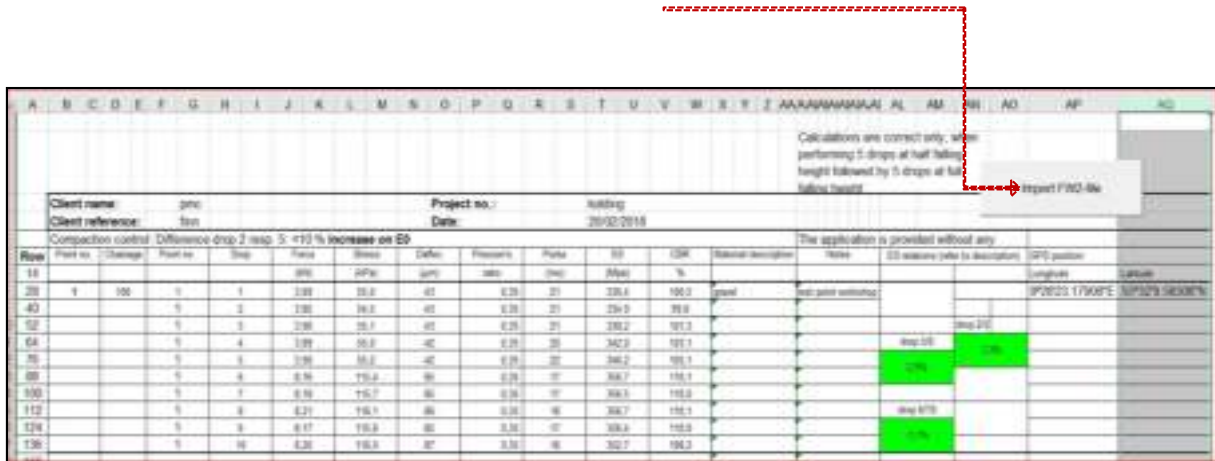
Inicie el Explorador desde la pantalla de inicio del teléfono:

Siga las siguientes ilustraciones para obtener el archivo en la **ACU - Almacenamiento interno compartido**.

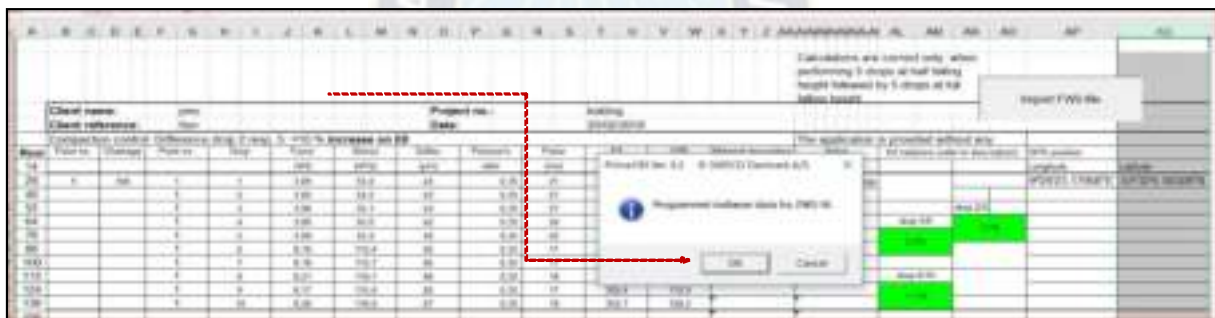


Abrir la hoja de cálculo en **EXCEL**” **OK Import FWD_EPC**”

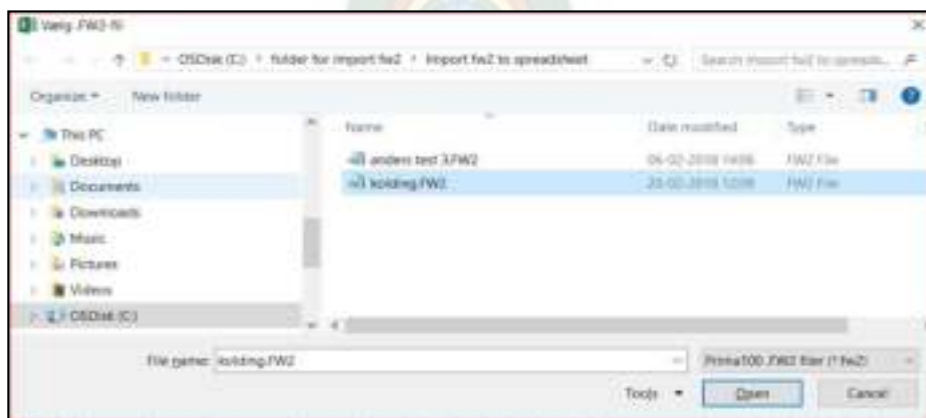
Luego: Se abre y se prepara para la importación: Kolding. FW2. Haga clic en la macro: Importar archivo FW2.



Presione **OK**



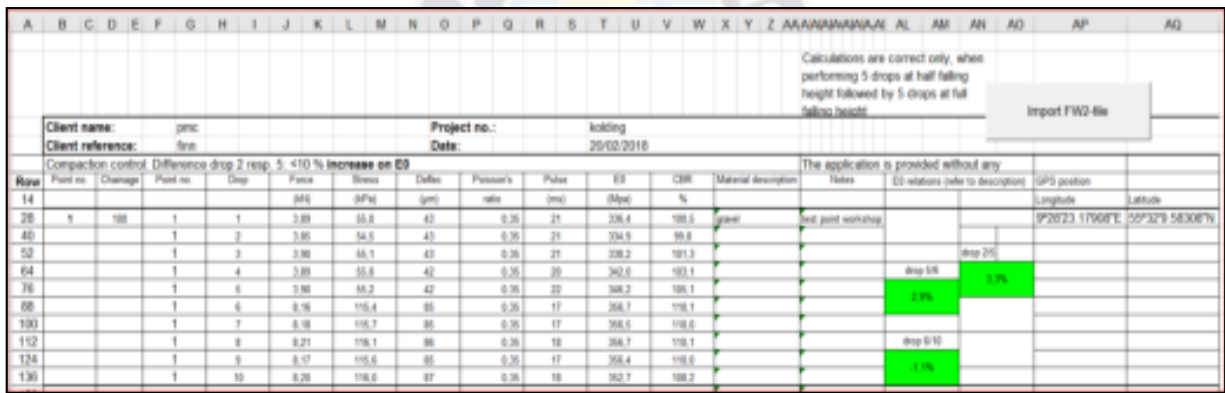
El archivo seleccionado a importar se marca y se **ABRE**



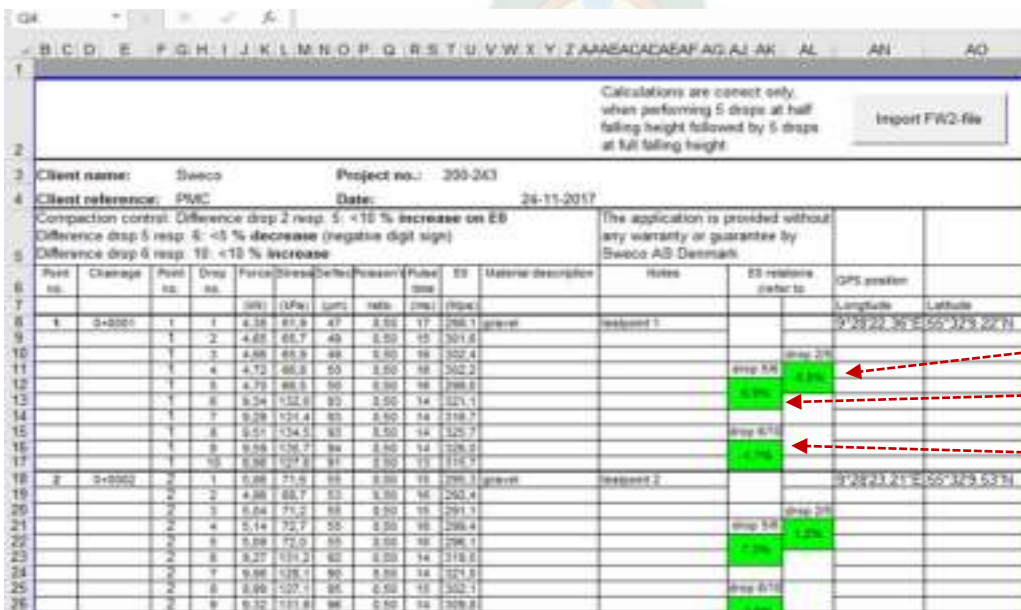
El archivo Kolding.FW2 se ha cargado en Excel, haga clic en OK.



Entonces se tendrá la planilla Excel con los datos obtenidos en los ensayos



A continuación, se muestra un ejemplo de captura de pantalla desde una hoja de Excel para la importación de datos:



Control de compactación

13. Interpretación de la planilla Excel para el control de la compactación

- a. Diferencia entre caída 2 respecto a la caída 5 debe ser menor al 10% del incremento del E
- b. Diferencia entre caída 5 respecto a la caída 6 debe ser menor al 5% de disminución (signo de dígito negativo) (debería estar cerca al 0%, compara la no linealidad del suelo)
- c. Diferencia entre caída 6 respecto a la caída 10 debe ser menor al 10% del incremento (Debería estar entre +5 a -5)

5.3.12. Definiciones de íconos

Ícono	Descripción
	Prima100 Collection START app. / se muestra en la pantalla de inicio de ACU
	Actualización de los dispositivos Bluetooth PRIMA100
	Conectar a unidades Bluetooth PRIMA100 marcadas
	Ir a PRIMA100 Collection
	Un paso atrás en el programa/ se muestra en la esquina superior izquierda de la PRIMA100 Collection.
	Bluetooth conectado y activo a Prima100 LWD
	Bluetooth no conectado o activo a PRIMA100 LWD
	Ajustes
	Crear / añadir nuevo: Proyecto / ubicación O Empezar nuevo: Soltar
	Borrar: Proyecto / Ubicación o eliminar: Soltar
	Guardar ajustes / Proyecto / Ubicación
	Editar
	Exportar proyecto a correo o dispositivo

Tabla 29. Significado de los iconos
Fuente: Manual Deflectómetro Liviano de Impacto PRIMA 100

5.3.13. Características y Especificaciones Técnicas

Carga	
Platos de carga	100, 200 y 300 [mm]
Masa de los pesos de caída	5 [kg] 10 [kg]
Rango de carga	Mayor 15 [kN] máxima carga usando el peso de 20 [kg]
Duración de pulso	15 – 30 [ms]
Altura de caída	Variable dependiente de nivel de carga deseado
Celda de Carga	
Rango	100, 200 y 300 [mm]
Exactitud	2% ± 1 μ
Precisión	0.0003 [kN]
Tipo de sensores	Geófonos – Transductores de velocidad
Cantidad	1 al centro a través del plato, sensores adicionales
Rango	150-2200 μm
Tiempo de muestreo	60-120 ms, lo fija en el usuario

Tabla 30. Características Generales del equipo
Fuente: Manual Deflectómetro Liviano de Impacto PRIMA 100

5.3.14. Preparación y Operación

Cuando se realice las mediciones en campo y laboratorio se debe comprobar que el LWD PRIMA 100 este listo para registrar datos, como se indica a continuación:

1. Planificar mediciones y cargar baterías.
2. Viajar al lugar y cargar el equipo en su respectiva caja.
3. Encender computador de mano e iniciar software LWD.
4. Establecer conexión del LWD por bluetooth con el ACU.
5. Configurar el ACU, como se indicó anteriormente.
6. Compruebe que el equipo PRIMA 100 este colocada verticalmente sobre una superficie plana.
7. Levante la carga de caída y fjela en el mango de liberación.
8. Presione el cierre de seguridad con el dedo índice izquierdo como se ilustra en la figura 64.

9. Coloque la mano derecha sobre la barra guía encima del mango de liberación como se ilustra en la figura 64. De esta manera, el equipo PRIMA 100 se mantiene estable y no se inclina debido a cualquier reacción en la superficie del pavimento probado.
10. Deje que la carga de caída se estabilice después de una medición, lea el resultado y guárdelo o elimínelo.



Figura 66. Ejecución del ensayo
Fuente: Elaboración Propia

11. El peso caerá con fuerza.
12. No coloque manos, pies ni herramientas entre los amortiguadores de goma y el peso.
13. El peso caerá con fuerza, manos, pies ni herramientas entre los amortiguadores de goma y el peso.

5.3.15. Procedimiento para uso del LWD según el manual M-MMP-1-16/20

El manual M-MMP-1-16/20, fue creado por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de la Dirección General de Servicios Técnicos del País de México. Los datos a obtener se realizaron de acuerdo con el procedimiento descrito en esta especificación particular, para determinar el porcentaje de muestras que cumplen con el grado de compactación de una capa de suelo de terracería en su estado natural o compactado en la obra (subbases y bases), mediante la relación del módulo de superficie o de reacción en campo definido en el tramo compactado, con respecto al módulo objetivo determinado en laboratorio usando el equipo Deflectómetro de Impacto Ligero ("LWD", por sus siglas en inglés, Light Weight Deflectometer), en un molde de acuerdo con el ensayo de compactación AASHTO, variante D.

Para el caso del equipo LWD PRIMA 100, los requisitos generales se basan en la norma ASTM E 2583-07, que cuenta con una celda de carga, la onda generada por el impacto de la masa y transmitida a la

superficie de contacto, será aproximadamente semisenoidal y se aplicará con una amplitud de pico a pico de 20 a 50 [kN]. La duración del impulso de fuerza permanecerá entre 20 y 40 [ms].

Este equipo es capaz de mostrar y registrar valores de cargas aplicadas y las deflexiones, así como el periodo de tiempo, presentándolos en forma numérica y gráfica, en tiempo real.

El procedimiento aquí descrito no cubre todos los aspectos concernientes con la seguridad requerida, asociados con su implementación. Es responsabilidad del usuario en establecer las prácticas adecuadas de seguridad y determinar la aplicación de limitaciones regulatorias para su uso, las cuales se encuentran de manera más adecuada en el manual del equipo LWD PRIMA 100.

El significado y uso del equipo, tiene la concepción que se tiene un camión que va ejercer un esfuerzo de 10 [Ton] al pavimento a una velocidad de 80 [km/h], en el cual por el área de influencia que tendrá el neumático se obtendrá un esfuerzo de 0.1 [MN/m²], [MPa], que representan 10.2 [Ton/m²]. Entonces lo que se hace con el LWD es a una menor escala, para un mejor entendimiento se realizó de manera gráfica en la siguiente figura:



Figura 67. Concepción del LWD
Fuente: M-MMP-1-16/20 – Secretaría de Transporte de México

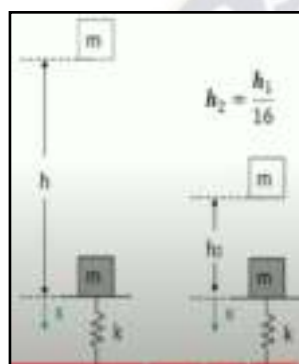
Se tendrá una masa de 10 [kg] con una altura de caída máxima, que tendrá una fuerza de 8.30 [kN], donde caerá a un sistema de amortiguamiento donde se desplazará a la Placa de 30 [cm] que esta sobre la superficie del suelo con un área de 0.07068 [m²], lo cual nos garantiza que se está aplicando el mismo esfuerzo que la del camión en la superficie de estudio.

5.3.16. Obtención del Módulo de Rigidez Objetivo, E_{Obj} , en Laboratorio.

Para obtener el módulo objetivo en laboratorio, se siguió el procedimiento basado en la norma AASHTO TP123-01. Esta especificación describe el procedimiento para el manejo del equipo Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) de laboratorio en un molde Proctor, donde para el presente estudio se realizó la en las muestras de capa subbase compactadas anteriormente realizadas en el ensayo de Proctor modificado del tramo de prueba de la "Construcción Doble Vía El Alto – Viacha", donde se determinó el módulo de reacción o rigidez objetivo E_{Obj} . Para lo cual se realizaron cuatro ensayos obtenidos de una misma muestra de capa subbase.

Para unificar el uso del LWD en laboratorio se tomó en cuenta los incisos emitidos a continuación:

- a) Para la utilización del equipo LWD se tomó en cuenta como un complemento de la metodología estipulada por la norma del ensayo de compactación según AASHTO en su variante D, también descrita en los manuales de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) en la sección S0403.
- b) Se configuró el equipo para usar en laboratorio, en el caso de equipos que no cuentan con celda de carga se debe calibrar la altura para reducir la fuerza aplicada y generar el mismo esfuerzo de acuerdo al diámetro del plato. Se ha analizado que en este tipo de equipos la fuerza aplicada para laboratorio es una cuarta parte de la fuerza total aplicada desde la altura máxima del mismo equipo, y la altura para obtener la fuerza indicada es una dieciseisava parte de la altura total.



$$h_{laboratorio} = \frac{1}{16} * h_{campo}$$

$$F_{laboratorio} = \frac{1}{4} * F_{campo}$$

Figura 68. Configuración alturas de caída
Fuente: M-MMP-1-16/20 – Secretaría de Transporte de México

- c) Se tomó una muestra aproximadamente de 30 [kg] del material que se utilizó en la construcción del tramo de prueba en estudio, de acuerdo con lo establecido en el manual técnico de la ABC en el apartado de ensayos de suelos y materiales, en la sección (S0201- Conservación y Transporte de muestras de suelos), basado en la norma ASTM D4220, de manera que se realizó la prueba con las mismas condiciones en que se encuentre el tramo de prueba en estudio.
- d) Se prepararon y compactaron las cuatro porciones de prueba, con un aproximado de 6 [kg] de material para cada molde, de acuerdo con lo establecido en el manual técnico de la ABC en el apartado de ensayos de suelos y materiales, en la sección (S0403 - Relaciones de Peso Unitario – Humedad en los suelos – Método Modificado), basado en las normas ASTM D422 y AASHTO T-180 en su variante D.
- e) Finalizado la compactación para cada punto de prueba, se colocó el equipo LWD con el plato de carga compuesta al cuerpo del geófono de 100 [mm] de diámetro para que sea compatible con el molde, se colocó en la parte superior y se debe giró aproximadamente 45° hacia adelante y hacia atrás para asentar el plato, sin que entre en contacto con el borde del molde evitando movimientos laterales durante los impactos, si los componentes del equipo lo permiten es posible usar un collarín convencional o bien se puede recortar y ajustar un collarín a la altura que el equipo requiera, para

asegurar que el contacto del plato sea sobre la totalidad de la superficie del suelo de prueba durante la caída de la masa, como se muestra en la Figura 67.

Figura 69. Equipo LWD sobre molde AASHTO



Fuente: Elaboración Propia

- f) Se sostuvo verticalmente el equipo de impacto ligero sobre el molde y se realizaron 3 caídas de acondicionamiento y 3 más para obtener las deflexiones, las cargas aplicadas y el módulo LWD, concluidas las caídas los valores se registraron y exportaron a un sistema de registro de datos para calcular un coeficiente de variación (C.V.) de las mediciones, donde será necesario repetirse si el coeficiente de variación es mayor al 10%, como indica la Ecuación.

$$C.V = \frac{S}{\bar{x}} * 100$$

Ecuación 29. Coeficiente de Variación
 Fuente: Especificación M-MMP-1-16/20

Donde:

C.V. = Coeficiente de variación, (%)

S = Desviación estándar de las deflexiones medidas, δ_i , (m)

\bar{x} = Media aritmética de las deflexiones medidas, δ_i , (m)

- g) Se registraron para cada porción de prueba i , las deflexiones, δ_i en [mm], y las cargas aplicadas, F_i , en [N], las alturas de caída, h_i , en [m], y en el caso de equipos que cuenten con celda de carga, el módulo de reacción o rigidez de la porción i , como E_i , en [MPa].
- h) Para la obtención del Módulo de reacción o rigidez es importante conocer el coeficiente de rigidez K, en los equipos con celda de carga integrada este valor se obtiene automáticamente mediante la Ecuación 24, sin embargo, en los equipos que no cuentan con una celda de carga es necesario calcularla con la misma ecuación.

$$k_i = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\delta_{m\acute{a}x}}$$

Ecuación 30. Coeficiente de reacción o Rigidez "k"
Fuente: Especificación M-MMP-1-16/20

Donde:

k_i = Rigidez del suelo de la porción de prueba, i , (N/mm)

$F_{m\acute{a}x}$ = Carga promedio máxima, aplicada con el equipo LWD (constante para equipos sin celda de carga) de las últimas 3 caídas, (N).

$\delta_{m\acute{a}x}$ = Deformación promedio máxima, aplicada por el equipo LWD de las últimas 3 caídas (mm).

i) **Cálculo del módulo de rigidez objetivo, E_{obj} .**

Método Gráfico:

Este método de cálculo es aplicable directamente para Deflectómetro de impacto ligero que proporcionen el módulo de rigidez de la porción de prueba i , como E_i , durante la ejecución de la prueba. Para lo cual se realizó lo siguiente:

a. Se elaboró la curva de compactación del material mediante la cual se obtuvo el contenido de humedad óptima ω_o , que le corresponde para una masa volumétrica seca máxima, $\gamma_{m\acute{a}x}$, de acuerdo en lo indicado en el Manual de la ABC en el apartado de ensayos de suelos y materiales, en la sección (S0403 - Relaciones de Peso Unitario – Húmedad en los suelos – Método Modificado).

b. Se elaboró una gráfica que relacione el eje de las abscisas, contenido de agua ω_1 , en % para cada porción de prueba, i , y el eje de las ordenadas, el módulo de rigidez E_i , en [MPa], que resulte mayor de la porción i , como se muestra en la gráfica 3.

Método Matemático:

Cuando el equipo no proporcione directamente de cada porción de prueba i , el módulo de rigidez E_{pi} , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{LWD_{Lab.pi}} = \left(1 - \frac{2v^2}{1-v}\right) \times \frac{4H}{\pi D^2} \times k_i$$

Ecuación 31. Módulo de rigidez para laboratorio
Fuente: Especificación M-MMP-1-16/20

Donde:

$E_{LWD_{Lab.pi}}$ = Módulo de rigidez del espécimen AASHTO, i , (MPa)

ν = Coeficiente de Poisson según el tipo de suelo, de acuerdo con la Tabla 19 de este Manual, (adimensional)

H = Altura del molde usado en la prueba de compactación AASTHO, (mm)

D = Diámetro del plato de carga del Deflectómetro de impacto ligero (LWD), (mm)

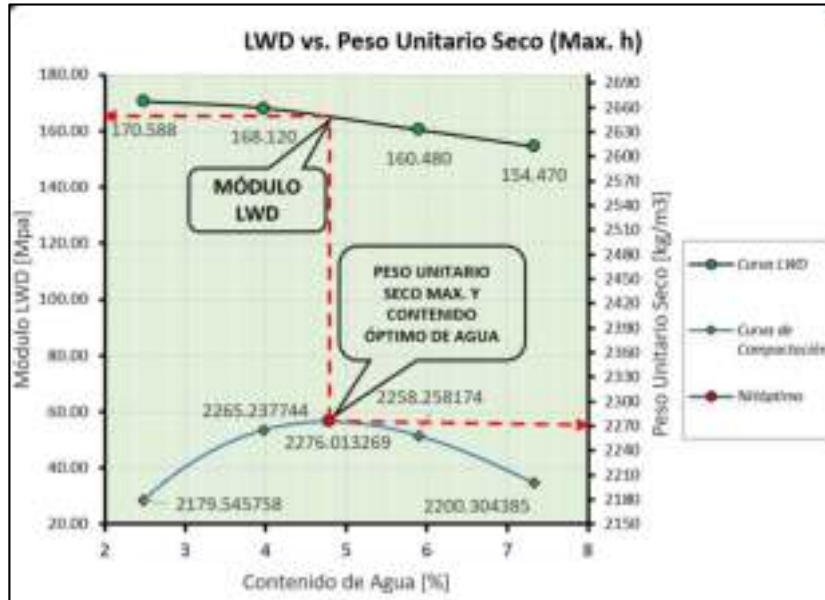
k_i = Rigidez del suelo de cada porción de prueba, i , calculado con la Ecuación 24, (N/mm).

Una vez obtenidos los módulos de rigidez E_{pi} , de cada porción de prueba se obtuvo el módulo de reacción o rigidez objetivo como se indica en el inciso a. y b.

- j) Para el caso de seleccionar una Relación de Poisson adecuado, se puede tomar en cuenta la Tabla 19, dependiendo del tipo de suelo de interés. La Relación de Poisson varía de 0 a 0.5 únicamente. En nuestro caso son suelos granulares sin tratar.

Suelo	Rango de valores	Valor típico
Suelos granulares sin tratar	0.30 a 0.40	0.35
Suelos granulares tratados con cemento	0.10 a 0.20	0.15
Suelos finos tratados con cemento	0.15 a 0.35	0.25
Limos estabilizados	0.30 a 0.25	0.20
Arena suelta o limosa	0.20 a 0.40	0.30
Arena densa	0.30 a 0.45	0.35
Arcillas saturadas	0.40 a 0.50	0.45
Limos	0.30 a 0.35	0.32
Arcillas no saturadas	0.10 a 0.30	0.20
Arcilla limosa	0.20 a 0.30	0.25
Arena de grano grueso	0.15	0.15
Arena de grano fino	0.25	0.25

Tabla 31. Valores típicos a considerar para el coeficiente de Poisson de un suelo
Fuente: Especificación M-MMP-1-16/20



Gráfica 4. Módulo Objetivo LWD mediante la curva de Compactación
Fuente: Elaboración propia en base a ensayos de laboratorio. **Ver Anexo B**

- k) Por efecto del espesor finito de la capa de las bases o subbases, cuando se tenga un sistema de capas, siempre que el espesor de la capa de la subbase sea menor que el diámetro de la placa de carga que se esté utilizando el Deflectómetro, el módulo de rigidez corregido $E_{Obj.-corr}$. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{Obj.-corr} = \frac{1}{\left[\frac{1}{E_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_0}\right)^2 \frac{E_1}{E_2}}} + \frac{1}{E_1 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_0}\right)^2}} \right]}$$

Ecuación 32. Módulo de rigidez corregido
Fuente: Especificación M-MMP-1-16/20

Donde:

$E_{LWD\ Objetivo-correctado}$ =Módulo de rigidez objetivo corregido (MPa)

E_1 = Módulo de rigidez objetivo de la subbase, obtenida en el laboratorio, (MPa)

E_2 = Módulo de rigidez de la superficie de campo de la capa inferior (subbase, subrasante), medido antes de colocar la base, (MPa).

h =Espesor de la capa superior (subbase), (mm)

r_0 =Radio del plato de carga, (mm)

5.3.16.1. Obtención del Módulo Superficie LWD en campo.

Esta especificación particular describe el procedimiento para el manejo del equipo Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD) en campo, basada en la norma AASHTO TP 456-01 (2017).

Para obtener el Módulo $E_{LWD_{Campo}}$ en el sitio de obra se utilizó el mismo Deflectómetro Liviano de Impacto que se empleó en el laboratorio para obtener el módulo de rigidez objetivo, $E_{LWD_{Obj}}$. Para evitar posibles diferencias entre mediciones debidas al uso de diferentes equipos, para lo cual fue necesario considerar los siguientes incisos:

- Se realizó la configuración del equipo para el cálculo del Módulo de campo y se utilizó su configuración normal como indica el manual de operación.
- Se utilizó el mismo equipo con el que se buscó el Módulo Objetivo ($E_{LWD_{Objetivo}}$) en Laboratorio para obtener el Módulo de Campo ($E_{LWD_{Campo}}$) y así obtener un porcentaje de compactación confiable.
- Debido a que el contenido de humedad es un factor muy importante a considerar, es indispensable obtener el módulo de rigidez de superficie en campo, $E_{LWD_{Campo}}$, dentro de las 2 primeras horas de realizada la compactación, lo cual nos garantizara la confiabilidad de las mediciones en campo, al evitar pérdidas de humedad en el suelo.
- Antes de iniciar la prueba en campo se determinó el número de puntos de prueba, la cual se consideró ocho puntos, para una frecuencia de muestreo para la obtención de los $E_{LWD_{Campo}}$ a lo largo de un tramo y con dependencia del tipo de capa.
- Se recomienda obtener el $E_{LWD_{Campo}}$ para base, subbase o subrasante, a cada 50 [m] o menos para un tramo de 500 [m] de longitud de acuerdo a la distribución que se muestra en la Figura 68. En el presente estudio se realizó la distribución cada 30 [m] en una longitud de 220 [m].

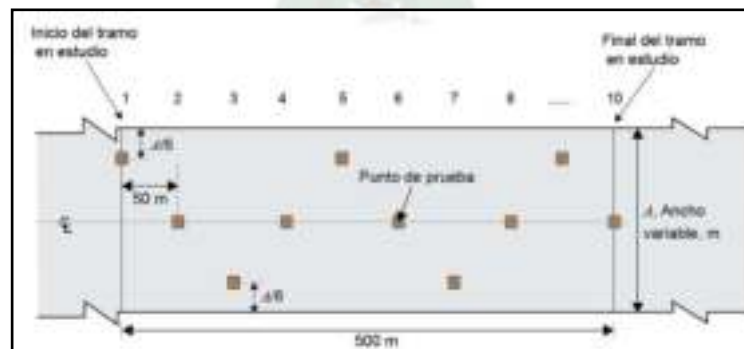


Figura 70. Distribución propuesta para muestrear en campo capas compactadas de subbase
Fuente: Manual M-MMP-1-16/20

- Se determinó el contenido de agua w del sitio, con 3 muestras aleatorias de suelo de las ubicaciones a muestrear utilizado en la construcción, se recomienda realizar la prueba rápida, de acuerdo con el

procedimiento indicado, una muestra se obtiene durante el tendido y conformación de cada capa y las otras dos muestras se obtienen inmediatamente después de la compactación.

- g) Si transcurrido este tiempo no se ha realizado la obtención del contenido de agua del suelo de las muestras representativas, éstas se envasan, transportan y almacenan, de acuerdo a lo estipulado en el manual de ensayos de suelos de la ABC basado en la norma ASTM D2216, Determinación en laboratorio del contenido de Agua (humedad), Muestreo de Suelo para Terracerías, para obtenerlo dentro de las primeras 12 horas en que se compactó la capa.
- h) Se verificó que el contenido de agua de las muestras, obtenidas después de la compactación no varíe en más del 2% respecto al contenido de agua de la muestra obtenida durante el tendido y conformación. El contenido de agua del tramo de estudio se considera como el promedio de 3 muestras.
- i) Se recomienda para la ejecución de la prueba que el intervalo de valores del contenido de agua, que cumplirá el suelo compactado en el campo, de acuerdo a lo siguiente:

$$\omega_0 - 3\% \leq \omega_{campo} \leq \omega_0 + 2\%$$

Ecuación 33. Intervalo del contenido de agua en campo
Fuente: Especificación EP-4

Donde:

ω_0 =Contenido de agua óptimo obtenido de acuerdo con lo indicado en el ensayo de compactación AASTHO T-180D, (%)

ω_{campo} =Contenido de agua en campo del suelo compactado en el tramo de estudio, (%)

- j) Una vez obtenido el intervalo del contenido de humedad en campo, se ingresó al sistema de procedimiento y registro de datos del Deflectómetro Liviano de Impacto, donde el coeficiente de Poisson (ν) utilizado en el $E_{LWD_{Objetivo}}$ y el factor de distribución de esfuerzos A, se utilizó como se indica en la siguiente tabla, según al tipo de suelo de que se trate:

Tipo de suelo	Factor A	Distribución de esfuerzos
Mixto	2	
Granular	$\frac{2}{3}$	
Cohesivo	$\frac{\pi}{2}$	

Tabla 32. Factor de distribución de esfuerzos para diferentes tipos de suelo
Fuente: Especificación M-MMP-1-16/2

- k) Después de verificar los anteriores puntos, se realizó el ensayo en campo donde se posicionó el equipo LWD sobre el punto de interés. La superficie de prueba deberá estar limpia, uniforme y sin partículas granulares sueltas tanto como sea posible. Si la superficie de prueba pertenece a una capa de base o subbase donde está compuesta por grava, se recomienda colocar una capa delgada de arena fina para colocar sobre ella el equipo, esto ayuda a tener un contacto uniforme entre el plato de carga y la superficie de prueba.
- l) Se posicionó el plato de carga y el sensor, se oscila 45° aproximadamente hacia atrás y hacia adelante para asegurarse de que estén posados sobre una superficie firme y estable.



Figura 71. Ensayo en campo Deflectómetro Liviano de Impacto
Fuente: Elaboración Propia

- m) Se elevó la masa a la altura de prueba, asegurando que el sistema guía siempre se encuentre perpendicular a la placa de carga y procurando colocar el pie en el borde del molde para evitar su movimiento durante el impacto de la carga, haciéndole caer libremente 3 veces como acondicionamiento, posteriormente 3 caídas más para obtener resultados del módulo de rigidez de superficie en campo, $E_{LWD_{campo}}$, se registran y se exportan a un sistema de registro y se continúa con los siguientes puntos.
- n) Los equipos LWD que no cuentan con celda de carga, el módulo de rigidez superficie en campo, $E_{LWD_{campo}}$, de los puntos de prueba, se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$E_{LWD_{campo}} = \frac{2k(1 - \nu^2)}{AR}$$

Ecuación 34. Módulo de rigidez en campo
Fuente: Especificación EP-4

Donde:

$E_{LWD_{campo}}$ = Módulo de rigidez de superficie en campo del suelo (MPa)

k = Rigidez del suelo, calculado con la Ecuación 24, (N/mm).

ν = Coeficiente de Poisson según el tipo de suelo, de acuerdo con la Tabla 19, (adimensional)

A = Factor de distribución de esfuerzo, según la tabla 20, (adimensional)

R = Radio del plato de carga, (mm)

En el presente estudio se obtuvo los módulos de rigidez directamente del equipo, que también considera esta ecuación.

o) En la siguiente tabla se pueden observar rangos de valores de referencia de Módulos LWD en campo que se pueden obtener dependiendo del tipo de suelo que se esté verificando.

Tabla 33. Valores de referencia del módulo de rigidez de superficie en campo para diferentes materiales

Material	Módulo de rigidez de superficie en campo, E_{LWD} MPa
Base granular o subbase	100 - 550
Subrasante	30 - 275
Terracerías estabilizadas mecánicamente	140 - 690
Suelos estabilizados con cal	50-350
Terracerías tratadas con cemento	690 - 1 700
Base tratada con cemento	1 050 - 2 750

Fuente: Especificación M-MMP-1-16/2

5.3.16.2. Cálculo del Grado de Compactación (Relación de Rigideces)

Una vez obtenido el módulo de rigidez objetivo $E_{Objetivo}$, y los módulos de rigidez de superficie en campo, E_{Campo} , se calculan y reportan el porcentaje de compactación del suelo, como la relación de rigideces de los puntos de prueba del tramo de prueba, considerando lo siguiente:

Para capas de revestimientos, terracerías y subbase:

$$RG_{TS} = \frac{E_{LWD_{Campo}}}{E_{LWD_{Objetivo}}}$$

Ecuación 35. Comprobación del Grado de compactación mediante módulo de rigidez

Fuente: Especificación EP-4

Donde:

RG_{TS} = Relación de rigideces para revestimientos, terracerías y subbase (adimensional).

$E_{LWD_{Objetivo}}$ = Módulo de rigidez objetivo, obtenido del suelo en el laboratorio, (MPa)

$E_{LWD_{Campo}}$ = Módulo de rigidez de superficie en campo, obtenido del suelo en estado compactado, (MPa).

Para capas de base:

$$RG_B = \frac{E_{LWD_{Campo}}}{E_{LWD_{Objetivo-corr.}}}$$

RG_B = Relación de rigideces para bases (adimensional).

$E_{LWD_{Objetivo-corr.}}$ = Módulo de rigidez objetivo corregido, obtenido del suelo en el laboratorio, (MPa)

$E_{LWD_{Campo}}$ = Módulo de rigidez de superficie en campo, obtenido del suelo en estado compactado, (MPa)

5.3.16.3. Determinación del Grado de Compactación

Para el tramo en estudio, se determinó mediante la comparación lo siguiente:

Cuando los valores de la relación de rigideces obtenidos son iguales a 1 o mayores, significa que el grado de compactación para cada punto de prueba es igual o mayor al indicado en el proyecto o aprobado.

Cuando más del 80% de los puntos de prueba tengan relación es de rigideces (grado de compactación) iguales a 1 o mayores, significa que el grado de compactación para el tramo en estudio es el indicado en el proyecto o aprobado por la Supervisión. Si esta condición no se cumple se considera que el grado de compactación del tramo es estudio no cumple lo indicado.

5.3.16.4. Deflectómetro de Impacto Pesado (FWD)

Con el fin de realizar los cálculos para la corrección del módulo de rigidez objetivo de la capa subbase, se utilizó los valores del estudio de Deflectometría de Impacto empleando el equipo del Deflectómetro de Impacto Pesado (FWD), trabajo realizado por la Empresa Consultora Mecanicista Ltda. Para la evaluación estructural del pavimento flexible como parte del proyecto.



Figura 72. Ensayo de Deflectometría FWD Prog. 11+233
Fuente: Memoria Técnica PR.09.21-01 -Mecanicista Ltda.

El Deflectómetro de impacto (FWD) es un dispositivo montado en un tráiler que consiste en una masa que se eleva y se deja caer libre verticalmente sobre un plato de acero. El tráiler puede ser arrastrado

por vehículos convencionales. La fuerza de impacto es transferida al plato de 300 [mm] o 450 [mm] de diámetro a través de unos amortiguadores de goma. Se puede regular la masa y su altura de caída para obtener la presión de contacto deseada medida con una celda de carga. El impacto del FWD es capaz de producir pulsos de carga aproximadamente sinusoidales con tiempos de carga entre 25 y 40 milisegundos. A través de geófonos (sensores de velocidad) ubicados en la superficie del pavimento, se registra la respuesta de la estructura subyacente. El dispositivo cuenta con 7 geófonos, a través de los cuales se puede conocer el cuenco de deflexiones para toda la estructura del pavimento. El cálculo de los MR de las capas subyacentes se hace simulando un sistema elástico multicapas a través de algoritmos de retro-cálculo, conociendo de antemano propiedades como los espesores de las capas subyacentes y sus respectivos módulos de Poisson. El FWD es muy bueno para determinar el módulo resiliente del paquete estructural completo y el de la subrasante. También se puede determinar el módulo de las capas intermedias, pero para ello se necesita más tiempo de procesamiento de datos debido a que se precisan muchas iteraciones. Para la evaluación directa de capas granulares se utiliza el geófono central del plato de carga (Fleming et al, 2000). Sin embargo, entrega presiones muy altas en comparación a las tensiones de trabajo a las que están sometidas las capas intermedias de pavimentos flexibles.

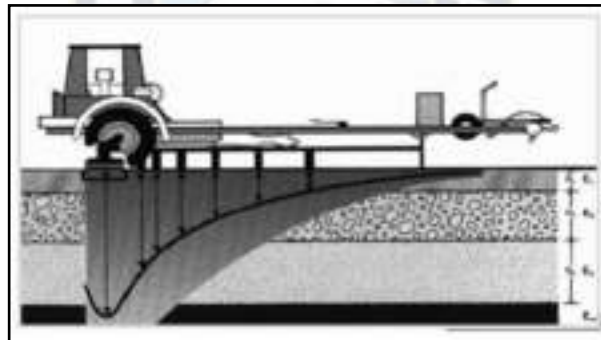


Figura 73. Cuenco de deflexiones medidas por FWD
Fuente: Solminihac,2001

Se tomaron los valores de las deflexiones medidos en el geófono D45, sacando así los valores de las ocho deflexiones en la capa subrasante. De esta manera es que asumimos un valor para el módulo de la capa subrasante (E_2) (Ver Anexos C).

CAPITULO 6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

6.1. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN

Es la medida del grado de relación entre dos o más variables. La correlación es una prueba de hipótesis que debe ser sometida a contraste y el coeficiente de correlación cuantifica la correlación entre dos o más variables, cuando esta exista.

Un coeficiente de correlación, mide el grado de relación o asociación existente generalmente entre dos variables aleatorias. No es conveniente identificar correlación con dependencia causal, ya que, si hay una semejanza formal entre ambos conceptos, no puede deducirse de esto que sean análogos; en efecto es posible que haya una alta correlación entre dos acontecimientos y que, sin embargo, no exista entre ellos una relación de causa o efecto, por ejemplo, cuando dos acontecimientos tienen alguna causa común, pueden resultar altamente asociados y no son el uno causa al otro.

Cabe recordar que el coeficiente fluctúa entre $-1 \leq \rho \leq 1$

En estudio medico se estableció que, al comparar el consumo de carbón con la mortalidad en periodos análogos, se encontró alta correlación.

Esto no quiere decir que el consumo de carbón sea la causa de las muertes, sino que tanto el aumento de consumo de carbón, como el aumento de la mortalidad se producen en las épocas de frio más intenso. En conclusión, un coeficiente de correlación por sí mismo no puede probar ni desmentir una relación causal entre variables. La relación causa – efecto es posible definirla solo a través de la comprensión de la relación natural que exista entre variables y esto no debe manifestarse solo por la existencia de una fuerte asociación. El análisis de correlación es técnicamente neutral.

Con variables nominales suele utilizarse el termino de Asociación para indicar el grado de relación entre las variables.

El coeficiente ***r de Pearson***, por ser una prueba paramétrica requiere de variables numéricas con distribución normal; mientras que el coeficiente de correlación no paramétrica ***rho de Spearman*** acepta variables de libre de distribución e incluso ordinales.

6.2. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN SEGÚN LA NATURALEZA DE LAS VARIABLES

El grado de relación entre variables depende de la naturaleza de las variables involucradas en el estudio o investigación.

En este sentido, si ambas variables son nominales la relación será descrita con el estadístico Ji-Cuadrado. Si ambas variables son ordinales se describe la relación con el Coeficiente de Correlación de Spearman.

Si ambas variables son intercalares mediante el Coeficiente de Pearson. Si una variable es nominal y la otra intercalar la relación puede ser descrita mediante el coeficiente Omega Cuadrado. Si ambas variables son dicotómicas o binarias la relación puede establecerse mediante el Coeficiente Phi.

La relación entre dos fenómenos puede ser: estricta, funcional o nula. Por ejemplo, la relación entre talla y peso no es estricta, ya que no existe una proporcionalidad simple entre ambas variables; pero tampoco es nula; pues de lo contrario ambas variables serían independientes entre sí (mientras que en este caso existe, indudablemente, cierta correlación; la gente alta es, en general, más pesada).

No obstante, esta relación no resulta funcional, porque de lo contrario se podría captar matemáticamente la dependencia mediante una ecuación de dos variables. La correlación tiene las mismas propiedades de los vectores: magnitud, dirección y sentido.

En tal sentido, se habla de correlación positiva o directa cuando ambas características (expresadas mediante valores de las variables) presentan la misma tendencia (por ejemplo, talla y peso) porque a medida que una aumenta se espera que la otra variable aumente, pero esta relación en los seres vivos no es indefinida sino hasta cierta edad.

Es decir, hay una variable reguladora la edad en este caso. En este mismo orden de ideas, se habla de correlación negativa o inversa cuando una variable aumenta y la otra disminuye, mostrando tendencias claramente opuestas, es el caso de la oferta y el precio en el ámbito de la economía. Cuando la oferta aumenta, el precio tiende a bajar. Los diagramas de dispersión o Scattergramas suelen ser útiles para estudiar el grado de relación entre dos variables.

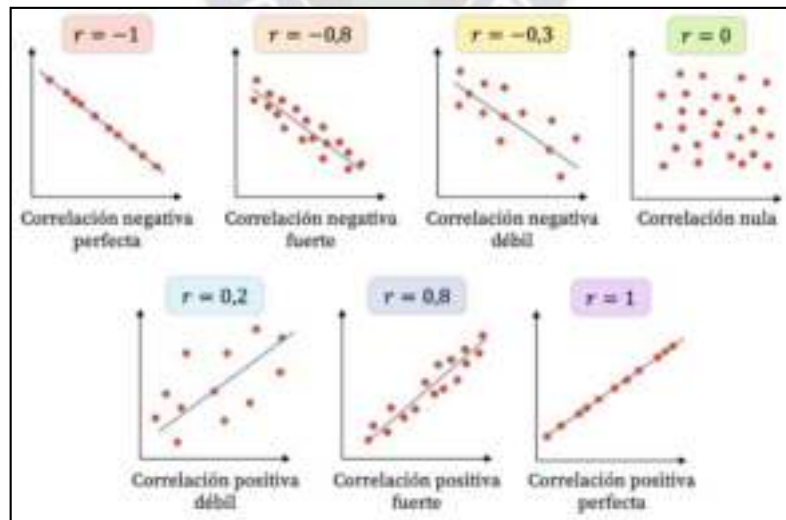


Figura 74. Grado de correlación entre variables
Fuente: Probabilidad y estadística.net

La correlación también hace posible el cálculo del coeficiente de determinación que se utiliza como medida de la bondad de ajuste de un modelo de regresión, como se verá más adelante.

En general, si el valor de R-cuadrado es mayor en comparación al modelo, el modelo que posea un R-cuadrado mayor será el de mejor ajuste. El R-cuadrado comienza a ser importante si sobrepasa el valor de 0,70. Este coeficiente siempre es positivo.

6.2.1. Pruebas de Correlación

La correlación es una prueba de hipótesis que debe ser sometida a contraste y el coeficiente de correlación cuantifica la correlación entre dos variables, cuando esta existe.

El coeficiente de r de Pearson, por ser una prueba paramétrica requiere de variables numéricas con distribución normal; mientras que el coeficiente de correlación no paramétrica rho de Spearman acepta variables de libre distribución e incluso ordinales.

Las pruebas de correlación miden el grado de asociación entre dos o más variables, en nuestro caso buscamos determinar una correlación bivariado (entre 2 variables) las pruebas adecuadas para ello son:

6.2.1.1. Prueba de Correlación de Pearson

Es una prueba estadística para analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por intervalos o de razón.

El coeficiente de correlación de Pearson es un número comprendido entre -1 y +1 cuyo signo coincide con la pendiente de la recta de regresión y cuya magnitud está relacionada con el grado de dependencia lineal entre dos variables.

$$r = \pm \frac{S_{xy}}{S_x * S_y} = \frac{\text{Covarianza de la muestra } x, y}{\text{Desviación estándar de } x, y}$$

Ecuación 36. Coeficiente de correlación Pearson
Fuente: Ruiz (2002)

La correlación de Pearson es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente.

Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, como es una correlación de curva, en cuyo caso no se debe aplicar la correlación de Pearson sino la de Spearman.

Es importante aclarar que la correlación de Pearson no evalúa causalidad, por ello no considera una variable dependiente y la otra independiente, la noción causa y efecto se debe establecer:

r	Interpretación
$r = 0$	No existe correlación entre las variables
$0.00 \leq r < \pm 0.20$	Existe correlación no significativa
$\pm 0.20 \leq r < \pm 0.40$	Existe una correlación baja
$\pm 0.40 \leq r < \pm 0.70$	Existe una correlación significativa
$\pm 0.70 \leq r < \pm 1.00$	Existe un alto grado de correlación
$r = 1$	Existe una correlación perfecta positiva
$r = -1$	Existe una correlación perfecta negativa

Tabla 34. Interpretación de r
 Fuente: Ruiz (2002)

El coeficiente de correlación de Pearson es quizá el mejor coeficiente y el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal existente entre dos variables cuantitativas.

6.2.1.2. Prueba de Correlación de Spearman

La prueba de correlación de rangos de Spearman, es una prueba no paramétrica utilizada para asociación o correlación de variables.

La ρ de Spearman es en realidad el coeficiente de correlación lineal r de Pearson, aplicado a los datos que satisfacen los requisitos de una escala ordinal o los de intervalo que no satisfagan el supuesto de normalidad, es decir, se perfila como una versión no paramétrica del coeficiente de correlación de Pearson.

Este coeficiente puede correlacionar las variables del tipo: dos variables cuantitativas que no siguen una distribución normal, una variable cuantitativa y otra variable cualitativa ordinal, dos variables ordinales.

Los valores del coeficiente van de -1 a +1, el signo del coeficiente indica la dirección de la relación y el valor absoluto del coeficiente de correlación indica la fuerza de la relación entre las variables.

ρ	Interpretación
$\rho = 1$	Correlación perfecta
$0.80 < \rho < 1$	Muy alta
$0.60 < \rho < 0.80$	Alta
$0.40 < \rho < 0.60$	Moderada
$0.20 < \rho < 0.40$	Baja
$0 < \rho < 0.20$	Muy baja
$\rho = 0$	Nula, no hay asociación

Tabla 35. Interpretación de ρ
 Fuente: Ruiz (2002)

Al igual que ocurre con el coeficiente tau-b de Kendall el de Spearman puede utilizarse como una alternativa al de Pearson cuando las variables estudiadas son ordinales y/o se incumple el supuesto de normalidad.

6.2.1.3. Coeficiente de Determinación (R^2)

El coeficiente de determinación se halla entre cero y uno ($0.00 \leq r^2 \leq +1$, cuando el coeficiente de determinación toma el valor de la unidad, se tienen toda la variación explicada y el ajuste es perfecto, por el contrario, si este coeficiente es cero, la línea de regresión no explica nada, es decir, es horizontal y la variable "y" no depende de "x".

El coeficiente de determinación puede calcularse para líneas de ajustes no lineales, al igual que para correlaciones múltiples lineales y no lineales, a la raíz cuadrada del coeficiente de determinación se le asigna el nombre de coeficiente de correlación.

Si se trata de un ajuste lineal, el coeficiente de determinación es el valor del coeficiente de correlación de Pearson elevado al cuadrado, nos expresa la parte proporcional que indica la varianza de factores comunes, es decir expresa el porcentaje de cuanto cambia una variable, cuando lo hace otra.

6.2.1.4. Modelos de Regresión Lineal

Teniendo ya conocimiento de la intensidad de la correlación entre las variables, manifestada a través del diagrama de dispersión y el coeficiente de correlación, podemos ensayar el ajuste de un modelo estadístico que se adapte mejor a las "n" observaciones; lo que lleva por nombre regresión. Uno de los procedimientos muy comunes en el ajuste regresivo es el método de los mínimos cuadrados, que produce estimaciones con menor error cuadrático promedio.

Una vez determinado el análisis de correlación, se produce a determinar un modelo de regresión lineal para analizar la relación entre dos variables cuantitativas.

El objeto principal del análisis de la regresión es:

- Determinar si dichas variables están asociadas y en qué sentido se da dicha asociación
- Estudiar si los valores de una variable pueden ser utilizadas para predecir y determinar el efecto de la otra.

El método de ajuste lineal se aplica también a ciertas relaciones no lineales, que con ciertos artificios matemáticos pueden resolverse.

6.2.1.5. Bondad de Ajuste

El R^2 expresa la proporción de varianza de la variable dependiente que esta explicada por la variable independiente. Es el coeficiente de determinación y su valor máximo es uno.

La correlación también hace posible el cálculo del coeficiente de determinación que se utiliza como medida de la bondad de ajuste de un modelo de regresión.

En general si el valor de R-cuadrado es mayor en comparación a otro modelo, el modelo que posea un R-cuadrado mayor será el de mejor ajuste. El R-cuadrado, comienza a ser importante si sobrepasa el valor de 0.70 y es positivo.

6.2.1.6. Coeficiente de Correlación múltiple R

La primera información que obtenemos se refiere al coeficiente de correlación múltiple R. Puesto que solo tenemos dos variables, el coeficiente de correlación múltiple no es otra cosa que el valor absoluto del coeficiente de Pearson entre dos variables, si el modelo es lineal.

6.2.1.7. Significancia estadística p

La significancia es el complemento del nivel de confianza, llamándose también nivel de error por ejemplo si el nivel de confianza es 0.95 la significancia será $p=0.05$.

Solo interpretamos el coeficiente de correlación si "p" es menor de 0.05 (nivel de significancia).

6.3. VALOR DE P DE SIGNIFICACION DE R

Otro aspecto importante a considerar es la significancia de valor de r, que viene dado por el valor P que lo acompaña.

Si el valor P que acompaña a R es menor que 0.05, concluimos que la correlación es significativa y esto indica que es una correlación o relación real, no debida al azar. Por ejemplo, si la salida del software SPSS muestra un $R=0,80$; P menor que 0.05, nos indica que la correlación es significativa.

El valor de R elevado al cuadrado indica el porcentaje de la variación de una variable debida a la variación de la otra y viceversa. Por ejemplo, si la correlación entre productividad y asistencia al trabajo es de 0.80. Esto es $r=0.80$ y $r^2=0.64$.

Expresa que la productividad es del 64% de la variación de la asistencia al trabajo o que la asistencia al trabajo es el 64% de la productividad.

6.4. TIPOS DE VARIABLES

6.4.1. Variables Cualitativas

Una variable estadística es cualitativa cuando solo puede clasificarse en categorías no numéricas. Ejemplos de variables cualitativas son el color de los ojos de las personas de una ciudad, la facultad en la que están matriculados los estudiantes de una universidad.

En este caso solo podemos hacer representaciones gráficas, su objetivo es dar una idea visual sencilla de la muestra obtenida.

6.4.2. Variables Cuantitativas

Una variable estadística es cuantitativa cuando toma valores numéricos. Son las que podemos hacer representaciones numéricas que no tenían sentido para las variables cualitativas. Es muy habitual distinguir dos tipos de variables cuantitativas que indicamos a continuación:

Discretas: Solo pueden tomar un conjunto finito o numerable de valores, generalmente valores enteros.

Continuas: Pueden tomar cualquier valor en un intervalo finito o infinito.

6.5. ANÁLISIS DE VARIABLES

En el siguiente cuadro se muestra los tipos de indicadores que tienen cada metodología utilizados en campo, para luego ser analizados mediante un análisis estadístico y determinar si siguen una distribución normal y medir los grados de asociación que tienen entre sus parámetros:

Ensayos de caracterización	Indicadores
CONO DE ARENA	Densidad seca en campo [kN/m ³]
GEOGAUGE H-4140	Densidad estimada Humboldt [kN/m ³]
	Rigidez [KN/m]
	Módulo de Young [MPa]
"LWD" PRIMA 100	Módulo de elasticidad en campo [MPa]

Los resultados obtenidos para cada parámetro, son las siguientes:

Densidad seca en campo - Cono de Arena		Densidad seca estimada Humboldt		Módulo de Young GeoGauge		Rigidez GeoGauge		Módulo de Elasticidad LWD	
N°	[kN/m ³]	N°	[kN/m ³]	N°	[MPa]	N°	[MN/m]	N°	[MPa]
1	22,38	1	22,26	1	266,02	1	30,67	1	207,01
2	22,00	2	22,00	2	272,47	2	31,41	2	227,49
3	22,19	3	22,19	3	237,45	3	26,75	3	272,76
4	22,00	4	22,00	4	269,50	4	31,07	4	313,68
5	21,93	5	21,93	5	327,22	5	35,42	5	262,56
6	21,88	6	21,88	6	269,96	6	31,12	6	440,27
7	21,94	7	21,94	7	261,72	7	30,17	7	408,63
8	22,23	8	22,23	8	244,15	8	26,40	8	205,93

Tabla 36. Valores de las variables obtenidas según a cada metodología
Fuente: Elaboración Propia

Se observa que los indicadores de densidad con los equipos de GeoGauge y Cono de arena están directamente relacionados en sus valores según al desarrollo de sus metodologías, para lo cual se utilizó la ecuación del grado de compactación tradicional, dándonos resultados satisfactorios y significativos para los valores de compactación que requiere el proyecto.

Así también la densidad estimada por Humboldt depende de la densidad seca de laboratorio, cuanto mayor sea la densidad seca mayor será el valor de la densidad estimada.

El indicador del módulo de elasticidad o de superficie es independiente, pero se verá cuanta correlación existe entre las densidades tanto seca como la estimada, además con los módulos de Young y rigidez las cuales fueron registrados con el GeoGauge.

Con las variables obtenidas se calcularon los grados de compactación con cada equipo, para cada punto de control, los resultados se muestran en el cuadro resumen a continuación:

Planilla Resumen - Grado de Compactación							
N° Punto	Progresiva	Relación de Rigideces LWD a diferentes alturas				GeoGauge	Cono de Arena
		Sin corrección		Con corrección			
		hmáx.	hmedio	hmáx.	hmedio	[%]	[%]
1	10+260	1,29	1,97	1,25	1,20	100,03	100,25
2	10+290	1,42	2,05	1,21	1,35	98,48	98,55
3	10+320	1,70	2,55	1,78	1,13	99,41	99,42
4	10+350	1,96	3,22	2,09	1,11	98,48	98,56
5	10+380	1,64	2,32	1,70	1,14	98,25	98,27
6	10+410	2,75	3,92	3,32	0,99	98,07	98,04
7	10+450	2,55	3,93	3,28	0,94	98,25	98,28
8	10+480	1,29	1,83	1,61	0,96	99,68	99,58

Tabla 37. Valores de las variables obtenidas según a cada metodología
Fuente: Elaboración Propia

Es importante conocer la naturaleza de las variables antes de realizar una correlación, ya que la estadística puede correlacionar cualquier variable aun cuando no exista relación natural entre ellas, empleando distintos tipos de análisis y coeficientes de correlación.

Por tanto, hay variables que se correlacionó, mediante los siguientes indicadores:

- Densidad seca obtenida por el método cono de arena
- Densidad estimada Humboldt obtenida por el método GeoGauge
- Módulo de Young y Rigidez obtenida por el método GeoGauge
- Módulo de elasticidad en campo obtenida por el método LWD.

6.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA NORMALIDAD DE LAS VARIABLES Y ELECCIÓN DE LA PRUEBA DE CORRELACIÓN ADECUADA

El análisis consiste en determinar si las variables siguen una distribución normal las cuales se utilizó con el software *SPSS Statistics 26* y la Regla Empírica para luego realizar las Correlaciones entre las variables mediante las pruebas de Pearson y Spearman que indica el software *SPSS Statistics 26*, además de encontrar correlaciones mediante el Coeficiente de Determinación (R^2):

Pruebas de correlaciones	Requisito de las variables
Correlación de Pearson	Siguen una distribución normal
	Se ajusta mejor a las relaciones lineales
Correlación de Spearman	Incumplen el requisito de normalidad
	Se ajusta mejor a las relaciones curvilíneas

Tabla 38. Requisito de las pruebas de correlación
Fuente: Elaboración Propia

El análisis consiste en determinar:

- Si las variables siguen una distribución normal
- Si la tendencia del diagrama de dispersión entre variables es lineal o curvilínea.

Con esto dos se determinará la prueba de correlación adecuada para el análisis de las variables ya analizadas previamente:

6.6.1. Correlación de la Densidad Seca del Suelo Mediante el Método Cono de Arena y Densidad Estimada Mediante el Método GeoGauge Humboldt H-4140.

La estimación para la densidad seca del terreno analizado, se realizó mediante la ecuación de Humboldt, modelo analítico-experimental que relaciona valores medidos experimentalmente para: rigidez del material, contenido de humedad, relación C determinada para el terreno de las muestras de suelo y densidad ideal del terreno analizado. (**Ver Anexos "C"**)¹.

$$\rho_D = \frac{\rho_0}{1 + 1.2 \left[\frac{Cm}{K} - 0.3 \right]^{0.5}} = \frac{22.32}{1 + 1.2 * \left[\frac{192.52 * 0.0478}{30.67} - 0.30 \right]^{0.5}} = 22.26 \left[\frac{KN}{m^3} \right]$$

Valores estimados para densidad seca a partir de datos experimentales obtenidos:

¹ Valores obtenidos del cálculo de la densidad con la ecuación Humboldt que se encuentra en Anexos Sección "C".

Rigidez medida	Densidad Cono de Arena	Densidad Seca Máx.	Contenido de humedad óptimo	Valor de C en terreno	Densidad Seca Humboldt
K	ρ_{CA}	ρ_0	m	y	ρ_D
[MN/m]	[KN/m ³]	[KN/m ³]		[MN/m]	[KN/m ³]
30,67	22,38	22,32	0,0478	192,52	22,26
31,41	22,00	22,32	0,0478	197,29	22,00
26,75	22,19	22,32	0,0478	167,97	22,19
31,07	22,00	22,32	0,0478	195,13	22,00
35,42	21,93	22,32	0,0478	222,50	21,93
31,12	21,88	22,32	0,0478	195,55	21,88
30,17	21,94	22,32	0,0478	189,54	21,94
26,40	22,23	22,32	0,0478	165,76	22,23

Tabla 39. Resumen del Ensayo GeoGauge del material granular para la capa subbase
Fuente: Elaboración Propia

Una vez estimado estos valores para la densidad seca (ρ_D), se procedió a determinar si existe correlación entre valores medidos para la densidad seca por el método de cono de arena y los valores estimados relacionados a través de la ecuación de Humboldt.

Se realizó el análisis estadístico correspondiente con la ayuda del software **SSPS Statistics 26**.

6.6.1.1. Cálculo de Estadísticos de las Variables

a. Variable densidad seca en campo – cono de arena [KN/m³]

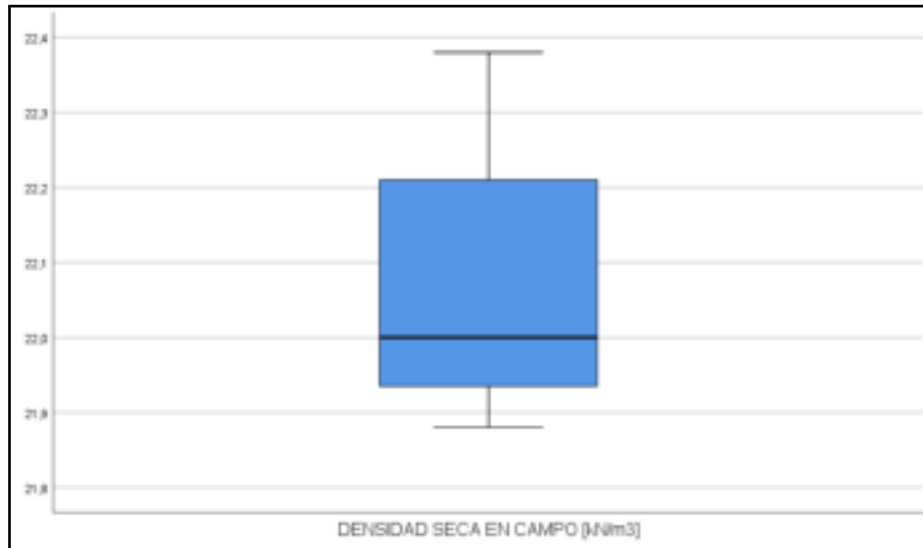
i) CUADRO DE ESTADÍSTICOS

Resumen de procesamiento de casos						
	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
DENSIDAD SECA EN CAMPO [kN/m ³]	8	100,0%	0	0,0%	8	100,0%

Descriptivos				
			Estadístico	Error estándar
DENSIDAD SECA EN CAMPO [kN/m ³]	Media		22,06875	0,062462
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	21,92105	
		Límite superior	22,21645	
	Media recortada al 5%		22,06194	
	Mediana		22,00000	
	Varianza		0,031	
	Desviación estándar		0,176671	
	Mínimo		21,880	
	Máximo		22,380	
	Rango		0,500	
	Rango intercuartil		0,287	
	Asimetría		0,827	0,752
	Curtosis		-0,594	1,481

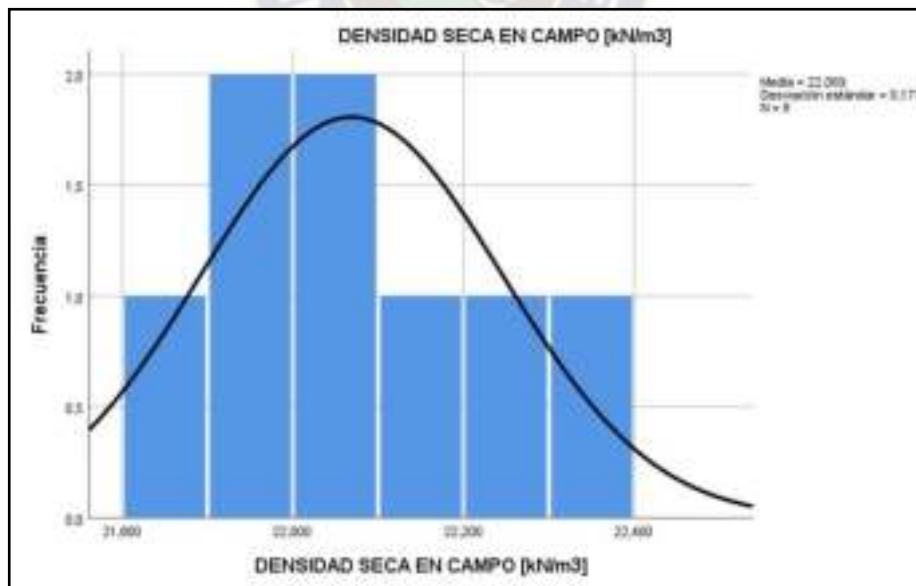
Tabla 40. Resumen de los Estadísticos de la variable Densidad seca en campo
Fuente: Software SSPS Statistics 26

ii) **DIAGRAMA DE CAJAS**



Este diagrama de caja sirve para localizar puntos discordantes, ya que afectan las medidas de dispersión y cambian la distribución de los datos, en este caso en el gráfico no se observan dichos puntos.

iii) **HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS**



De acuerdo al histograma de frecuencias se puede observar que los datos no siguen una distribución normal, esta afirmación la someteremos a una prueba de hipótesis.

b. Variable densidad estimada Humboldt – Geogauge Humboldt [kN/m³]

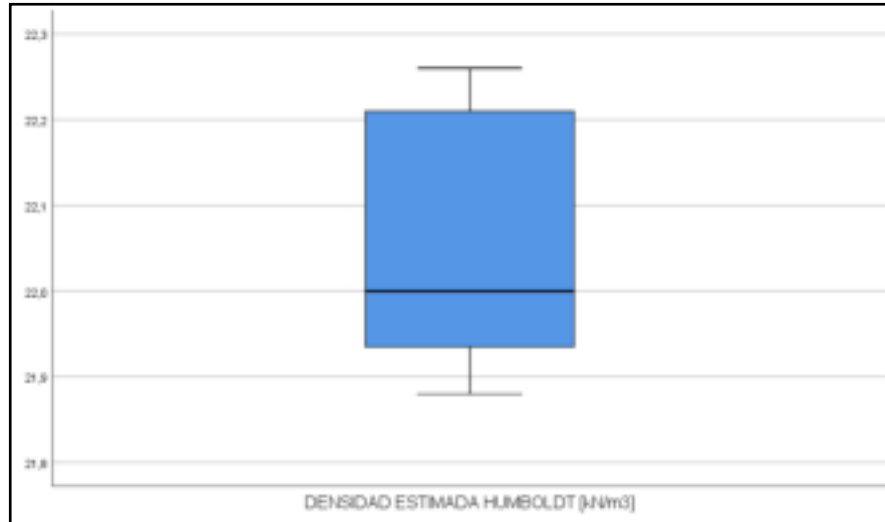
iv) CUADRO DE ESTADÍSTICOS

Resumen de procesamiento de casos						
	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [kN/m ³]	8	100,0%	0	0,0%	8	100,0%

Descriptivos				
			Estadístico	Error estándar
DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [kN/m ³]	Media		22,05375	0,052845
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	21,92879	
		Límite superior	22,17871	
	Media recortada al 5%		22,05194	
	Mediana		22,00000	
	Varianza		0,022	
	Desviación estándar		0,149469	
	Mínimo		21,880	
	Máximo		22,260	
	Rango		0,380	
	Rango intercuartil		0,287	
	Asimetría		0,448	0,752
	Curtosis		-1,844	1,481

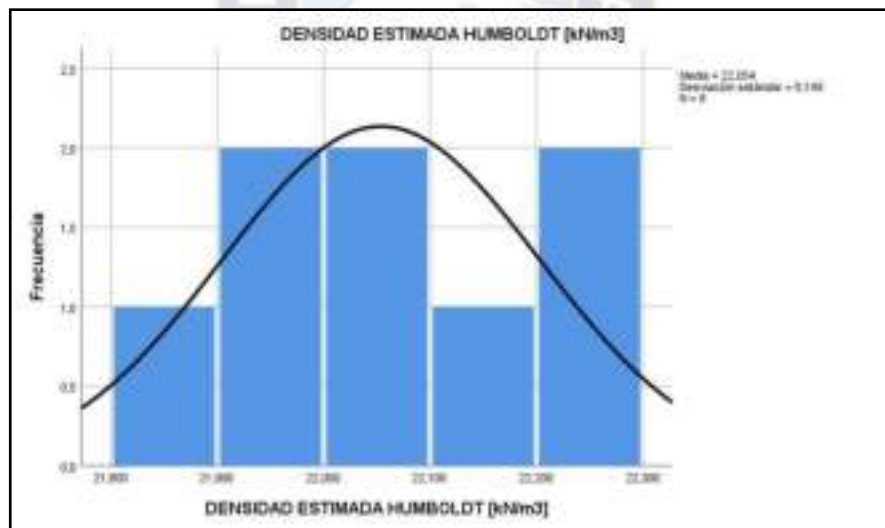
Tabla 41. Resumen de los Estadísticos de la variable Densidad seca estimada
Fuente: Software SSPS Statistics 26

v) DIAGRAMA DE CAJAS



Este diagrama de caja sirve para localizar puntos discordantes, ya que afectan las medidas de dispersión y cambian la distribución de los datos, en este caso en el grafico no se observan dichos puntos.

vi) HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS



De acuerdo al histograma de frecuencias se puede observar que los datos no siguen una distribución normal, esta afirmación la someteremos a una prueba de hipótesis.

6.6.1.2. Prueba de Hipótesis de Normalidad de las Variables

Se procede a realizar una prueba de hipótesis conjunta para determinar si nuestras variables siguen o no una distribución normal.

a) **Variables:** Densidad seca en campo por Cono de Arena, Densidad estimada por Humboldt

b) **Planteamiento de la hipótesis**

Ho: Los datos de las variables siguen una distribución normal.

Ha: Los datos de las variables no siguen una distribución normal.

c) Nivel de significancia

P-valor = 0.05 ó 5%

d) Estadístico de prueba

Como el número de ensayos son menores a 50, elegimos el estadístico Shapiro - Wilk

e) Valor de “p” o significancia

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
DENSIDAD SECA EN CAMPO [kN/m ³]	0,276	8	0,072	0,891	8	0,239
DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [kN/m ³]	0,265	8	0,102	0,869	8	0,146

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 42. Resumen de las pruebas de normalidad
 Fuente: Software SSPS Statistics 26

f) Decisión

Si el P – Valor o significancia es menor que 0.05, se RECHAZA “Ho”

Si el P – Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ho”

g) Variable Densidad Seca en Campo

Como P- Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ho”

h) Variable Densidad Estimada Humboldt

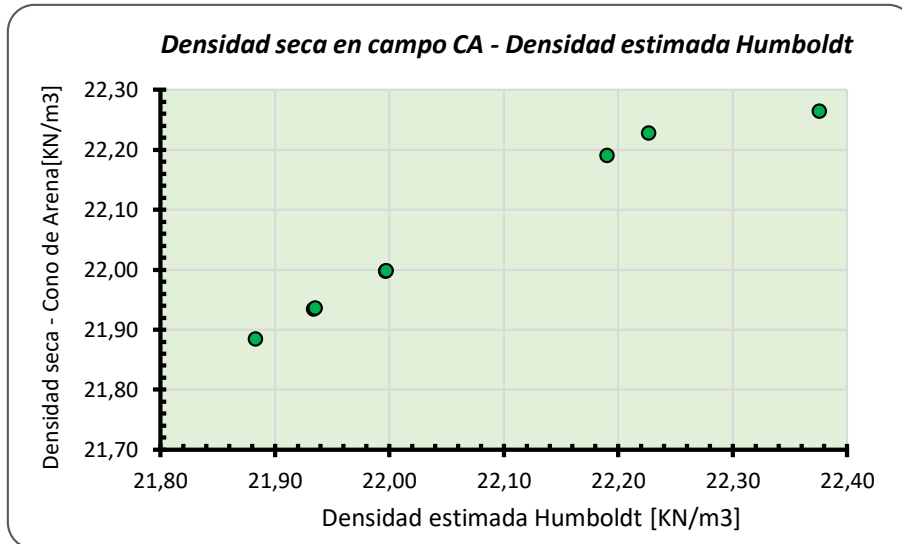
Como P- Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ho”

i) Conclusiones

Las variables siguen una distribución normal. En el siguiente análisis, se explicará de una mejor manera mediante la prueba de Pearson, ya que siguen una distribución normal según la significancia de Shapiro Wilk.

6.6.1.3. Prueba de Correlación entre Densidad Seca en Campo y Densidad Estimada Humboldt.

GRÁFICO DISPERSIÓN ENTRE VARIABLES



Gráfica 5. Dispersión de los valores de las variables
Fuente: Elaboración Propia

Se observa en el gráfico de dispersión, que los puntos tienen relación directa, la tendencia de los puntos sigue una recta. Por lo tanto, confirmamos que el análisis entre las variables tiene significancia, la prueba de correlación más adecuada es de Pearson. A continuación, se realizará una prueba de hipótesis para confirmar si hay o no correlación entre ambas variables.

i) PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA: DENSIDAD SECA EN CAMPO CONO DE ARENA Y DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT.

a) Variables: Densidad seca en campo por Cono de Arena y densidad estimada Humboldt.

b) Planteamiento de la hipótesis

Ho: no existe correlación entre ambas variables Densidad seca en campo y Densidad estimada Humboldt

Ha: existe correlación entre ambas variables Densidad seca en campo y densidad estimada Humboldt

c) Nivel de Significancia

Alfa = 0.01 ó 1%

e) Estadístico de prueba

Coefficiente de correlación de Pearson

f) Valor del coeficiente de Correlación

Correlaciones

		DENSIDAD SECA EN CAMPO [KN/m3]	DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [KN/m3]
DENSIDAD SECA EN CAMPO [g/cm3]	Correlación de Pearson	1	,980**
	Sig. (bilateral)		0,000
	N	8	8
DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [g/cm3]	Correlación de Pearson	,980**	1
	Sig. (bilateral)	0,000	
	N	8	8
DENSIDAD SECA EN CAMPO [g/cm3]	Rho de Spearman	1.000	1,000**
	Sig. (bilateral)	.	.
	N	8	8
DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [g/cm3]	Correlación de Pearson	1,00**	1.00

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 43. Resumen de las pruebas de correlación
Fuente: Software SSPS Statistics 26

El valor del coeficiente de Pearson es de $r = 0.980$ y ρ de Spearman= 1.000

Por lo tanto, de acuerdo a la tabla de rangos de Pearson y Spearman, existe un alto grado de correlación.

g) Valor de “p” o significancia

El valor de significancia es de $P=0.980$ y 1.000

h) Decisión

Si el P – Valor o significancia es menor que 0.01, se RECHAZA “Ha”

Si el P – Valor o significancia es mayor que 0.01, se ACEPTA “Ha”

Como P- Valor o significancia es mayor que 0.001, se ACEPTA “Ha” por lo tanto existe una correlación estadística entre las dos variables.

i) Conclusión

Se determinó que existe un alto grado de correlación, entre las dos variables. Por la tanto se determinará un modelo de regresión lineal y polinómica entre ambas variables.

6.6.1.4. Modelo de Regresión Lineal para el Valor: Densidad Seca en Campo y Densidad Estimada Humboldt.

Descripción del modelo	
Nombre de modelo	MOD_1
Variable dependiente	DENSIDAD SECA EN CAMPO [kN/m3]
Ecuación	LINEAL
Variable independiente	DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [kN/m3]
Constante	Incluido
Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos	Sin especificar

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0,980	0,960	0,954	0,038

La variable independiente es DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [kN/m3].

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	0,210	1	0,210	144,975	0,000
Residuo	0,009	6	0,001		
Total	0,218	7			

La variable independiente es DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [kN/m3].

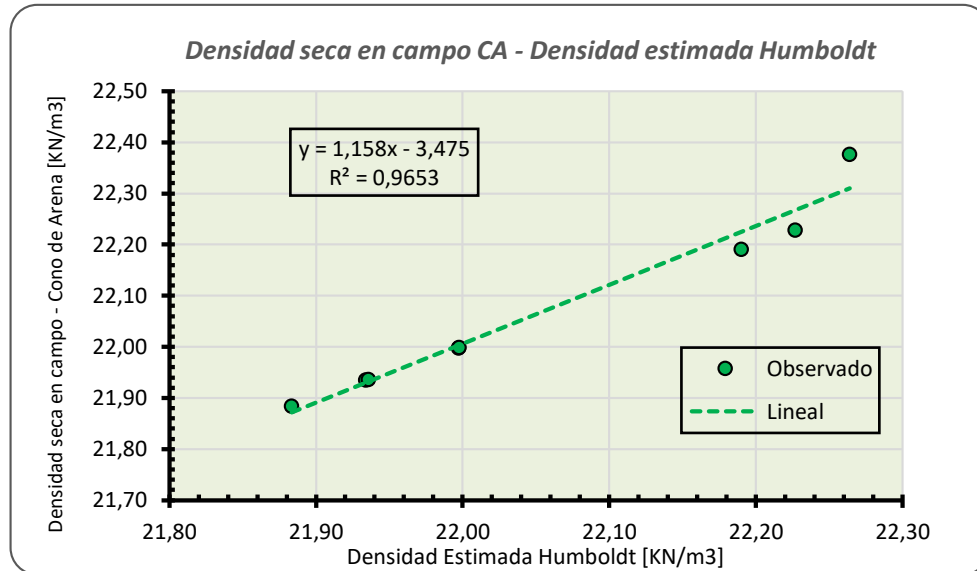
Coeficientes					
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
DENSIDAD ESTIMADA HUMBOLDT [kN/m3]	1,158	0,096	0,980	12,041	0,000
(Constante)	-3,475	2,122		-1,638	0,153

La variable dependiente es ln(DENSIDAD SECA EN CAMPO [kN/m3]).

La Ecuación del modelo es:

$$\rho_{GeoGauge} = 1.158 * \rho_{Humboldt} - 3.475$$

GRÁFICA DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL

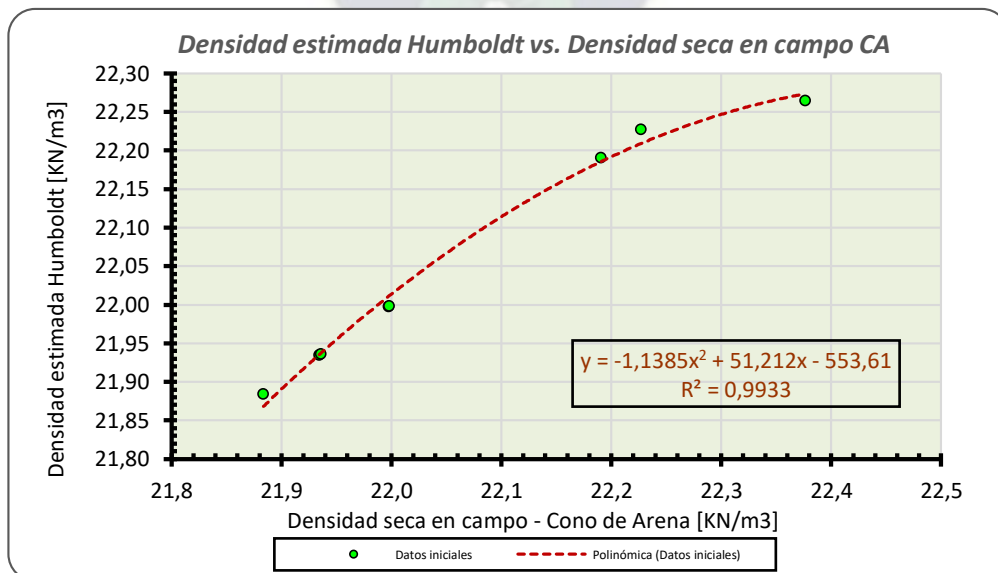


Gráfica 6. Correlación Lineal entre las variables
 Fuente: Elaboración Propia

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9653$, por lo tanto, la bondad del ajuste expresa que la Densidad de la Ecuación Humboldt predice en un 96.53% el valor de la densidad seca Cono de Arena.

El coeficiente de correlación $R = 0.980$, en este caso coincide con el coeficiente de Pearson debido a que el ajuste es lineal, por lo tanto, se concluye que la correlación entre ambas es directa y significativa.

GRÁFICA DEL MODELO DE REGRESIÓN POLINÓMICA DE SEGUNDO GRADO



Gráfica 7. Correlación Polinómica entre las variables
 Fuente: Elaboración Propia

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9933$, por lo tanto, la bondad del ajuste expresa que la Densidad de la Ecuación Humboldt predice en un 99.53% el valor de la densidad seca Cono de Arena. Dándonos una mejor correlación con el modelo polinómico de segundo grado.

El coeficiente de correlación $R = 0.996$, en este caso coincide con el coeficiente de Spearman debido a que el ajuste es polinómico de segundo grado, por lo tanto, se concluye que la correlación entre ambas es directa y significativa.

6.6.2. Validación del Modelo y Comparación con los Valores Medidos

La determinación de los valores para el modelo de correlación se realiza sustituyendo los valores estimados para la densidad de la ecuación de Humboldt. La validez estadística para comparar los resultados fue efectuado a través de un análisis aplicando una prueba t-student como criterio estadístico.

El modelo de cálculo para el ajuste lineal es la siguiente:

$$\rho_{GeoGauge} = 1.158 * \rho_{Humboldt} - 3.475 = 1.158 * 22.26 - 3.475 = 22.31 \left[\frac{KN}{m^3} \right]$$

El gráfico representativo entre estos valores se muestra en las curvas de correlación. (Ver Anexos "D")

Densidad Cono de Arena	Densidad Seca Humboldt	Densidad seca determinada Modelo de correlación, ρ Cono de Arena - GeoGauge
ρ_{CA}	$\rho_{Humboldt}$	$\rho_{GeoGauge}$
[KN/m3]	[KN/m3]	[KN/m3]
22,38	22,26	22,31
22,00	22,00	22,00
22,19	22,19	22,23
22,00	22,00	22,00
21,93	21,93	21,93
21,88	21,88	21,87
21,94	21,94	21,93
22,23	22,23	22,27

Tabla 44. Densidad Cono de Arena, densidad seca Humboldt
Fuente: Elaboración propia

El modelo de cálculo para la correlación polinómica hallada con un $R^2 = 0.9933$ es la siguiente:

$$\rho_{Humboldt} = -1.1385 * \rho_{C.A.}^2 + 51.212 * \rho_{C.A.} - 553.61$$

Resolviendo la ecuación de segundo grado para la densidad seca en campo por el método Cono de Arena, se tiene que:

$$\rho_{C.A.} = \frac{-51.212 \pm \sqrt{101.529 - 4.554 * \rho_{Humboldt}}}{-2.277} \left[\frac{KN}{m^3} \right]$$

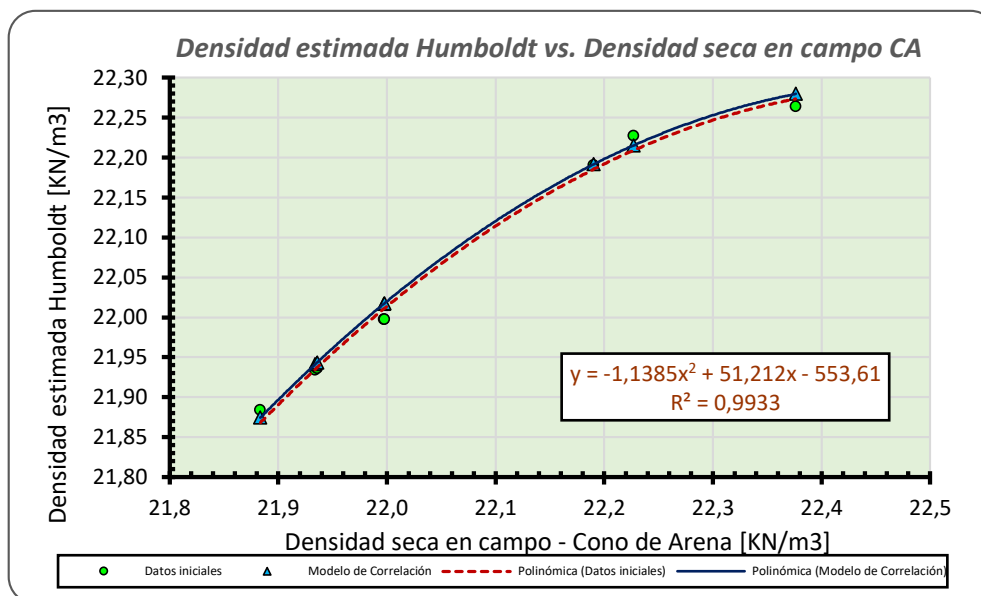
El modelo de cálculo es la siguiente, tomando valores positivos para la raíz cuadrada:

$$\rho_{C.A.} = \frac{-51.212 \pm \sqrt{101.529 - 4.554 * 22.26}}{-2.277} = 22.33 \left[\frac{KN}{m^3} \right]$$

Densidad Cono de Arena	Densidad Seca Humboldt	Modelo de correlación, Densidad Seca Cono de Arena - GeoGauge
ρ_{CA}	$\rho_{Humboldt}$	$\rho_{C.A.}$
[KN/m3]	[KN/m3]	[KN/m3]
22,38	22,26	22,33
22,00	22,00	21,98
22,19	22,19	22,19
22,00	22,00	21,98
21,93	21,93	21,93
21,88	21,88	21,89
21,94	21,94	21,93
22,23	22,23	22,25

Tabla 45. Modelo de correlación GeoGauge
 Fuente: Elaboración propia

El gráfico representativo entre los valores medidos originales y proyectados, nos indican una variación casi nula, comprobando una correlación alta y significativa.



Gráfica 8. Correlación Densidad estimada Humboldt - Densidad seca en campo CA
Fuente: Elaboración propia

6.6.3. Prueba de Correlación de Entre Módulo de Young Mediante el Método GeoGauge Humboldt H-4140, Densidad Seca en Campo Mediante el Método Cono de Arena y Rigidez Mediante el Método GeoGauge Humboldt H-4140.

La estimación para la densidad seca del terreno analizado, se realizó mediante el método cono de arena, la obtención de la rigidez, y el módulo de Young del material, se realizó mediante el equipo GeoGauge Humboldt H-4140, como se indicó en la tabla 36. (Ver Anexos "C")².

6.6.3.1. Cálculo de Estadísticos de las Variables

a. Variables: relación entre el módulo de Young por el método GeoGauge [MPa] y densidad seca en campo por el método Cono de Arena [KN/m³]

i) CUADRO DE ESTADÍSTICOS

Resumen de procesamiento de casos						
	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
MÓDULO DE YOUNG/DENSIDAD SECA EN CAMPO [MPa]/[KN/m ³]	8	100,0%	0	0,0%	8	100,0%

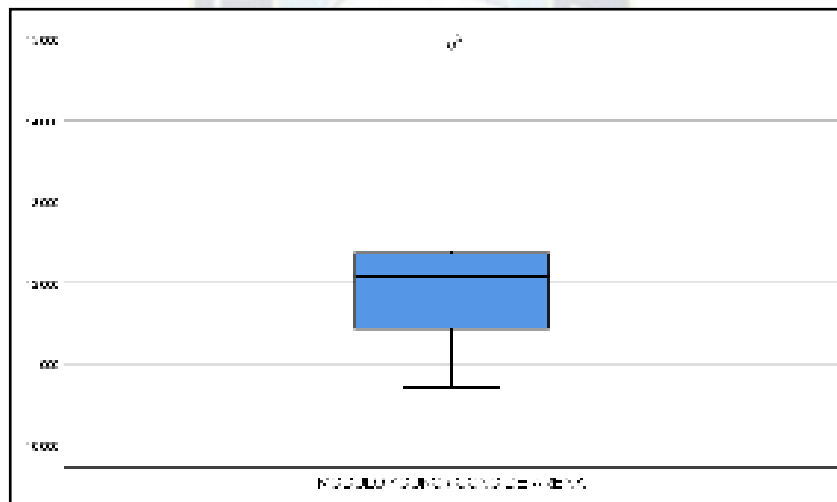
Descriptivos				
			Estadístico	Error estándar

² Valores obtenidos del cálculo de la densidad seca con el cono de arena, la rigidez y el módulo de Young con el equipo GeoGauge que se encuentra en Anexos Sección "C".

MÓDULO YOUNG / CONO DE ARENA [MPa]/[KN/m3]	Media		12,17500	0,450377
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	11,11003	
		Límite superior	13,23997	
	Media recortada al 5%		12,10444	
	Mediana		12,09000	
	Varianza		1,623	
	Desviación estándar		1,273858	
	Mínimo		10,700	
	Máximo		14,920	
	Rango		4,220	
	Rango intercuartil		1,170	
	Asimetría		1,451	0,752
	Curtosis		3,376	1,481

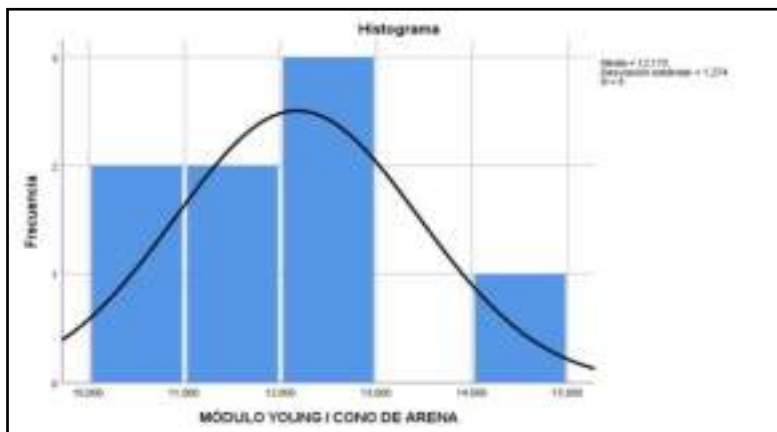
Tabla 46. Cuadro de Estadísticos de las variables
 Fuente: Software SSPS Statistics 26

ii) DIAGRAMA DE CAJA



Este diagrama de caja sirve para localizar puntos discordantes, ya que afectan las medidas de dispersión y cambian la distribución de los datos, en este caso en el grafico se observa un dicho punto.

iii) HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS



De acuerdo al histograma de frecuencias se puede observar que los datos no siguen una distribución normal, esta afirmación la someteremos a una prueba de hipótesis.

b. Variable módulo de rigidez por el método GeoGauge [MPa]

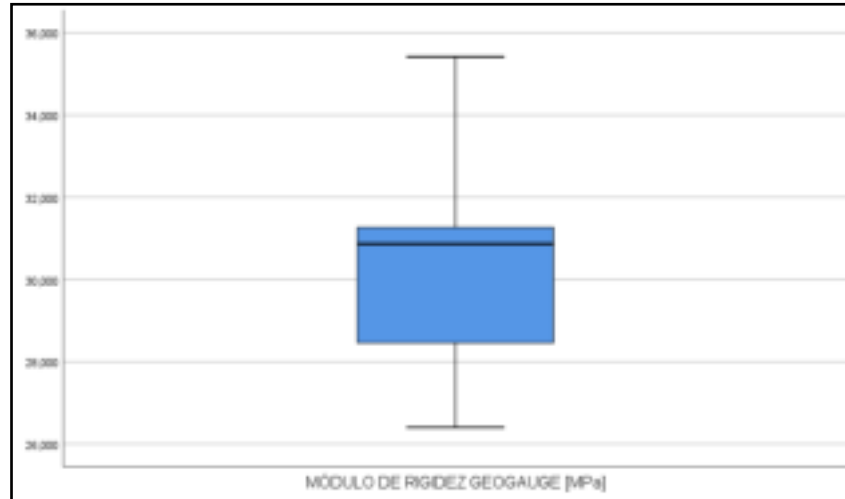
iv) CUADRO DE ESTADÍSTICOS

Resumen de procesamiento de casos						
	Casos					
	Válido		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
MÓDULO DE RIGIDEZ - GEOGAUGE [MPa]	8	100,0%	0	0,0%	8	100,0%

Descriptivos				
			Estadístico	Error estándar
MÓDULO DE RIGIDEZ GEOGAUGE [MPa]	Media		30,37625	1,005623
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	27,99833	
		Límite superior	32,75417	
	Media recortada al 5%		30,31694	
	Mediana		30,87000	
	Varianza		8,090	
	Desviación estándar		2,844332	
	Mínimo		26,400	
	Máximo		35,420	
	Rango		9,020	
	Rango intercuartil		3,733	
	Asimetría		0,162	0,752
	Curtosis		0,714	1,481

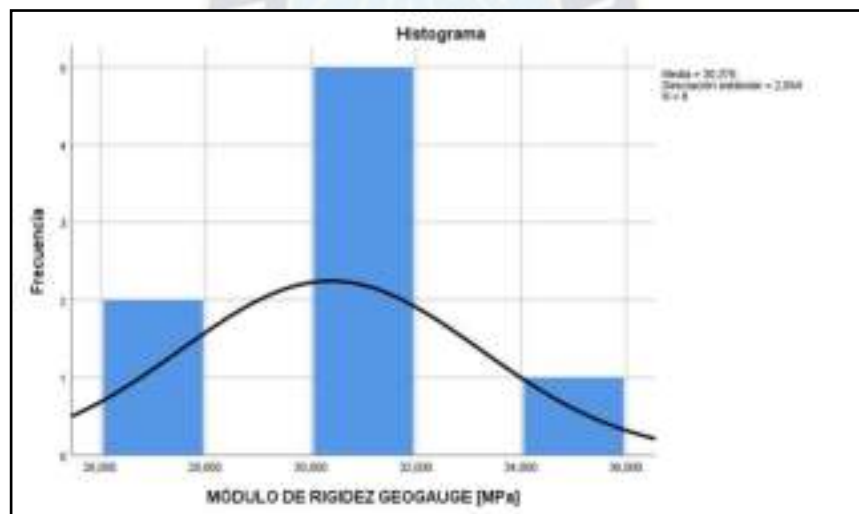
Tabla 47. Cuadro de Estadísticos de las variables
Fuente: Software SSPS Statistics 26

v) DIAGRAMA DE CAJA



Este diagrama de caja sirve para localizar puntos discordantes, ya que afectan las medidas de dispersión y cambian la distribución de los datos, en este caso en el gráfico no se observa dichos puntos.

vi) HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS



De acuerdo al histograma de frecuencias se puede observar que los datos no siguen una distribución normal, esta afirmación la someteremos a una prueba de hipótesis.

6.6.3.2. Prueba de Hipótesis de Normalidad de las Variables

Se procede a realizar una prueba de hipótesis conjunta para determinar si nuestras variables siguen o no una distribución normal.

a) **Variables:** Módulo de Young mediante el GeoGauge respecto a la Densidad seca en campo cono de arena y Rigidez mediante el GeoGauge.

b) **Planteamiento de la hipótesis**

Ho: Los datos de las variables siguen una distribución normal.

Ha: Los datos de las variables no siguen una distribución normal.

c) Nivel de significancia

P-valor = 0.05 ó 5%

d) Estadístico de prueba

Como el número de ensayos son menores a 50, elegimos el estadístico Shapiro - Wilk

e) Valor de “p” o significancia

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
MÓDULO DE YOUNG/ CONO DE ARENA [MPa]/[KN/m3]	0,308	8	0,025	0,844	8	0,083
MÓDULO DE RIGIDEZ GEOGAUGE [MPa]	0,233	8	0,200*	0,895	8	0,262

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 48. Cuadro de Normalidad de las variables
Fuente: Software SSPS Statistics 26

f) Decisión

Si el P – Valor o significancia es menor que 0.05, se RECHAZA “Ho”

Si el P – Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ha”

g) Variable Módulo Young / Densidad seca Cono De Arena

Como P- Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ho”

h) Variable Módulo de Rigidez GeoGauge

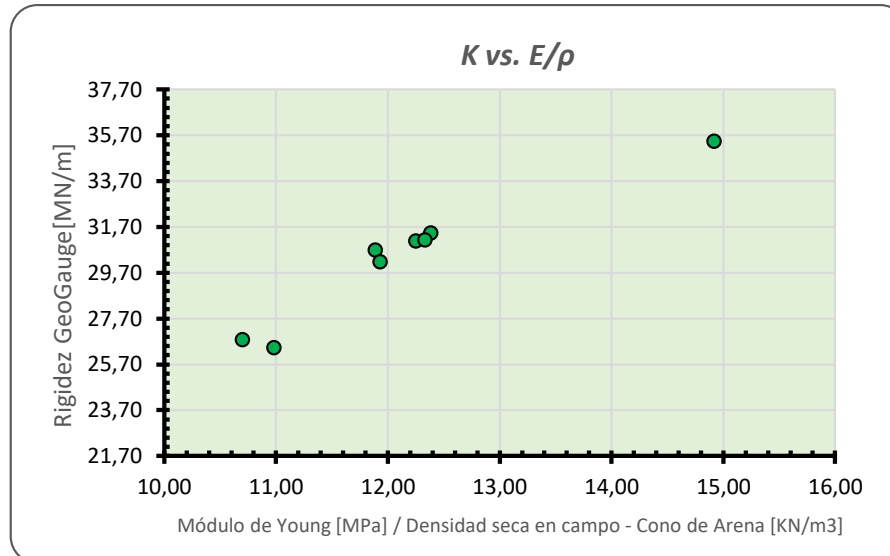
Como P- Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ho”

i) Conclusiones

Las variables siguen una distribución normal. Este análisis que se realizará se explicará de una mejor manera mediante la prueba de Spearman, ya que siguen una distribución normal según la significancia de Shapiro Wilk.

6.6.3.3. Prueba de Correlación entre Módulo Young / Cono de Arena y Módulo de Rigidez GeoGauge.

GRÁFICO DISPERSIÓN ENTRE VARIABLES



Gráfica 9. Dispersión de los valores de las variables
Fuente: Elaboración Propia

Se observa en el gráfico de dispersión, que los puntos tienen relación directa, la tendencia de los puntos sigue una recta o una curva. Por lo tanto, confirmamos que el análisis entre las variables, la prueba de correlación, la más adecuada es de Pearson. A continuación, se realizará una prueba de hipótesis para confirmar si hay o no correlación entre ambas variables.

a. PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA: ENTRE MÓDULO YOUNG / CONO DE ARENA Y MÓDULO DE RIGIDEZ GEOGAUGE.

a) **Variables:** Módulo de Young mediante el GeoGauge respecto a la Densidad seca en campo cono de arena y Rigidez mediante el GeoGauge.

b) Planteamiento de la hipótesis

Ho: no existe correlación entre ambas variables Módulo de Young / Densidad seca en campo y Rigidez.

Ha: existe correlación entre ambas variables Módulo de Young / Densidad seca en campo y Rigidez.

c) Nivel de Significancia

Alfa = 0.01 ó 1%

d) Estadístico de prueba

Coefficiente de correlación de Pearson

e) Valor del coeficiente de Correlación

Correlaciones			
		MÓDULO DE RIGIDEZ GEOGAUGE [MPa]	MÓDULO YOUNG [MPa] / CONO DE ARENA [KN/m3]
MÓDULO DE RIGIDEZ GEOGAUGE [MPa]	Coeficiente de correlación Pearson	1,000	,958*
	Sig. (bilateral)		0,000
	N	8	8
MÓDULO YOUNG [MPa] / CONO DE ARENA [KN/m3]	Coeficiente de correlación Pearson	,958**	1,000
	Sig. (bilateral)	0,000	
	N	8	8
MÓDULO DE RIGIDEZ GEOGAUGE [MPa]	Rho de Spearman	1,000	,952*
	Sig. (bilateral)		0,000
	N	8	8
MÓDULO YOUNG [MPa] / CONO DE ARENA [KN/m3]	Rho de Spearman	,952**	1,000

Tabla 49. Dispersión de los valores de las variables
Fuente: Software SSPS Statistics 26

f) El valor del coeficiente de Pearson es de $r = 0.958$ y ρ de Spearman = 0.952

Por lo tanto, de acuerdo a la tabla de rangos de Pearson y Spearman, existe un alto grado de correlación.

g) Valor de "p" o significancia

El valor de significancia es de $P=0.958$ y 0.952

h) Decisión

Si el P – Valor o significancia es menor que 0.01, se RECHAZA "Ho"

Si el P – Valor o significancia es mayor que 0.01, se ACEPTA "Ha"

Como P- Valor o significancia es mayor que 0.001, se ACEPTA "Ha" por lo tanto existe una correlación estadística entre las dos variables.

i) Conclusión

Se determinó que existe un alto grado de correlación, entre las dos variables. Por lo tanto se determinará un modelo de regresión polinómica entre ambas variables.

6.6.3.4. Modelo de Regresión Polinómica para el Valor: Entre Módulo Young / Cono de Arena y Módulo de Rigidez GeoGauge.

Descripción del modelo		
Nombre de modelo		MOD_7
Variable dependiente	1	MÓDULO DE RIGIDEZ GEOGAUGE [MPa]
Ecuación	1	Cuadrático
Variable independiente		MÓDULO YOUNG [MPa] / CONO DE ARENA [KN/m3]
Constante		Incluido
Variable cuyos valores etiquetan las observaciones en los gráficos		Sin especificar
Tolerancia para entrar términos en ecuaciones		0,0001

Resumen del modelo			
R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
0,988	0,977	0,967	0,514
La variable independiente es MÓDULO YOUNG / CONO DE ARENA.			

ANOVA					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	55,311	2	27,656	104,727	0,000
Residuo	1,320	5	0,264		
Total	56,632	7			

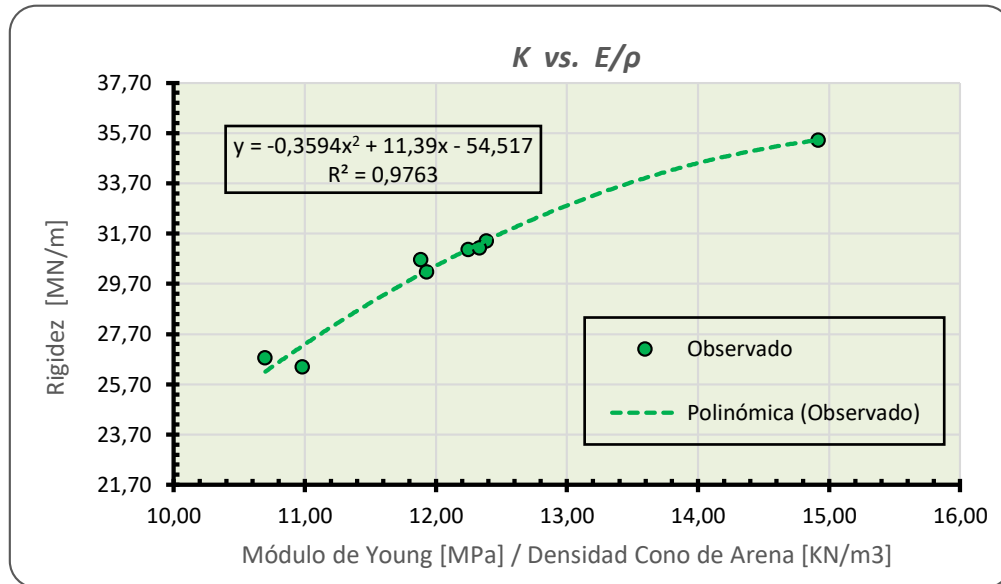
La variable independiente es MÓDULO YOUNG / CONO DE ARENA.

Coeficientes					
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Desv. Error	Beta		
MÓDULO YOUNG / CONO DE ARENA	11,361	2,618	5,088	4,340	0,007
MÓDULO YOUNG / CONO DE ARENA ** 2	-0,358	0,102	-4,137	-3,528	0,017
(Constante)	-54,325	16,726		-3,248	0,023

La Ecuación del modelo matemático es:

$$K_{GeoGauge} = -0.3594 * \left(\frac{E_{GeoGauge}}{\rho_{C.A.}} \right)^2 + 11.39 * \frac{E_{GeoGauge}}{\rho_{C.A.}} - 54.517$$

GRÁFICA DEL MODELO DE REGRESIÓN PÓLINOMICA



Gráfica 10. Modelo de Correlación entre las variables
Fuente: Elaboración Propia

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9763$, por lo tanto, la bondad del ajuste expresa que el módulo de rigidez respecto a la densidad del cono y Módulo de Young predice en un 97.63% el valor de la rigidez medida por el GeoGauge.

El coeficiente de correlación $R = 0.988$, en este caso coincide con el coeficiente de Spearman debido a que el ajuste es polinómico de segundo grado, por lo tanto, se concluye que la correlación entre ambas es directa y significativa.

6.6.3.5. Validación del Modelo y Comparación con los Valores Medidos

La determinación de los valores para el modelo de correlación se realiza sustituyendo los valores de la rigidez y módulo de Young medidos por el equipo GeoGauge. La validez estadística para comparar los resultados fue efectuado a través de un análisis aplicando una prueba t-student como criterio estadístico.³

³ Valores obtenidos del cálculo de la densidad, Módulo de Young y Rigidez obtenidos en campo por el equipo GeoGauge que se encuentra en Anexos Sección "C".

Densidad Cono de Arena	Módulo de Young del equipo GeoGauge	Rigidez del equipo GeoGauge
ρ_{CA}	$E_{GeoGauge}$	$K_{GeoGauge}$
[KN/m ³]	[MPa]	[MN/m]
22,38	266,02	30,67
22,00	272,47	31,41
22,19	237,45	26,75
22,00	269,50	31,07
21,93	327,22	35,42
21,88	269,96	31,12
21,94	261,72	30,17
22,23	244,15	26,40

Tabla 50. Módulo de Young del equipo GeoGauge
Fuente: Elaboración Propia

Resolviendo la ecuación de segundo grado para la densidad seca en campo por el método Cono de Arena, se tiene que:

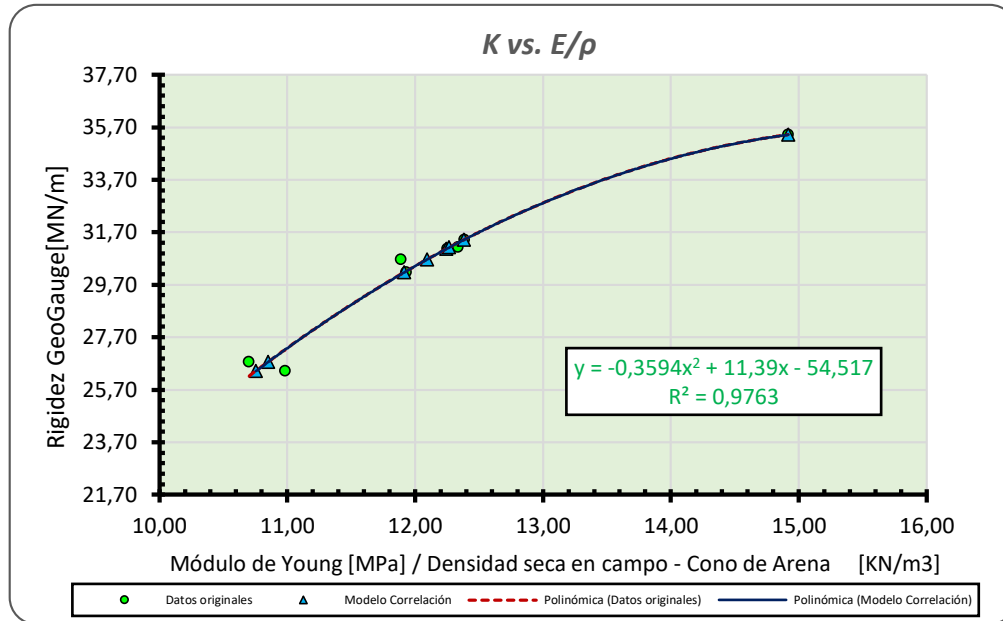
$$\rho_{C.A.} = \frac{-E_{GeoGauge} * 0.7188}{-11.39 \pm \sqrt{51.3584 - 1.4376 * K_{GeoGauge}}}$$

El modelo de cálculo es la siguiente:

$$\rho_{C.A.} = \frac{-266.02 * 0.7188}{-11.39 \pm \sqrt{51.3584 - 1.4376 * 30.67}} = 22.00 \left[\frac{\text{MPa}}{\text{MN/m}} \right]$$

Densidad Cono de Arena	Modelo de correlación obtenida para la Densidad Cono de Arena Módulo de Young - Rigidez
ρ_{CA}	$\rho_{C.A.}$
[KN/m ³]	[MPa]
22,38	22,00
22,00	22,01
22,19	21,89
22,00	22,01
21,93	21,93
21,88	22,01
21,94	21,97
22,23	22,71

Tabla 51. Modelo de correlación obtenida para la Densidad Cono de Arena Módulo de Young - Rigidez
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 11. Modelo de Correlación entre las variables
Fuente: Elaboración Propia

El gráfico representativo entre los valores medidos originales y proyectados, nos indican una variación casi nula, comprobando una correlación alta y significativa.

6.6.4. Prueba de Correlación de entre la Variable Densidad Seca en Campo Mediante el Método Cono de Arena [KN/m3] y Módulo de Campo Mediante el Método LWD.

6.6.4.1. Prueba de Hipótesis de Normalidad de las Variables

Se procede a realizar una prueba de hipótesis conjunta para determinar si nuestras variables siguen o no una distribución normal.

a) Variables: Módulo de Elasticidad LWD, Densidad seca en campo por Cono de Arena

b) Planteamiento de la hipótesis

H₀: Los datos de las variables siguen una distribución normal.

H_a: Los datos de las variables no siguen una distribución normal.

c) Nivel de significancia

P-valor = 0.05 ó 5%

d) Estadístico de prueba

Como el número de ensayos son menores a 50, elegimos el estadístico Shapiro – Wilk

e) Valor de “p” o significancia

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
MÓDULO DE ELASTICIDAD LWD CORR. [MPa]	0,177	8	,200*	0,969	8	0,888
DENSIDAD SECA EN CAMPO [kN/m ³]	0,276	8	0,072	0,891	8	0,239

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 52. Pruebas de normalidad
 Fuente: Elaboración Propia

f) Decisión

Si el P – Valor o significancia es menor que 0.05, se RECHAZA “Ho”

Si el P – Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ho”

g) Variable Módulo de elasticidad LWD

Como P- Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ho”

h) Variable Densidad Seca en Campo

Como P- Valor o significancia es mayor que 0.05, se ACEPTA “Ho”

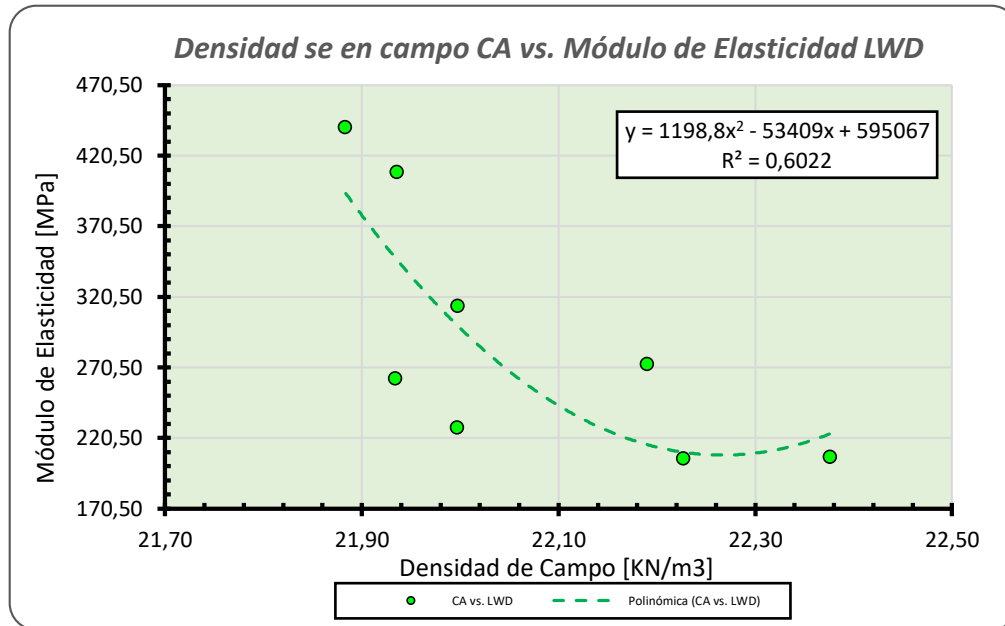
i) Conclusiones

Las variables siguen una distribución normal. Este análisis que se realizara se explicara de una mejor manera mediante la prueba de Pearson. Como sabemos si sus significancias son mayores a 0.05 se dará una correlación lineal, como se muestra en el grafico:

La Ecuación del modelo matemático es:

$$E_{LWD} = 1198.8 * \rho_{C.A.}^2 - 53409 * \rho_{C.A.} + 595067$$

GRÁFICA DEL MODELO DE REGRESIÓN POLINÓMICA



Gráfica 12. Gráfica del modelo de regresión polinómica
 Fuente: Elaboración Propia

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.602$, por lo tanto, la bondad del ajuste expresa que el Módulo elástico LWD en un 60.22% el valor de la densidad seca Cono de Arena.

El coeficiente de correlación $R = 0.766$, en este caso coincide con el coeficiente de Spearman debido a que el ajuste es polinómico de segundo grado, por lo tanto, se concluye que la correlación es moderada aceptable.

6.6.4.2. Validación del Modelo y Comparación con los Valores Medidos

La determinación de los valores para el modelo de correlación se realiza sustituyendo los valores estimados para la densidad seca en campo con los módulos de elasticidad LWD en campo. La validez estadística para comparar los resultados fue efectuado a través de un análisis aplicando una prueba t-student como criterio estadístico.⁴

⁴ Valores obtenidos del cálculo de la densidad, Módulo de Elasticidad obtenidos en campo por el equipo Deflectómetro Liviano de Impacto que se encuentra en Anexos Sección "C".

Densidad seca en campo - Cono de Arena		Módulo de Elasticidad LWD	
N°	[kN/m ³]	N°	[MPa]
1	22,38	1	207,01
2	22,00	2	227,49
3	22,19	3	272,76
4	22,00	4	313,68
5	21,93	5	262,56
6	21,88	6	440,27
7	21,94	7	408,63
8	22,23	8	205,93

Tabla 53. Densidad seca en campo y Módulo de Elasticidad LWD
Fuente: Elaboración Propia

Resolviendo la ecuación de segundo grado para la densidad seca en campo por el método Cono de Arena, se tiene que:

$$\rho_{C.A.} = \frac{53409 \pm \sqrt{-943997.4 + 4795.2 * E_{LWD}}}{2397.6}$$

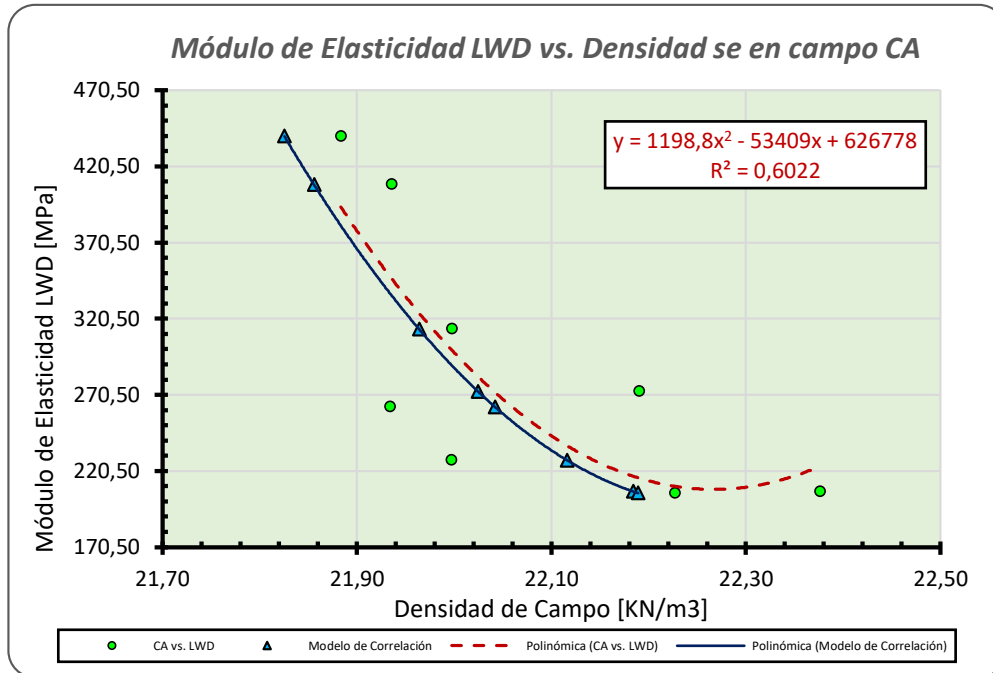
El modelo de cálculo es la siguiente:

$$\rho_{C.A.} = \frac{53409 \pm \sqrt{-943997.4 + 4795.2 * 207.01}}{2397.6} = 22.18 \text{ [MPa]} = \left[\frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \right]$$

Como se puede observar en los valores de validez, estos hacen notar una correlación alta entre ambas.

Modelo de correlación para la Densidad seca mediante Módulo de Elasticidad LWD	
N°	[MPa]
1	22,18
2	22,12
3	22,02
4	21,96
5	22,04
6	21,83
7	21,86
8	22,19

Tabla 54. Modelo de correlación para la Densidad seca mediante Módulo de Elasticidad LWD
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 13. Correlación Densidad seca en campo CA vs. Módulo de Elasticidad LWD
 Fuente: Elaboración Propia

El gráfico representativo entre los valores medidos originales y proyectados, nos indican una variación significativa, comprobando una correlación moderada aceptable.

CAPITULO 7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

7.1.1. Contenido de Humedad

Se logró determinar el contenido de humedad higroscópica de las muestras del suelo del tramo de prueba, el valor es importante de la humedad ya que explica el comportamiento de este al presentar buena gradación en los materiales y una buena estabilidad mecánica. Entonces trata de un suelo granular. Esta humedad es adecuada para los siguientes ensayos de granulometría y Cono de Arena.

Resumen Ensayo Contenido de Humedad ASTM D1556	
Ensayo	Promedio Contenido de Humedad [%]
Granulometría	1,47
Cono de arena	3,5

Tabla 55. Resumen Ensayo Contenido de Humedad ASTM D1556
Fuente: Elaboración Propia

7.1.2. Granulometría

Para el presente proyecto de grado se realizó el ensayo de granulometría, de la muestra, que fue tomada del tramo de prueba, según a las Especificaciones Técnicas del Proyecto "Construcción Doble vía El Alto – Viacha" y el Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) (ETG 2 – 06) para la conformación de la capa subbase, la planilla de los resultados y los registros obtenidos se encuentra en el Anexo A.

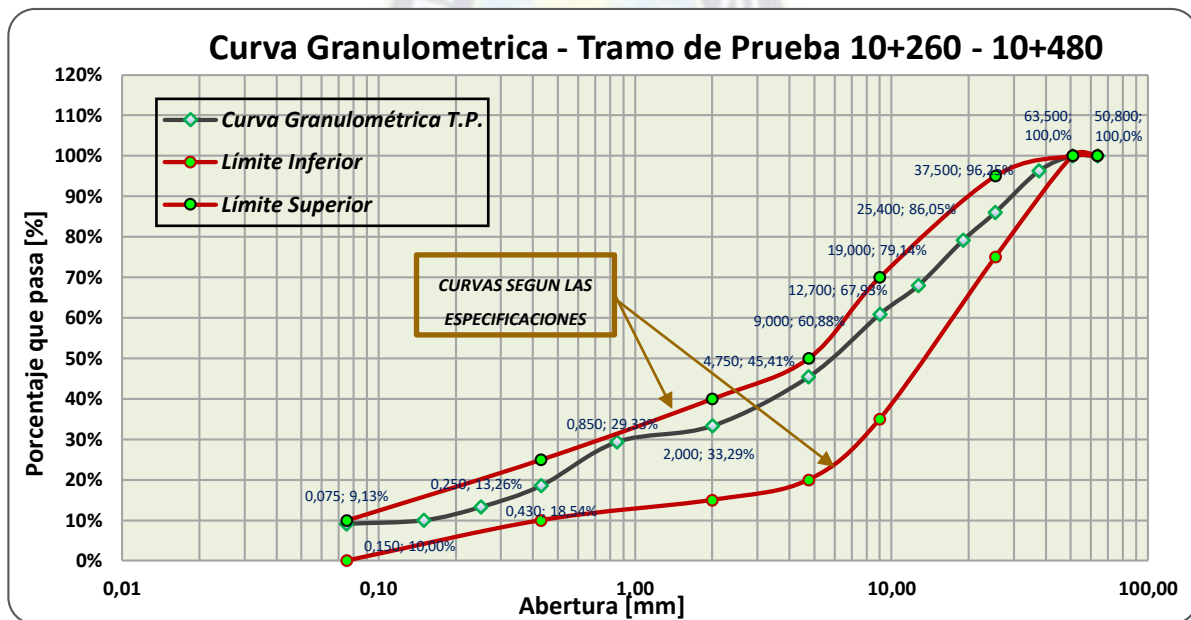
Resumen del Análisis Granulométrico				
Tamices	Aberturas	% que Pasa	Especificación ETG2-06 Gradación B	
No.	[mm]			
2"	50,8	100,00	100	100
1 1/2"	38,1	96,25		
1"	25,4	86,05		
3/4"	19,1	79,14		
1/2"	12,7	67,93		
3/8"	9,52	60,88		
No. 4	4,76	45,41	25	55
No. 10	2	33,29		
No. 20	0,84	29,33		
No. 40	0,42	18,54		
No. 60	0,25	13,26		
No. 100	0,105	10,00		
No. 200	0,074	9,13	0	10
ETG 2-06		Cumple		

Tabla 56. Resumen del Análisis Granulométrico
Fuente: Elaboración Propia

Del análisis granulométrico del material granular se determinó que tiene un diámetro máximo menor a 75 [mm] utilizado para la conformación de la capa subbase, además se puede evidenciar que las curvas granulométricas se encuentran dentro de la faja granulométrica, por tal razón se verifica que el material granular para la capa subbase cumple con lo establecido según las Especificaciones Técnicas del Proyecto y el Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción (ETG 2 – 06) de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

Composición de la muestra	
%Gravas	54,59%
%Arenas	36,28%
%Finos	9,13%
TOTAL	100%

Tabla 57. Composición de la muestra
 Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 14. Curva Granulométrica - Tramo de Prueba 10+260 - 10+480
 Fuente: Elaboración Propia

7.1.3. Límites de Atterberg

Para el suelo granular del tramo de prueba de la “Construcción Doble Vía El Alto - Viacha, se determinó los límites de consistencia de Atterberg, donde se definió la plasticidad respetando indicaciones según las especificaciones técnicas del proyecto y el manual de especificaciones técnicas Generales de Construcción ETG 2 – 06 de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) para la capa subbase.

Se obtuvieron dos valores de LL (Límite líquido), la primera realizando la regresión en la gráfica %h vs. No de Golpes, hallando el valor correspondiente del porcentaje de humedad para 25 golpes,

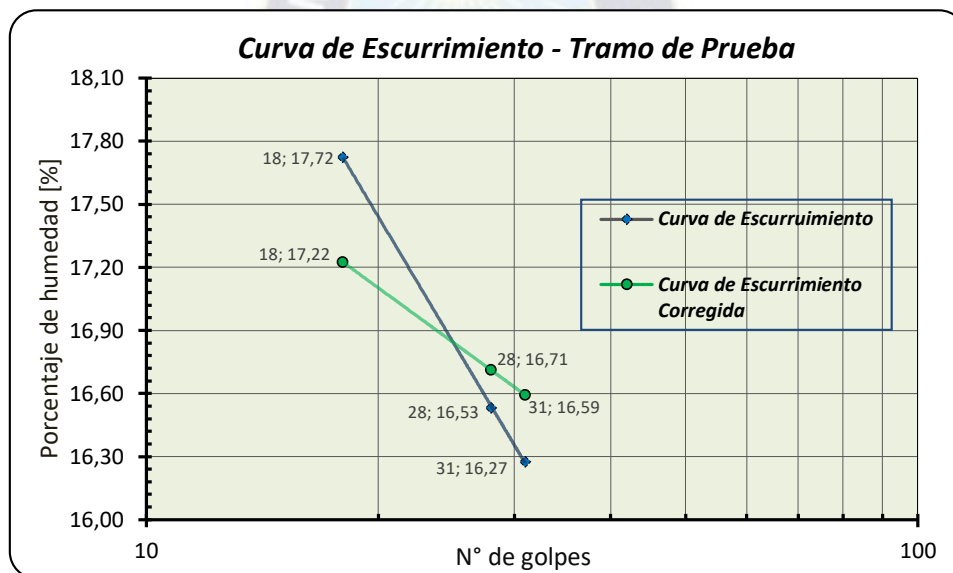
proyectando esa recta en la gráfica nos dio como resultado **LL=16.84 %**. Otra forma de determinar el LL (límite líquido) es analíticamente utilizando las ecuaciones descritas en planilla cuyo valor fue **LL=16.85 %**, aceptando el ensayo. (ver Anexo A).

Se obtuvo un valor de límite plástico LP= **16.85**, y un LP= **10.86** hallando así:

Índice de Plasticidad: $IP = LL - LP = 5.99$

Resumen del Ensayo de Limites de Consistencia			Especificación ETG2-06	
Límite Líquido	[%]	16,85	≤ 25 %	Cumple
Límite Plástico	[%]	10,86		
Índice de Plasticidad	[%]	5,99	≤ 6 %	Cumple

Tabla 58. Resumen del Ensayo de Limites de Consistencia
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 15. Curva de Esguimiento - Tramo de Prueba
Fuente: Elaboración Propia

7.1.4. Clasificación de la Capa Subbase del Tramo de Prueba según la AASTHO y ASTM.

Se estableció la clasificación del suelo según el sistema AASTHO, atendiendo la granulometría obtenida:

- El 35% o menos pasa por el tamiz N° 200, entonces se trata de un suelo Granular.
- Por el tamiz N° 10 (2,0 mm) debe ser 50% máximo = **18.54%**.
- Por el tamiz N° 40 (0,425mm) debe ser 30% máximo = **18.54%**.

- Por el tamiz N° 200 (0,075mm) debe ser 15% máximo = **9.13%**
- El IP tiene que ser 6 máximo, **IP= 5.99**
- Estos valores indican que el suelo pertenece al Grupo A1.
- Lo cual indica que pertenece al Subgrupo A-1-b, que contiene fragmentos de roca, grava y arena.

Se estableció la clasificación del suelo según el sistema AASTHO y ASTM, según a la granulometría obtenida:

- Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm) = **54.6 %**
- Determinar Coeficiente de Uniformidad (C_u) y Coeficiente de curvatura (C_c), como C_c es mayor a 4 y C_c esta entre 1 y 3 entonces es **GW**.
- Gravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC, según al porcentaje de la arena obtenida en el ensayo de granulometría = **36.28 %**, como es mayor a 15% entonces su símbolo es **GM**.

El suelo se caracterizó por material de grano grueso el cual fue utilizado en la conformación de la capa subbase del tramo estudiado. (ver Anexos A)

Resumen de la Clasificación del suelo									
AASHTO M154					ASTM M154				
General	Grupo	Índice de Grupo	Características Principales	Características como subgrado	General	Símbolo de Grupo	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$	$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$	Nombre de grupo
Material granular	A1a	(0)	Fragmentos de Roca. Grava y Arena	Excelente a bueno	Suelos de grano grueso – Gravas limpias	GW	120	1.2	GM (Grava bien graduada con limo y arena)

Tabla 59. Resumen de la Clasificación del suelo
Fuente: Elaboración Propia

Los ensayos de caracterización son muy importantes para la aceptación del suelo que deben cumplir con las especificaciones del proyecto y pueda ser empleado para la capa subbase de la estructura de un pavimento, para el presente estudio se conformó una capa subbase de 20 [cm] en la construcción de pavimento rígido de la doble vía El Alto – Viacha

La adecuada clasificación permitió tener una primera idea acerca del comportamiento del suelo, en esta ocasión al ser granular da a entender que es un material que tiene una buena gradación cumpliendo

con las especificaciones técnicas de la obra y su influencia se vio en un análisis de resistencia las cuales son mayores.

7.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS

7.2.1. Ensayo de Compactación – Relaciones de Peso Unitario y Humedad en los Suelos Método Modificado.

Se realizó la preparación para las cuatro porciones según al *Manual ABC Volumen 4, Ensayos de Suelos y materiales SO403*, en cual indica que se debe realizar la prueba en las mismas condiciones en que se encuentre el material en el tramo de la obra en estudio, este se aplica únicamente, a suelos con mayor del 20% en peso de partículas retenidas en el tamiz de 3/8" y menos del 30 % en peso de partículas retenidas en el tamiz de 3/4", para el presente ensayo el material granular analizado se encuentra en el rango establecido anteriormente. Además, se observó que la disminución de humedad, fue a causa del transporte, pero cabe notar que el suelo no tenía una humedad alta al tratarse de un material granular. La variación de humedad puede llegar hasta un 8% en comparación a la humedad que registra el suelo natural.

Para la muestra ensayada del tramo de prueba, según la clasificación AASTHO T-180 D, este suelo pertenece al grupo A-1-a (0). Con los resultados obtenidos se llega a utilizar el método D. Obteniendo como resultados los valores mostrados en el recuadro.

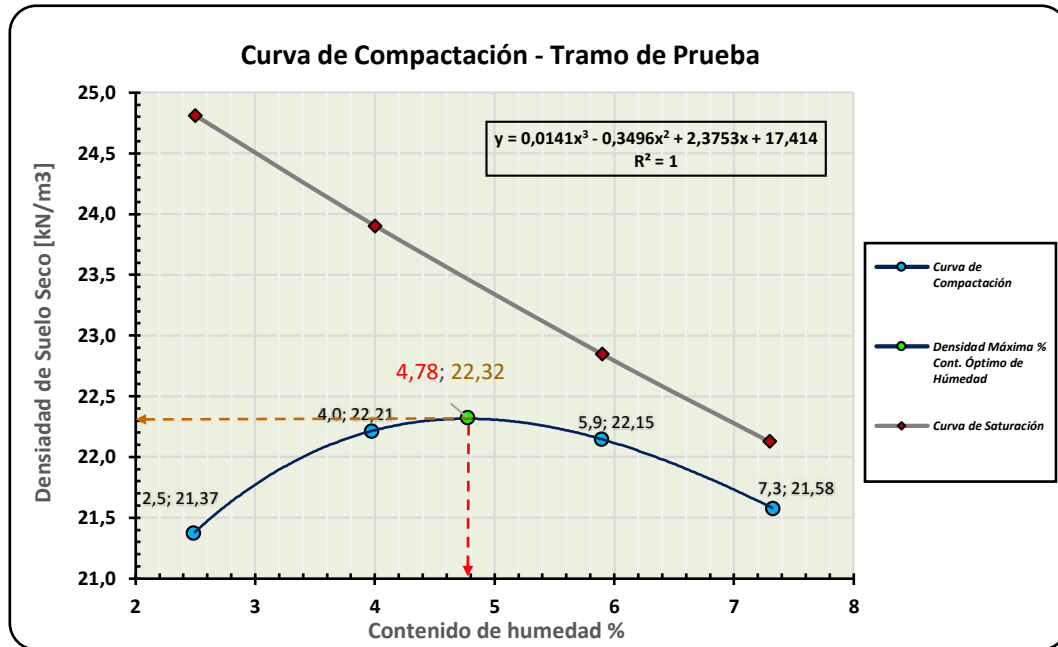
Resumen del Ensayo Proctor Modificado	
% H óptima	4,78
Densidad seca máx. [kN/m3]	22,32

Tabla 60. Resumen del Ensayo Proctor Modificado
 Fuente: Elaboración Propia

Se debe aclarar que, si analizamos un mismo suelo con distintas energías de compactación, vemos que la humedad óptima cambia de acuerdo a la energía que se emplee. En consecuencia, se alcanza una humedad óptima mayor y densidad seca máxima menor, cuanto menor sea la energía de compactación aplicada, con mayores energías de compactación se deduce que se alcanza humedades óptimas menores y densidades secas máximas mayores. El suelo evaluado se realizó por el método AASTHO T-180D, por consiguiente, se utilizó una energía de compactación mayor.

La curva de saturación es una curva de vacíos cero, reemplazados con agua comprendida con una saturación al 100%. Se realizó la curva para un suelo granular con una gravedad específica de: $G_s=2.7$, se ve claramente que la curva es paralela y no choca al descenso de la curva de compactación, con una saturación del 90%, entonces se aceptó el ensayo.

Por medio de los cuales se puede apreciar una curva de compactación de forma acampanada indicando que la humedad óptima se alcanza en 4.78%. Logrando una compactación máxima seca en laboratorio de 22.32 [kN/m³]. (ver Anexos B).



Gráfica 16. Curva de Compactación - Tramo de Prueba
Fuente: Elaboración Propia

7.2.2. Ensayo Relación de Soporte del Suelo en el Laboratorio (CBR de Laboratorio)

Para el presente proyecto de grado se realizó el ensayo de laboratorio, este ensayo determina un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte California (CBR). El ensayo se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables, el ensayo es aplicable a todos aquellos suelos que contengan una cantidad limitada de material que pasa por el tamiz de 2" (50 mm) y es retenido en el tamiz ¾" (19 mm). Cuando el tamaño máximo absoluto del material en estudio sea superior a ¾" (19 mm), el peso retenido en este tamiz se reemplazará por un equivalente de material de la misma muestra que pasa por ¾" (19 mm) y es retenido en N° 4 (4.75mm). La muestra fue tomada del tramo de prueba, como establece las Especificaciones Técnicas del Proyecto y Manual ABC Volumen 4, Ensayos de Suelos y materiales SO404 para la conformación de la capa subbase, la planilla y resultados se encuentran en el Anexo B.

El ensayo del índice de soporte californiano (CBR) para el presente proyecto de grado se realizó conforme al método AASHTO T-193; con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180 D; el resumen de los ensayos de laboratorio se presenta a continuación:

Resumen Ensayo CBR de Laboratorio				
Capa	Detalle CBR %	CBR %	Según ETs.	
SUBBASE	100	98	≥ 90%	Cumple
SUBBASE	97	58	≥ 40%	Cumple

Tabla 61. Resumen Ensayo CBR de Laboratorio
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar el material granular de la capa subbase colocado de acuerdo a los ensayos realizados cumplen con lo exigido según las especificaciones ETG 2- 06 y las especificaciones técnicas del proyecto, para la conformación de la capa subbase.

7.2.3. Ensayo Densidad en Sitio por el Método Cono de Arena

Finalizado el compactado del material de la capa subbase y la realización del control geométrico, se procedió a controlar el grado de compactación, para esto se realizaron ensayos de densidad de campo (in-situ) para controlar el grado de compactación de la capa subbase, de acuerdo a las Especificaciones Técnicas del Proyecto y el Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción (ETG 2 – 06) de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), el valor mínimo aceptable es un valor mínimo de 97% de compactación; en caso de no cumplimiento se procedía a re compactar el material de la capa subbase y realizar otros trabajos hasta su cumplimiento.

Para hallar la densidad seca en campo, se realizó el ensayo en ocho puntos del tramo de prueba mostrados en la Figura 12. Para esto primeramente se determinó la calibración del equipo dando como resultados:

Resumen de la Calibración del Equipo y de la Arena		
Densidad aparente de la Arena	[g/cm ³]	1,489
Masa de la Arena + Cono	[g]	1608

Tabla 62. Resumen de la Calibración del Equipo y de la Arena
Fuente: Elaboración Propia

Es claro hacer notar que este ensayo de calibración es muy importante para posteriores cálculos y este debe estar disponible para ser usado en campo. **(ver Anexos B)**

Posteriormente en campo se obtuvo los siguientes resultados:

Resúmen de los ensayos de Densidad seca en campo – Cono de Arena y el Grado de Compactación									
N° Ensayo		1	2	3	4	5	6	7	8
Progresiva de Ensayo		10+260	10+290	10+320	10+350	10+380	10+410	10+450	10+480
Capa		Subbase	Subbase	Subbase	Subbase	Subbase	Subbase	Subbase	Subbase
Espesor	[cm]	20	20	20	20	20	20	20	21
Lado		Izquierda	Central	Derecha	Izquierda	Central	Derecha	Izquierda	Izquierda
Densidad seca material que pasa 3/4", $D_{sp} = \frac{M_{msp}}{V_p}$	[g/cm ³]	2,28173	2,24309	2,26279	2,24314	2,23667	2,2315	2,23682	2,26653
Densidad máxima de laboratorio, $D_{máx.} =$	[g/cm ³]	2,276	2,276	2,276	2,276	2,276	2,276	2,276	2,276
Grado de Compactación, $G.C. = \frac{(D_{sp}/D_{máx.}) * 100}{100}$	[%]	100,252	98,5539	99,4196	98,5562	98,2718	98,0449	98,2787	99,5838

Tabla 63. Resúmen de los ensayos de Densidad seca en campo – Cono de Arena y el Grado de Compactación
Fuente: Elaboración Propia

Se ve claramente en el cuadro que los ocho valores en cada punto que se realizó el ensayo, el Grado de Compactación es mayor al requerido del 97% en capa subbase según las especificaciones técnicas. (ver Anexos B).

7.3. ENSAYO DEFLECTÓMETRO LIVIANO DE IMPACTO (LWD) PRIMA - 100

Para aplicar el análisis del Grado de Compactación se aplicó el método descrito por el Manual N-MMP-1-16/20, realizado por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México, basados en las normas AASHTO TP123-01; AASHTO TP456-01 Y ASTM E2583-07

Primeramente, se determinó el módulo de laboratorio para dos alturas de caída, la máxima y la media que marca la barra guía del equipo Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD), adecuándolo a la concepción de la **fuerza de impacto de 10 [kg]**, lo que se refiere al manual descrito, tomando datos según el coeficiente de variación $\leq 10\%$.

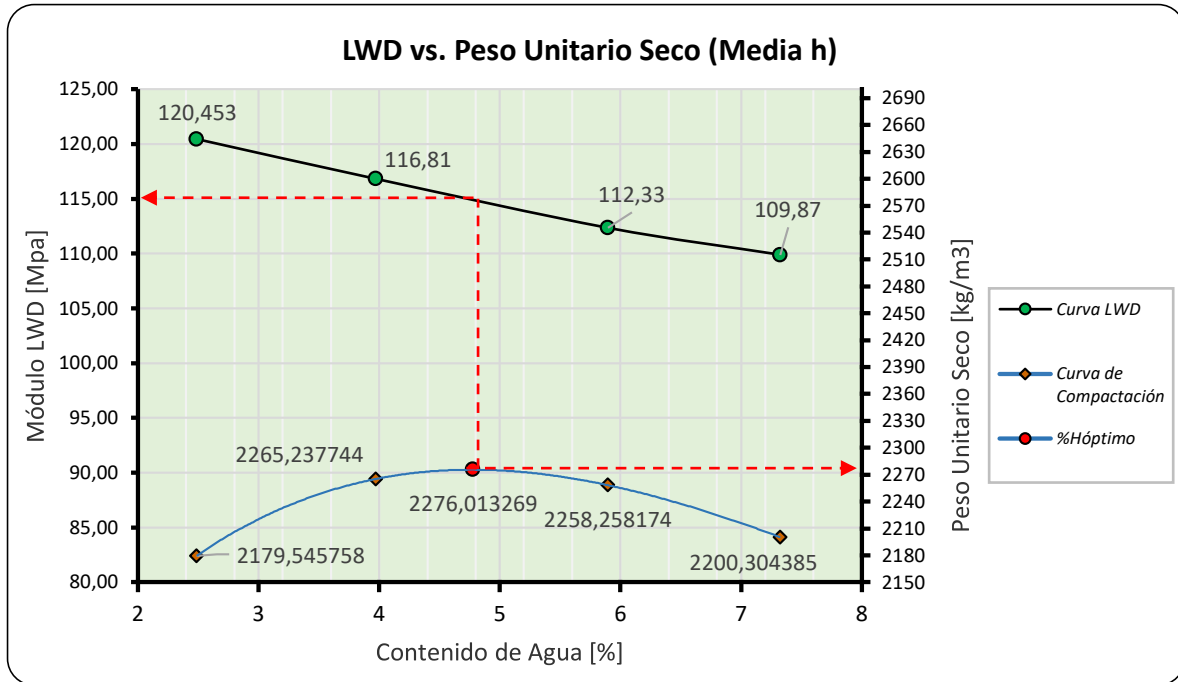
Dando como resultado los valores promedio de los módulos de laboratorio en los 4 moldes ensayados de 6", según el ensayo Proctor modificado, que se muestran en tabla 64:

Tabla resumen del promedio de los módulos en laboratorio						
N° MOLDE	Para una altura media			Para una altura máxima		
	k [N/mm]	$E_{LWD_{Lab}}$	$P_{LWD_{Lab}}$ [MPa]	k [N/mm]	$E_{LWD_{Lab}}$	$P_{LWD_{Lab}}$ [MPa]
1	52994,01	119,818	120,453	76923,08	173,922	170,588
	52837,57	119,465		74491,68	168,424	
	53992,02	122,075		74931,13	169,418	
2	50523,31	114,232	116,81	76082,86	172,022	168,120
	53571,43	121,124		72941,18	164,919	
	50893,70	115,070		74047,19	167,419	
3	48054,30	108,650	112,33	69896,19	158,034	160,480
	49861,50	112,736		71772,04	162,275	
	51134,22	115,613		71266,38	161,132	
4	46825,40	105,871	109,87	68358,71	154,558	154,470
	49907,58	112,840		68771,33	155,491	
	49048,05	110,897		67830,42	153,363	

Tabla 64. Tabla resumen del promedio de los módulos en laboratorio
Fuente: Elaboración Propia

En los siguientes gráficos, se observa trazada la curva de compactación de los materiales la cual se obtuvo el contenido de agua óptimo que le corresponde a una masa volumétrica seca máxima de acuerdo con los valores obtenidos, del mismo modo se elaboró la gráfica del módulo de rigidez LWD, relacionando el porcentaje de contenido de agua óptima con cada valor promedio del módulo en laboratorio mostrados en la tabla anterior en [MPa], **para ser hallado el módulo LWD objetivo**, se trazó una línea perpendicular en el punto correspondiente al valor del contenido de la humedad óptima, hasta interceptar la curva del módulo de rigidez LWD y a partir de este punto se traza la línea horizontal en donde se encontró el módulo objetivo de laboratorio con el valor de 115 [MPa] para una altura media de caída, se nota claramente que a mayor contenido de agua, los módulos son menores en ambos casos.

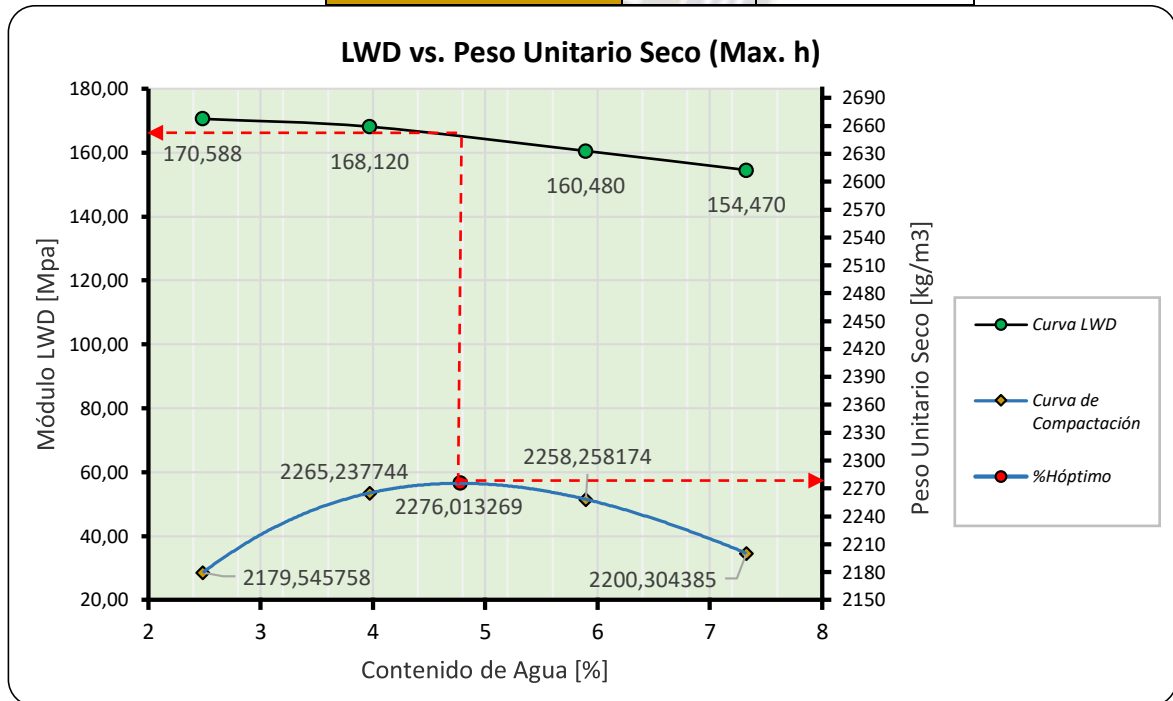
De la misma manera para una altura máxima de caída se registro un un módulo de 162 [MPa].



Gráfica 17. LWD vs. Peso Unitario Seco (Media h)
 Fuente: Elaboración Propia

Del grafico se obtiene el Módulo objetivo de LWD, teniendo como valor:

Módulo Objetivo LWD = 115 [MPa]



Gráfica 18. LWD vs. Peso Unitario Seco (Max. h)
Fuente: Elaboración Propia

Del grafico se obtiene el Módulo objetivo de LWD, teniendo como valor:

Módulo Objetivo. LWD =	162	[MPa]
-------------------------------	-----	-------

Para hallar **módulo LWD en campo**, se necesitó ubicar de una manera correcta el equipo en los ocho puntos del tramo de prueba para lo cual se dio inicio con el ensayo, como se explica en el capítulo descrito anteriormente, para ello fue necesario realizar 3 impactos de asentamiento y 6 impactos con una altura máxima y media con el equipo y así sacar promedio a los últimos tres y con los datos obtenidos se hace uso de los módulos para cada punto (**Ver anexos C**). Verificando el coeficiente de variación (**COV**) entre los valores de deflexión de cada impacto realizado, que deberá ser \leq a 10%. Los resultados a una altura media y máxima son las siguientes:

$E_1 [MPa] - h_{m\acute{a}xima}$		$E_1 [MPa] - h_{media}$	
N°	Promedio	N°	Promedio
1	207,01	1	226,74
2	227,49	2	235,21
3	272,76	3	293,25
4	313,68	4	370,66
5	262,56	5	267,18
6	440,27	6	451,22
7	408,63	7	451,54
8	205,93	8	210,85

Tabla 65. Resultados de los módulos en campo
Fuente: Elaboración Propia

Se nota claramente que los módulos en cada punto de ensayo del tramo de prueba son diferentes esto puede deberse: a la posición del equipo que a momentos no estaba vertical por el mal contacto con la superficie de la capa subbase, a la compactación realizada por la maquinaria que en tramos centrales se realizó al 100% con el rodillo mientras que en huellas externas al 60% del rodillo, otro aspecto es el número de pasadas con el cual se compactó la capa subbase que fue diferente en huellas externas respecto a las huellas centrales.

Pese a la diferencia de estos valores, se puede decir que estos módulos obtenidos son adecuados para una capa subbase de una estructura de pavimento, comparando con los valores de referencia que está en el manual N-MMP-1-16/20, que comprende de 100 a 500 [MPa].

También se ve en ambos cuadros que los valores que para una altura mayor de caída los módulos son mayores a los de una altura media de caída. Esto también se explica por la adecuación de la masa de caída de los 10 [kg], ya que a una mayor altura será menor los módulos, por su deformación obtenida.

Por efectos del espesor finito que tienen las capas bases y subbases y además que el módulo resiliente de una capa granular en terreno queda afectada por el módulo resiliente que tiene la capa subyacente, resultando un módulo compuesto de la capa colocada (investigación AASTHO), se realiza esta medición siempre y cuando el espesor de la capa subbase sea menor que el diámetro de la placa, se realizó la corrección mediante la ecuación proporcionada por el manual (**ver Anexos C**), tomando como valores de referencia los módulos de la capa inferior en el caso de este proyecto la capa subrasante, medidos con el equipo del FWD que son proporcionales con el LWD, las cuales fueron tomadas por la empresa encargada de control y monitoreo, se utilizaron los siguientes valores (**ver Anexos C**):

E_2 (FWD)	
Promedio [MPa]	
1	245,00
2	324,00
3	213,00
4	204,00
5	215,00
6	164,00
7	148,00
8	154,00

Tabla 66. Resultados de los módulos E_2 (FWD)
 Fuente: Elaboración Propia

Para la evaluación directa de capas granulares en nuestro caso se utilizó el geófono más alejado del plato de carga (D45) (**ver Anexos C**), la cual indica el desempeño de toda la estructura con una contribución mayor de la subrasante. Sin embargo, entrega presiones muy altas los dos primeros valores de la capa subrasante, mostradas en el cuadro, en comparación a las tensiones de trabajo a las que están sometidas las capas intermedias de pavimentos. Comparando con los valores de referencia que está en el Manual N-MMP-1-16/20, para una capa subrasante debe comprender de 30 a 225 [MPa].

Para una $h_{máx.}$ [MPa]	
E_{LWD} Objetivo Corregido.	
1	166,09

Los resultados obtenidos del cálculo de los módulos mediante la ecuación indicada por el Manual N-MMP-1-16/20

2	189,73
3	154,41
4	150,85
5	155,18
6	133,30
7	125,37
8	128,41

corregidos, son los

Tabla 67. Módulo corregido para una $h_{máx}$.
 Fuente: Elaboración Propia

siguientes:

Se nota claramente que los módulos sin corrección (E1) de campo son mayores a los valores que no se utiliza la corrección, entonces esto da a entender que la causa de esta variación de valores puede ser a las siguientes consideraciones:

Para una h_{media} [MPa]	
$E_{LWD\text{Objetivo Corregido}}$	
1	138,48
2	154,98
3	130,07
4	127,47
5	130,63
6	114,41
7	108,36
8	110,69

Tabla 68. Módulo corregido para una h_{media} .
 Fuente: Elaboración Propia

Factores inherentes al material y sus características que se deben al tipo de material, tamaño, granulometría, contenido de agua y tipo de compactación con las cuales se trabajó este tramo de prueba, al considerar un sistema de capas a los módulos de la capa subyacente en nuestro caso la capa subrasante respecto a la capa subbase, podría ser un factor importante a la hora de obtener los valores y ser considerados en un análisis de la relación de rigideces. Además, que los valores de la de E2 del equipo FWD se tomaron de referencia siendo el cálculo de diferente forma al del LWD.

Los factores externos que podemos tomar en cuenta son los niveles de esfuerzos aplicado, tal como en el caso del FWD, la duración del pulso de carga que en el caso del FWD es mayor al del LWD, el

$$E_{Obj-corr} = \frac{1}{\left[\frac{1}{E_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a} \cdot \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} + \frac{1}{E_1 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^2}} \right]}$$

capa

procedimiento de medición en ambos casos es similares, pero no así en sus cálculos. Entonces podemos decir que la rigidez de la subyacente influyo a los valores en la corrección. Finalmente, se determinó la comparación del Grado de Compactación relación de los módulos obtenidos en campo

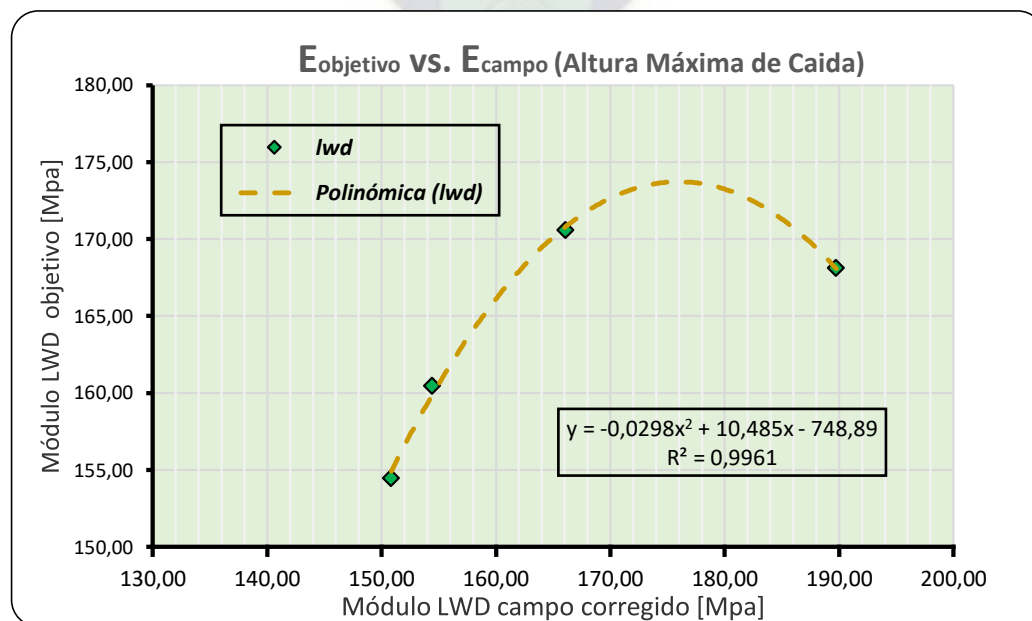
como la respecto al módulo de laboratorio para dos alturas:

N°	Módulos en campo		Módulos en campo corregido	
	$RG_{Subbase} = \frac{E_{LWD}}{E_{laboratorio}}$			
	hmáx.	hmedia	hmáx.	hmedia
1	1,28	1,97	1,25	1,20
2	1,40	2,05	1,20	1,35
3	1,68	2,55	1,77	1,13
4	1,94	3,22	2,08	1,11
5	1,62	2,32	1,69	1,14
6	2,72	3,92	3,30	0,99
7	2,52	3,93	3,26	0,94
8	1,27	1,83	1,60	0,96

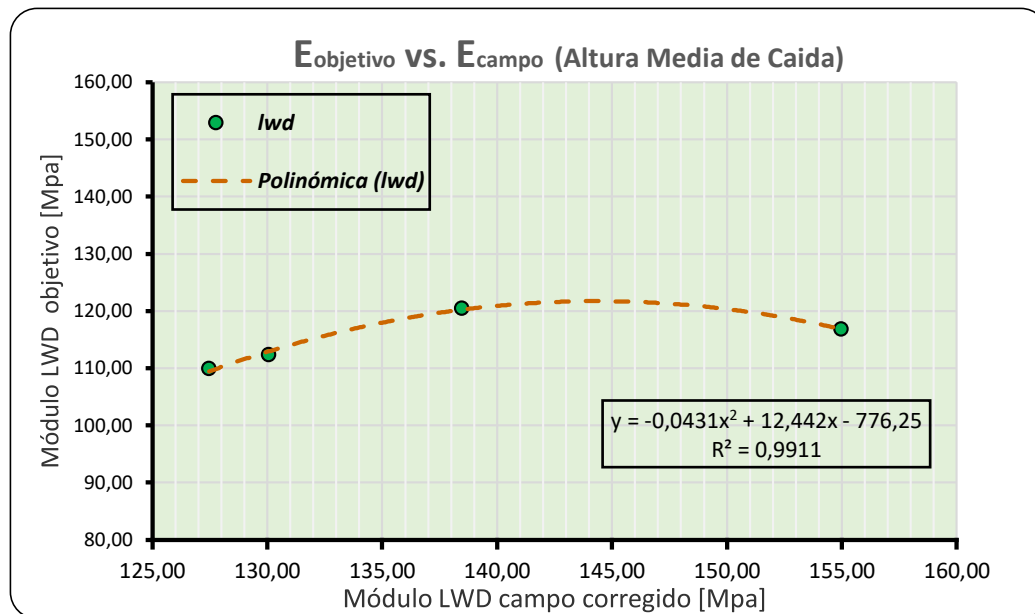
Tabla 69. Módulos en campo corregido
 Fuente: Elaboración Propia

Al realizar la comparación de los valores a distinta altura de caída, en el caso de laboratorio y de campo respecto a sus módulos, se nota la variación mínima que existe al realizar los respectivos ensayos, entonces ambos resultados son opcionales al momento de determinar el grado de compactación de un tramo, siempre y cuando se esté garantizando la concepción de los 10 [kg] de impacto a la misma altura. Para el presente estudio se utilizó los valores a una altura máxima ya que es el caso más crítico para una obra vial.

Las gráficas que se muestran a continuación, dan a entender de una mejor manera que los valores obtenidos en laboratorio como en campo (corregido) tienen una correlación significativa en ambos casos con una $R^2 = 0.996$ y 0.991 .



Gráfica 19. Correlación Eobjetivo vs. Ecampo (Altura Máxima de Caída)
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 20. Correlación Eobjetivo vs. Ecampo (Altura Media de Caída)
Fuente: Elaboración Propia

El análisis de los módulos, viene dado por una realidad que vivimos en nuestro medio, ya que para el control de la compactación se sigue tomando en cuenta la densidad netamente de un suelo, pero actualmente se diseñan los pavimentos mediante módulos, entonces ahí va la contradicción por la cual este control de calidad se sigue basando en densidades. Es por eso que en la actualidad aparecen este tipo de equipos para que el control de compactación mediante módulos de las capas de la estructura, además que ser procesos rápidos de medición.

Finalmente, como se midieron la relación de módulos, estas deben ser igual o mayor a uno, en todos los valores de los ocho puntos del tramo de prueba como se muestra en el recuadro anteriormente, además de cumplir esta especificación también se debe verificar que el 80% de los puntos son mayores a uno, entonces se aprueba el control de compactación en el tramo de estudio, según al Manual N-MMP-1-16/20, con todo lo mencionado el Grado de Compactación es mayor al requerido del 97% en capa subbase según las especificaciones técnicas, como se muestra en la figura de la comparación de grados de compactación. **(ver Anexos C)**

7.4. ENSAYOS GEOGAUGE HUMBOLDT H-4140

A partir de la ecuación analítica-experimental desarrollada por Humboldt, se pudo determinar los valores para C de la región del terreno analizada, a partir de los valores medidos en campo, en este caso la

rigidez del material, el contenido de humedad del mismo y sustituyendo la ρ_D por la densidad del terreno analizado mediante el método de Cono de Arena, ρ_{CA} .

Los valores entre C, K y m dan lugar a usar un C más apropiado en la estimación de cada densidad seca en lugar de seleccionar un número limitado de C para usarlas en varios rangos de humedad.

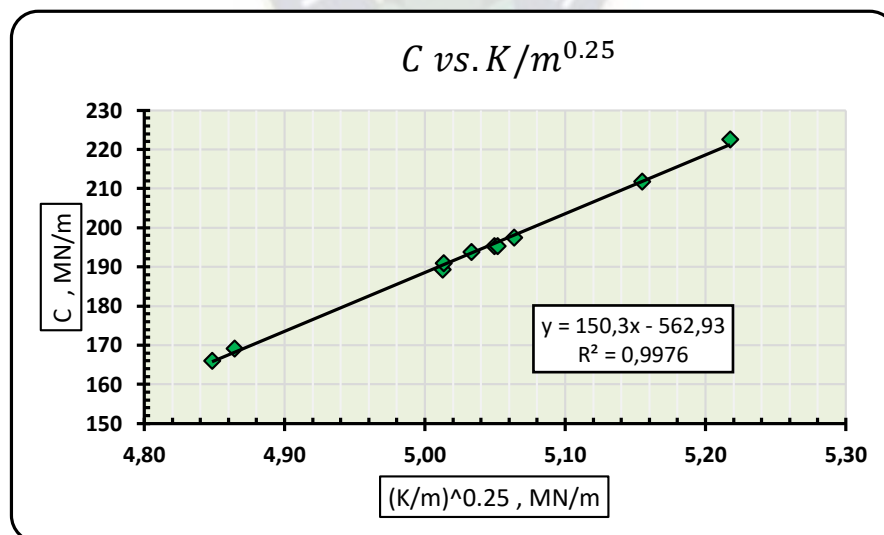
Mediante la ecuación para un determinado C, con los valores de la densidad seca máxima obtenida en laboratorio (ρ_0), la humedad del suelo en sitio (m), la rigidez medida en campo por el equipo GeoGauge (K) y los valores de las densidades secas (ρ_{CA}) halladas en los 8 puntos del tramo de prueba, se tienen los siguientes valores obtenidos, (ver Anexos C):

Se ve claramente que para un suelo de tipo A1a (0) los valores de "C" comprenden de 165.76 a 222.50 [MN/m]. Esto nos ayudó para hallar una correlación lineal entre los valores calculados de "C" vs. " $(K/m)^{0.25}$ ", del terreno. La figura efectivamente es típica de la relación lineal que se logra con los datos de terreno "C":

$$C = K/m \left(\left[\frac{\left(\frac{\rho_0}{\rho_{CA}} - 1 \right)}{1.2} \right]^2 + 0.3 \right)$$



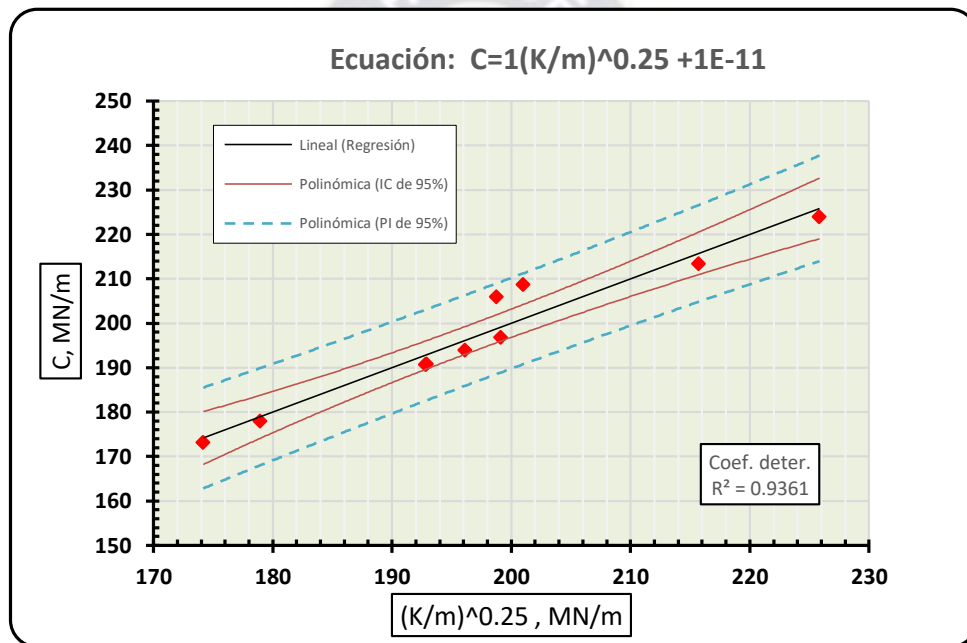
Punto	Valor de C en terreno y [MN/m]	$K/m^{0.25}$ x
1	192,52	5,033
2	197,29	5,063
3	167,97	4,864
4	195,13	5,049
5	222,50	5,218
6	195,55	5,052
7	189,54	5,013
8	165,76	4,848



Gráfica 21. C vs. $K/m^{0.25}$
 Fuente: Elaboración Propia

La relación lineal determinada para valores "C" y la relación " $K/m^{0.25}$ ", datos medidos en el terreno analizado, con un coeficiente de determinación $R^2=0.9976$, indica que la rigidez del material (K) y la variable del contenido de humedad del material (m) poseen una relación significativa evidenciada por la tendencia de los datos analizados.

En siguiente gráfico se muestra la correlación con un $R^2=0.9361$, obtenida para los datos del terreno analizados - línea (color negro), la línea punteada (color rojo) describe que con un 95% de confianza el intervalo de los datos que se ajustarán caerá en esta región, la línea punteada (color azul) es el intervalo de predicción del 95%, que indica con una confianza del 95% los valores predichos caerán en esta línea. Esta correlación es requerida para realizar la determinación de los valores para la densidad estimada del suelo, la cual se calcula mediante la ecuación antes descrita desarrollada por Humboldt.



Gráfica 22. Ecuación: $C=1(K/m)^{0.25} +1E-11$
 Fuente: Elaboración Propia

Después de corroborar que el "C" del terreno, son adecuados para el cálculo de la densidad estimada por la ecuación de Humboldt, se calculó el siguiente grupo de valores:

Punto	Densidad Seca Humboldt [KN/m3]	Densidad Cono de Arena [KN/m3]
1	22,26	22,38
2	22,00	22,00
3	22,19	22,19
4	22,00	22,00
5	21,93	21,93

6	21,88	21,88
7	21,94	21,94
8	22,23	22,23

$$\rho_D = \frac{\rho_0}{1 + 1.2 \left[\frac{Cm}{K} - 0.3 \right]^{0.5}}$$

Una vez estimado estos valores, comparamos que ambas densidades son parecidas en valor, para lo cual se procedió a realizar un análisis estadístico para corroborar si existe correlación entre ambos valores, que se explicaran en el siguiente apartado, para confirmar un método alternativo de obtener densidades secas mediante la rigidez en campo.

Sabemos que el tipo de suelo es A1a (0) para capa subbase en este proyecto, entonces se tiene como rangos de valor, las densidades secas por el método cono de arena, entre 21.88 a 22.23 [kN/m³] y un rango de valores de Rigidez 26.75 a 35.42 [MPa]. Para realizar la validación del modelo matemático hallado anteriormente, se realizó la sustitución de los valores de la densidad estimada de Humboldt.

Punto	Densidad Cono de Arena	Densidad por validación del modelo
	[KN/m ³]	[KN/m ³]
1	22,38	22,33
2	22,00	21,98
3	22,19	22,19
4	22,00	21,98
5	21,93	21,93
6	21,88	21,89
7	21,94	21,93
8	22,23	22,25

Tabla 70. Sustitución de valores de la densidad estimada de Humboldt
Fuente: Elaboración Propia

Esto quiere decir que la validación del modelo es aceptable, dando como valores iguales al de la densidad por el método cono de arena. Finalmente, para realizar un análisis del Grado de Compactación para el tramo de prueba por el método GeoGauge, se tomó como referencia la relación tradicional, tomando en cuenta la densidad estimada Humboldt respecto con la densidad seca máxima por el

ensayo Proctor modificado, de este análisis se obtuvo que los grados de compactación son los siguientes:

Punto	Grado de compactación
	[%]
1	100,03
2	98,48
3	99,41
4	98,48
5	98,25
6	98,07
7	98,25
8	99,68

Tabla 71. Grado de compactación GeoGauge
Fuente: Elaboración Propia

Se ve que, en todos los valores de los ocho puntos del tramo de prueba, son aceptados según el requerimiento que es $\geq 97\%$ para capa subbase, según las especificaciones técnicas del proyecto.

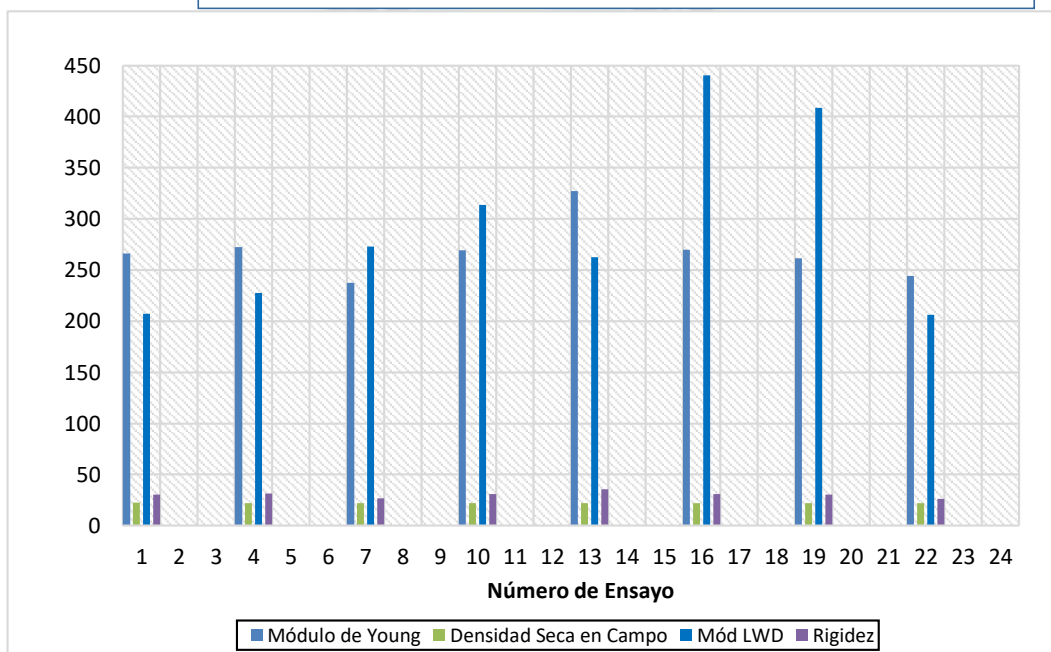
7.5. ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES OBTENIDAS ENTRE SUS PARÁMETROS DE LOS MÉTODOS LWD, GEOGAUGE Y CONO DE ARENA.

Para realizar el análisis e interpretar los resultados obtenidos por los tres métodos en el presente proyecto de grado, deben presentarse en primer lugar los datos de sus parámetros que se muestran a continuación:

Parámetros obtenidos en Campo del Tramo de Prueba 10+260 - 10+470									
Progresiva	Punto	N° Ensayo	GeoGauge				LWD		Cono de Arena
			Módulo de Young [MPa]		Rigidez [KN/m]		Módulo de Elasticidad [MPa]		Densidad seca en campo [KN/m ³]
10+260	1	1	252,31	266,02	29,09	30,67	206,77	207,01	22,38
		2	315,06		36,32		203,56		
		3	230,68		26,59		210,69		
10+290	2	4	186,06	272,47	21,45	31,41	225,69	227,49	22,00
		5	303,95		35,04		228,39		
		6	327,40		37,74		228,39		
10+320	3	7	312,05	237,45	33,8	26,753	268,55	272,76	22,20
		8	213,94		24,66		272,29		
		9	186,37		21,8		277,44		
10+350	4	10	210,05	269,50	24,21	31,067	311,60	313,68	22,01
		11	293,82		33,87		306,94		
		12	304,63		35,12		322,49		

10+380	5	13	279,47	327,22	32,22	35,417	254,24	262,56	21,94
		14	334,80		38,59		265,08		
		15	367,39		35,44		268,34		
10+410	6	16	250,18	269,96	28,84	31,12	437,84	440,27	21,89
		17	255,39		29,44		443,61		
		18	304,30		35,08		439,35		
10+440	7	19	265,00	261,72	30,55	30,17	402,11	408,63	21,94
		20	265,09		30,56		411,89		
		21	255,06		29,40		411,89		
10+470	8	22	201,27	244,15	23,20	26,403	273,29	205,93	22,23
		23	286,50		27,80		174,10		
		24	244,69		28,21		170,40		

Tabla 72. Parámetros obtenidos en Campo del Tramo de Prueba 10+260 - 10+470
Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 23. Parámetros obtenidos en Campo del Tramo de Prueba 10+260 - 10+470
Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica 23 se puede evidenciar que los valores de los módulos de Elasticidad son variables entre sus valores desde 200 a 440, mientras que en los módulos de Young son mas constantes entre sus valores desde 237 a 327, comparando ambos valores son variables en todos los ensayos.

Tambien se puede observar que los valores de Rigidez y Densidad Seca, se asemejan en sus valores, siendo que las Rigideces son mas altos, desde 35 a 26, mientras que en los valores de Densidades Secas comprendidas entre 21 a 22.

7.5.1. Análisis de Distribución Normal o Método de Gauss Obtenido de las Variables de los Métodos GeoGauge, Cono de Arena, LWD.

Se realizó el análisis de las variables según los siguientes métodos:

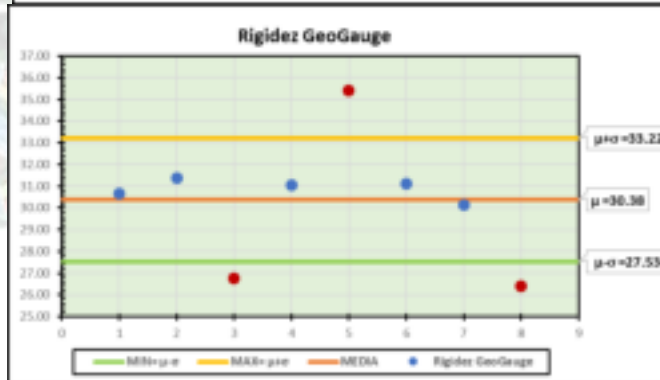
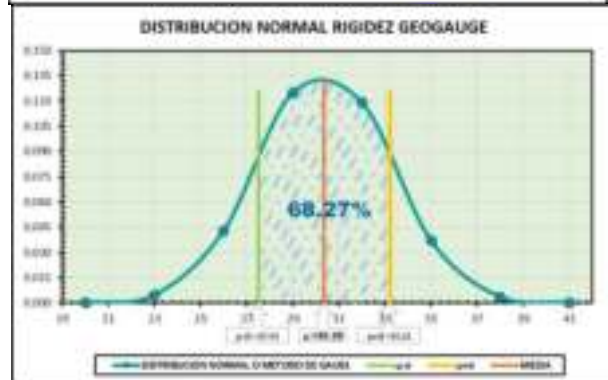
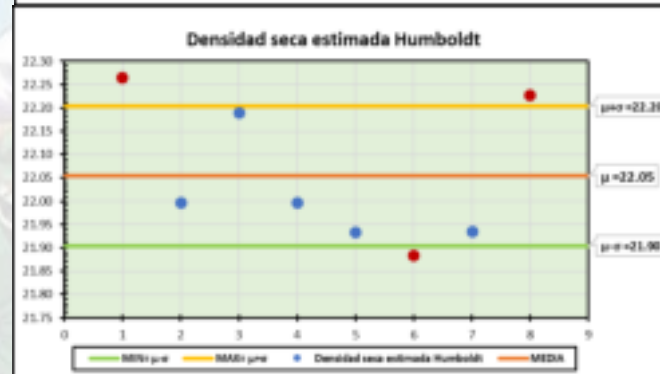
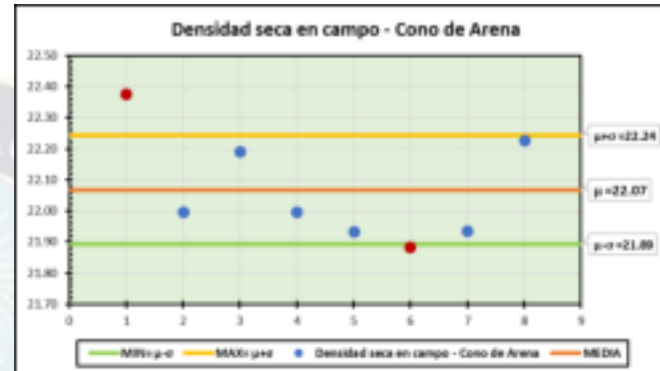
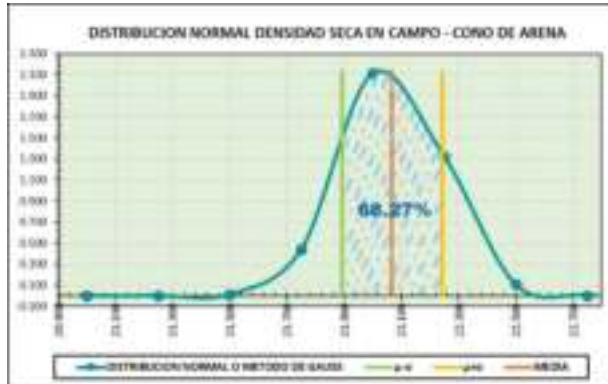
- **Estadístico de prueba Shapiro Wilk.** - Esta prueba nos indica que se utiliza para una cantidad de datos menores a 50, para este proyecto de grado son menores, con un nivel de significancia del 5% (0.05%).
- **Regla Empírica.** - Esta prueba es una guía de cómo se distribuyen los datos en una distribución normal. Esta regla establece que aproximadamente el 68.27% de los datos de las variables se encuentran dentro de una desviación estándar de la media, donde el valor máximo y mínimo están comprendidos entre la probabilidad de las variables; $Pr(\mu - 1\sigma \leq X_i \leq \mu + 1\sigma)$.

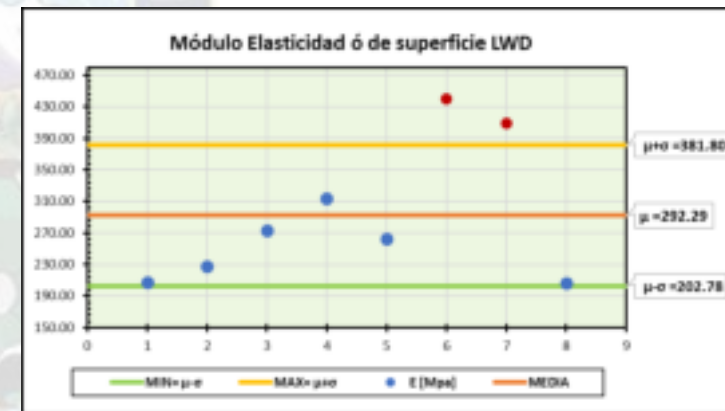
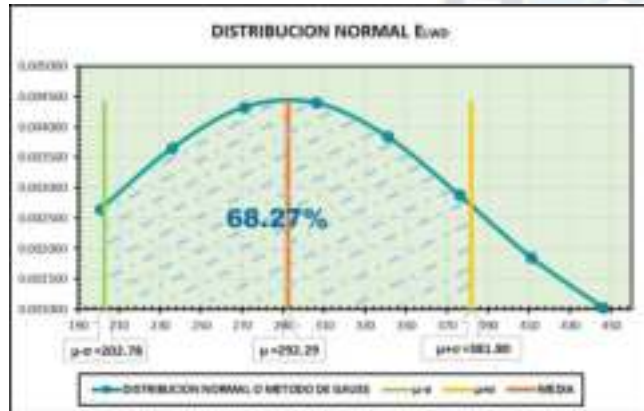
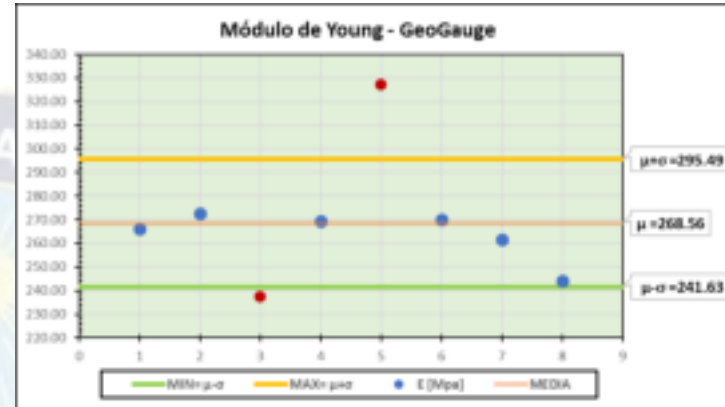
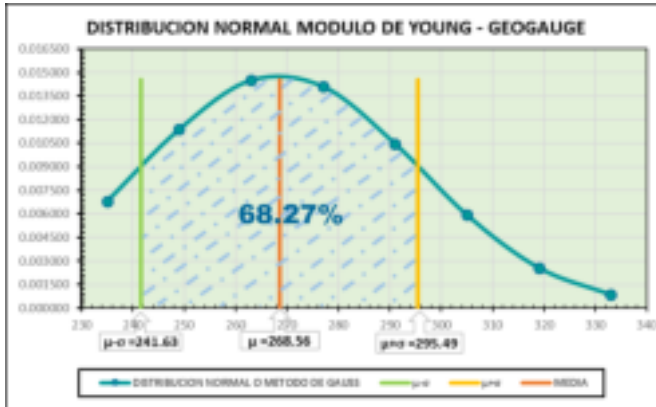


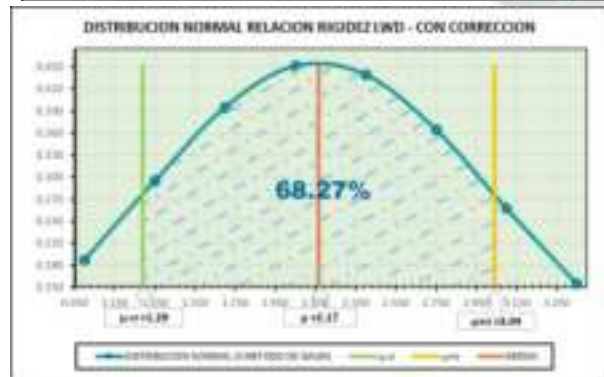
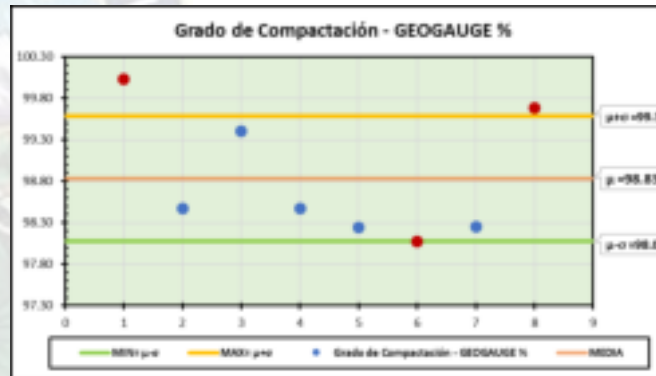
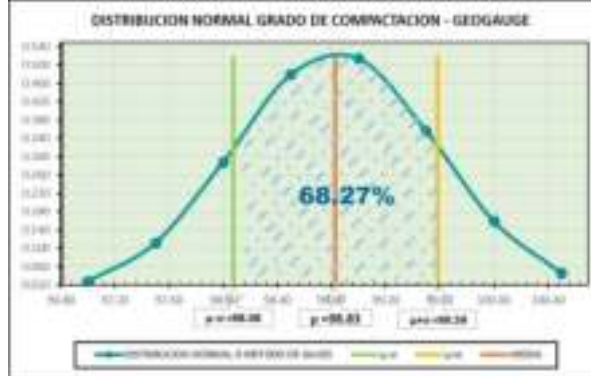
Prueba de Normalidad							
Variable	Cuadro de Estadísticos				Según SPSS Statistics 26.		Según la Regla Empírica al 68,27%
					Prueba de Hipótesis		
	MEDIA (μ)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (σ)	MIN ($\mu-1\sigma$)	MAX ($\mu+1\sigma$)	Sigue una D.N. = Ho	No sigue una D.N. = Ha	Pr ($\mu-1\sigma \leq Xi \leq \mu+1\sigma$)
					Estadístico de Prueba Shapiro-Wilk < 50 datos , con un nivel de significancia de p=0,05%.		
Densidad Seca de Campo Cono de Arena	22.07	0.18	21.89	22.24	0,239		Pr (21,89 $\leq Xi \leq$ 22,24)
Densidad Seca Estimada GeoGauge	22.05	0.15	21.90	22.20	0,146		Pr (21,90 $\leq Xi \leq$ 27,53)
Rigidez GeoGauge	30.38	2.84	27.53	33.22	0,083		Pr (27,53 $\leq Xi \leq$ 33,22)
Módulo de Young / Densidad Seca en Campo	12,18	1,27	10,9	13,45	0,262		Pr (10,90 $\leq Xi \leq$ 13,45)
Módulo de Young	268.56	26.93	241.63	295.49	0,060		Pr (241,63 $\leq Xi \leq$ 295,49)
Módulo Elasticidad LWD	292.29	89.51	202.78	381.80	0,160		Pr (202,78 $\leq Xi \leq$ 381,80)
Grado de compactación Cono de Arena	98,87	0,78	98,09	99,65	0,208		Pr (98,09 $\leq Xi \leq$ 99,65)
Grado de compactación GeoGauge	98,83	0,76	98,08	99,59	0,093		Pr (98,08 $\leq Xi \leq$ 99,59)
Grado de compactación LWD	2,17	0,88	1,29	3,04	0,061		Pr (1,29 $\leq Xi \leq$ 3,04)
					Si: p es mayor a 0,05 , se ACEPTA Ho Si: p es menor a 0,05 , se RECHAZA Ho		Donde Xi son cada uno de los datos de las variables

Tabla 73. Prueba de normalidad
Fuente: Elaboración Propia

Donde se demostró que las variables cumplen con una distribución normal, es decir que las variables que se encuentran dentro de una probabilidad que dependen de la media y la desviación estándar. Como se muestra en las siguientes gráficas:







7.6. CORRELACIONES OBTENIDAS ENTRE SUS PARÁMETROS DE LOS MÉTODOS LWD, GEOGAUGE Y CONO DE ARENA.

Se realizaron todas las correlaciones estadísticas entre los valores de las variables mediante los tres métodos: Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD), GEOGAUGE Y CONO DE ARENA, los cuales puedan ser utilizadas y tener un soporte para futuros proyectos donde se requiera homologar un parámetro a través de una correlación de acuerdo a la siguiente tabla:

Correlaciones			
Variables	Según SPSS Statistics 26.		Coeficiente de Determinación R^2
	Prueba de Hipótesis		
	a) Existe Correlación = Ho b) No existe correlación= Ha		
	Estadístico de Prueba Pearson (r), con un nivel de significancia de $r=0,01\%$.	Estadístico de Prueba Spearman (p), con un nivel de significancia de $p=0,01\%$.	Valor de R^2
Densidad Estimada GeoGauge y Densidad Seca de Campo	0,980	1,000	0,9933
Módulo de Young / Densidad Seca en Campo y Rigidez	0,958	0,952	0,9763
Densidad Seca en Campo y Módulo Elasticidad LWD	0,71	0,755	0,6022
Rigidez y Módulo Elasticidad LWD	0,153	0,214	0,0172
Módulo de Young y Módulo Elasticidad LWD	0,022	0,119	0,0309
Densidad Seca de Campo y Módulo de Young	0,491	0,599	0,2355
Densidad Seca de Campo y Rigidez	0,546	0,623	0,3051
Grado de Compactación Cono de Arena y GeoGauge	0,993	0,988	0,9889
Grado de Compactación Cono de Arena y LWD	0,632	0,571	0,4006
Grado de Compactación GeoGauge y LWD	0,614	0,675	0,3734
Si: r,p es mayor a 0,01 , se ACEPTA Ho Si: r,p es menor a 0,01 , se RECHAZA Ho			

Tabla 74. Correlaciones entre las variables
Fuente: Elaboración Propia

Cabe hacer notar que todos los valores de los parámetros con cada equipo son proporcionales al momento de analizar la rigidez de un suelo.

De acuerdo con la tabla de las variables estudiadas con cada equipo los que más correlación se obtuvo de acuerdo al análisis del coeficiente de determinación R^2 y que se acercaron a 1 son los siguientes modelos matemáticos mostradas en la siguiente tabla:

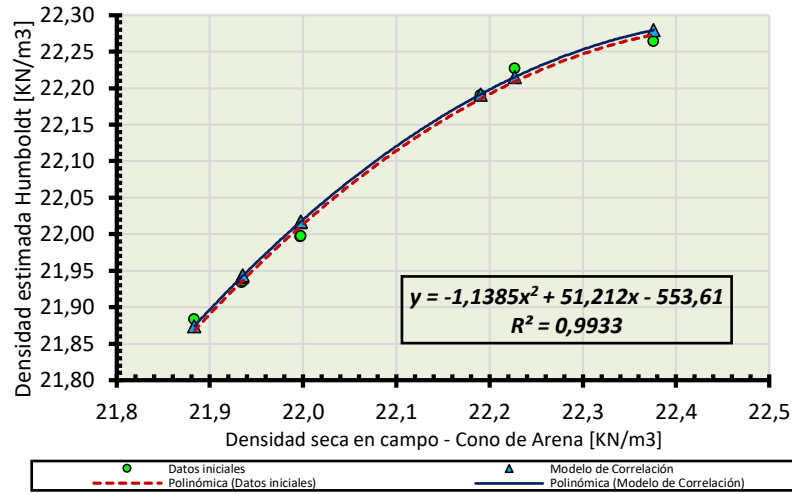
Parámetro	Ecuación	Indicador estructural
Densidad GeoGauge	$\rho_{C.A.} = \frac{-51.212 \pm \sqrt{101.529 - 4.554 * \rho_{Humboldt}}}{-2.277}$	Indica la densidad seca en campo mediante la Rigidez GeoGauge con un $R^2 = 0.9933$.
Densidad Cono de Arena-Young-Rigidez	$\rho_{C.A.} = \frac{-E_{GeoGauge} * 0.7188}{-11.39 \pm \sqrt{51.3584 - 1.4376 * K_{GeoGauge}}}$	Indica la densidad seca en campo mediante módulo de Young y la Rigidez en campo con un $R^2 = 0.9763$.
Densidad - Módulo de Elasticidad LWD	$\rho_{C.A.} = \frac{53409 \pm \sqrt{-943997.4 + 4795.2 * E_{LWD}}}{2397.6}$	Indica la densidad seca en campo mediante el módulo de elasticidad LWD con un $R^2 = 0.6022$.

Tabla 75. Modelos matemáticos para el cálculo de la densidad en campo
 Fuente: Elaboración Propia

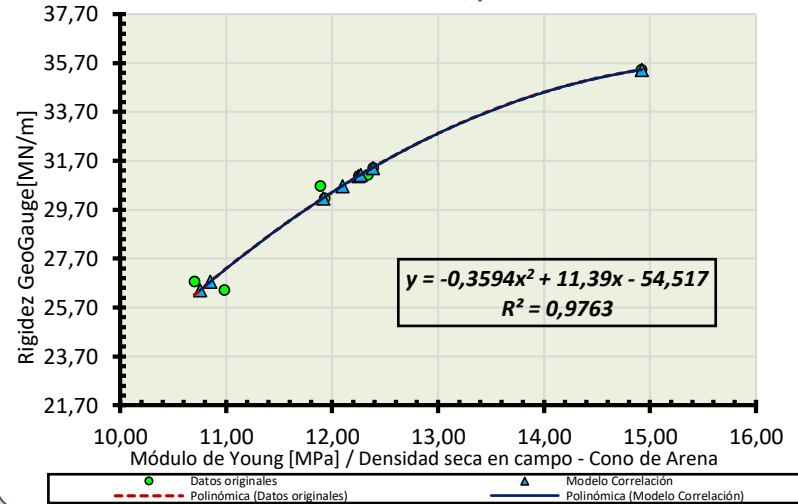
Por lo tanto, las ecuaciones, para hallar la densidad seca en campo mediante los diferentes parámetros, pueden ser utilizados en controles de campo.

También se pudo complementar la investigación realizando gráficas, que interpreten la correlación que existe en el grado de compactación entre los tres métodos, dando resultados satisfactorios que se muestran a continuación:

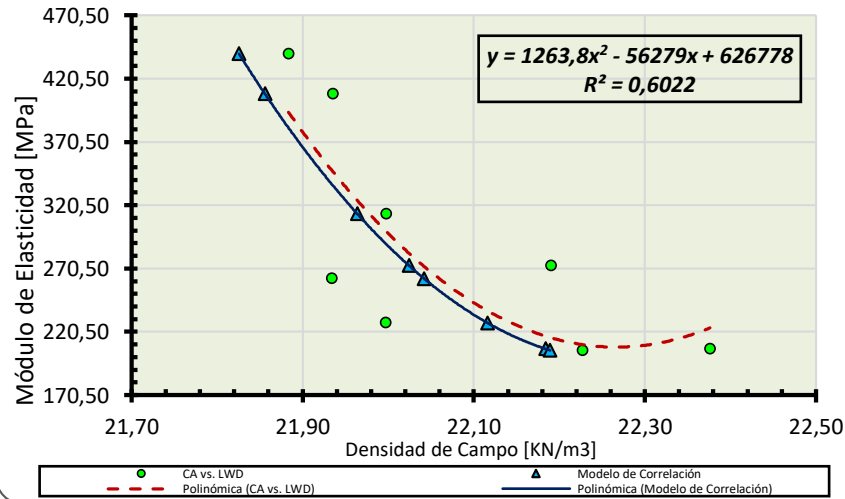
Densidad estimada Humboldt vs. Densidad seca en campo CA



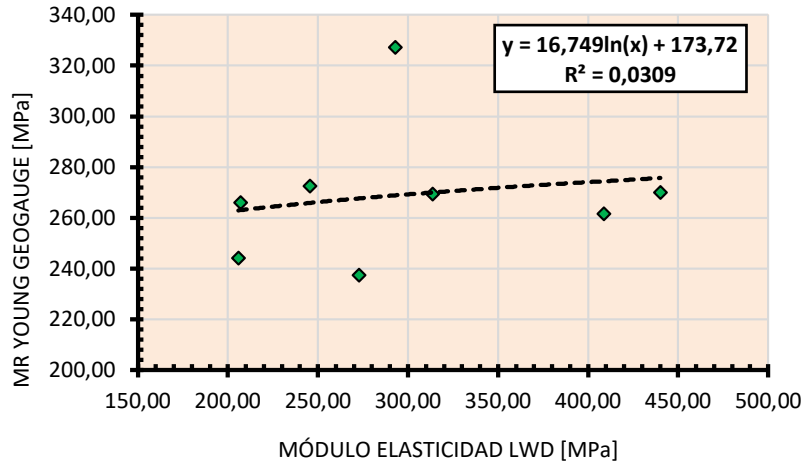
K vs. E/ρ



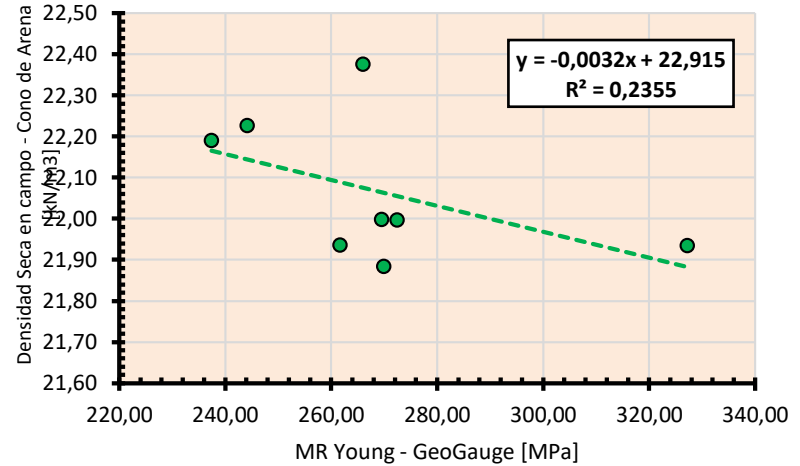
Densidad se en campo CA vs. Módulo de Elasticidad LWD



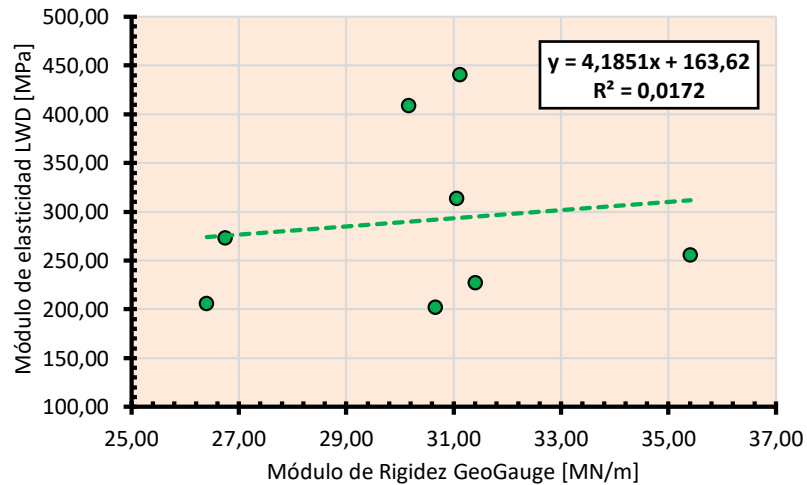
M.R. Young vs. M.E. LWD campo



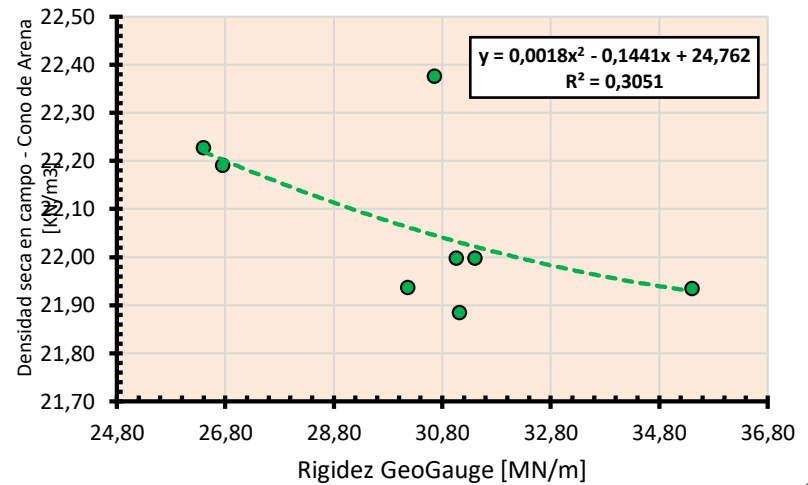
Densidad Seca en Campo C.A vs. M.R. Young GeoGauge

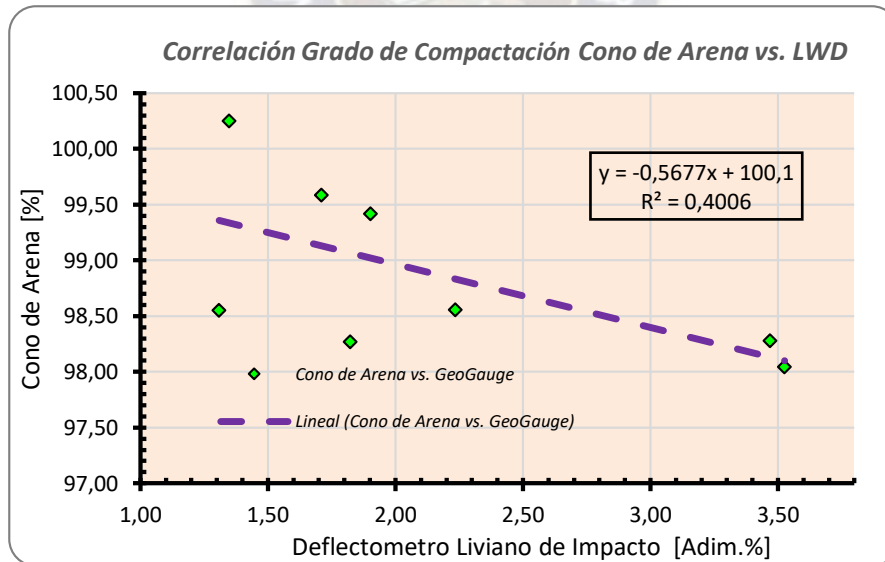
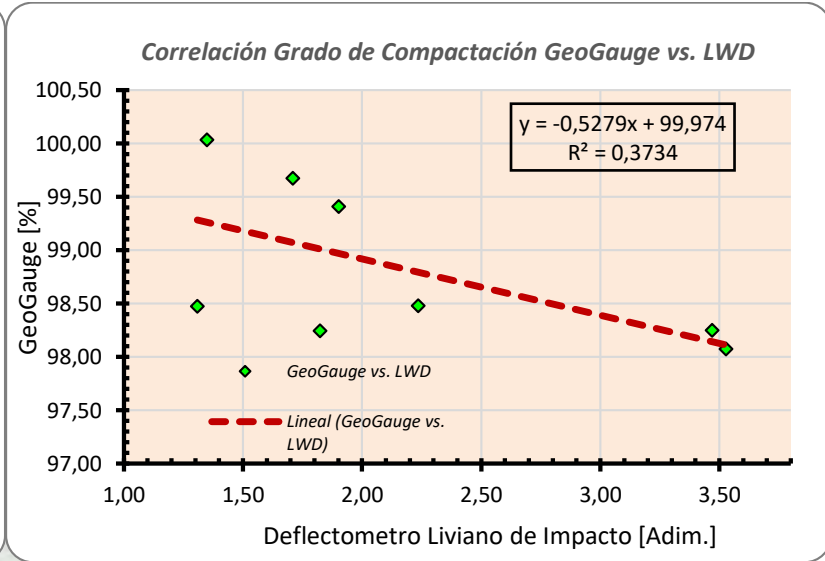
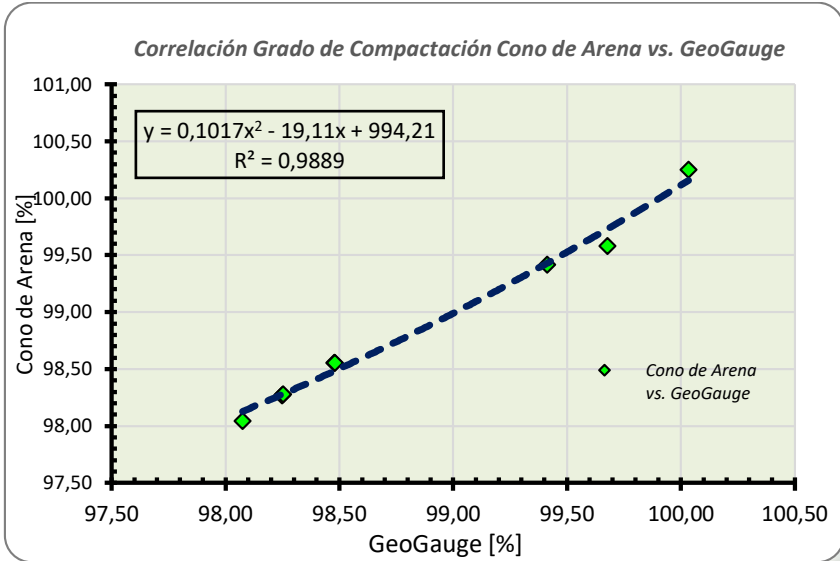


Módulo de Elasticidad LWD vs. Módulo de Rigidez GeoGauge



Densidad seca en campo CA - Rigidez GeoGauge





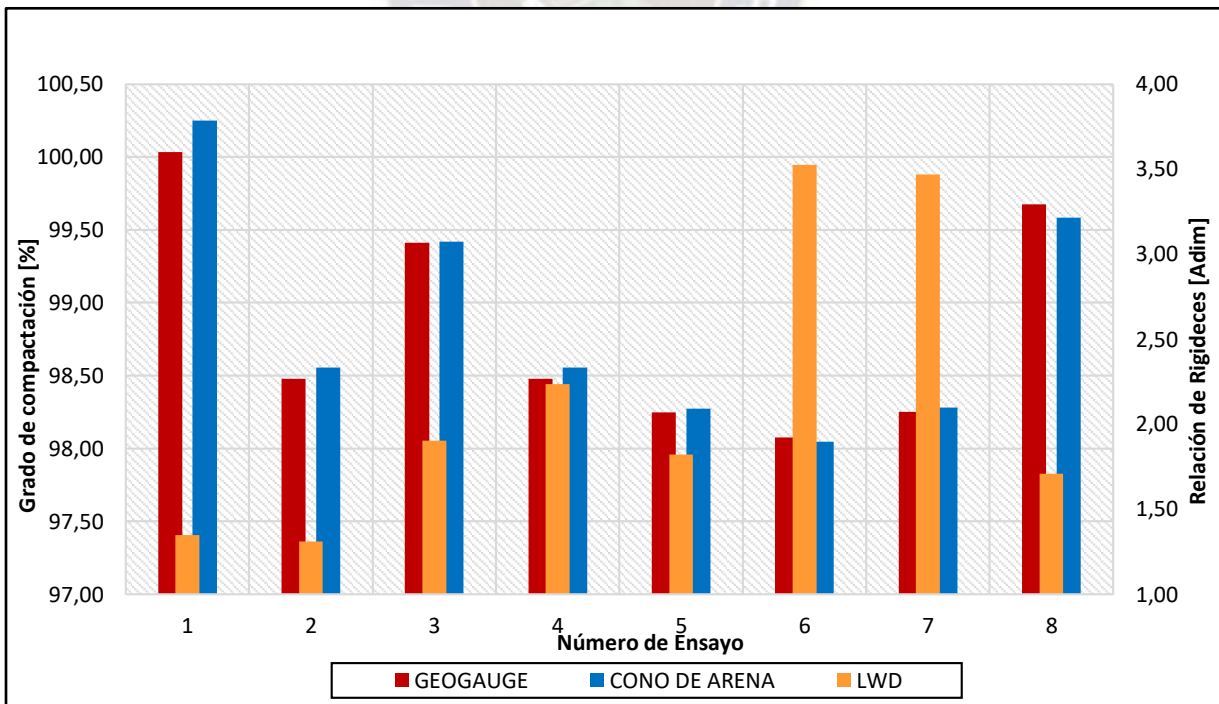
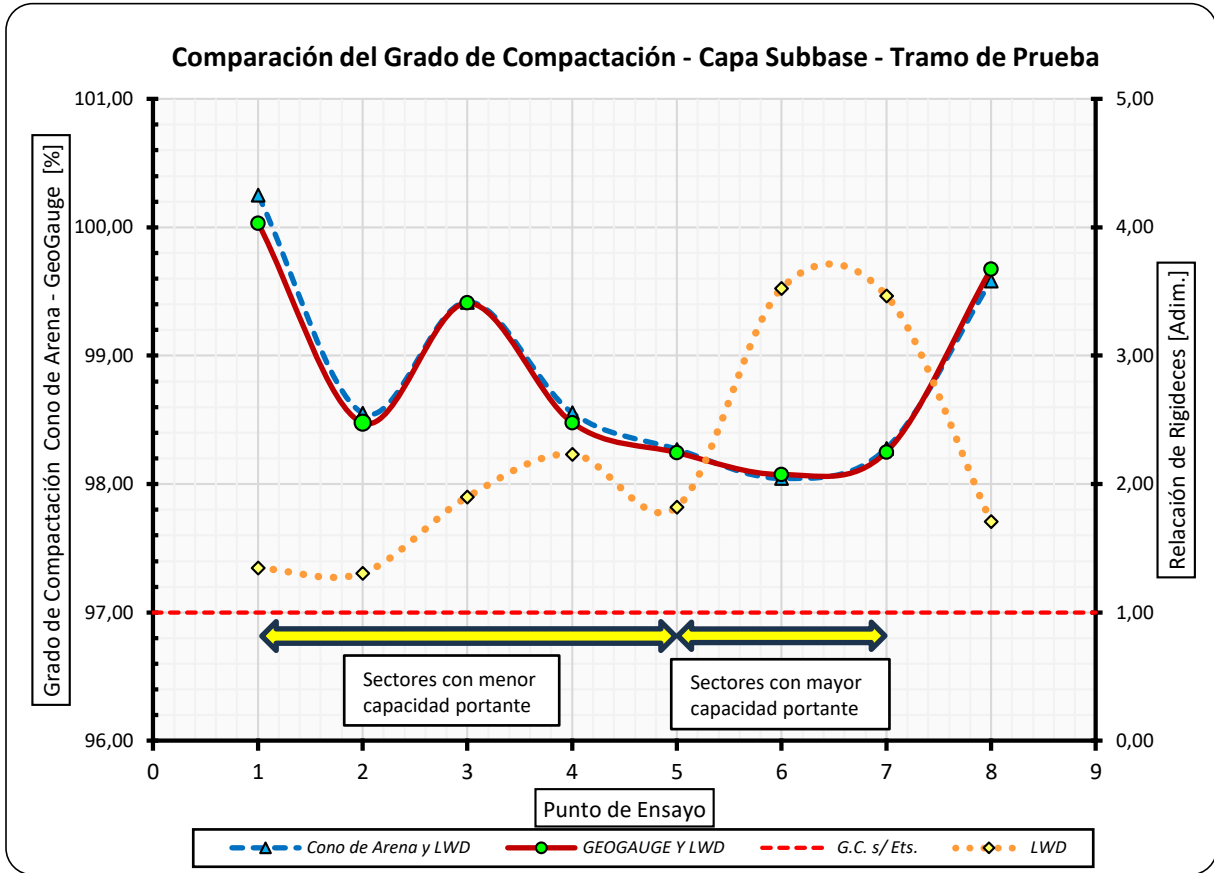
7.7. COMPARACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN ENTRE LOS TRES MÉTODOS

Se observa que los valores con los métodos Cono de Arena y GeoGauge tienen una similitud significativa, el grado de concordancia entre las densidades estimadas mediante las rigideces de la capa subbase son consistentes con la precisión de la mayor parte de las mediciones en terreno y en laboratorio del comportamiento del suelo mediante el ensayo Proctor Modificado, esto se ve reflejado con la ecuación investigada por Hryciw & Toman. Este hecho es muy importante ya que significa que el GeoGauge podría ser usado para estimar la densidad seca en campo, junto con mediciones en paralelo como es el contenido de humedad, Proctor Modificado y teniendo como referencia un "C" del terreno para cada tipo de suelo, en nuestro caso es para un suelo A1a (0).

En el caso del método Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD), se graficó valores de relación de rigideces de laboratorio y campo, con la altura más crítica (máxima de ensayo), en cual muestra valores oscilantes en todos los puntos de ensayo del tramo de prueba, como se ve en la gráfica 24, esta variación se debió a los valores recolectados en campo, que por más de realizar el control de los requisitos que describe el Manual M-MMP-1-16 y además de realizar correcciones considerando para este caso un sistema de capas, se nota que estos valores comparando el grado de compactación con los otros métodos son variables, es por esto que se debe aplicar todas las consideraciones descritas en el Manual N-MMP-1-16/20 de la manera correcta en lo posible.

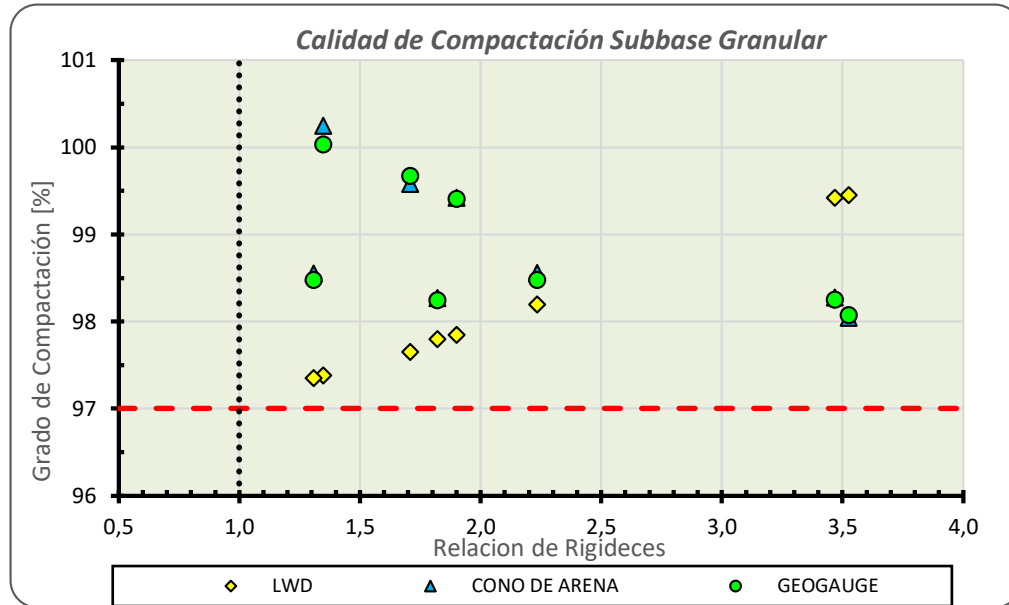
Planilla Resumen - Grado de Compactación				
N° Punto de Ensayo	Progresiva	Relación de Rigidez LWD h máx. de caída	GeoGauge	Cono de Arena
		Con corrección		
		[Adimensional]	[%]	[%]
1	10+260	1,35	100,03	100,25
2	10+290	1,31	98,48	98,55
3	10+320	1,90	99,41	99,42
4	10+350	2,24	98,48	98,56
5	10+380	1,82	98,25	98,27
6	10+410	3,53	98,07	98,04
7	10+450	3,47	98,25	98,28
8	10+480	1,71	99,68	99,58

Tabla 76. Planilla Resumen - Grado de Compactación
 Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 24. Comparación del Grado de Compactación - Capa Subbase - Tramo de Prueba
 Fuente: Elaboración Propia

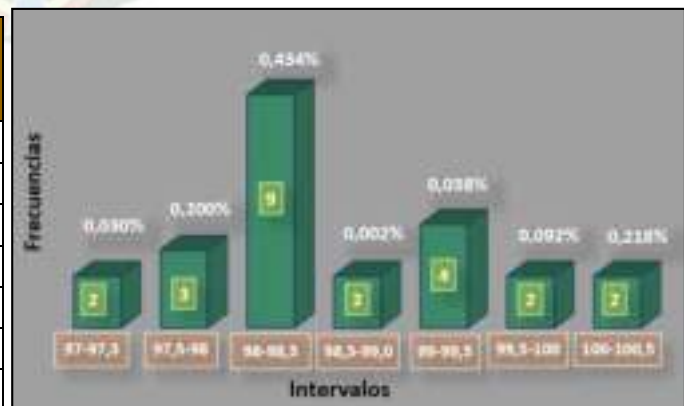
En la gráfica 24, se puede evidenciar que los valores de lo grados de Compactación obtenidas con los métodos Cono de Arena y GeoGauge en todos los puntos de ensayo son constantes y altos en los puntos 1,3,8, en cambio que por el método del LWD, se presenta valores más variables oscilantes en todos los puntos, en 6 y 7 los valores del grado de compactación son más altos que los obtenidos con los otros dos métodos. A si mismo se nota que por los tres métodos cumplen con el grado de compactación requerido según a las especificaciones técnicas del proyecto que es de \geq al 97% para capa subbase como se muestra en la gráfica 25.



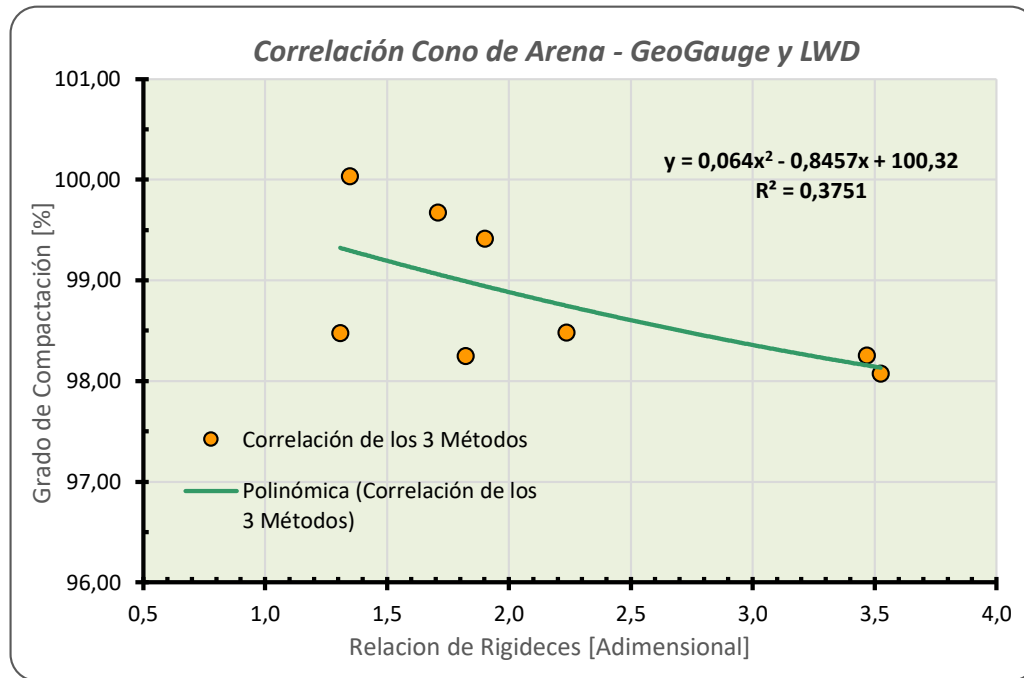
Gráfica 25. Calidad de Compactación Subbase Granular
Fuente: Elaboración Propia

Realizando la diferencia que existe entre los datos obtenidos del grado de compactación por los métodos del cono de arena, GeoGauge y LWD, se puede verificar que existe la mayor diferencia en un 0.434%, donde para las densidades secas que se encuentran entre el rango de 22.89 [KN/m³] a 22.01 [KN/m³], con rigideces de 2 a 2.5, tendrán una diferencia del grado de compactación de 0.5%, como se muestra en el siguiente cuadro:

N°	Intervalos [%]	Frecuencia	[%] Diferencia
1	97,0-97,5	2	0,030
2	97,5-98,0	3	0,200
3	98,0-98,5	9	0,434
4	98,5-99,0	2	0,002
5	99,0-99,5	4	0,038
6	99,5-100,00	2	0,092
7	100,00-100,5	2	0,218
		24	



En la presente gráfica se muestra la correlación del grado de compactación obtenida mediante los tres métodos en estudio:



Gráfica 26. Correlación Cono de Arena - GeoGauge y LWD
Fuente: Elaboración Propia

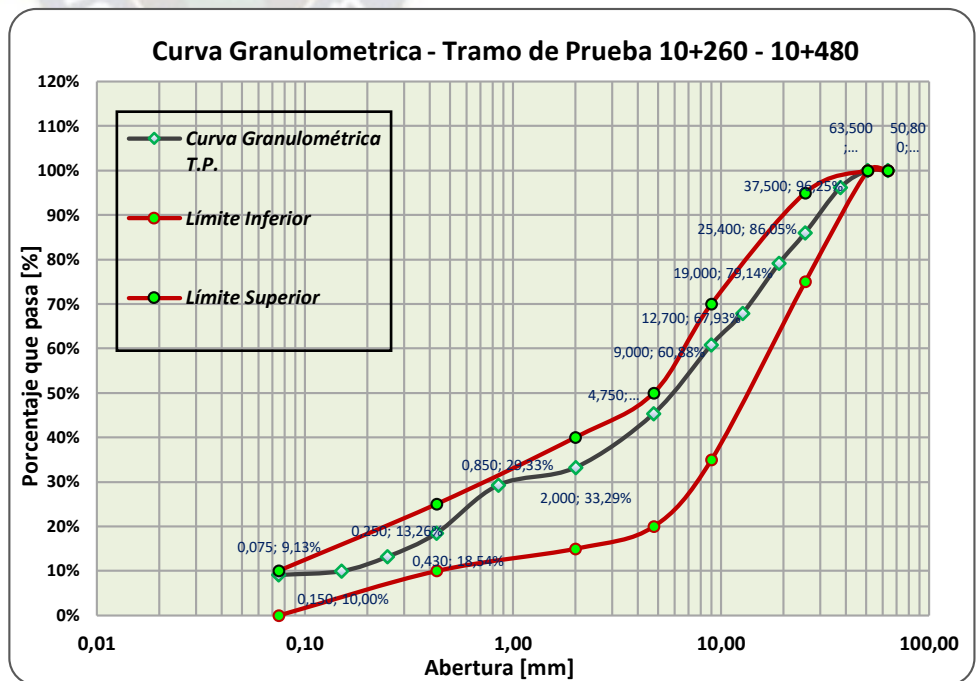
Realizando el análisis de correlación del grado de compactación obtenidas con el método del Cono de Arena, GeoGauge y LWD se llegó a determinar que tienen un coeficiente de correlación baja moderada; por lo tanto, los valores del grado de compactación en campo obtenidos con el LWD tienen una baja relación con los valores del grado de compactación obtenidas con el método del Cono de Arena y GeoGauge.

CAPITULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio comparativo para la determinación del grado de compactación empleando los métodos de Cono de Arena, Deflectómetro Liviano de Impacto y GeoGauge en la capa subbase para un suelo tipo A-1-a en un tramo de prueba entre las progresivas 10+260 a 10+480, de la "Construcción Doble Vía el Alto – Viacha".
- Se recopiló información existente sobre la utilización de los equipos utilizados, el cual esta descrito en el marco teórico.
- Se determinó un tramo de prueba con una longitud de 220 [m] de la "Construcción Doble Vía el Alto – Viacha".
- Se logró determinar la frecuencia y la distribución de los puntos a ensayar, las cuales fueron ocho puntos con un espaciamiento de 30 [m] a una distancia de 60 [cm] de los bordes.
- Se recolectó del tramo de prueba, una cantidad considerable de suelo de capa subbase proveniente del Banco de Ingavi, determinando un material conformado de rocas, gravas y arenas. Las proporciones del material utilizado para la conformación subbase fue la siguiente: 54.59% de gravas, 36.28% arenas y 9.13 de finos. El material obtenido para la capa subbase presenta entre otros los siguientes resultados:

ANÁLISIS GRANUMETRICO POR TAMIZADO AASTHO T-27			
Tamices	% que Pasa	Especificación ETG2-06	
No.			
2"	100,00	100	100
1 1/2"	96,25		
1"	86,05		
3/4"	79,14		
1/2"	67,93		
3/8"	60,88		
No. 4	45,41	25	55
No. 10	33,29		
No. 20	29,33		
No. 40	18,54		
No. 60	13,26		
No. 100	10,00		
No. 200	9,13	0	10



- La granulometría del suelo demostró que se trataba de un material granular con partículas superiores al tamiz N°4, fue suficiente realizar el ensayo de tamizado por vía húmeda y no se precisó el ensayo de caracterización de hidrometría, porque los demás ensayos no requerían la precisión de este ensayo.
- Se realizaron los ensayos físico mecánicos del material granular para la conformación de la capa subbase, entre ellos el Proctor modificado método D y el ensayo Índice de Soporte del suelo en laboratorio (CBR), como se muestra en siguiente cuadro resumen de los ensayos realizados:

CUADRO RESÚMEN DE LOS ENSAYOS FISICO - MECÁNICOS DEL TRAMO DE PRUEBA							
Ensayos		Resultado		Especificación ETG2-06		NORMA ASTM	NORMA AASTHO
Limite Liquido	[%]	16,85		≤ 25 %	Cumple	D – 4318	T-89
Limite Plástico	[%]	10,86				D - 4318	T-99
Índice de Plasticidad	[%]	5,99		≤ 6 %	Cumple	D - 4318	T-99
Compactación	[KN/m3]	Dens.Máx.	22,32	AASTHO T-180D	Cumple	D-1557	T-180
	[%]	Hum. Ópt.	4.78				
CBR	[%]	Al 100% Dens.máx	98	≥ 90 %	Cumple	D – 1883	T - 193

Tabla 77. Cuadro resumen de los ensayos físico - mecánicos del tramo de prueba
Fuente: Elaboración Propia

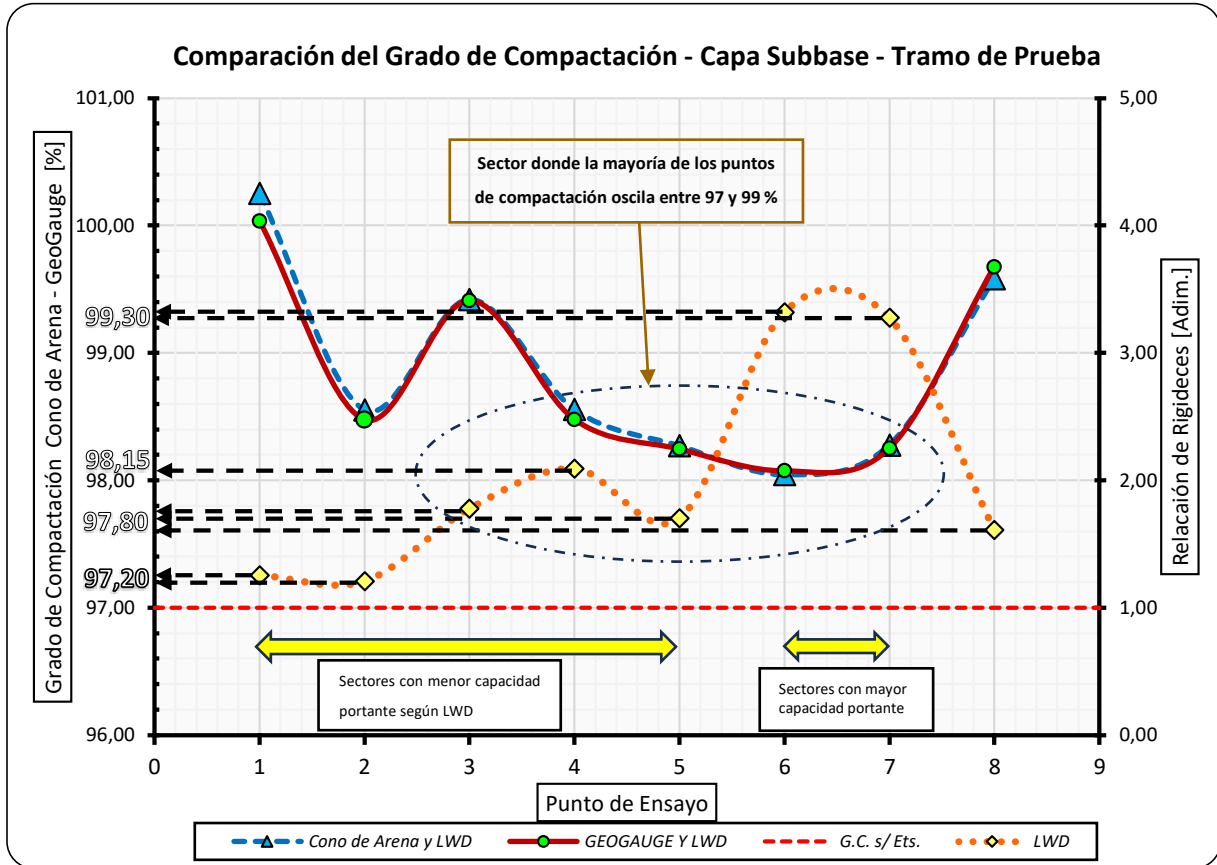
Por lo tanto, se concluye que el material cumple con las Especificaciones Técnicas del Proyecto de la "Construcción Doble Vía El Alto – Viacha" y con los Manuales de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción (ETG02-6) de la (ABC).

- Para el ensayo mediante el método del Cono de Arena se realizaron ocho ensayos de densidad en sitio con un espaciamiento de 30 [m], en los puntos ubicados al tres bolillo en una longitud de 220 [m]. Si bien las Especificaciones Técnicas del proyecto y el Manual de las Especificaciones Técnicas Generales de Construcción (ETG02-6) de la (ABC), establece un espaciamiento de 100 [m], para el presente proyecto se optó en realizar el espaciamiento a 30 [m] para realizar las densidades en sitio esto para contar con más datos en el tramo de prueba y mayor control de la compactación en los puntos establecidos de ensayo.
- Los ensayos de densidad en sitio se realizaron de acuerdo a los procedimientos según la AASTHO T191, Método Como de Arena, con corrección de sobre tamaños del material, es decir se determinó la masa del material retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ ".
- Para los valores de la humedad en sitio del material capa subbase tipo A-1-a, se realizaron en laboratorio, los cuales fueron utilizados para el Método Cono de Arena en el cálculo de la densidad seca en campo y para el Deflectómetro Liviano de Impacto, es un valor de intervalo para la verificación respecto al contenido de humedad óptima determinada en laboratorio.

- Se comparó los valores de los grados de compactación con cada uno de los métodos utilizados, las cuales se realizó en los ocho puntos de ensayo, verificando que los grados de compactación son mayores al recomendado, según las Especificaciones Técnicas para una capa subbase. Entonces esto quiere decir que independientemente con el método utilizado, sus valores son confiables para un control de compactación.
- Los valores de compactación mediante el método Cono de Arena son casi iguales que los obtenidos con el GeoGauge, ya que el valor promedio de la media aritmética del método Cono de Arena arroja un valor de 0.04 % superior al valor obtenido por el método GeoGauge, esto explica que las rigideces utilizadas para calcular la densidad seca estimada por la ecuación Humboldt, son valores directamente proporcionales a las densidades secas determinados en campo por el método cono de arena, además de utilizar los mismos valores de contenido de humedad y densidad seca máxima en ambos métodos.
- Para un 97% de compactación para capa subbase del tipo de suelo A-1-a (0), se requiere 1,0 de relación de rigideces, de acuerdo al Manual M-MMP-1-/16.
- Según al gráfico de Comparación del Grado de Compactación para el análisis del Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD), en los puntos de ensayo 1-2-3 los grados de compactación respecto a los métodos GeoGauge y Cono de Arena son menores, en un 2,0%, en el punto 4 de 0.36% en el punto 5 de 1.47%, en 6-7 son mayores respecto a los otros dos métodos en un 1.51% y finalmente en el punto 8 es menor en un 2.33%, entonces podemos concluir que la relación de los valores de módulos de rigidez de 1 a 4,5 aceptables para un Grado de Compactación menores a 100%, esto garantiza que no exista la sobre compactación como en los otros puntos.

Planilla Resumen - Grado de Compactación					
N° Punto de Ensayo	Progresiva	Relación de Rigidez LWD h máx. de caída	GeoGauge	Cono de Arena	Según gráfico: LWD en G.C.
		Con corrección			
		[Adimensional]	[%]	[%]	[%]
1	10+260	1,35	100,03	100,25	97.29
2	10+290	1,31	98,48	98,55	97.20
3	10+320	1,90	99,41	99,42	97.80
4	10+350	2,24	98,48	98,56	98.15
5	10+380	1,82	98,25	98,27	97.80
6	10+410	3,53	98,07	98,04	99.38
7	10+450	3,47	98,25	98,28	99.30
8	10+480	1,71	99,68	99,58	97.65

Tabla 78. Planilla Resumen - Grado de Compactación
Fuente: Elaboración Propia



- Las correlaciones encontradas por los métodos GeoGauge y Cono de arena, nos sirvió para poder tener una valoración del grado de compactación en el tramo de prueba en estudio, se determinó una correlación entre sus parámetros: densidad seca en campo y densidad estimada por GeoGauge, dándonos resultados satisfactorios donde se determinó dos modelos matemáticos de correlación:

$$\rho_{Humboldt} = -1,1385 * \rho_{C.A.}^2 + 51.212 * \rho_{C.A.} - 553.61$$

$$\rho_{C.A.} = \frac{-51.212 \pm \sqrt{101.529 - 4.554 * \rho_{Humboldt}}}{-2.277}$$

Con coeficiente de determinación $R^2 = 0.9653$; $R^2 = 0.9933$ respectivamente, estas ecuaciones pueden ser utilizados en el control de compactación en campo, con la misma confiabilidad con las que se utilizan los resultados del método del cono de arena, es decir se puede emplear el método GeoGauge para calcular el grado de compactación previa aplicación de la corrección respecto al resultado del cono de arena con la ecuación obtenida de $x = \frac{-51.212 \pm \sqrt{101.529 - 4.554 * y}}{-2.277}$, por último, si con el GeoGauge se tiene un grado de compactación del 99.75%, aplicando la correlación encontrada será del 100.03% para el mismo punto de control.

- Se pudo hallar una correlación alta y significativa con un $R^2 = 97.63$ entre el Módulo de Young, Cono de Arena y Rigidez, dando como resultado el modelo matemático para la Densidad Seca en Campo:

$$\rho_{C.A.} = \frac{-E_{GeoGauge} * 0.7188}{-11.39 \pm \sqrt{51.3584 - 1.4376 * K_{GeoGauge}}}$$

Con este modelo matemático se pueden realizar controles en campo para la compactación mediante el módulo de Young y la Rigidez mediante el equipo GeoGauge y también para hallar módulos en campo para futuros estudios que se requiera.

- Se realizó el ensayo por el método del Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD), la cual sirve para valorar un grado de compactación y tener conocimiento en la aproximación de la densidad por el método del cono de arena, la ecuación hallada mediante una correlación fue la siguiente:

$$\rho_{C.A.} = \frac{53409 \pm \sqrt{-943997.4 + 4795.2 * ELWD}}{2397.6}, \text{ con un } R^2 = 0.6022, \text{ dando como resultados de densidad}$$

seca en campo aproximados al del método cono de arena, con esto se pueden utilizar los valores de los módulos obtenidos en campo, con una confiabilidad aceptable, además de determinar el grado de compactación de acuerdo al manual M-MMP-1-16/20.

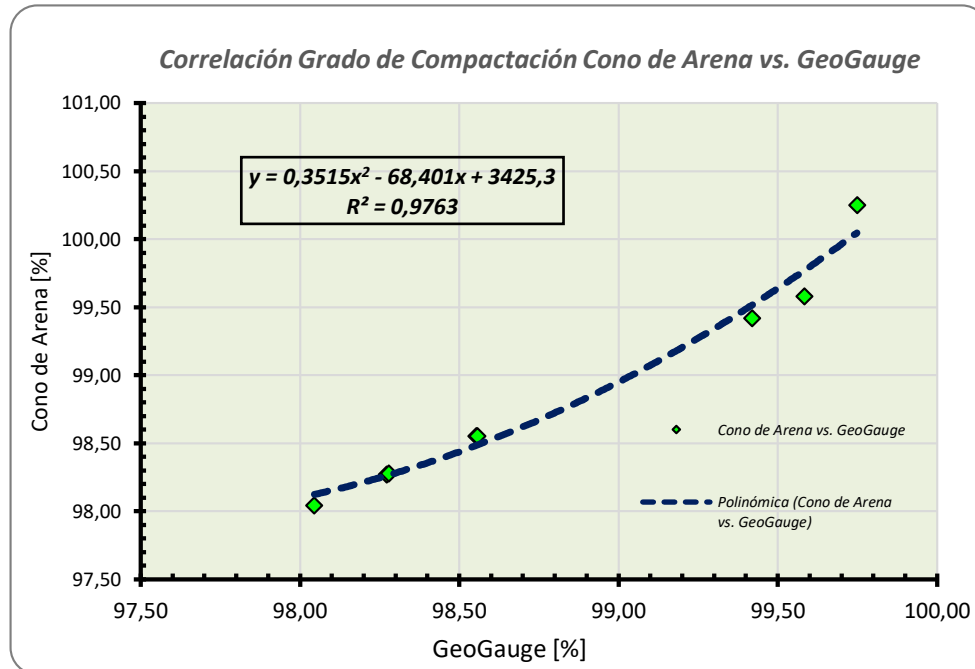
- Para valores de rigidez comprendidos entre 26.40 a 35.42 [MN/m] de los datos registrados en el tramo de prueba indicaron un grado de compactación mayor al 97% de la capa subbase.

Punto de ensayo	Grado de compactación	Rigidez medida
		K
	[%]	[MN/m]
1	100,03	30,67
2	98,48	31,41
3	99,41	26,75
4	98,48	31,07
5	98,25	35,42
6	98,07	31,12
7	98,25	30,17
8	99,68	26,40

Tabla 79. Rigidez medida
Fuente: Elaboración Propia

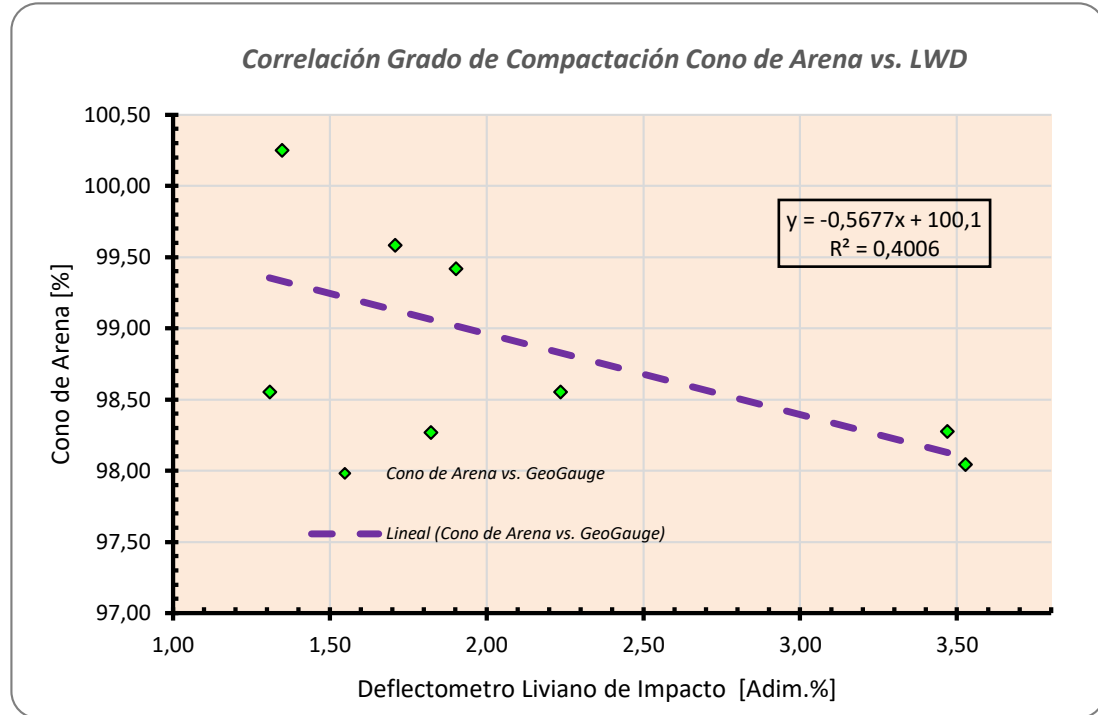
- Como se pudo observar en el cálculo de los valores de "C", son diferentes para cada suelo, en nuestro caso los valores hallados son para un suelo del tipo A-1-a (0), es por eso que se debe tomar en cuenta realizar un estudio para tener dichos valores en distintos suelos del país.

- Comparando los ensayos GeoGauge y LWD los resultados de correlación para los grados de compactación en el tramo de prueba son aceptables, es decir con estos resultados obtenidos en campo tienen una variación baja, lo cual puede ser usado como una correlación aceptable estadísticamente.



Gráfica 27. Correlación Grado de Compactación Cono de Arena vs. GeoGauge
Fuente: Elaboración Propia

- De las correlaciones encontradas entre el Cono de Arena y el GeoGauge gráficamente podemos decir que el grado de compactación es directamente proporcional a las lecturas de Rigidez estructural del suelo. Para un tipo de suelo A-1-a (0), el grado de compactación varía de 100,25 a 98,07 para las rigideces de 35,42 a 26,40.
- Se puede concluir que el LWD tiene una correlación baja moderada con el método Cono de Arena, por lo tanto, es un equipo que puede ser aceptado, siempre y cuando, se tome en cuenta las consideraciones en laboratorio como en campo, además que el equipo debe estar calibrado de una manera correcta, también debe tenerse en cuenta los ciclos de compactación con el cual se realizó la capa subbase, para tener de referencia el grado compactado del material y poder ser aprobado para liberación del tramo.



Gráfica 28. Correlación Grado de Compactación Cono de Arena vs. LWD
Fuente: Elaboración Propia

- Los resultados de la aplicación de los tres equipos, GeoGauge, Deflectómetro Liviano de Impacto y Cono de Arena, nos muestra con la investigación realizada en el presente proyecto de grado que tienen una confiabilidad aceptable, por lo tanto, son aplicables para controles de calidad para una construcción vial. Así mismo, se realizó una tabla comparativa para determinar las ventajas y desventajas que tienen los métodos y equipos utilizados:

Ventajas y Desventajas					
GeoGauge		Deflectómetro Liviano de Impacto (LWD)		Cono de Arena	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Tiempo de ejecución en campo de 9 [min]	Equipo costoso	Tiempo de ejecución en campo es de 10 [min]	Diferencias entre dispositivos comerciales	Práctico, Procedimiento sencillo	Tiempo de ejecución en campo es de 45 [min]
No destructivo	No hay linealidad esfuerzo de vibración y humedad	No destructivo	Equipos costosos	Equipo no costoso	Destructivo
Bajo factor humano	Se debe determinar el factor de "C"	Bajo factor humano	No hay linealidad humedad y esfuerzo		Alto factor humano

	para cada tipo de suelo				
Fácil medición y rápida		Fácil medición y rápida	Diferencias entre dispositivos comerciales		Densidades
Módulo de Young y Rigidez		Módulo de elasticidad	Proceso más lento para determinar los módulos en laboratorio		No es dato para el diseño para pavimentos
Un solo tipo de dispositivo		Replica el movimiento de la rueda de un camión	Diferencias en esfuerzos en laboratorio y campo		
Replica movimientos de vibración para emitir fuerzas al suelo, para poder hallar módulos		Mediciones cuantitativas críticas entre pavimento y desempeño de pavimento	Sensible a factores externos		
Cuenta con un verificador de masas (calibración)			No cuenta con un calibrador para verificar valores de módulo		

Tabla 80. Ventajas y Desventajas
Fuente: Elaboración Propia

8.2. RECOMENDACIONES

- Considerar las distancias con las cuales se debe realizar los ensayos ya que puede tener una influencia al momento de evaluar los resultados obtenidos en campo.
- Tanto en laboratorio como en campo, verificar el buen estado y funcionamiento de los equipos antes de realizar la toma de datos. Además de comprobar sus calibraciones. Esto para tener más confiabilidad en los resultados.
- Se recomienda verificar la energía de compactación sobre el molde Proctor, con el fin de obtener una relación real con la compactación ejecutada en cada capa de material en campo, ya que este es uno de los parámetros incidentes en la obtención de resultados.
- Debido a que el contenido de agua es un factor importante a considerar es indispensable obtener el módulo elástico LWD dentro de las dos primeras horas realizada la compactación, lo cual garantizará la confiabilidad de las mediciones en campo, al evitar pérdidas de humedad en el suelo.
- Se debe verificar si se trata de un sistema de capas en la estructura de un pavimento en estudio, para posteriormente utilizar la ecuación de correlación descrito en el Manual M-MMP-1-16/20.

- Realizar el control de variaciones para los valores obtenidos con los equipos GeoGauge y Deflectómetro Liviano de Impacto, según al coeficiente de variación (COV) descritos por el Manual M-MMP-1-16/20.
- Se recomienda usar adecuadamente las ecuaciones propias para determinar módulos en cada tipo de equipo LWD, ya que no todos los equipos tienen el mismo principio de funcionamiento, debido a variaciones en sus elementos.
- Realizar ciclos de compactación con la maquinaria, en terraplenes de prueba y así tener previo conocimiento de las compactaciones que se realizaran en el tramo. Ya que influye en los valores de la recolección de datos en cada equipo.
- Se recomienda, tener la información del tipo de material que se está colocando en cada capa que conforma la estructura del pavimento esta puede ser la subrasante o sub base, por motivos de que el equipo LWD- PRIMA 100 toma datos hasta un espesor de 30 [cm] y en esta investigación el espesor de la subbase granular es de 20 [cm], por lo cual quiere decir que los 10 [cm] restantes el equipo está considerando en los resultados, el material de la subrasante.
- Se debe utilizar la ecuación de ajuste para corregir los módulos obtenidos en laboratorio en capas de Base y Subbases granulares, recomendada en la norma AASHTO TP456-17.
- Por los tiempos de ejecución en los ensayos, se recomienda realizar primeramente los ensayos no destructivos. Y así tener un conocimiento del grado de compactación inmediato, previo para posteriores ensayos.
- Se recomienda utilizar terraplenes de prueba cerca de la obra, para verificar y ajustar las pasadas de la compactación, a finde lograr un grado de compactación igual al 95% como mínimo que indica las Especificaciones Técnicas del proyecto (ETs.), la cual está verificación también tiene implicaciones económicas.
- Realizar los ensayos inmediatamente después de la compactación para evitar variaciones en los resultados.
- Para la verificación del contenido de humedad del LWD para el tramo de prueba, se realizó en laboratorio en lugar de hacer la medición en campo, ello debido a que en el momento no se contaba con una hornilla manual para determinar el contenido de humedad en campo, lo adecuado según el manual M-MMP-1-16/20.
- Se recomienda utilizar otros métodos para hallar los contenidos de humedad en sitio como ser el método mediante el equipo Speedy.
- Se recomienda utilizar el equipo GeoGauge Humboldt H-4140, ya que nos da mucha confiabilidad en los valores de sus parámetros estudiados en este proyecto, dando así resultados de correlaciones

altas y significativas, además de ser un procedimiento rápido en las lecturas de sus valores en campo, podemos decir que ahorraría tiempo.

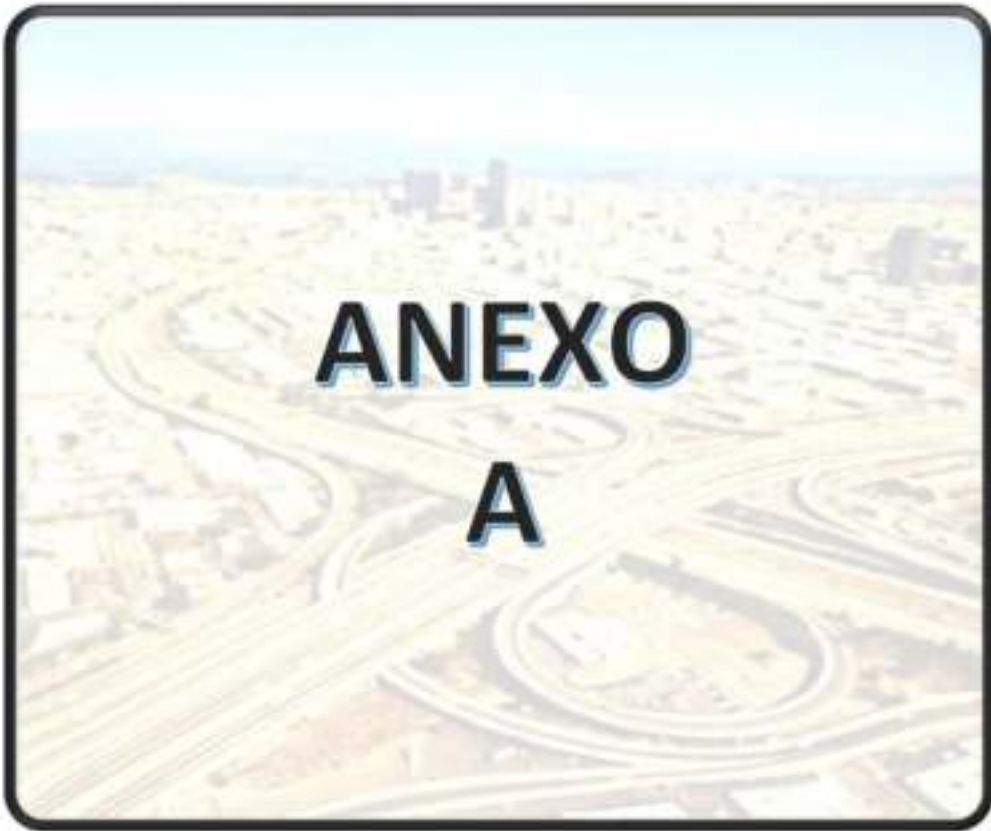
- Para un buen ensayo respecto al equipo LWD se debe considerar el tiempo de calibración del equipo , buen manejo en campo y laboratorio, el buen uso de la norma y los manuales vigentes, para evitar la toma de datos erróneos, en este proyecto se notó que obtuvimos valores altos respecto a sus módulos, dando correlaciones aceptables pero bajas, de todas maneras también se recomienda utilizar este equipo teniendo en cuenta las anteriores afirmaciones, ya que es un procedimiento rápido y con la ayuda de las correlaciones encontradas tener un apoyo de los valores que se puedan obtener a la hora de realizar controles en campo.



CAPITULO 9. BIBLIOGRAFÍA

- Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), Manual técnico ensayo de suelos y materiales, Manual especificaciones técnicas, volumen 4, volumen 7.
- Alelí Osorio, Lird (2008), Metodología de evaluación in situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimento flexible con el deflectómetro de impacto liviano, Santiago de Chile, Tesis de Grado
- Braja M. Das, (2015), Fundamentos de Mecánica de Suelos, Cuarta Edición.
- Bowles, Joseph E. (1981) Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. México: Editorial McGraw-Hill.
- Crespo Villalaz, Carlos, (2005) Mecánica de suelos y cimentaciones. Quinta Edición. México. Editorial Limusa
- Cussi Mamani, Fanny Janneth, Quispe Zeballos, Ademar, (2019), Comparación del valor del módulo de reacción de un suelo, determinado mediante el ensayo de placa de carga en sitio y a partir de ensayos en laboratorio, Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería UMSA.
- Dr. Maher, Ali, Mr. Bennert Thomas, Dr. Gucunski Nenad. (2002). Evaluation of the Humboldt Stiffness gauge. U.S. New jersey, departamento of transportation, división of research and technology and federal highway administration. Report.
- Empresa Boliviana de la construcción (EBC), (2021), especificaciones técnicas de la "Construcción Doble Vía El Alto – Viacha"
- Estuardo de León Monroy, Eddy Jose (2009), Ventajas y desventajas de la utilización del método de la arena y el densímetro nuclear en la determinación de la densidad en campo, Guatemala, trabajo de grado.
- Guerrón AVECILLAS, Silvia Alexandra. (2013), comparación de resultados de densidad de campo por los métodos cono y arena, volumétrico y densímetro nuclear, Quito Ecuador, trabajo de grado.
- Guzmán Abril, Axel Antonio. (2013), Manual operativo del aparato de globo de hule ASTM D 2167, análisis comparativo y descriptivo con el método cono de arena ASTM D 1556 para la determinación de densidad en campo, Guatemala, Trabajo de Grado.
- Humboldt H-4140, Manual del Usuario GeoGauge, Humboldt Mfg.
- Instituto Boliviano del Cemento y Hormigón (ICBH), Agosto (2021), Curso de construcción y rehabilitación de Pavimentos Rígidos.

- Ing. Msc. Bermejo Franco, Víctor Eduardo, Ing. Msc. Pacosillo Ticona, Luis, (2013), Laboratorio de Mecánica de Suelos, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil.
- Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso. (2005), Mecánica de Suelos, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Tercera Edición, México. Editorial Limusa
- Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso. (2003), Mecánica de Suelos, Tomo II, Editorial Limusa,
- Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso. (2003), Teoría y aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Tercera Edición, México. Editorial Limusa.
- Kolding DK-6000, Manual del Usuario PRIMA 100 LWD (LIGHT FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER).
- Lambe William y Whitman, Robert, (2005), Mecánica de Suelos. México: Editorial Limusa.
- Lenke R. Lary, Mckeen R. Gordon, (2001), Evaluation of a mechanical Stiffness gauge for compaction control of granular media, new mexico, Albuquerque. Report.
- Martin Pliego, Fransisco Javier, Ruiz Maya, Perez Luis, (2009), fundamentos de probabilidad, 3ra edición, España, Alfa Centauro.
- Mite Bedoya, Mariuxi Paola, (2018), Correlacion estadística entre método densímetro electrónico y método placa y cono para determinar la densidad del suelo en terraplen: Machala, proyecto de grado.
- Palenque Reyes, Humberto, Tópicos de investigación para elaborar la tesis de grado, 2° Edición – Actualizada.
- Palenque Reyes, Humberto, (2014), tópicos de investigación, 2da edición – actualizada.
- Salamanca Rodríguez, Eliana Carmenza, (2020), curvas de calibración para el control de calidad de compactación usando el equipo LWD en capas granulares en un proyecto de infraestructura vial. Bogotá Colombia, Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de grado.
- Sierra Pérez, Eduardo, y Paternina Martin, Varela, (2012), tesis: “Correlación entre el método GeoGauge y el método cono de arena para determinar la densidad del suelo en campo”, Barranquilla Colombia.
- Secretaria de comunicaciones y transportes, (2020), Métodos de muestreo y prueba de materiales (manual M-MMP-1-16/20), Instituto Mexicano del Transporte.
- <https://jesusgarciaj.com/2010/01/22/la-curva-de-distribucion-normal/>
- <https://www.medwave.cl/series/MBE04/5033.html>



1. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA (ASTM D422 AASHTO T87- 70; T27-93)

Humedad Higroscópica		Peso Seco de la muestra Total	
Especificación	Datos	Especificación	Datos
Masa de la cápsula: M_c [g] =	124.7	Masa Muestra Húmeda total: M_{mh} [g] =	8507.00
Masa Humedo+ capsula: M_h [g] =	462.3	Agregado grueso (Ret. N10): M_g [g] =	5647.09
Masa Seco+ capsula: M_s [g] =	457.4	Pasa N° 10 húmedo: $M_h - M_{mh} - M_g$, M_h [g] =	2859.91
Masa de la muestra Seca: $M_s = M_h - M_c$; M_s [g] =	332.7	Masa del agua: $M_a = (M_h * \%h) / (100 + \%h)$; M_a [g] =	41.51
Masa del Agua: $M_a = M_h - M_s$; M_a [g] =	4.9	Pasa N 10 seco: $M_s - M_a$; M_s [g] =	2818.40
Contenido de Humedad: $h(\%) = M_a / M_s * 100 =$	1.47	Muestra total seca: $M_Ts = M_g + M_s$; M_Ts [g] =	8465.49

ANÁLISIS DE TAMICES DEL AGREGADO GRUESO					
Tamices	Aberturas	Masa Retenida	Parcial Ret.	Acumulado	
		M_{ret}	$M_{%ret}$	$M_{%ret\ acum}$	$M_{%pasa}$
No.	[mm]	[g]	[%]	%Ret. Acum.	% Pasa
2"	50.8	-	0	0	100.000%
1 1/2"	38.1	317.09	0.037	0.037	96.254%
1"	25.4	863.7	0.102	0.139	86.052%
3/4"	19.1	584.9	0.069	0.209	79.142%
1/2"	12.7	949.1	0.112	0.321	67.931%
3/8"	9.52	596.5	0.070	0.391	60.885%
No. 4	4.76	1309.7	0.155	0.546	45.414%
No. 10	2	1026.1	0.121	0.667	33.293%
TOTAL		5647.09			

$$M_{%ret} = \frac{M_{ret}}{M_{tot}}$$

$$M_{%pasa} = 1 - M_{%ret\ acum}$$

Masa muestra húmeda [g]	320
Masa muestra seca [g]	315

ANÁLISIS DE TAMICES DEL AGREGADO FINO						
Tamices	Aberturas	Masa Ret.	%Ret. Mortero		%Acumulado Pasa	
		M_{ret}	$M_{%ret}$	$M_{%ret\ acum}$	$M_{%pasa}$	$M_{%total}$
No.	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[%]
No. 10	2	-	-	0	100.000%	33.293%
No. 20	0.84	111.67	0.354	0.354	64.589%	29.332%
No. 40	0.42	74.96	0.238	0.592	40.819%	18.538%
No. 60	0.25	36.63	0.116	0.708	29.204%	13.263%
No. 100	0.105	22.66	0.072	0.780	22.018%	9.999%
No. 200	0.074	6.04	0.019	0.799	20.103%	9.129%
		251.96				

$$M_{%ret} = \frac{M_{ret}}{M_{tot}}$$

$$M_{%pasa} = 1 - M_{%ret\ acum}$$

$$M_{%total} = M_{%pasa} + M_{%ret}$$

Composición de la muestra

%Gravas	54.59%	%Arenas	36.28%	%Finos	9.13%
---------	--------	---------	--------	--------	-------



Coefficiente de Uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{9,0}{0,075} = 120$$

Coefficiente de Curvatura:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} = \frac{0,9^2}{9 \times 0,075} = \frac{0,81}{0,675} = 1,2$$

OBSERVACIONES.-

2. LIMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D4318; AASHTO T89; T90)

LÍMITE LÍQUIDO (LL) - SUELO NATURAL

LÍMITE LÍQUIDO (L.L.)			
Especificación	Datos		
Cápsula	76	75	104
Número de golpes: N^* [golpes] =	18	28	31
Masa suelo húmedo+ capsula: M_{sh+c} [g] =	35.25	42.32	42.24
Masa suelo seco+ capsula: M_{ss+c} [g] =	32.51	38.48	38.71
Masa del Agua: $M_a = M_{sh+c} - M_{ss+c}$; M_a [g]=	2.74	3.84	3.53
Masa de la cápsula: M_c [g] =	17.05	15.25	17.02
Masa de la muestra Seca: $M_{ss} = M_{ss+c} - M_c$; M_{ss} [g] =	15.46	23.23	21.69
Contenido de Humedad: h (%) = $M_a/M_{ss} * 100$ =	17.72	16.53	16.27



Cápsula	76	75	104
Número de golpes: N^* [golpes] =	18	28	31
Logaritmo del Número de golpes: $\ln(N^*)$ =	1.26	1.45	1.49
Porcentaje de humedad: $\%h$ [%] =	17.72	16.53	16.27
Índice de deformación: Id =	-2.675		
% humedad corregida: $\%h_c = [Id * \log(N)] \pm C$; $\%h_c$ [%] =	17.22	16.71	16.59
Promedio	$LL\% = \frac{\%h}{1.419 - 0.3 * \log(N)}$		
$\ln(N^*)_{prom.} =$ 1.40			
$\%h_{prom.} =$ 16.84			
$C = \%h_{prom.} - [\log(N)_{prom.} * Id] =$ 20.58			
Limite Liquido:	17.00	16.78	16.75
LL =	16.85 %		

Limite Liquido = 16.85 % Para N=25 [golpes]

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO DE GRADO: "ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CONO DE ARENA, DEFLECTOMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEOGAUGE EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE VÍA EL ALTO - VIACHA"

LÍMITE PLÁSTICO (LP) - SUELO NATURAL

LIMITE PLASTICO (L.P.)			
Especificación	Datos		
Cápsula	34	35	36
Masa suelo húmedo+ capsula: M_{sh+c} [g] =	23.50	24.94	23.58
Masa suelo seco+ capsula: M_{ss+c} [g] =	22.66	23.98	22.79
Masa del Agua: $M_a = M_{sh+c} - M_{ss+c}$; M_a [g]=	0.84	0.96	0.79
Masa de la cápsula: M_c [g] =	15.16	15.12	15.29
Masa de la muestra Seca: $M_{ss} = M_{ss} - M_c$; M_{ss} [g] =	8	8.86	7.5
Contenido de Humedad: h (%) = $M_a/M_{ss} * 100$ =	11.2	10.84	10.53
Promedio Contenido de Humedad [%]:	10.86		

Limite Plástico = 10.86 % Para N=25 [golpes]

Entonces el IP será:

Índice de Plasticidad: $IP = LL - LP = 5.99$

OBSERVACIONES. -

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL	PROYECTO DE GRADO: "ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CONO DE ARENA, DEFLECTOMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEÓLOGO EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE VÍA EL ALTO - VACOMA"
---	---

3. CLASIFICACIÓN DE SUELOS (AASHTO M145)

En base a los resultados de los ensayos de Granulometría y Límites de Atterberg, clasificaremos el suelo según la norma AASHTO:

Nº	Porcentaje			Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
	Gravas	Arenas	Finos			
1	54.59%	36.28%	9.13%	16.85	10.86	5.99

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz Nº 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz Nº 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa: Nº 10 (2mm) Nº 40 (0,425mm) Nº 200 (0,075mm)	50 máx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Características de la fracción que pasa por el tamiz Nº 40	-		-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín (2)
Límite líquido	-		-	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Índice de plasticidad	6 máx		NP (1)	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Características como subgrado			Excelente a bueno				Pobre a malo				

(1): No plástico

(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Por lo tanto se clasifica el material como:

Material granular
Excelente a bueno como subgrado
A-1-a Fragmentos de Roca, Grava y Arena

Índice de Grupo:

$$I.G. = \underbrace{(Pasa\ N^{\circ}200 - 35)}_a [0,2 + \underbrace{0,005(LL - 40)}_b] + 0,01 \underbrace{(Pasa\ N^{\circ}200 - 15)}_c \underbrace{(IP - 10)}_d$$

$$I.G. = (17,09 - 35)[0,2 + 0,005(16,85 - 40)] + 0,01(17,09 - 15)(5,99 - 10)$$

$$I.G. = (35 - 35)[0,2 + 0,005(40 - 40)] + 0,01(15 - 15)(10 - 10)$$

Valor del índice de grupo (IG):

Valor del índice de grupo (IG): 0

A - 1 - a (0) Fragmentos de Roca, Grava y Arena

I. CLASIFICACIÓN DE SUELOS (ASTM M145)

DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACION DE LABORATORIO		
SUELOS DE GRANO GRUESO Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4.75 mm)	GW Gravas limpias (sin o con pocos finos)	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5% → GW, GP, SW, SP >12% → GM, GC, SM, SC 5 al 12% → casos límite que requieren usar doble símbolo	$C_u = D_{60}/D_{10} = 4$ $C_c = (D_{30} - D_{10}) / (D_{60} - D_{10})$ entre 1 y 3	
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4.75 mm)	GP Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	GM Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW
		GC Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.	SW Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		Arenas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4.75 mm)	SP Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	SM Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		Arenas con grava, pocos finos o sin finos.	$C_u = D_{60}/D_{10} = 6$ $C_c = (D_{30} - D_{10}) / (D_{60} - D_{10})$ entre 1 y 3
		SC Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	(Empty)		(Empty)	Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.
	SUELOS DE GRANO FINO Más de la mitad del material pasa por el tamiz número 200	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50	ML Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.		(Empty)	Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$.
Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	CL Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.	OL Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.	(Empty)	Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.	(Empty)	
Suelos muy orgánicos	MH Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.	CH Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.	(Empty)	(Empty)	(Empty)	
(Empty)	OH Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada, limos orgánicos.	PT Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.	(Empty)	(Empty)	(Empty)	

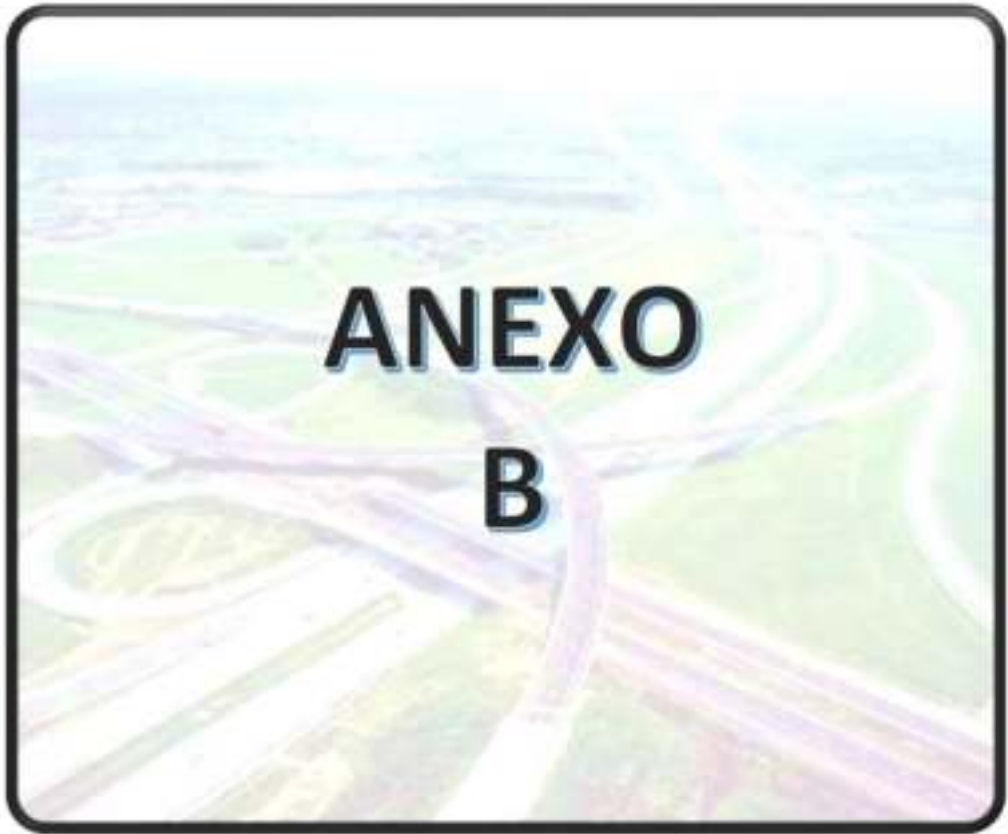


Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)

Suelo de partículas gruesas (Nomenclatura con un símbolo)

Suelos de grano grueso - Gravas limpias GW

GM (GRAVA BIEN GRADUADA CON LIMO Y ARENA)



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL	PROYECTO DE GRADO: "ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CONO DE ARENA, DEFLECTOMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEODASIS EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE VÍA EL AUTO VIACHA"
---	--

1. ENSAYO RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA(ASTM 1883 AASTHO T193)

PLANTILLA DE TOMA DE DATOS

1. DATOS DEL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO - CURVA DE COMPACTACIÓN

Muestra:	Humedad Óptima [%]	Densidad Seca Máxima [kN/m ³]
Capa Subbase - TP El Alto Viacha	4.78	22.32

2. COMPACTACIÓN CBR Volumen del molde = 2109.12 [cm³]

Nº Molde	20		15		19	
	5		5		5	
Numero de capas	10		25		56	
Numero de Golpes por capa	10		25		56	
Condición de la muestra	Húmeda	Saturada	Húmeda	Saturada	Húmeda	Saturada
Masa muestra + molde [g]	10858.00	10981.00	11062.50	11148.00	11220.00	11268.00
Masa del molde [g]	6152		6150		6145	

2.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

Muestra de humedad al:	Inicial		Final		Inicial		Final		Inicial		Final	
	R-B	Z	P-A	21	7-V	18-A	39-Z	16-B	5L	50-B	17	20
Nº Contenedor	100.38	115.73	109.08	125.48	104.78	103.33	123.59	126.78	103.47	101.98	128.19	133.02
Masa del contenedor [g]	732.00	632.30	677.30	799.80	612.50	643.00	758.50	696.50	489.50	454.00	734.10	727.50
Masa Contenedor + masa húmeda [g]	705.10	610.28	642.50	758.20	591.44	621.03	725.70	665.00	474.28	437.59	703.70	698.70
Masa contenedor + masa seca [g]												

2. EXPANSIÓN

Fecha	Hora	Lectura		Lectura		Lectura	
20/8/2021	12:30	0+10	0+10	0+10	0+10	0+10	0+10
24/8/2021	13:30	0+10	0+10	0+11	0+11	0+12	0+12

3. PENETRACIÓN

min	Pulg.	cm.	Lectura		Lectura		Lectura	
0-30	0.025	0.064	389	9302	564	32054	1350	
1-00	0.050	0.127	1749	9468	2284	33724	5924	
1-30	0.075	0.191	3186	9880	5684	35.48	12560	
2-00	0.100	0.245	4126	10080	9580	35040	20020	
2-30	0.125	0.318	4930	10569	13054	36628	27820	
3-00	0.150	0.381	5880	11020	16545	37686	35260	
3-30	0.175	0.445	8570	11476	19848	39052	42160	
4-00	0.200	0.508	7120	11926	22904	39164		
4-30	0.225	0.762	7536	12386	25446	39928		
5-00	0.250	1.016	8132		27920			
5-30	0.275	1.270	8720		30242			

4. PESO UNITARIO SUELO HÚMEDO

Condición de la muestra	Húmeda	Saturada	Húmeda	Saturada	Húmeda	Saturada
Masa muestra húmeda + molde [g]	10858.00	10981.00	11062.50	11148.00	11220.00	11268.00
Masa del molde [g]	6152		6150		6145	
Masa del suelo húmedo [g]	4706.00	4829.00	4912.50	4998.00	5075.00	5123.00
Volumen de la muestra [cm ³]	2109.12	2109.12	2109.12	2109.12	2109.12	2109.12
Peso unitario del suelo húmedo [g/cm ³]	2.23	2.29	2.33	2.37	2.41	2.43

5. PESO UNITARIO SUELO SECO

Muestra de humedad al:	Inicial		Final		Inicial		Final		Inicial		Final	
Nº Contenedor	R-B	Z	P-A	21	7-V	18-A	39-Z	16-B	5L	50-B	17	20
Masa del contenedor [g]	100.38	115.73	109.08	125.48	104.78	103.33	123.59	126.78	103.47	101.98	128.19	133.02
Masa Contenedor + masa húmeda [g]	732.00	632.30	677.30	799.80	612.50	643.00	758.50	696.50	489.50	454.00	734.10	727.50
Masa Contenedor + masa seca [g]	705.10	610.28	642.50	758.20	591.44	621.03	725.70	665.00	474.28	437.59	703.70	698.70
Masa del agua [g]	26.90	22.22	34.80	41.60	21.06	21.97	32.80	31.50	15.22	16.41	30.40	28.80
Masa del suelo seco [g]	604.72	494.55	533.42	632.72	486.66	517.70	602.11	538.22	370.81	335.61	575.51	565.68
Contenido de humedad [%]	4.4483	4.4930	6.5239	6.5748	4.3275	4.2438	5.4475	5.8526	4.1045	4.8896	5.2823	5.0912
Promedio contenido de humedad [%]	4.4707		6.5494		4.2856		5.6501		4.4971		5.1867	
Peso unitario muestra seca [g/cm ³]	2.14		2.15		2.23		2.24		2.30		2.31	

6. EXPANSIÓN

Altura del suelo en el molde CBR compactado	=	h = 5 "	(POR NORMA)
Precisión Tripode extensómetro Dial 155 (Lab.)	=	0.001	[plg]

Fecha	Hora	Tiempo transcurrido en días	MOLDE N° 20			MOLDE N° 15			MOLDE N° 19		
			LECTURA EXTENS.	EXPANSIÓN		LECTURA EXTENS.	EXPANSIÓN		LECTURA EXTENS.	EXPANSIÓN	
			30			30			10		
20/8/2021	12:30	0									
		1									
		2									
		3									
24/8/2021	13:30	4	11		0.02	11		0.02	12		0.04

7. (PLANILLA COMPLETA HASTA 10 MINUTOS)

min	Penetración en [plg]	Penetración en [cm]	Lectura 1 [Kg]	Lectura 2 [Kg]	Lectura 3 [Kg]
0:30	0.025	0.064	0.389	0.564	1.35
1:00	0.050	0.127	1.749	2.284	5.924
1:30	0.075	0.191	3.186	5.684	12.56
2:00	0.1	0.245	4.126	9.580	17.02
2:30	0.125	0.318	4.93	13.054	
3:00	0.150	0.381	5.88	16.545	
3:30	0.175	0.445	6.57	19.848	
4:00	0.2	0.508	7.12	20.904	27.82
4:30	0.225	0.762	7.536	25.446	
5:00	0.250	1.016	8.132	27.920	
5:30	0.275	1.270	8.72	30.242	
6:00	0.3	0.762	9.302	30.322	35.26
6:30	0.325	0.826	9.468	33.724	
7:00	0.350	0.889	9.88	35.480	
7:30	0.375	0.953	10.08	35.640	
8:00	0.4	1.016	10.569	35.628	42.16
8:30	0.425	1.080	11.02	37.686	
9:00	0.450	1.143	11.476	39.052	
9:30	0.475	1.207	11.926	39.164	
10:00	0.5	1.270	12.386	39.150	50.20

7.1 PARA NUESTRO CASO SE UTILIZO UNA CARGA Y PISTON DE PENETRACION DIGITAL EXPRESADO EN kg.

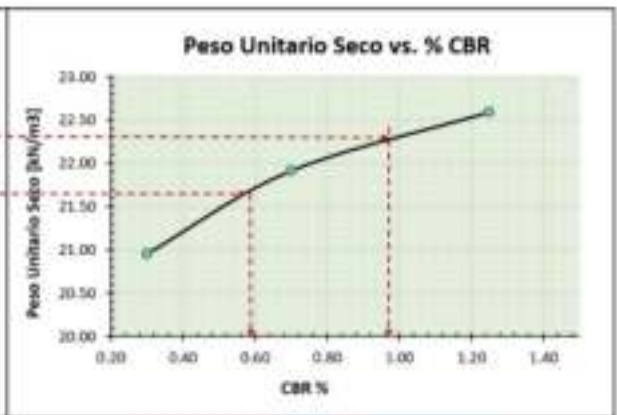
0.0250	0.389	0.564	1.35
0.0500	1.749	2.284	5.924
0.0750	3.186	5.684	12.56
0.1000	4.126	9.58	17.02
0.2000	7.12	20.904	27.82
0.3000	9.302	30.322	35.26
0.4000	10.569	35.628	42.16
0.5000	12.386	39.15	50.2

7.2 CBR

Penetración en [plg]	Molde 1			Molde 2			Molde 3		
	Penetración en [libras]	CBR [%]	CBR corregido	Penetración en [libras]	CBR [%]	CBR corregido	Penetración en [libras]	CBR [%]	CBR corregido
0.000	0			0			0		
0.025	0.9			1.2			3.0		
0.050	3.9			5.0			13.1		
0.075	7.0			12.5			27.7		
0.100	9.1	0.30		21.1	0.70		37.5	1.25	
0.200	15.7	0.35		46.1	1.02		61.3	1.36	
0.300	20.5			66.8			77.7		
0.400	23.3			78.5			92.9		
0.500	27.3			86.3			110.7		



7.3 GRÁFICAS CURVA DE COMPACTACIÓN VS. CBR



Del gráfico interceptando las densidades secas con la curva de CBR, tenemos:

	%	D _s	CBR	Según ETs
CAPA BASE	100	22.32	98	Mayor al 90%
CAPA SUBBASE	97	21.65	58	Mayor al 40%

Resumen Ensayo CBR de Laboratorio			
CAPA	CBR %	CBR	Según ETs
BASE	100	98%	Mayor al 90%
SUBBASE	97	58%	Mayor al 40%
Cumple			

5. ENSAYO PROCTOR MODIFICADO (ASTM D1557 - AASHTO T180 D)

5.1 COMPACTACIÓN

1. DATOS DEL ENSAYO

Molde:	6"	Método:	D
Diámetro: [cm]	15.231	N° de Golpes:	56
Altura: [cm]	11.384	Peso [g]:	6000

2. PESO UNITARIO

Puntos de humedad	1	2	3	4
Cantidad de agua, %	2.0 %	4.0 %	6.0 %	8.0 %
Nombre de Molde	molde 1	molde 2	molde 3	molde 4
Peso molde s/base, A [g] =	5423	5423	5423	5423
Peso suelo humedo +molde, B [g] =	10054.5	10306.5	10381.5	10319.5
Peso suelo humedo (Psh), C [g] = B-A	4631.5	4883.5	4958.5	4896.5
Volumen del muestra (Vm), D [cm³] =	2074.2	2074.2	2074.2	2074.2
Densidad suelo humedo (Dh), E [g/cm³] =	2.23	2.35	2.39	2.36

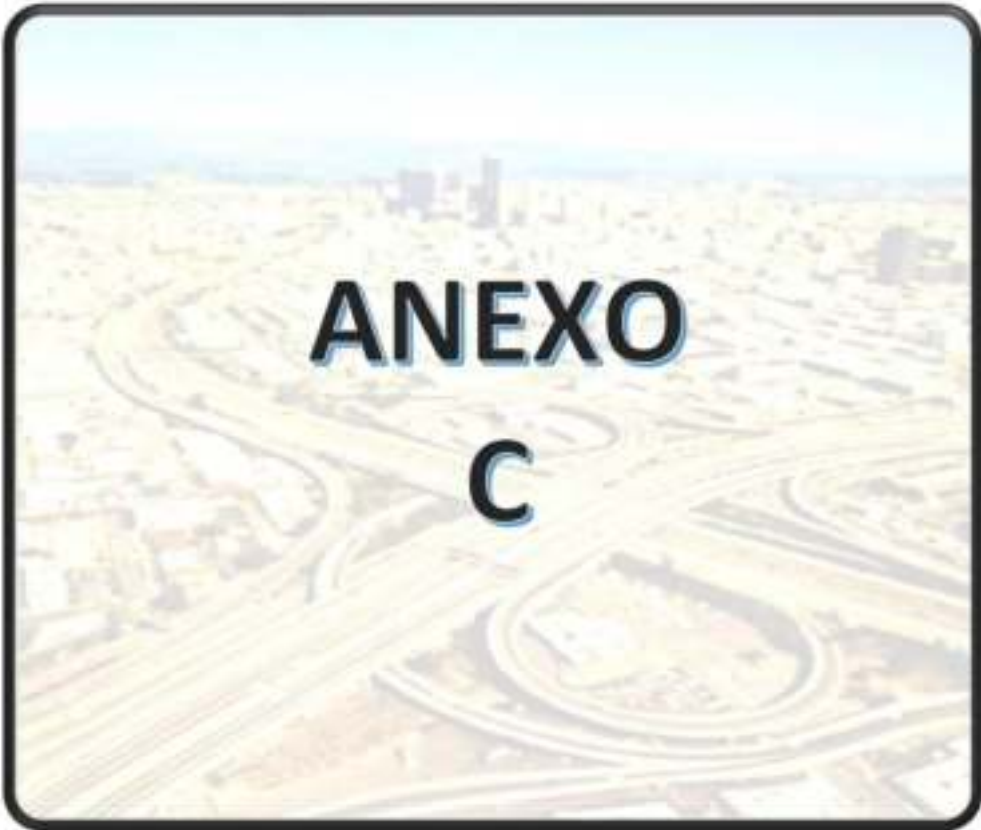
3. CONTENIDO DE HUMEDAD

Cantidad de agua, %	2.00		4.00		6.00		8.00	
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8
Capsulas N°	19	16	23	12	27V	41	85	16-C
Peso de la cápsula, F [g] =	124.72	146.89	110.55	133.72	165.21	135.07	106.06	135.31
Peso suelo humedo + cápsula, G [g] =	834.7	981.60	796.2	892.00	903.4	948.80	849.7	975.60
Peso suelo seco + cápsula, H [g] =	915.5	990.90	764.8	862.80	883.1	902.60	799.1	918.20
Peso del agua (Pa), I [g] = G - H	19.2	20.70	25.6	29.4	40.3	46.2	50.6	57.4
Peso suelo seco (Ps), J [g] = H - F	790.78	814.01	654.05	728.88	697.89	767.53	691.02	782.89
Contenido de humedad, K [%] = I / J *100	2.43	2.54	3.91	4.03	5.77	6.02	7.32	7.33
Contenido de humedad promedio, L [%] =	2.485		3.974		5.897		7.327	
Densidad suelo seco, M [g/cm³] = E/((1+L)/100)	2.179		2.264		2.257		2.200	
Saturación, S = 2,7/(1+(L/100)*2,7)*8,81	25		24		23		22	



% H óptima	4.78	Densidad seca más. [kN/m³]	22.32
------------	------	----------------------------	-------

OBSERVACIONES.-



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL	PROYECTO DE GRADO: "ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CONO DE ARENA, DEFLECTOMETRO UNIVANO DE IMPACTO Y GEOGAUGE EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE VÍA EL ACTO - SIACAMA"
---	---

1. OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE RIGIDEZ EN CAMPO CON EL GEOGAUGE

Se realizaron los ensayos correspondientes en cada punto, en el tramo de prueba:

Nº Punto	DESCRIPCIÓN / ESTACA	Clasificación del Suelo [AASHTO]	Densidad [Laboratorio] [gr/cm³]	Densidad de Campo [Cono de Arena] [gr/cm³]	Humedad Óptima Laboratorio [%]	Humedad Campo [%]	DATOS GEOGAUGE	
							TIPO DE ESTRUCTURA	
							MR Young [Mpa]	Medición Rigidez [MN/m]
1	K 10+260	A-1-a (0)	2234	2.282	4.78	3.5	252.31	29.09
		A-1-a (0)	2234	2.282	4.78	3.5	315.06	36.32
		A-1-a (0)	2234	2.282	4.78	3.5	230.68	26.59
I	TOTAL K 0+000						266.02	30.67
2	K 10+290	A-1-a (0)	2234	2.243	4.78	3.5	186.06	21.45
		A-1-a (0)	2234	2.243	4.78	3.5	303.95	35.04
		A-1-a (0)	2234	2.243	4.78	3.5	327.40	37.74
II	TOTAL K 0+030						272.47	31.41
3	K 10+320	A-1-a (0)	2234	2.263	4.78	3.5	312.05	33.8
		A-1-a (0)	2234	2.263	4.78	3.5	213.94	24.66
		A-1-a (0)	2234	2.263	4.78	3.5	186.37	21.8
III	TOTAL K 0+060						237.45	26.75
4	K 10+350	A-1-a (0)	2234	2.243	4.78	3.5	210.05	24.21
		A-1-a (0)	2234	2.243	4.78	3.5	293.82	33.87
		A-1-a (0)	2234	2.243	4.78	3.5	304.63	35.12
IV	TOTAL K 0+090						269.50	31.07
5	K 10+380	A-1-a (0)	2234	2.237	4.78	3.5	279.47	32.22
		A-1-a (0)	2234	2.237	4.78	3.5	334.80	38.59
		A-1-a (0)	2234	2.237	4.78	3.5	367.39	35.44
V	TOTAL K 0+120						327.22	35.42
6	K 10+410	A-1-a (0)	2234	2.232	4.78	3.5	250.18	28.84
		A-1-a (0)	2234	2.232	4.78	3.5	255.39	29.44
		A-1-a (0)	2234	2.232	4.78	3.5	304.30	35.08
VI	TOTAL K 0+150						269.96	31.12
7	K +000	A-1-a (0)	2234	2.237	4.78	3.5	265.00	30.55
		A-1-a (0)	2234	2.237	4.78	3.5	265.09	30.56
		A-1-a (0)	2234	2.237	4.78	3.5	255.06	29.40
VII	TOTAL K 0+000						261.72	30.17
8	K +000	A-1-a (0)	2234	2.267	4.78	3.5	201.27	23.20
		A-1-a (0)	2234	2.267	4.78	3.5	286.50	27.80
		A-1-a (0)	2234	2.267	4.78	3.5	244.69	28.21
VIII	TOTAL K 0+030						244.15	26.40
9	K +000	A-1-a (0)	2234	-	4.78	3.5	238.18	27.46
		A-1-a (0)	2234	-	4.78	3.5	211.13	24.34
		A-1-a (0)	2234	-	4.78	3.5	336.15	38.75
IX	TOTAL K 0+060						261.82	30.18
10	K +000	A-1-a (0)	2234	-	4.78	3.5	143.80	16.58
		A-1-a (0)	2234	-	4.78	3.5	241.39	27.83
		A-1-a (0)	2234	-	4.78	3.5	343.93	39.65
X	TOTAL K 0+090						243.04	33.74

a) Cálculo de "C" de la región del terreno analizada partir de la Ecuación de Humboldt

Mediante la ecuación:

$$\rho_p = \frac{\rho_o}{1 + 1.2 \left[\frac{C/m}{K} - 0.3 \right]^{0.5}}$$

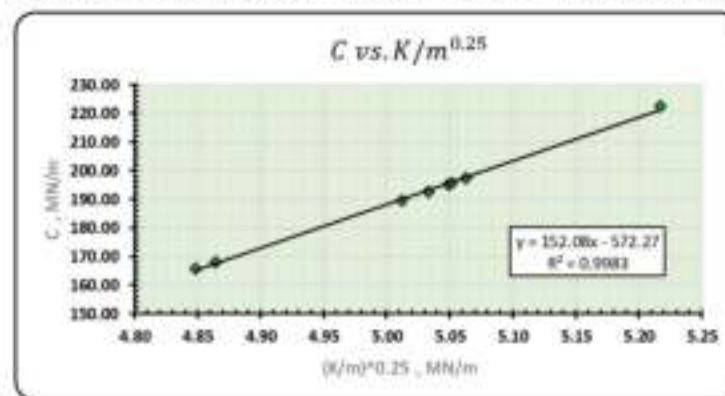
Modelo de cálculo para la determinación de los C de la región del terreno analizada:

$$C = K/m \left(\left[\frac{\rho_o - \rho_p}{1.2} \right]^2 + 0.3 \right)$$

Relación lineal para determinar para valores "C" y la relación $K/m^{0.25}$ en campo:

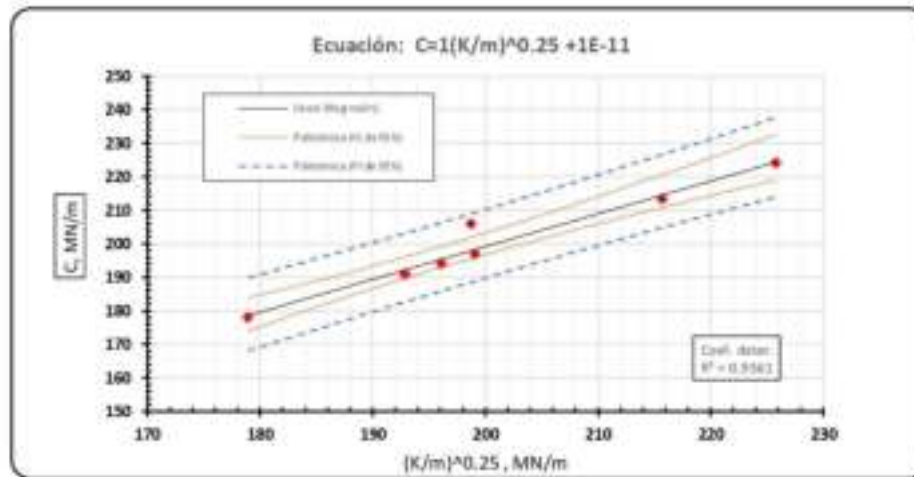
PUNTO DE ENSAYO	Capa	Nivel	Rigidez medido	Densidad Cono de Arena	Densidad Seca Máx.	Contenido de humedad óptima	Valor de "C" en terreno	$K/m^{0.25}$	Cálculo por la regresión (Comparación)	Densidad Seca Humbolt
N°		[m]	[MN/m]	[KN/m³]	[KN/m³]	m	y	x	C	[KN/m³]
1	Subbase	0.2	30.67	22.38	22.32	0.0478	192.52	5.033	193.17	22.26
2	Subbase	0.2	31.41	22.00	22.32	0.0478	197.29	5.063	197.69	22.00
3	Subbase	0.2	26.75	22.19	22.32	0.0478	167.97	4.864	167.82	22.19
4	Subbase	0.2	31.07	22.00	22.32	0.0478	195.13	5.049	195.60	22.00
5	Subbase	0.2	35.42	21.93	22.32	0.0478	222.50	5.218	220.83	21.93
6	Subbase	0.2	31.12	21.88	22.32	0.0478	195.55	5.052	195.93	21.88
7	Subbase	0.2	30.17	21.94	22.32	0.0478	189.54	5.013	190.08	21.94
8	Subbase	0.2	26.40	22.23	22.32	0.0478	165.76	4.848	165.42	22.23

Gráfica: Regresión Lineal "C" para el suelo A-1-a (0) con respecto a la Rigidez y la humedad óptima "K/m":



Datos para la regresión			Punto	\bar{y}	Pred media	UM [y]	LSM [x]	Ped. in.	UI	LSM
Nº datos	n	10	1	193.403	0.2876417	192.74	194.07	0.94	191.23	195.58
intercepto	a	-569.030	2	197.981	0.3069593	197.27	198.69	0.95	195.79	200.17
pendiente	b	151.482	3	167.820	0.4549577	166.77	168.87	1.01	165.50	170.14
Promedio de X	M_x	5.014	4	195.877	0.2960958	195.19	196.56	0.95	193.69	198.06
Suma del cuadrado de las desviaciones a con respecto a su promedio	STC _e	0.144	5	221.352	0.5588877	220.06	222.64	1.06	218.91	223.79
Error standart de estimación	S_{yx}	0.898658	6	196.205	0.2975762	195.52	196.89	0.95	194.02	198.39
Nivel de significación	λ	5%	7	190.297	0.2842093	189.64	190.95	0.94	188.12	192.47
Nivel de confianza	γ	95%	8	165.399	0.4850893	164.28	166.52	1.02	163.04	167.75
Grados de libertad	$v=n-2$	8	9	165.399	0.4850893	164.28	166.52	1.02	163.04	167.75
Valor crítico de tadas correspondiente a la distribución t de student	$t_{(n-2)(1-\lambda/2)}$	2.31	10	211.826	0.4373154	210.82	212.83	1.00	209.52	214.13

Gráfica: Correlación entre valores C y la relación $K/m^{0,25}$ medidos en el terreno:



Validación de la ecuación del modelo matemático:

El grado de compactación se calculará como:

$$p_{ca} = \frac{-51.212 \pm \sqrt{101.529 - 4.554 \cdot p_{Rumboldr}}}{-2.277}$$

$$G.C. = \frac{\rho_{seca \text{ Humboldt}}}{\rho_{seca \text{ máx.}}} \times 100$$

PUNTO	Densidad Cono de Arena	Densidad por inducción del núcleo
N°	[KN/m3]	[KN/m3]
1	22.38	22.33
2	22.00	21.98
3	22.19	22.19
4	22.00	21.98
5	21.93	21.93
6	21.88	21.89
7	21.94	21.93
8	22.23	22.25

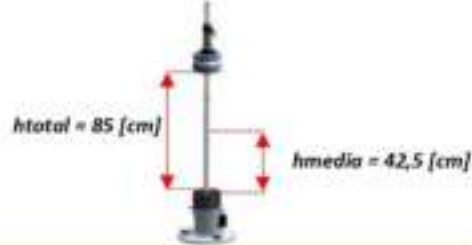
PUNTO	Grado de compactación
N°	[%]
1	99.75
2	98.55
3	99.42
4	98.56
5	98.27
6	98.04
7	98.28
8	99.58

7. CÁLCULO DEL MODULO OBJETIVO EN LABORATORIO (AASHTO TP123-01)

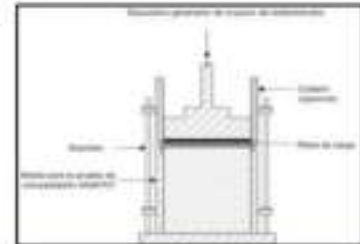
1.1 Cálculo del coeficiente de rigidez y coeficiente de Variación

Según las alturas de caída:

Mediante la ecuación:



$$k = \frac{F}{\delta}$$



MOLDE N° 1					MOLDE N° 2				
Nº Medición	Fuerza Aplicada leída [kN]	Deflexión [µm]	Deflexión [mm]	Coefficiente de rigidez [k][N/mm]	Nº Medición	Fuerza Aplicada leída [kN]	Deflexión [µm]	Deflexión [mm]	Coefficiente de rigidez [k][N/mm]
CAIDAS DE ASENTAMIENTO					CAIDAS DE ASENTAMIENTO				
1	5.33	96.8	0.0968	55.06	1	5.33	95.2	0.0952	55.99
2	5.28	91.5	0.0915	57.70	2	5.28	99.7	0.0997	52.96
3	5.30	90.2	0.0902	58.76	3	5.30	98.6	0.0986	53.75
Para una altura media					Para una altura media				
4	5.31	100.2	0.1002	52994	4	5.31	105.1	0.1051	50523
5	5.40	102.2	0.1022	52838	5	5.40	100.8	0.1008	53571
6	5.41	100.2	0.1002	53992	6	5.41	106.3	0.1063	50894
Para una altura total					Para una altura total				
7	8.08	105.0	0.1050	76923	7	8.08	106.2	0.1062	76083
8	8.06	108.2	0.1082	74492	8	8.06	110.5	0.1105	72941
9	8.16	108.9	0.1089	74931	9	8.16	110.2	0.1102	74047

MOLDE N° 3					MOLDE N° 4				
Nº Medición	Fuerza Aplicada leída [kN]	Deflexión [µm]	Deflexión [mm]	Coefficiente de rigidez [k][N/mm]	Nº Medición	Fuerza Aplicada leída [kN]	Deflexión [µm]	Deflexión [mm]	Coefficiente de rigidez [k][N/mm]
CAIDAS DE ACONDICIONAMIENTO					CAIDAS DE ASENTAMIENTO				
1	5.33	98.7	0.0987	54.00	1	5.33	90.2	0.0902	59.09
2	5.28	93.3	0.0933	56.59	2	5.28	91.5	0.0915	57.70
3	5.30	96.2	0.0962	55.09	3	5.30	93.2	0.0932	56.87
Para una altura media					Para una altura media				
4	5.31	110.5	0.1105	48054	4	5.31	113.4	0.1134	46825
5	5.40	108.3	0.1083	49861	5	5.40	108.2	0.1082	49908
6	5.41	105.8	0.1058	51134	6	5.41	110.3	0.1103	49048
Para una altura total					Para una altura total				
7	8.08	115.6	0.1156	69896	7	8.08	118.2	0.1182	68359
8	8.06	112.3	0.1123	71772	8	8.06	117.2	0.1172	68771
9	8.16	114.5	0.1145	71266	9	8.16	120.3	0.1203	67830

1.2 Cálculo del coeficiente de Variación

Mediante la ecuación:

$$C.V. = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100$$

Cálculo para el MOLDE 1:

Cálculo de la desviación estandar y media aritmetica para el caso mas crítico:

$$S_g = 0.0000021$$

$$\bar{x} = 0.0001074$$

Cálculo del coeficiente de variación :

$$C.V. = 1.92 \%$$

$$1.92 < 10\% \%$$

se continua con el procedimiento

Cálculo de la desviación estandar y media aritmetica para el caso menos crítico:

$$S_g = 0.0000012$$

$$\bar{x} = 0.0001009$$

Cálculo del coeficiente de variación :

$$C.V. = 1.14 \%$$

Por lo tanto:

$$1.14 < 10\% \%$$

se continua con el procedimiento

Para lo cual tenemos un cuadro resumen para los 4 moldes:

	Desviación estandar	Media aritmetica	Coficiente de variacion	C.V. < 10 %
	S_g [m]	\bar{x} [m]	C.V. [%]	
Para el caso mas critico htotal [cm]				
MOLDE N° 1	2.06E-06	1.07E-04	1.92	CUMPLE
MOLDE N° 2	2.40069E-06	1.08967E-04	2.20	CUMPLE
MOLDE N° 3	1.68028E-06	1.14133E-04	1.47	CUMPLE
MOLDE N° 4	1.58219E-06	1.18567E-04	1.33	CUMPLE
Para el caso menos critico hmedia [cm]				
MOLDE N° 1	1.1547E-06	0.000100867	1.14	CUMPLE
MOLDE N° 2	2.89194E-06	1.04067E-04	2.78	CUMPLE
MOLDE N° 3	2.3516E-06	1.08200E-04	2.17	CUMPLE
MOLDE N° 4	2.61598E-06	0.000110633	2.36	CUMPLE

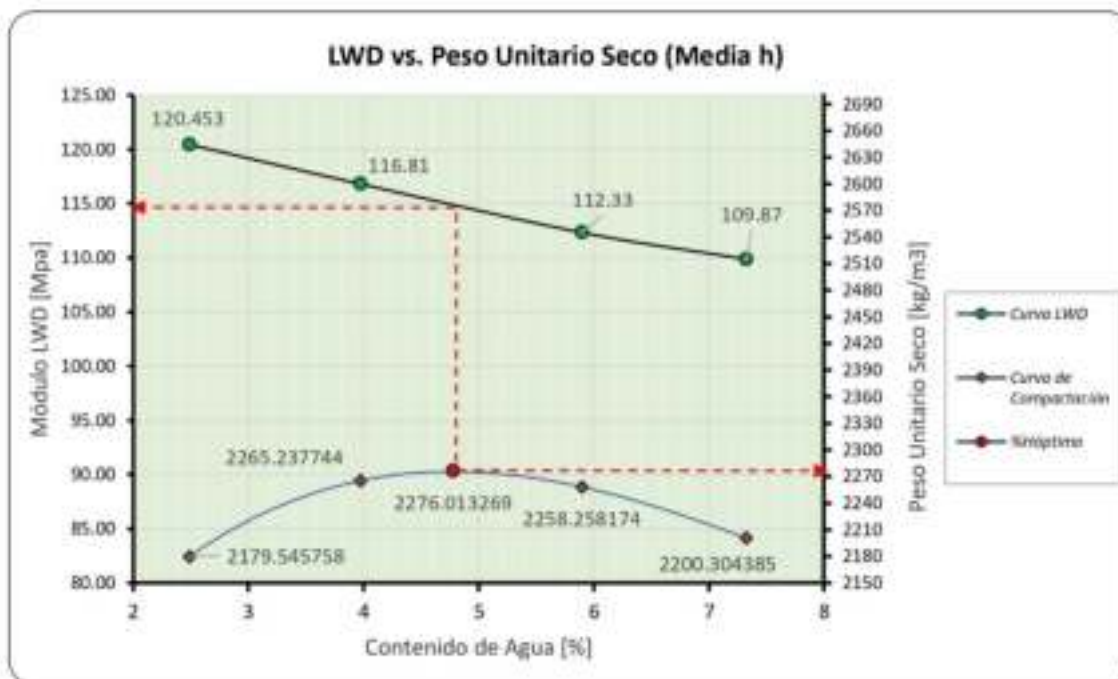
1.2 Cálculo del Módulo LWD en laboratorio

$$E_{LWD_{Lab}} = \left[\left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) \frac{4H}{\pi D^2} k \right]$$

Coficiente de Poisson (ν):	0.35
Altura del molde: (H) [mm]	114
Diametro del plato de carga: (D) [mm]	200

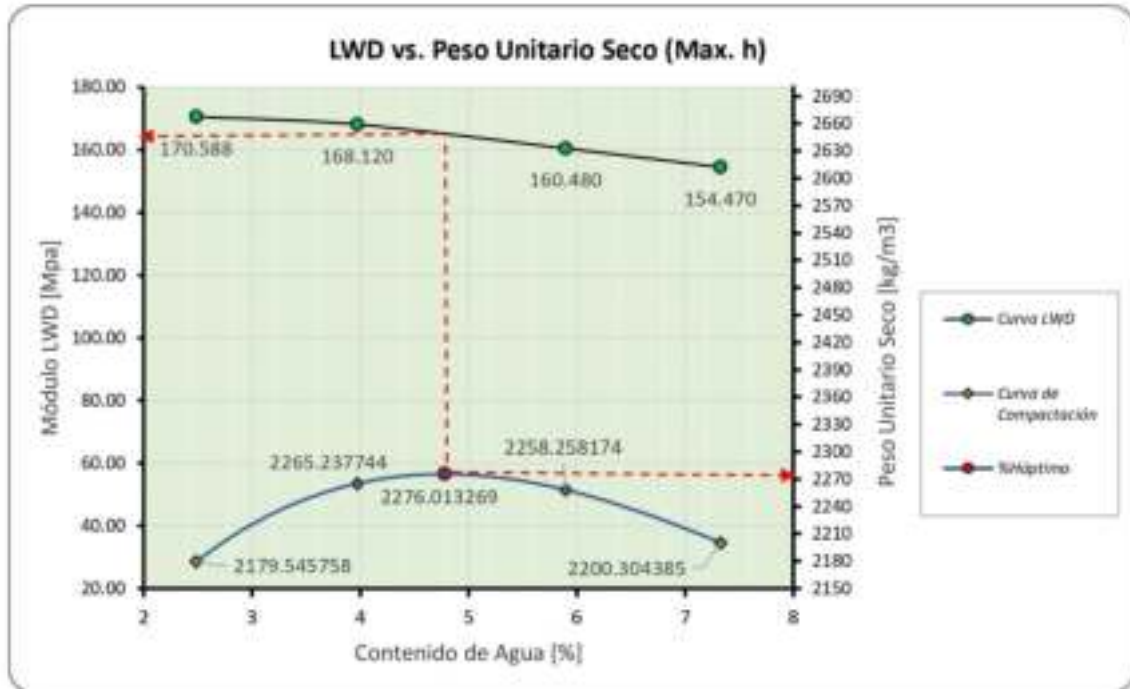
Tabla resumen del promedio de los módulos en laboratorio						
N° MOLDE	Para una altura media			Para una altura máxima		
	k [N/mm]	$E_{LWD_{Lab}}$	$P_{LWD_{Lab}}$ [MPa]	k [N/mm]	$E_{LWD_{Lab}}$	$P_{LWD_{Lab}}$ [MPa]
1	52994.01	119.818	120.453	76923.08	173.922	170.588
	52837.57	119.465		74491.68	168.424	
	53992.02	122.075		74931.13	169.418	
2	50523.31	114.232	116.81	76082.86	172.022	168.120
	53571.43	121.124		72941.18	164.919	
	50893.70	115.070		74047.19	167.419	
3	48054.30	108.650	112.33	69896.19	158.034	160.480
	49861.50	112.736		71772.04	162.275	
	51134.22	115.613		71266.38	161.132	
4	46825.40	105.871	109.87	68358.71	154.558	154.470
	49907.58	112.840		68771.33	155.491	
	49048.05	110.897		67830.42	153.363	

1.3 Gráficos del LWD en laboratorio vs. Peso Unitario Seco



Del gráfico se obtiene el Módulo objetivo de LWD, teniendo como valor:

Módulo Obj. LWD =	115	[MPa]
--------------------------	------------	--------------



Del gráfico se obtiene el Módulo objetivo de LWD, teniendo como valor:

Módulo Obj. LWD = 162 [MPa]

OBSERVACIONES.-

8. CÁLCULO DEL MÓDULO SUPERFICIE LWD EN CAMPO (AASHTO TP456-01)

8.1 Contenido de humedad del sitio

Mediante la ecuación:

$$\omega_0 - \Delta \leq \omega_{campo} \leq \omega_0 + \Delta$$

Número de Molde: N^* =	48	33	51
Masa del recipiente: M_r [g] =	107.5	102.5	120
Masa muestra húmeda + rcpte.: M_{mh+r} [g] =	677.5	753	819.5
Masa muestra seca + rcpte: M_{ms+r} [g] =	660	733	792
Masa muestra seca: $M_{ms} = M_{ms} - M_r$; M_{ms} [g] =	552.5	630.5	672
Masa del agua: $M_a = M_{mh+r} - M_{ms+r}$ [g] =	17.5	20	27.5
Porcentaje de humedad: $\omega_{campo} = M_a / M_{ms}$ [%] =	3.2%	3.2%	4.1%
Promedio: ω_{campo} [%] =	3.48		
Contenido de humedad óptimo (ω_0) [%] =	4.78		

Aplicando la ecuación del intervalo del contenido de agua:

$$4.78\% - 3\% \leq 3.48\% \leq 4.78 + 2\%$$

$$1.78 \leq 3.48 \leq 6.78$$

Cumple lo recomendado

2.2. Módulo Superficie LWD en Campo - Capa Subbase - Estructura de Pavimento Compuesto

Mediante la ecuación:

$$E_{LWD_{campo}} = \frac{2k(1 - \nu^2)}{AR}$$

Coefficiente de rigidez del suelo otorgado por el LWD: F/δ [N/mm]=	k		
Factor de distribución: A [Ctte.] Suelo Granular =	2.67		
Coefficiente de Poisson: ν [adimensional]=	0.35		
Diametro del plato de carga: D [mm]; [m] ; Radio [mm]=	300	0.3	150



Datos medidos con LWD en Campo para Capa Subbase:

Nombre del Cliente:		UMSA				Nombre del Proyecto:		EL ALTO - VIACHA					
Referencia del Cliente:		INVESTIGACIÓN -PROYECTO DE GRADO				Fecha:		19.09.21					
Control de Compactación diferencia caída 2 respecto 5: <10% aumentar en E0													
Diferencia caída 5 respecto 6: <5% disminuir (signo negativo)													
Diferencia caída 6 respecto 10: <10% aumentar													
Punto	Progresiva	N° Punto	N° Caída	Fuerza [kN]	Deflexión [µm]	Poissons radio	Pulse time [ms]	E0 = E1 [MPa]	CBR [%]	Descripción de Material	E0 relacion referencias	Posición GPS	
												Longitud	Latitud
1	10+260	1	1	5.55	156.3	0.35	17	155.8	30.2	A-1-a (0)		68°15'22.98600"W	6°36'20.25000
		1	2	5.73	117.3	0.35	16	214.2	49.6		2/5		
		1	3	5.61	111.6	0.35	18	220.6	52.0		7.8%		
		1	4	5.61	110.1	0.35	18	223.6	53.1				
		1	5	5.60	105.8	0.35	17	232.2	56.3		5/6		
		1	6	5.56	108.7	0.35	18	224.4	53.4		-3.4%		
		1	7	8.30	176.2	0.35	16	206.8	47.0				
		1	8	8.11	174.7	0.35	15	203.6	45.8				
		1	9	8.11	168.9	0.35	16	210.7	48.4		-6.5%		
2	10+290	2	1	5.67	115	0.35	17	217.2	39.3	A-1-a (0)		68°15'22.89000"W	6°36'20.43000
		2	2	5.63	105	0.35	17	235.2	44.5		2/5		
		2	3	5.66	109	0.35	17	227.2	42.1		7.6%		
		2	4	5.69	109	0.35	18	228.4	42.5				
		2	5	5.69	105	0.35	18	237.6	45.2		5/6		
		2	6	5.69	104	0.35	18	239.7	45.8		0.9%		
		2	7	8.23	160	0.35	15	225.7	41.6		6/10		
		2	8	8.33	160	0.35	16	228.4	42.4				
		2	9	8.33	160	0.35	16	228.4	42.5		-4.9%		

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO DE GRADO: "ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CONO DE ARENA, DEFLECTOMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEORGALUGE EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE VIA EL ALTO - VIVCHA "

3	10+320	3	1	5.65	82	0.35	18	302.3	85.0	A-1-a (0)		68°15'22.81200"W	16°36'20.53800"		
		3	2	5.65	82	0.35	18	302.3	85.0		2/5				
		3	3	5.48	65	0.35	17	369.5	116.4		-8.8%				
		3	4	5.51	65	0.35	17	371.5	117.4						
		3	5	5.59	88	0.35	18	277.7	74.5		5/6				
		3	6	8.27	157	0.35	15	230.5	55.7		-20.5%				
		3	7	8.41	137	0.35	16	268.5	70.7						
		3	8	8.41	136	0.35	16	272.3	72.2		6/10				
		3	9	8.31	131	0.35	16	277.4	74.4		15.4%				
				3	10	8.28	125	0.35	16	290.0	79.7				
4	10+350	4	1	5.49	65	0.35	17	371.1	117.2	A-1-a (0)		68°15'22.92000"W	16°36'20.19000"		
		4	2	5.60	69	0.35	18	356.6	110.1		2/5				
		4	3	5.57	67	0.35	18	364.8	114.0		3.7%	menor al 10%			
		4	4	5.60	65	0.35	18	376.9	120.0						
		4	5	5.55	66	0.35	17	370.3	116.7		5/6				
		4	6	8.18	119	0.35	16	301.5	84.7		-22.8%	menor al 5%			
		4	7	8.10	114	0.35	16	311.6	89.2						
		4	8	8.03	115	0.35	16	306.9	87.1		6/10				
		4	9	8.13	111	0.35	16	322.5	94.1		1.8%	menor al 10%			
				4	10	8.15	109	0.35	16	327.5	96.4				
5	10+380	5	1	5.57	109	0.35	18	223.8	53.1	A-1-a (0)		68°15'22.93800"W	16°36'20.40600"		
		5	2	5.62	105	0.35	18	234.3	57.1		2/5				
		5	3	5.53	99	0.35	18	246.4	61.8		13.8%				
		5	4	5.52	85	0.35	18	283.4	76.9						
		5	5	5.55	90	0.35	17	271.7	72.0		5/6				
		5	6	8.20	171	0.35	16	209.8	48.0		-29.5%				
		5	7	8.17	141	0.35	16	254.2	64.9						
		5	8	8.16	135	0.35	16	265.1	69.3		6/10				
				5	9	8.07	132	0.35	16	268.3	70.6		20.9%		
				5	10	8.19	137	0.35	16	262.5	68.2				

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL	PROYECTO DE GRADO: "ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CONO DE ARENA, DEFLECTOMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEOGAUGE EN LA CAPA SUBRAZ DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE VIA EL ACTO - VUACHA "
---	--

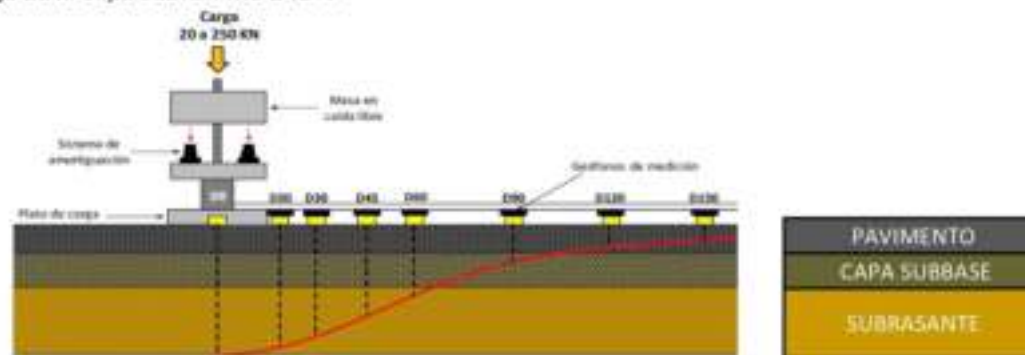
6	10+410	6	1	5.96	58	0.35	16	450.0	158.3	A-1-a (0)		68°16'28.77000"W	16°37'31.83600"S
		6	2	5.96	58	0.35	16	450.0	158.3		2/5		
		6	3	6.09	58	0.35	18	463.3	165.7		0.6%		
		6	4	6.01	58	0.35	17	451.8	159.3				
		6	5	6.02	58	0.35	16	452.5	159.7		5/6		
		6	6	8.13	79	0.35	16	449.3	122.3		-0.7%		
		6	7	8.13	81	0.35	16	437.8	117.4				
		6	8	8.13	81	0.35	16	437.8	117.4		6/10		
		6	9	8.13	80	0.35	16	443.6	119.8		-2.6%		
				6	10	8.05	80	0.35	16	439.3	118.0		
7	10+450	7	1	5.96	64	0.35	17	410.0	105.9	A-1-a (0)		66°16'20.73600"W	11°45'58.79400"S
		7	2	5.96	56	0.35	17	469.3	130.9		2/5		
		7	3	5.76	57	0.35	17	440.0	118.3		5.2%		
		7	4	6.03	55	0.35	17	485.0	137.8				
		7	5	5.99	53	0.35	17	495.3	142.3		5/6		
		7	6	8.24	97	0.35	17	374.3	91.92		-32.3%		
		7	7	8.20	92	0.35	16	392.4	98.94				
		7	8	8.12	89	0.35	16	402.1	102.8		6/10		
		7	9	8.28	88	0.35	16	411.9	106.7		6.9%		
		7	10	8.28	88	0.35	16	411.9	106.7				
8	10+480	8	1	5.67	162	0.35	16	153.8	22.9	A-1-a (0)		66°16'12.81000"W	11°48'9.76800"S
		8	2	5.67	159	0.35	17	156.8	23.6		2/5		
		8	3	5.78	110	0.35	17	230.4	25.5		23.7%		
		8	4	5.78	129	0.35	17	196.5	15.8				
		8	5	5.58	119	0.35	17	205.7	20.9		5/6		
		8	6	8.33	159	0.35	16	229.8	42.9		10.5%		
		8	7	8.27	157	0.35	16	230.5	43.1				
		8	8	8.19	131	0.35	16	273.3	56.2		6/10		
		8	9	8.28	209	0.35	16	174.1	27.8		15.9%		
		8	10	8.22	212	0.35	16	170.4	26.9				

2.3 Módulo Resiliente en Campo de la Capa Subrasante - Datos Referenciales Equipo (FWD)

Datos recolectados por el equipo FWD:

PROGR ESIVA	Condiciones de ensayo Carga de ensayo [kN]	Deflexiones medidas [Df_r] [um]									Deflexiones corregida por carga [Df_r] [um]						
		Df_0	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	Df_5	Df_6	Df_7	Df_0	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	Df_5	Df_6	Df_7
		Distancias al eje de la carga [r] [cm]									Distancias al eje de la carga [r] [cm]						
		0	20	30	45	60	90	120	150	0	20	30	45	60	90	120	150
10+033	42.9	417	226	156	93	64	40	29	21	389	211	145	87	60	37	27	20
10+133	43.4	337	175	115	71	49	32	22	16	311	161	106	65	45	29	20	15
10+233	41.3	424	261	173	103	70	48	36	27	411	253	168	100	68	46	35	26
10+333	41.9	435	246	168	109	78	53	38	28	415	235	160	104	74	51	36	27
10+433	41.1	542	239	152	97	71	47	33	23	527	233	148	94	69	46	32	22
10+533	41	609	346	241	133	87	54	38	28	594	338	235	130	85	53	37	27
10+633	41.7	607	396	265	149	96	56	38	28	582	380	254	143	92	54	36	27
10+733	41.9	562	339	244	144	98	60	40	28	537	324	233	137	94	57	38	27

Como se necesita los valores de la capa subrasante, se elige la disposición del geófono con la distancia mas alejada, hasta el punto de aplicación de la carga de la capa subrasante D45 :



Las deflexiones obtenidas en cada punto fueron empleadas con las siguientes ecuaciones para determinar el módulo resiliente de la subrasante (M_R):

$$M_R = \frac{0,24 \times P}{d_r \times r}$$

Donde:

- MR** = Módulo resiliente capa subrasante, MPa
- dr** = deflexion medida por FWD, mm
- r** = distancia respecto al geofono central , para subrasante D45, mm
- P** = carga de ensayo, N



$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \times \sqrt{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}$$

$r \geq 0,7 \times a_e$

Donde:

- a** = Radio de bulbo de esfuerzos en la interface pavimento - subrasante
- D** = Espesor total del pavimento [pulg]
- Ep** = Módulo elástico efectivo de todas las capas del pavimento combinados sobre la subrasante en [lb/pulg²]

Se tiene los siguientes módulos resilientes por el método FWD para la capa subrasante:

Parámetros de diseño				Módulo resiliente subrasante [MPa]
Sensor alejado	Distancia sensor escogido [cm]	Deflexión corregida [um]	ae [cm]	
3	45	87	44.41	245.00
3	45	65	43.25	324.00
3	45	100	46.22	213.00
3	45	104	47.07	204.00
3	45	94	40.88	215.00
3	45	130	43.61	164.00
3	45	143	46.35	148.00
3	45	137	47.32	154.00

Se eliga los primeros ocho datos , según a la disposición de puntos de ensayo en el tramo de prueba:

2.4 Módulo Superficie LWD en Campo Corregido

De la planilla de ensayo de LWD tenemos para una altura máxima total de carga:

E_1	
Nº	Promedio
1	207.01
2	227.49
3	272.76
4	313.68
5	262.56
6	440.27
7	408.63
8	205.93

Como ya tenemos E_1 laboratorio y E_2 calculamos con la siguiente ecuación

$$E_{Objetivo\text{corregido}} = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{E_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_0} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} + \frac{1 - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_0}\right)^2}}{E_1} \right\}}$$

Espesor de la capa superior (h) 0.2 m

Cálculo de E en campo corregido:

$E_{Obj.\text{corr}}$
166.09
189.73
154.41
150.85
155.18
133.30
125.37
128.41

De la planilla de ensayo de LWD tenemos para una altura media de carga:

E_1	
Nº	Promedio
1	226.74
2	235.21
3	293.25
4	370.66
5	267.18
6	451.22
7	451.54
8	210.85

$$E_{Objetivo\text{corregido}} = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{E_2 \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_0} \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} + \frac{1 - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{r_0}\right)^2}}{E_1} \right\}}$$

Espesor de la capa superior (h) 0.2 m

Cálculo de E en campo corregido:

$E_{Obj.\text{corr}}$
138.48
154.98
130.07
127.47
130.63
114.41
108.36
110.69

2.5 Módulo Superficie LWD en Campo Corregido

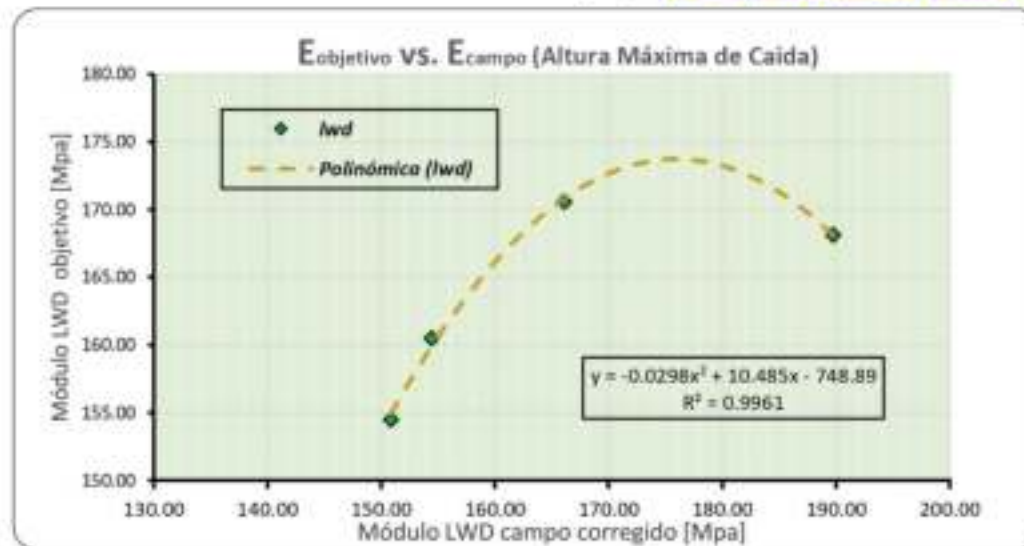
Teniendo los módulos de campo y de laboratorio tenemos que la relación de los módulos (% de compactación) son :

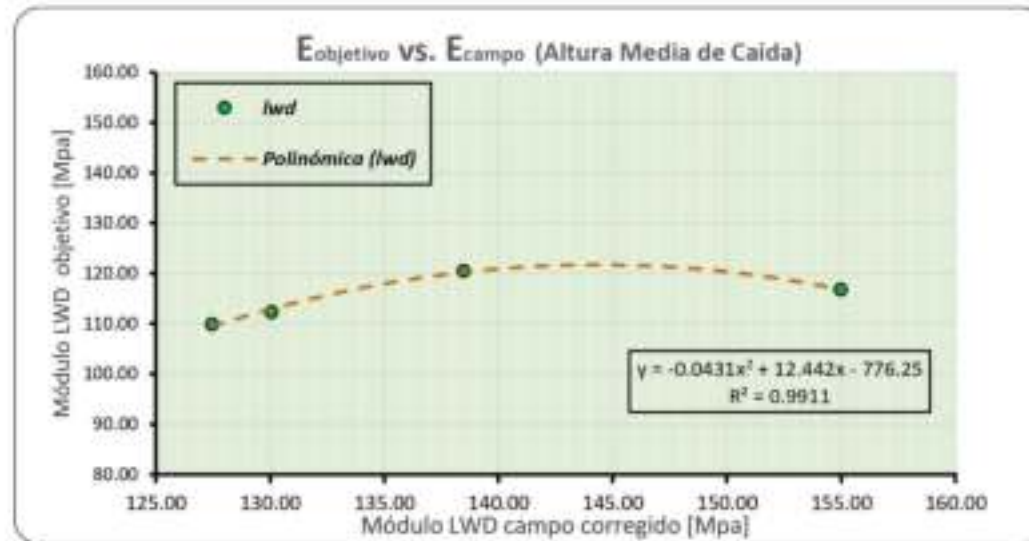
$$RG_{TS} = \frac{E_{LWD_{CAMPO}}}{E_{LWD_{OBJETIVO-CORR}}}$$

Si son iguales o mayores a 1, entonces quiere decir que cumple con la compactación la que estamos esperando.



Nº	Módulo en campo		Módulo en campo corregido	
	$RG_{subbase} = \frac{E_{LWD}}{E_{laboratorio}}$			
	h _{máx.}	h _{medio}	h _{máx.}	h _{medio}
1	1.28	1.97	1.25	1.20
2	1.40	2.05	1.20	1.35
3	1.68	2.55	1.77	1.13
4	1.94	3.22	2.08	1.11
5	1.62	2.32	1.69	1.14
6	2.72	3.92	3.30	0.99
7	2.52	3.93	3.26	0.94
8	1.27	1.83	1.60	0.96





OBSERVACIONES.-

9. CALIBRACIÓN DE LA ARENA DE ENSAYO (ASTM D1556 - AASHTO T191)

Ensayo	Nº	1	2	3	4	5
Masa del molde: $Mm=$	[g]	464				
Masa de la arena+molde: $Ma+m=$	[g]	5347	5325.5	5322.5	5330.5	5328.5
Promedio masa de Arena+molde: $Mprom.=$	[g]	5330.8				
Masa de la arena: $Ma = Mprom. - Mm=$	[g]	4867				
Masa del vidrio: $Mv =$	[g]	2191.50				
Masa vidrio+molde+agua a 24 °C: $Mv+m+a=$	[g]	5916				
Masa del agua: $Ma = Mv+m+a - Mv - Mm =$	[g]	3260.5				
Densidad de agua s/ temp. Tablas: $Da =$	[g/cm3]	0.9973				
Volumen del molde: $Vm = Ma/Da =$	[cm3]	3269.33				
Densidad aparente de la Arena: $Dar = Ma/Vm=$	[g/cm3]	1.489				
Masa inicial cono+arena: $Mc+a=$	[g]	9375.5				
Masa final arena que queda: $Mar.=$	[g]	7767.5				
Masa de la Arena + Cono: $Mc+a-Mar=$	[g]	1608				

2. ENSAYO CONO DE ARENA (ASTM D1556 - AASHTO T191)

2.1 Muestra para determinar el contenido de humedad del suelo

Número de Molde		48	33	51
Masa del recipiente: $Mr =$	[g]	107.5	102.5	120
Masa de la muestra húmeda + rcpte.: $Mmh+r=$	[g]	677.5	753	819.5
Masa de la muestra seca + rcpte.: $Mms+r=$	[g]	660	733	792
Masa de la muestra seca: $Mms = Mms+r - Mr =$	[g]	552.5	630.5	672
Masa del agua: $Ma = Mmh+r - Mms+r =$	[g]	17.5	20	27.5
Porcentaje de humedad: $%h=Ma/Mms$	[%]	3.2	3.2	4.1
Promedio del contenido de humedad: $%hprom.=$	[%]	3.5		

2.2 Planilla Resumen en cada punto del tramo de prueba

Progresiva de Ensayo		10+260	10+290	10+320	10+350	10+380	10+410	10+450	10+480
Capa		Subbase	Subbase	Subbase	Subbase	Subbase	Subbase	Subbase	Subbase
Espesor	[cm]	20	20	20	20	20	20	20	21
Lado		Izquierda	Central	Derecha	Izquierda	Central	Derecha	Izquierda	Izquierda
Masa Arena + Frasco antes del ensayo, $C =$	[g]	9377.5	9237	9483	9435	9416	9382.2	9480	9467.5
Masa Arena + Frasco despues del ensayo, $D =$	[g]	3650	3428.5	3650	3647	3617	3773	3787	3637.5

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA CIVIL	PROYECTO DE GRADO: "ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CONO DE ARENA, DEFLECTOMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEORADAR EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE VÍA EL ALTO - VIANCA"
---	--

Masa Arena para llenar hoyo + cono, $E = C - D$	[g]	5727.5	5808.5	5833	5788	5799	5609.2	5693	5830
Masa de arena en cono (dato laboratorio), $F =$	[g]	1608	1608	1608	1608	1608	1608	1608	1608
Masa de arena en hoyo, $G = E - F$	[g]	4119.5	4200.5	4225	4180	4191	4001.2	4085	4222
Densidad de la arena (dato laboratorio), $Da =$	[g/cm ³]	1.489	1.489	1.489	1.489	1.489	1.489	1.489	1.489
Volumen del hoyo, $Vh = G/Da$	[cm ³]	2766.62	2821.02	2837.47	2807.25	2814.64	2687.17	2743.45	2835.46
Masa de la muestra húmeda que sale del hoyo, $Mh =$	[g]	6713.5	6792.5	6861	6723	6708	6398	6534.5	6827.5
Masa retenido en 3/4", $Mr =$	[g]	1232	1690	1516	1302	1133	1142	1061.5	1082.5
Peso específico retenido en 3/4 (dato laboratorio), $Gr =$	[g/cm ³]	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
Volumen retenido en 3/4", $Vr = Mr/Gr =$	[cm ³]	473.8	650.0	583.1	500.8	435.8	439.2	408.3	416.3
Masa muestra húmeda que pasa 3/4", $Mhp = Mh - Mr =$	[g]	5481.5	5102.5	5345	5421	5575	5256	5473	5745
Contenido de humedad en sitio, $\%h =$	[%]	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Humedad óptima (dato laboratorio), $hóptima =$	[%]	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78	4.78
Masa muestra seca que pasa 3/4", $Mmsp = (Mhp * 100) / (100 + \%h) =$	[g]	5231.503	4869.788	5101.23	5173.76	5320.739	5016.288	5223.391	5482.986
Volumen que pasa 3/4", $Vp = Vh - Vr$	[cm ³]	2292.78	2171.02	2254.40	2306.48	2378.87	2247.94	2335.18	2419.11
Densidad seca material que pasa 3/4", $Dsp = Mmsp/Vp$	[g/cm ³]	2.28	2.24	2.26	2.24	2.24	2.23	2.24	2.23
Densidad máxima de laboratorio, $Dmáx. =$	[g/cm ³]	2.276	2.276	2.276	2.276	2.276	2.276	2.276	2.276
Grado de compactación, $G.C. = (Dsp/Dmáx.) * 100$	[%]	100.2519	98.5539	99.4196	98.5562	98.27175	98.04492	98.2787	99.58376
Grado de compactación según ETG	[%]	97	97	97	97	97	97	97	97
APROBADO (A) RECHAZADO (R)		(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)

OBSERVACIONES,-

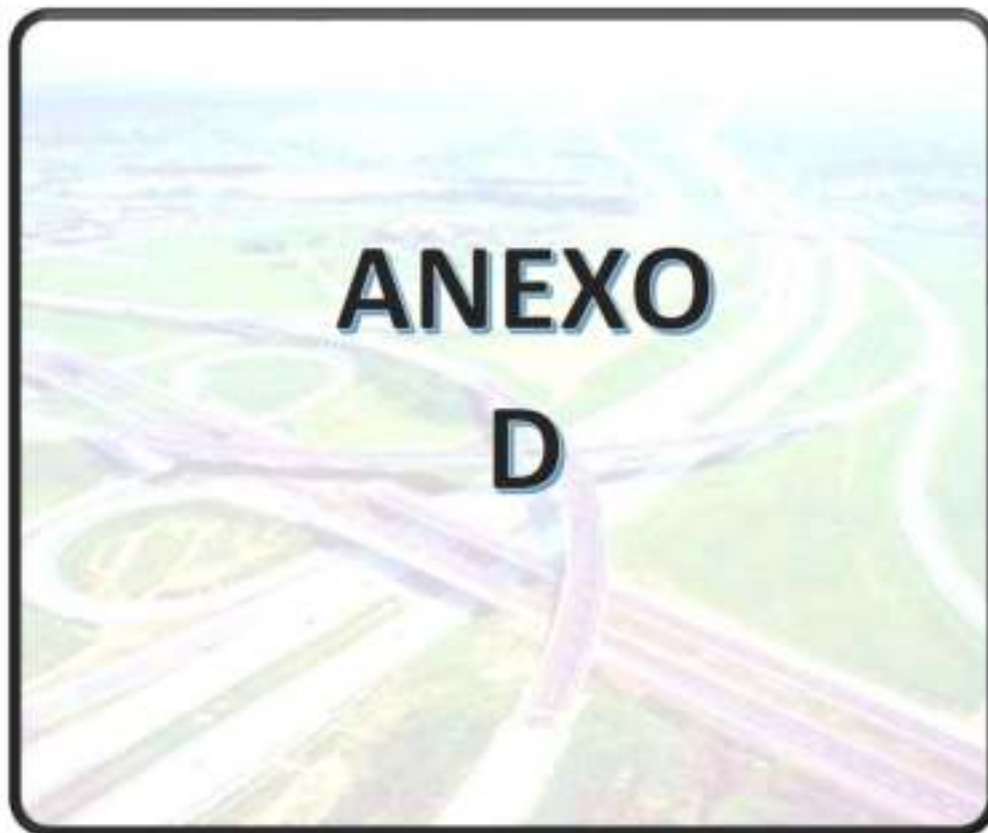
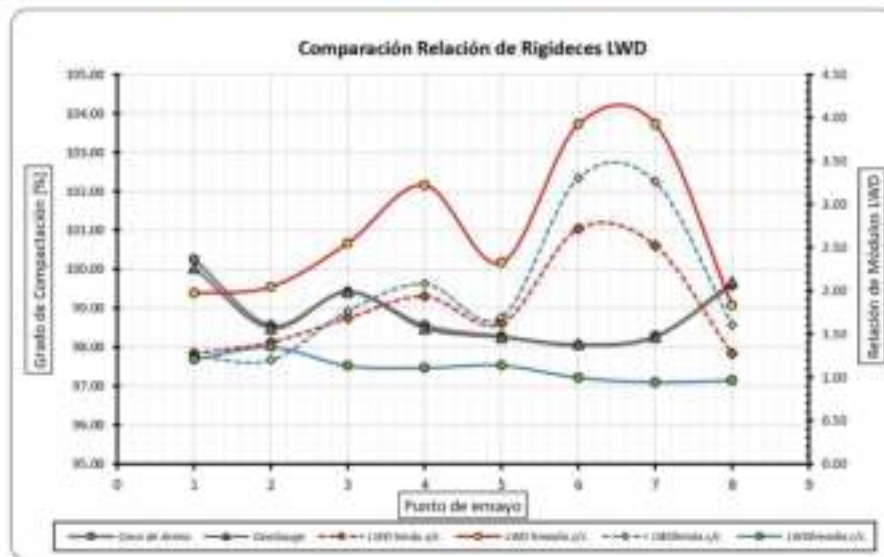
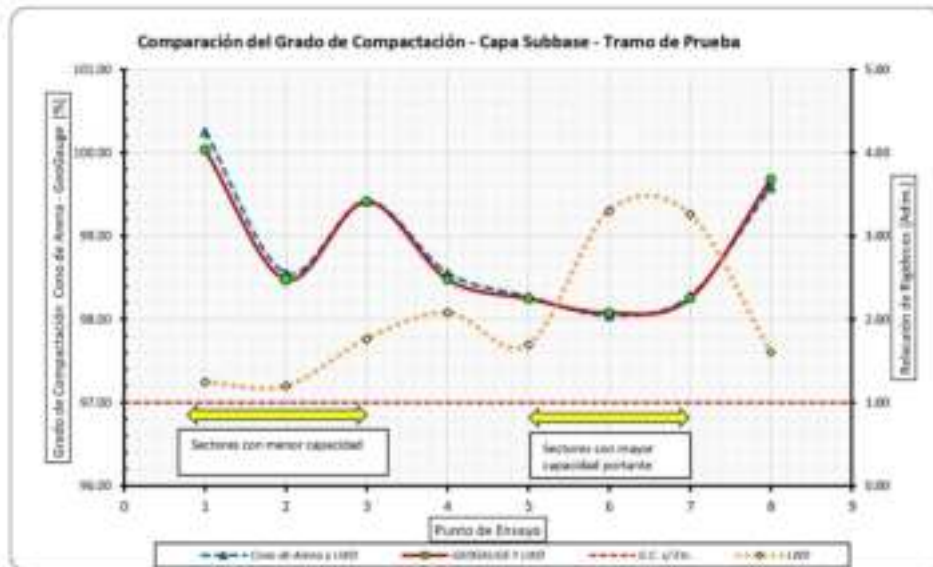


Gráfico Comparativo del Grado de Compactación

Se determina la planilla de los resultados de cada método empleado para el análisis del Grado de Compactación para el Tramo de prueba de la construcción de la vía El Alto Viacha

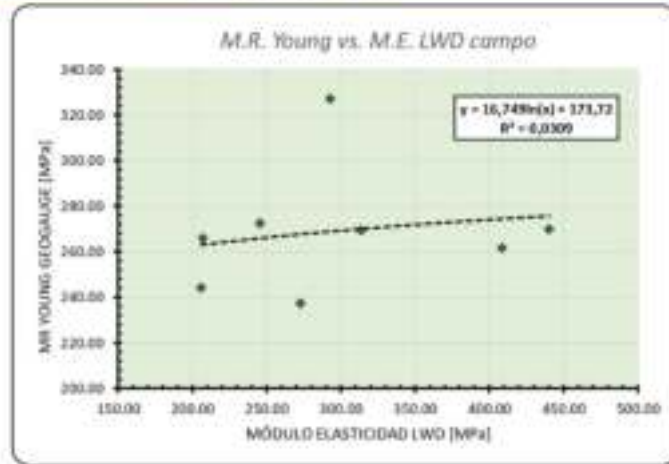
Planilla Resumen - Grado de Compactación							
N° Puntos	Programa	Relación de Rigideces LWD a diferentes alturas				GEOGAUGE (%)	Cono de Arena (%)
		Sin corrección		Con corrección			
		h máx	h medio	h máx	h medio		
1	10+260	1.28	1.97	1.25	1.20	100.03	100.25
2	10+290	1.40	2.05	1.20	1.35	98.48	98.55
3	10+320	1.68	2.55	1.77	1.13	99.41	99.42
4	10+350	1.94	3.22	2.08	1.11	98.48	98.56
5	10+380	1.62	2.32	1.69	1.14	98.25	98.27
6	10+410	2.72	3.92	3.30	0.95	98.07	98.04
7	10+450	2.52	3.93	3.26	0.94	98.25	98.28
8	10+480	1.27	1.83	1.60	0.96	99.68	99.58



Gráfica Correlación de Módulo de Young GeoGauge vs. LWD

Módulo de Young		Módulo Elasticidad LWD	
N°	[Mpa]	N°	[Mpa]
1	266.02	1	207.01
2	272.47	2	245.60
3	237.45	3	272.76
4	269.50	4	313.68
5	327.22	5	292.98
6	269.96	6	440.27
7	261.72	7	408.63
8	244.15	8	205.93

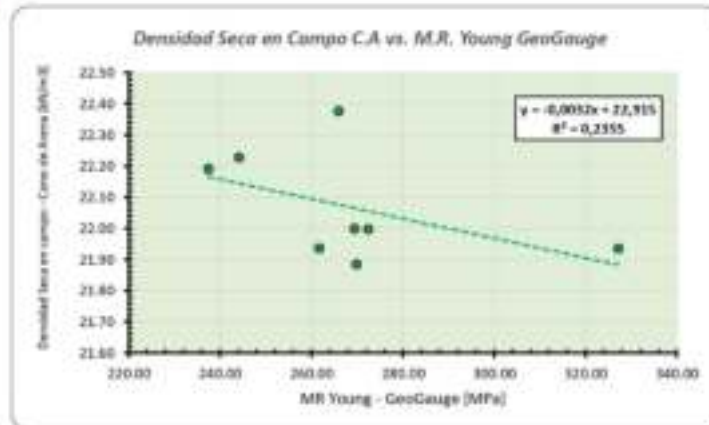
Correlación nula



Gráfica Correlación de Densidad Seca en campo - Cono de Arena vs. Módulo de Young GeoGauge

Densidad seca en campo - Cono de Arena		Módulo de Young GeoGauge	
N°	[MN/m ³]	N°	[Mpa]
1	22.38	1	266.02
2	22.00	2	272.47
3	22.15	3	237.45
4	22.00	4	269.50
5	21.81	5	327.22
6	21.88	6	269.96
7	21.94	7	261.72
8	22.23	8	244.15

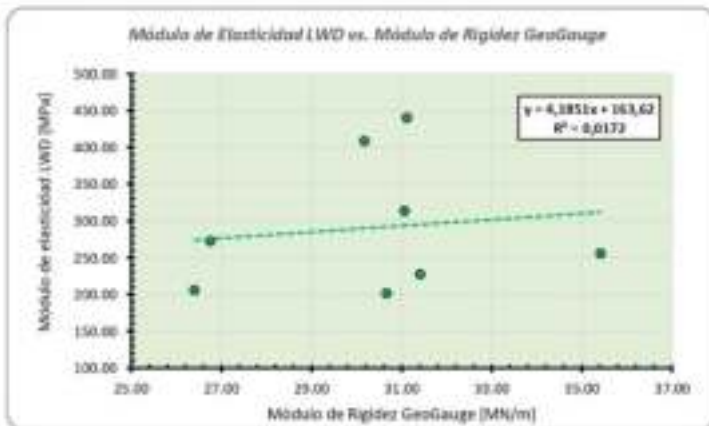
Correlación negativa débil



Gráfica Correlación Módulo de Rigidez vs. Módulo de Elasticidad LWD

Módulo de Rigidez GeoGauge		Módulo de Elasticidad LWD	
N°	[MN/m]	N°	[Mpa]
1	30.67	1	201.68
2	31.41	2	227.33
3	26.75	3	272.76
4	31.07	4	313.68
5	35.42	5	255.67
6	31.12	6	440.27
7	30.17	7	408.63
8	26.40	8	205.93

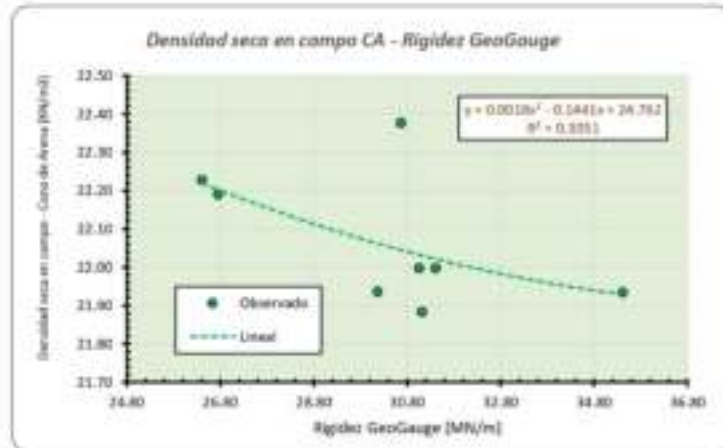
Correlación positiva débil



Gráfica Correlación Densidad seca en campo vs. Rigidez GeoGauge

Densidad seca en campo - Cono de Arena		Rigidez GeoGauge	
N°	[kN/m ³]	N°	[MN/m]
1	22.38	1	30.67
2	22.00	2	31.41
3	22.19	3	26.75
4	22.00	4	31.07
5	21.93	5	35.42
6	21.88	6	31.12
7	21.94	7	30.17
8	22.23	8	26.40

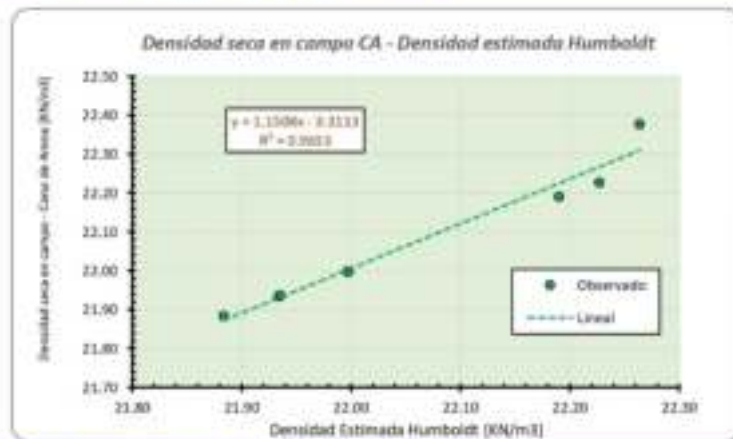
Correlación negativa baja



Gráfica Correlación Densidad seca en campo vs. Densidad Humboldt

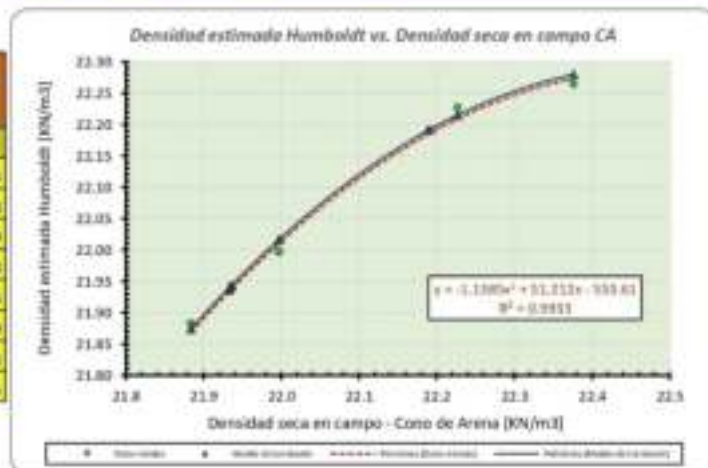
Densidad seca en campo - Cono de Arena		Densidad seca estimada Humboldt	
N°	[kN/m ³]	N°	[kN/m ³]
1	22.38	1	22.26
2	22.00	2	22.00
3	22.19	3	22.19
4	22.00	4	22.00
5	21.93	5	21.93
6	21.88	6	21.88
7	21.94	7	21.94
8	22.23	8	22.23

Correlación positiva alta



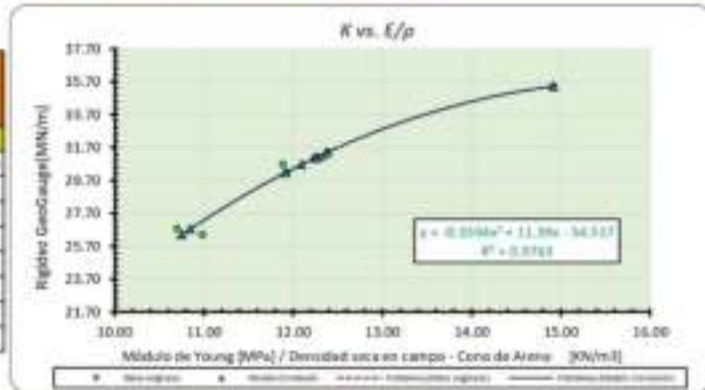
Gráfica Correlación Densidad Humboldt vs. Densidad seca en campo

Densidad seca estimada Humboldt	Densidad seca en campo - Cono de Arena	Módulo de Compresión para la densidad seca en campo			
N°	[kN/m ³]	N°	[MN/m]		
1	22.26	1	22.38	1	22.33
2	22.00	2	22.00	2	21.98
3	22.19	3	22.19	3	22.19
4	22.00	4	22.00	4	21.98
5	21.93	5	21.93	5	21.93
6	21.88	6	21.88	6	21.88
7	21.94	7	21.94	7	21.93
8	22.23	8	22.23	8	22.25



Gráfica Correlación Módulo de Young, Densidad seca en campo y Rigidez

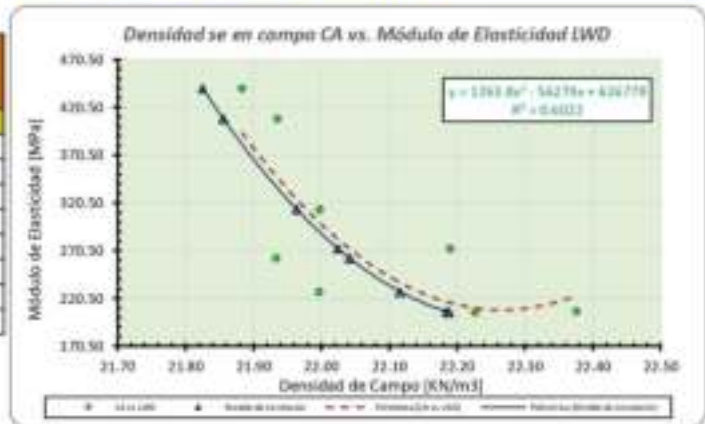
Módulo de Young / Densidad seca en campo		Rigidez GeoGauge		Módulo de Correlación para la densidad seca en campo	
N°	[KN/m ³]	N°	[MPa/m]	N°	[MPa/m]
1	11.89	1	30.67	1	22.00
2	12.39	2	31.41	2	22.01
3	10.70	3	26.75	3	21.89
4	12.25	4	31.07	4	22.01
5	14.92	5	35.42	5	21.93
6	12.34	6	31.12	6	22.01
7	11.93	7	30.17	7	21.97
8	10.98	8	26.40	8	22.71



Gráfica Correlación Densidad en campo C.A. vs. Módulo de elasticidad LWD

Densidad seca en campo - Cono de Arena		Módulo de Elasticidad LWD		Módulo de correlación para Módulo de Elasticidad LWD	
N°	[KN/m ³]	N°	[Mpa]	N°	[Mpa]
1	22.38	1	207.01	1	22.18
2	22.00	2	227.49	2	22.12
3	22.19	3	272.76	3	22.02
4	22.00	4	313.68	4	21.96
5	21.93	5	262.56	5	22.04
6	21.88	6	440.27	6	21.83
7	21.94	7	408.63	7	21.86
8	22.23	8	205.93	8	22.19

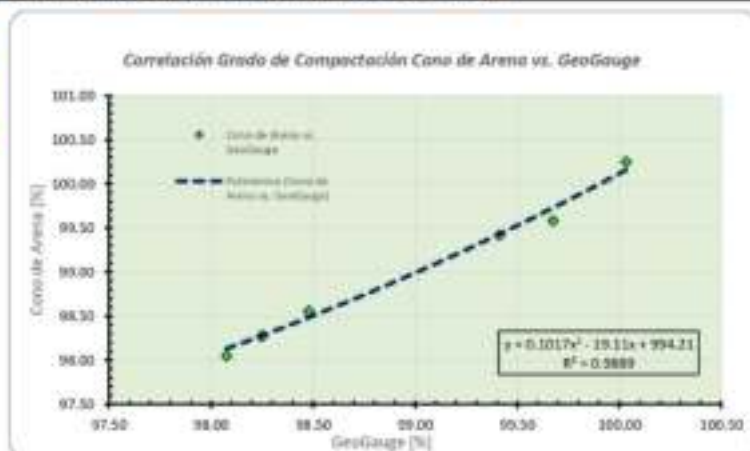
Correlación negativa significativa



Gráfica Correlación del Grado de Compactación, Cono de Arena vs. GeoGauge

GRADO DE COMPACTACIÓN			
Cono de Arena		GeoGauge	
N°	[%]	N°	[%]
1	100.25	1	100.03
2	98.55	2	98.48
3	99.42	3	99.41
4	98.56	4	98.48
5	98.27	5	98.25
6	98.04	6	98.07
7	98.28	7	98.25
8	99.58	8	99.68

Correlación positiva alta

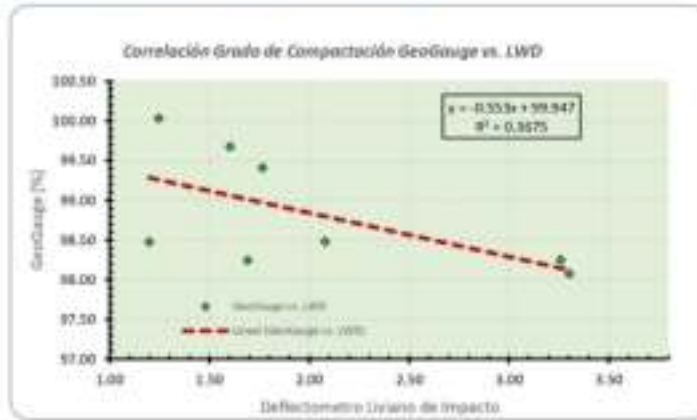


OBSERVACIONES-

Gráfica Correlación del Grado de Compactación, GeoGauge vs. LWD

GRADO DE COMPACTACIÓN			
GeoGauge		LWD	
N°	[%]	N°	[Adim.]
1	100.03	1	1.25
2	98.48	2	1.20
3	99.41	3	1.77
4	98.48	4	2.08
5	98.25	5	1.69
6	98.07	6	3.30
7	98.25	7	3.26
8	99.68	8	1.60

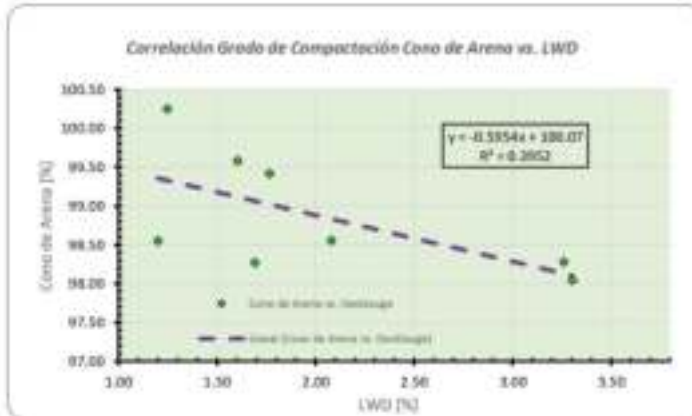
Correlación negativa baja



Gráfica Correlación del Grado de Compactación vs. Módulo de Rigidez GeoGauge

GRADO DE COMPACTACIÓN			
Cono de Arena		LWD	
N°	[%]	N°	[Adim.]
1	100.25	1	1.25
2	98.55	2	1.20
3	99.42	3	1.77
4	98.56	4	2.08
5	98.27	5	1.69
6	98.04	6	3.30
7	98.28	7	3.26
8	99.58	8	1.60

Correlación negativa significativa





**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-4327/2023
La Paz, 7 de Diciembre del 2023**

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **30 de Noviembre del 2023**, por **ARIEL RAUL BEDOYA CASTRO** con C.I. N° **8311032 LP**, con número de trámite **DA 2383/2023**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DEL CONO DE ARENA, DEFLECTÓMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEOGAUGE EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DOBLE VÍA EL ALTO - VIACHA"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adaptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*.



"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

Oficina Central - La Paz
Av. Morales, N° 29,
entre Sac. Uruguay y
C. Sebastián Illimani.
Telf.: 219299
219296 - 219297

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Bulwers,
N° 29, SBF, Bicentenario.
Telf.: 310252 - 310292

Oficina - Cochabamba
Calle Bolivia, N° 20,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telf.: 404400 - 7042937

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2960
206, Multicentro El Centro
10da. Piso, Of. 18,
Jura 16 de Julio.
Telf.: 244444 - 7042939

Oficina - Ortopneum
Calle Eliconator, N° 266
casal esp. Urología/oftalm.,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 7042937

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calleles Ciro Trigo y Avenida
Edif. Santa Cruz, N° 243.
Telf.: 7042938

Oficina - Sucre
Calle 6 de Octubre N° 4817
entre Ayacucho y Jancin,
Salera Central, Of. 14.
Telf.: 310252

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
ESE. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 11.
Telf.: 7042936

www.senapi.gob.bo

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*.

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ..."*, por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE COMPACTACIÓN EMPLEANDO LOS MÉTODOS DEL CONO DE ARENA, DEFLECTÓMETRO LIVIANO DE IMPACTO Y GEOGAUGE EN LA CAPA SUBBASE DE LA CONSTRUCCIÓN DOBLE VÍA EL ALTO - VIACHA"**, a favor del autor y titular: **ARIEL RAUL BEDOYA CASTRO** con C.I. Nº 8311032 LP, bajo el seudónimo **ARIELITO**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



Abg. Roberto Ilich Garcia Herrera
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS a.i.**
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

- Oficina Central - La Paz: Av. Montes, Nº 515, entre Esq. Urugua y C. Nacional Simón Bolívar. Telf.: 225296 / 225295 - 225293
- Oficina - Santa Cruz: Av. Uruguay, Calle prolongación Bolívar, Nº 26, Edif. Bicentenario. Telf.: 322752 - 3242700
- Oficina - Cochabamba: Calle Bolívar, Nº 75, entre el de Julio y Armasa. Telf.: 344443 - 3442952
- Oficina - El Alto: Av. Juan Pablo II, Nº 2560 Edif. Multicentro El Gallo Edm. Pico 1, Of. 18, Zona 16 de Julio. Telf.: 244444 - 2442449
- Oficina - Chuquisaca: Calle Kilómetro 1, Nº 366 casi esq. Urubogochita, Zona Parque Bolívar. Telf.: 2209879
- Oficina - Tarija: Av. La Paz, entre Calles San Diego y Avenida Telf. Santa Clara, Nº 243. Telf.: 7065066
- Oficina - Oruro: Calle 6 de Octubre Nº 5827 entre Apacaca y Jariña, Zulia Central, Of. 14. Telf.: 4230888
- Oficina - Potosí: Av. Villazón entre calles Mercedes Alta y San Alberto, Edif. AP. Salinas Nº 24, Primer Piso, Of. 11. Telf.: 2206610

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS – CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Nombre: Ariel Raul Bedoya Castro **C.I.:** 8311032 LP. **Teléfono:** (+591) 67067214

Dirección: Calle Pioneros Rochdale No.609, Zona San Pedro

Correo Electrónico: arbedoya04@gmail.com