



**UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

## **TESIS**

**APLICACIÓN Y USO DE MESA VIBRATORIA EN PAVIMENTOS,  
CARRETERA MOQUEGUA – OMATE – AREQUIPA, TRAMO I,  
2020**

**PRESENTADA POR**

**BACHILLER JULIO LARICO RAMOS**

**ASESOR:**

**MGR. MARIO PEDRO RODRÍGUEZ VÁSQUEZ**

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO CIVIL**

**MOQUEGUA – PERÚ**

**2021**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
Página de jurado.....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
Contenido.....	iv
CONTENIDO DE TABLAS .....	viii
CONTENIDO DE FIGURAS .....	xii
CONTENIDO DE ECUACIONES.....	xix
CONTENIDO DE APÉNDICES .....	xx
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
INTRODUCCIÓN .....	xxiii

## CAPÍTULO I

### PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema.....	1
1.2. Definición del problema .....	5
1.2.1. Problema general.....	5
1.2.2. Problemas específicos .....	5
1.3. Objetivos de la investigación .....	6
1.3.1. Objetivo general .....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Justificación .....	6

1.4.1. Justificación teórica.....	6
1.4.2. Justificación práctica .....	6
1.5. Alcances y limitaciones .....	7
1.5.1. Alcances .....	7
1.5.2. Limitaciones .....	7
1.6. Variables .....	7
1.6.1. Operacionalización de variables.....	7
1.7. Hipótesis de la investigación .....	8
1.7.1. Hipótesis general .....	8
1.7.2. Hipótesis derivadas .....	8

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

2.1. Antecedentes de la investigación .....	9
2.1.1. Locales .....	9
2.1.2. Nacionales .....	9
2.1.3. Internacionales .....	11
2.2. Bases teóricas.....	13
2.2.1. Pavimentos .....	13
2.2.2. Compactación de suelos .....	26
2.2.3. Métodos de compactación.....	46
2.2.4. Ensayos básicos de laboratorio .....	68
2.2.5. Ensayos especiales en laboratorio .....	74
2.3. Definición de términos.....	91

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

3.1. Tipo de investigación.....	93
3.1.1. Investigación descriptiva.....	93
3.1.2. Investigación comparativa.....	93
3.1.3. Investigación explicativa.....	94
3.2. Diseño de la investigación .....	94
3.3. Población y muestra.....	94
3.3.1. Población.....	94
3.3.2. Muestra.....	94
3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos .....	96
3.4.1. Planteamiento .....	96

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

4.1. Presentación de resultados .....	101
4.1.1. Descripción de los materiales obtenidos en campo .....	102
4.1.2. Ensayos básicos en laboratorio .....	105
4.1.3. Ensayos especiales en laboratorio.....	116
4.2. Contrastación de hipótesis .....	144
4.2.1. Hipótesis general .....	144
4.2.2. Hipótesis específicas .....	148
4.3. Discusión de resultados.....	156

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1. Conclusiones .....	162
5.2. Recomendaciones.....	163
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165
APÉNDICES.....	176
MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	263

## CONTENIDO DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Requerimientos granulométricos para Sub Base y Base Granular. ....	3
Tabla 2 Matriz de operacionalización de variables.....	7
Tabla 3 Datos de textura y plasticidad del suelo según Johnson y Sallberg.....	38
Tabla 4 Métodos de compactación en laboratorio. ....	47
Tabla 5 Métodos de compactación según equipos y maquinarias. ....	56
Tabla 6 Equipos o maquinarias a usar según tipo de suelo.....	56
Tabla 7 Ensayos destructivos de densidad de campo. ....	61
Tabla 8 Ensayos no destructivos de densidad de campo.....	65
Tabla 9 Factor de corrección “k” para límite líquido.....	71
Tabla 10 Métodos de aplicación de Proctor Modificado. ....	74
Tabla 11 Relación entre el índice de densidad y compactación relativa.....	84
Tabla 12 Zonas seleccionadas del Km 06+000 al Km 07+000.....	95
Tabla 13 Cuadro de localización de calicatas realizadas. ....	102
Tabla 14 Análisis granulométrico de Base granular. ....	106
Tabla 15 Clasificación según su distribución de tamaños de la base granular. .	106
Tabla 16 Análisis granulométrico de Sub-base granular. ....	107
Tabla 17 Clasificación según su distribución de tamaños de la Sub-base granular. ....	107
Tabla 18 Análisis granulométrico de Subrasante.....	108
Tabla 19 Clasificación según su distribución de tamaños de la Subrasante. ....	108
Tabla 20 Contenido de humedad de la base granular. ....	110
Tabla 21 Contenido de humedad de la sub-base granular.....	110

Tabla 22	Contenido de humedad de la subrasante. ....	110
Tabla 23	Límites de Atterberg de la base granular. ....	111
Tabla 24	Límites de Atterberg de la sub-base granular. ....	112
Tabla 25	Límites de Atterberg de la subrasante. ....	113
Tabla 26	Sistemas de clasificación de suelos de la base granular – SUCS y AASHTO. ....	114
Tabla 27	Sistemas de clasificación de suelos de la sub-base granular – SUCS y AASHTO. ....	115
Tabla 28	Sistemas de clasificación de suelos de la subrasante – SUCS y AASHTO. ....	115
Tabla 29	Resultados de Proctor modificado de la base granular. ....	117
Tabla 30	Resultados de Proctor modificado de la sub-base granular. ....	117
Tabla 31	Resultados de Proctor modificado de la subrasante. ....	118
Tabla 32	Masa de muestra requerida, tamaño de molde según el T.M. de las partículas ....	121
Tabla 33	Efectos a considerar en la compactación mediante la mesa vibratoria. ....	121
Tabla 34	Serie de ensayos a realizar para alcanzar la densidad máxima de compactación. ....	122
Tabla 35	Resultados densidades secas ( $\text{g/cm}^3$ ) base granular, C-01, C-02 y C-03. ....	127
Tabla 36	Densidad máxima seca a nivel de base granular en estado seco. ....	131
Tabla 37	Densidad máxima seca a nivel de base granular en estado húmedo. ...	131

Tabla 38	Resultados densidades secas (g/cm <sup>3</sup> ) sub-base granular, C-01, C-02 y C-03.....	133
Tabla 39	Densidad máxima seca a nivel de sub-base granular en estado seco..	137
Tabla 40	Densidad máxima seca a nivel de sub-base granular en estado húmedo.....	137
Tabla 41	Resultados densidades secas (g/cm <sup>3</sup> ) subrasante, C-01, C-02 y C-03.	139
Tabla 42	Densidad máxima seca a nivel de subrasante en estado seco. ....	143
Tabla 43	Densidad máxima seca a nivel de subrasante en estado húmedo. ....	143
Tabla 44	Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la base granular. ....	145
Tabla 45	Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la base granular .....	146
Tabla 46	Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la sub-base granular. ....	146
Tabla 47	Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la sub-base granular .....	147
Tabla 48	Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la subrasante.....	147
Tabla 49	Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la subrasante.....	148
Tabla 50	Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para base granular.	153
Tabla 51	Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para base granular.	153
Tabla 52	Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para sub-base granular. ....	154

Tabla 53 Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para sub-base granular. ....	154
Tabla 54 Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para subrasante. ....	155
Tabla 55 Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para subrasante. ....	155
Tabla 56 Variación porcentual en la D.M.S. para la base granular. ....	157
Tabla 57 Variación porcentual en la D.M.S. para la sub-base granular. ....	157
Tabla 58 Variación porcentual en la D.M.S. para la subrasante. ....	157
Tabla 59 Comparación de D.M.S. mediante vibración e impacto para la base granular. ....	159
Tabla 60 Comparación de D.M.S. mediante vibración e impacto para la sub-base granular. ....	160
Tabla 61 Comparación de D.M.S. mediante vibración e impacto para la subrasante. ....	160
Tabla 62 Influencia en el grado de compactación de la base granular. ....	161
Tabla 63 Influencia en el grado de compactación de la sub-base granular. ....	161
Tabla 64 Influencia en el grado de compactación de la subrasante. ....	161

## CONTENIDO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Plano clave carretera Moquegua – Omate – Arequipa. ....	2
Figura 2. Falla pavimento tipo grieta longitudinal.....	3
Figura 3. Composición estructural de un Pavimento Flexible. ....	14
Figura 4. Aplicación de mezcla asfáltica en caliente. ....	18
Figura 5. Aplicación de mezcla asfáltica en frío.....	18
Figura 6. Grieta de borde. ....	20
Figura 7. Grieta Longitudinal.....	20
Figura 8. Grieta Transversal.....	21
Figura 9. Grieta por fatigamiento.....	22
Figura 10. Parches deteriorados. ....	22
Figura 11. Bache. ....	23
Figura 12. Desgaste superficial. ....	24
Figura 13. Ondulación del pavimento. ....	24
Figura 14. Hundimiento del pavimento. ....	25
Figura 15. Ahuellamiento del pavimento.....	26
Figura 16. Condición física de un suelo.....	27
Figura 17. Fases de la curva de compactación.....	31
Figura 18. Menisco formado entre partículas. ....	32
Figura 19. Curva de compactación.....	33
Figura 20. Tipos de curvas de compactación. ....	35
Figura 21. Curvas de compactación para diferentes energías .....	35
Figura 22. Variación de la resistencia y densidad máxima – humedad. ....	36



Figura 45. Rodillo pata de cabra. ....	60
Figura 46. Ensayo cono de arena 6”.....	62
Figura 47. Ensayo cono de arena 12”.....	62
Figura 48. Ensayo de Balón de hule. ....	63
Figura 49. Ensayo reemplazo de arena. ....	64
Figura 50. Ensayo reemplazo de agua.....	65
Figura 51. Métodos de medición del densímetro nuclear. ....	66
Figura 52. Densímetro eléctrico (EDG).....	67
Figura 53. Densímetro eléctrico (SDG).....	68
Figura 54. Desarrollo histórico de la compactación vibratoria.....	76
Figura 55. Evolución de la mesa vibratoria. ....	77
Figura 56. Mesa vibratoria sísmica. ....	78
Figura 57. Ensayo mesa vibratoria ASTM D4253.....	79
Figura 58. Mesa vibradora para bloques de concreto. ....	80
Figura 59. Partes de la mesa vibratoria.....	85
Figura 60. Tramo I, carretera Moquegua – Omate – Arequipa.....	95
Figura 61. Zonas en estudio. ....	96
Figura 62. Esquema del procedimiento metodológico a seguir. ....	96
Figura 63. Zona 01: Km 06+200 (Presencia de falla).....	97
Figura 64. Zona 02: Km 06+580 (Presencia de falla).....	98
Figura 65. Zona 03: Km 06+830 (Presencia de falla).....	98
Figura 66. Calicata Nro. 01 – Km 06+200 (lado izquierdo).....	99
Figura 67. Calicata Nro. 02 – Km 06+580 (lado izquierdo).....	99
Figura 68. Calicata Nro. 03 – Km 06+830 (lado izquierdo).....	99

Figura 69. Zonificación de calicatas realizadas. ....	102
Figura 70. Perfil estratigráfico C-01, Km 06+200. ....	103
Figura 71. Perfil estratigráfico C-02, Km 06+580. ....	104
Figura 72. Perfil estratigráfico C-02, Km 06+830. ....	104
Figura 73. Cuarteo de muestra y análisis granulométrico.....	105
Figura 74. Comparativa de curvas granulométricas de la base granular.....	106
Figura 75. Comparativa de curvas granulométricas de la sub-base.....	107
Figura 76. Comparativa de curvas granulométricas de la subrasante .....	109
Figura 77. Determinación del contenido de humedad. ....	109
Figura 78. Determinación límite líquido y plástico. ....	110
Figura 79. Límite líquido base granular de la C-01 (a), C-02 (b) y C-03 (c).....	111
Figura 80. Límite líquido sub-base granular de la C-01 (a), C-02 (b) y C-03 (c). ....	112
Figura 81. Límite líquido subrasante de la C-01 (a), C-02 (b) y C-03 (c). ....	113
Figura 82. Ensayo Proctor modificado ASTM D1557. ....	116
Figura 83. Proctor modificado de la base granular C-01, C-02 y C-03. ....	117
Figura 84. Proctor modificado de la sub-base granular C-01, C-02 y C-03. ....	118
Figura 85. Proctor modificado de la subrasante C-01, C-02 y C-03.....	118
Figura 86. Instrumentos para realizar el ensayo de mesa vibratoria. ....	119
Figura 87. Colocación de molde con muestra a la mesa y sobrecarga.....	123
Figura 88. Toma de lectura inicial y después del vibrado.....	124
Figura 89. Visualización del asentamiento de la muestra después de la vibración.....	124
Figura 90. Preparación de muestra y llenado de material al molde. ....	125

Figura 91. Vibración, toma de lectura y visualización del material asentado después del ensayo. ....	125
Figura 92. Densidades para la base granular Km 06+200 (f=40 Hz). ....	128
Figura 93. Densidades para la base granular Km 06+200 (f=50 Hz). ....	128
Figura 94. Densidades para la base granular Km 06+200 (f=60 Hz). ....	128
Figura 95. Densidades para la base granular Km 06+580 (f=40 Hz). ....	129
Figura 96. Densidades para la base granular Km 06+580 (f=50 Hz). ....	129
Figura 97. Densidades para la base granular Km 06+580 (f=60 Hz). ....	129
Figura 98. Densidades para la base granular Km 06+830 (f=40 Hz). ....	130
Figura 99. Densidades para la base granular Km 06+830 (f=50 Hz). ....	130
Figura 100. Densidades para la base granular Km 06+830 (f=60 Hz). ....	130
Figura 101. D.M.S. de la base granular Km 06+200. ....	131
Figura 102. D.M.S. de la base granular Km 06+580. ....	132
Figura 103. D.M.S. de la base granular Km 06+830. ....	132
Figura 104. Densidades para la sub-base granular Km 06+200 (f=40 Hz).....	134
Figura 105. Densidades para la sub-base granular Km 06+200 (f=50 Hz).....	134
Figura 106. Densidades para la sub-base granular Km 06+200 (f=60 Hz).....	134
Figura 107. Densidades para la sub-base granular Km 06+580 (f=40 Hz).....	135
Figura 108. Densidades para la sub-base granular Km 06+580 (f=50 Hz).....	135
Figura 109. Densidades para la sub-base granular Km 06+580 (f=60 Hz).....	135
Figura 110. Densidades para la sub-base granular Km 06+830 (f=40 Hz).....	136
Figura 111. Densidades para la sub-base granular Km 06+830 (f=50 Hz).....	136
Figura 112. Densidades para la sub-base granular Km 06+830 (f=60 Hz).....	136
Figura 113. D.M.S. de la base granular Km 06+200. ....	137

Figura 114. D.M.S. de la base granular Km 06+580. ....	138
Figura 115. D.M.S. de la base granular Km 06+830. ....	138
Figura 116. D.M.S. de la subrasante Km 06+200 (f=40 Hz). ....	140
Figura 117. D.M.S. de la subrasante Km 06+200 (f=50 Hz). ....	140
Figura 118. D.M.S. de la subrasante Km 06+200 (f=60 Hz). ....	140
Figura 119. D.M.S. de la subrasante Km 06+580 (f=40 Hz). ....	141
Figura 120. D.M.S. de la subrasante Km 06+580 (f=50 Hz). ....	141
Figura 121. D.M.S. de la subrasante Km 06+580 (f=60 Hz). ....	141
Figura 122. D.M.S. de la subrasante Km 06+830 (f=40 Hz). ....	142
Figura 123. D.M.S. de la subrasante Km 06+830 (f=50 Hz). ....	142
Figura 124. D.M.S. de la subrasante Km 06+830 (f=60 Hz). ....	142
Figura 125. D.M.S. de la subrasante Km 06+200 (f=60 Hz). ....	143
Figura 126. D.M.S. de la subrasante Km 06+580 (f=60 Hz). ....	144
Figura 127. D.M.S. de la subrasante Km 06+830 (f=60 Hz). ....	144
Figura 128. Influencia de efectos - base granular Km 06+200. ....	149
Figura 129. Influencia de efectos - base granular Km 06+580. ....	149
Figura 130. Influencia de efectos - base granular Km 06+830. ....	150
Figura 131. Influencia de efectos - subbase granular Km 06+200. ....	150
Figura 132. Influencia de efectos - subbase granular Km 06+580. ....	150
Figura 133. Influencia de efectos - subbase granular Km 06+830. ....	151
Figura 134. Influencia de efectos - subrasante Km 06+200. ....	151
Figura 135. Influencia de efectos - subrasante Km 06+580. ....	151
Figura 136. Influencia de efectos - subrasante Km 06+830. ....	152
Figura 137. Comparación de densidades máximas secas para base granular. ....	159

Figura 138. Comparación de densidades máximas secas para sub-base granular. ....	160
Figura 139. Comparación de densidades máximas secas para subrasante.....	160

## CONTENIDO DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
Ecuación 01 .....	27
Ecuación 02 .....	28
Ecuación 03 .....	28
Ecuación 04 .....	29
Ecuación 05 .....	69
Ecuación 06 .....	69
Ecuación 07 .....	69
Ecuación 08 .....	70
Ecuación 09 .....	70
Ecuación 10 .....	71
Ecuación 11 .....	72
Ecuación 12 .....	73
Ecuación 13 .....	75
Ecuación 14 .....	83
Ecuación 15 .....	83
Ecuación 16 .....	84
Ecuación 17 .....	126

## CONTENIDO DE APÉNDICES

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Fallas en el pavimento flexible .....	176
Apéndice B. Ensayos básicos de laboratorio – Calicata 01 .....	181
Apéndice C. Ensayos básicos de laboratorio – Calicata 02 .....	194
Apéndice D. Ensayos básicos de laboratorio – Calicata 03 .....	206
Apéndice E. Ensayos especiales de laboratorio – Calicata 01 .....	218
Apéndice F. Ensayos especiales de laboratorio – Calicata 02 .....	233
Apéndice G. Ensayos especiales de laboratorio – Calicata 03.....	248

## RESUMEN

El principal objetivo de esta investigación fue aplicar y usar la mesa vibratoria ASTM D4253 para la obtención de las densidades máximas en las capas estructurales (base granular, sub-base granular y subrasante) del pavimento en la carretera Moquegua – Omate – Arequipa, tramo I de km 0 al 35, siendo el problema general si la aplicación y uso de mesa vibratoria permitirá medir correctamente la densidad máxima seca del suelo, por ende esta investigación busca dar a conocer una nueva metodología para la obtención de la D.M.S. en laboratorio; estudiar cómo influye los efectos de humedad, frecuencia y tiempo de vibración; y comparar metodologías de compactación siendo la vibratoria e impacto. La investigación es de tipo experimental, comparativo y explicativo con un diseño de investigación cuasiexperimental, se consideró la población como el total de los 35 kilómetros del tramo I de la carretera Moquegua – Omate – Arequipa, asimismo mediante un método no probabilístico se seleccionaron tres muestras. Para la técnica e instrumentos de recolección de datos se realizó una serie de ensayos en laboratorio para poder determinar el tipo de suelo y obtener las D.M.S. mediante la mesa vibratoria ASTM D4253 del cual se obtuvo una D.M.S. promedio; para la base granular de 2,201 g/cm<sup>3</sup>, sub base granular de 2,167 g/cm<sup>3</sup>, subrasante de 1,999 g/cm<sup>3</sup> mediante el método 1B, asimismo se pudo observar que los efectos considerados si influyen significativamente en los resultados, finalmente se pudo comparar dos metodologías de compactación obteniéndose una mayor densidad seca mediante la mesa vibratoria.

*Palabras clave:* mesa vibratoria, pavimento, densidad seca, densidad máxima seca.

## ABSTRACT

The main objective of this research was to apply and use the ASTM D4253 vibrating table to obtain the maximum densities in the structural layers (granular base, granular sub-base and subgrade) of the pavement on the Moquegua - Omate - Arequipa highway, section I from km 0 to 35, the general problem being whether the application and use of a vibrating table will allow the correct measurement of the maximum dry density of the soil, therefore this research seeks to present a new methodology for obtaining the DMS in laboratory; study how the effects of humidity, frequency and vibration time influence; and compare compaction methodologies being vibratory and impact. The research is experimental, comparative and explanatory with a quasi-experimental research design, the population was considered as the total of the 35 kilometers of section I of the Moquegua - Omate - Arequipa highway, also by means of a non-probabilistic method, three samples were selected. For the data collection technique and instruments, a series of laboratory tests was carried out to determine the type of soil and obtain the D.M.S. using the vibrating table ASTM D4253 from which a D.M.S. average; For the granular base of  $2.201 \text{ g / cm}^3$ , granular sub base of  $2.167 \text{ g / cm}^3$ , subgrade of  $1.999 \text{ g / cm}^3$  by method 1B, it could also be observed that the effects considered did significantly influence the results, finally it was possible to compare two compaction methodologies obtaining a higher dry density through the vibrating table.

Keywords: vibrating table, pavement, dry density, maximum dry density.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación estudia el uso y aplicación de la mesa vibratoria ASTM D-4253, el cual es un equipo con el que obtenemos la densidad máxima seca del suelo mediante la compactación vibratoria, en la presente tesis se busca estudiar minuciosamente el uso y aplicación de la mesa vibratoria en la carretera Moquegua – Omate – Arequipa, dicha carretera está conformada por un pavimento flexible en el cual a lo largo del tramo hay presencia de zonas fisuradas, agrietas y asentamientos en la carpeta asfáltica, dicho pavimento presenta tres capas estructurales siendo la base granular, sub base granular y subrasante, el objetivo principal es determinar la D.M.S. de dichas capas estructurales mediante la herramienta no convencional de Mesa vibratoria ASTM D4253, asimismo de estudiar cómo influye los efectos de humedad, tiempo y frecuencia de vibración para obtener la densidad seca y comparar la variabilidad de resultados con la metodología de compactación tradicional más usada en el Perú, se busca hacer de conocimiento sobre este equipo el cual es relativamente nuevo en el Perú, sin embargo, ya fue muy utilizado y estudiado por los años de 1960 en países como EEUU, Reino Unido, Polonia, Sudáfrica, etc, los cuales trabajan con nuevas metodologías muchas más eficaces y eficientes como la compactación giratoria y martillo vibratorio.

La característica principal de este equipo es el tipo de compactación con el cual trabaja para obtener la densidad máxima seca, esta es mediante la vibración que a comparación del Proctor es mucho más preciso, debido a que tiene un alcance de hasta 3 pulgadas en tamaños de las partículas del suelo, el Proctor modificado es

un método de compactación más usado a nivel mundial, sin embargo presenta deficiencias provocando que las compactaciones en las capas estructurales del pavimento tengan un bajo grado de compactación haciendo que se produzcan asentamientos de las mismas capas y por lo tanto fisuraciones y grietas en la carpeta asfáltica.

En nuestro país hay escasos trabajos de investigación referentes a este tema, una de las causas puede ser debido al desconocimiento sobre nuevos métodos que existen, según autores americanos sugieren que el método de compactación de Proctor debe ser reemplazado por nuevos métodos mejorados tales como los vibratorios y actualmente el giratorio para tener mayor confiabilidad en los resultados.

En el capítulo I planteamos el problema de la investigación, descripción de la realidad del problema, definimos el problema general y específicos, se establecieron los objetivos a alcanzar siendo los generales y específicos, justificación en el cual se sustenta el porqué es importante realizar dicha investigación, alcances y limitaciones, variables las cuales fueron identificadas y definidas, hipótesis de la investigación formuladas como posibles soluciones a los problemas generales y específicos de la investigación.

En el capítulo II contiene los antecedentes de investigación locales, nacionales e internacionales donde se mencionan los trabajos de investigación similares a la presente, bases teóricas las cuales se desarrolló a detalle y de manera minuciosa, definición de términos, incluye conceptos de términos claves lo cual ayudará a entender mejor la investigación realizada.

En el capítulo III definimos tipo de investigación, diseño de investigación el cual es diseño experimental, población y muestra y finalmente la descripción de los instrumentos para la recolección de datos donde se indica el planteamiento del procedimiento a seguir y herramientas necesarias a para lograr los objetivos de la presente tesis.

En el capítulo IV se puede visualizar la presentación de resultados, se evidencia los cálculos, procedimientos y procesos de los cuales se obtuvieron los resultados esperados, contrastación de hipótesis, se realizó el análisis estadístico con ayuda del programa IBM SPSS STATISTICS V.25 el cual valida o niega el planteamiento hipotético, discusión de resultados, es la interpretación a los resultados obtenidos.

En el capítulo V se puede visualizar las conclusiones y recomendaciones las cuales fueron obtenidas mediante la interpretación de los resultados y en base a las hipótesis generales y específicas planteadas, recomendaciones, se describe diferentes indicaciones y observaciones sobre el desarrollo de la tesis que ayudará a mejorar las futuras investigaciones.

# **CAPÍTULO I**

## **PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Descripción de la realidad del problema.**

Los pavimentos en términos generales son un conjunto de capas estructurales cuyos materiales son seleccionados de acuerdo a normativa EG-2013, en el Perú los pavimentos más utilizados son los flexibles, rígidos y semirrígidos, para el presente trabajo de investigación se enfocará a los pavimentos flexibles debido a que su construcción es ampliamente utilizada tanto en vías urbanas como en carreteras, sin embargo se ha observado que los pavimentos recientemente construidos presentan daños tales como fisuras, grietas y asentamientos en sus capas estructurales inferiores, lo cual genera una intriga en la población ya que se sabe que los pavimentos flexibles según estudios tiene una vida útil de hasta 20 años, por lo cual es difícil que en un pavimento con poca vida útil presenten estas fisuras o grietas en los próximos dos a cinco años de ser construido.

La carretera en estudio está denominada como “Mejoramiento de la red vial departamental Moquegua - Arequipa; Tramo MO-108: Cruz de Flores, distritos Torata, Omate, Coalaque, Puquina, l.d. Pampa Isuña, Moquegua; tramo AR-118: distritos Polobaya, Pocsi y Mollebaya, Arequipa” el cual tiene como objetivo la

eficacia en la interconexión vial de las Provincias de Mariscal Nieto y General Sánchez Cerro de la Región Moquegua, así como también parte de la Región Arequipa a nivel de carpeta asfáltica en caliente. Dicho proyecto fue dividido en tres tramos para su ejecución siendo el tramo I del Km 0 al 35 a cargo del Gobierno Regional de Moquegua, del Km 35 al 153 a cargo de Provias Nacional y del Km 153 al 208 a cargo del Gobierno Regional de Arequipa.

Asimismo, en el presente estudio de investigación se intervino el tramo I del Km 0 al 35, el cual dio inicio en el año 2013 y culminó en el año 2020, tras una serie de adicionales y ampliaciones de plazo debido a retrasos de la ejecución del proyecto.



Figura 1. Plano clave carretera Moquegua – Omate – Arequipa.  
Fuente: Bernal, 2020.

Entre los principales problemas a lo largo de los 35 km se tiene tramos donde existe presencia de asentamientos en la carpeta asfáltica generando fallas tipo grieta de borde y longitudinal en su mayoría.



Figura 2. Falla pavimento tipo grieta longitudinal.

Mediante un análisis de campo se determinó las posibles causas que pudo haber generado estas fallas en el pavimento, a continuación, se detalla lo siguiente:

*A. Selección de material para conformación del pavimento.*

El tipo de material utilizado para las capas estructurales de la base y sub base granular no cumplen con las especificaciones técnicas dadas en el EG 2013, principalmente en la distribución de tamaños de los agregados gruesos (Granulometría), teniéndose en la sub base y base granular partículas de agregado con tamaño máximo de tres pulgadas. Sin embargo, según las especificaciones técnicas Sección 402 del EG 2013 el requerimiento es el siguiente:

**Tabla 1**

*Requerimientos granulométricos para Sub Base y Base Granular.*

<b>Nro. Tamiz</b>	<b>Porcentaje que Pasa Gradación B</b>
50 mm. (2")	100
25 mm. (1")	75 – 95
9,5 mm. (3/8")	40 – 75
4,75 mm. (N° 4)	30 – 60
2,00 mm. (N° 10)	20 – 45
4,25 um. (N° 40)	15 – 30
75 um. (N°200)	5 – 15

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013.

Debido al incumplimiento del huso granulométrico de ambos materiales se presenta dificultades para alcanzar la máxima densidad durante la compactación del material, es por ello que, para prevenir las segregaciones de las partículas, bajos niveles de compactación y resistencia se deberá obtener una curva granulométrica uniforme y sensiblemente paralela a los límites de dicha franja.

*B. Inadecuado uso de metodología de compactación.*

Las causas de la presencia de estas grietas y fisuras en el pavimento pueden ser muchas, pero la más importante es en la etapa de compactación de estas capas estructurales las cuales presentan en su distribución de tamaños partículas de hasta tres pulgadas, en el Perú los métodos tradicionales de compactación realizados en campo como en laboratorio presentan ciertas deficiencias en cuanto a su uso y alcance, este método es el Proctor Modificado (ASTM D1556) con un alcance de hasta 3/4" a través del cual se obtiene la densidad máxima en laboratorio y siendo su uso recomendado para suelos arcillosos y limosos, ocurre que al aplicar la metodología por impacto en suelos granulares no cohesivos se obtenga una mayor densidad en campo que en laboratorio, ocasionando que el grado de compactación esté por encima del 100% el cual es un valor irreal, se debe analizar los tamaños que tenemos en las diferentes capas estructurales del pavimento, observamos que este método es deficiente ya que según Drnevich, Evans y Prochaska (2007) indica que “los suelos con agregados granulares de gran tamaño crean problemas potenciales para los métodos de control de compactación (Proctor) debido a la presencia de partículas de gran tamaño, las partículas de gran tamaño definidas aquí son las retenidas en la malla de 3/4 de pulgada”, a consecuencia de lo anteriormente mencionado decimos que al trabajar con este método tradicional inadecuado no

tendremos resultados confiables causando deficiencias en el proceso de la medición de compactación y posteriormente daños de las capas estructurales del pavimento y la carpeta asfáltica.

### *C. Desconocimiento de nuevas metodologías.*

El presente trabajo de investigación da a conocer el uso, conocimiento y operación de la mesa vibratoria (ASTM D 4253), el cual no es muy utilizado en el Perú, debido al desconocimiento de esta, por lo que se busca que a través de este nuevo método de compactación se logre obtener correctamente el valor de la densidad máxima seca en laboratorio para tener una mejor ejecución - control de compactación de suelos y asimismo evitar los problemas anteriormente descritos.

Según White, Bergeson, Jahren y Wermager (1999) afirman que los materiales granulares necesitan confinamiento para ser compactados efectivamente, y la vibración es la forma más eficiente de proporcionar una reorientación de las partículas a un lugar más denso.

## **1.2. Definición del problema**

### **1.2.1. Problema general.**

¿La aplicación y uso de mesa vibratoria permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento?

### **1.2.2. Problemas específicos.**

¿Cómo influirá los efectos de humedad, frecuencia y tiempo de vibración en la densidad máxima seca mediante la aplicación y uso de mesa vibratoria en las capas estructurales del pavimento?

¿Cómo influirá la aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento con respecto a la metodología de compactación tradicional?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Demostrar que la aplicación y uso de mesa vibratoria permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

Estudiar los efectos de humedad, frecuencia y tiempo de vibración en la densidad máxima seca mediante la aplicación y uso de mesa vibratoria las capas estructurales del pavimento.

Comparar la aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento con respecto a la metodología de compactación tradicional.

### **1.4. Justificación**

#### **1.4.1. Justificación teórica.**

Tiene como finalidad de aportar al conocimiento deficiente en la etapa de compactación de suelos mediante la aplicación y uso de mesa vibratoria para poder determinar las densidades máximas secas de las capas estructurales del pavimento.

#### **1.4.2. Justificación práctica.**

Esta investigación se realiza con la finalidad de mejorar el proceso de compactación de las capas estructurales del pavimento por medio de la aplicación y uso de la mesa vibratoria y asimismo evitar que surja la presencia de fallas (grietas y fisuras) en el pavimento flexible.

Además, permitirá comparar metodologías de compactación, la tradicional el cual es más usado nuestro país (Proctor modificado – impacto) y un método más moderno y eficaz (Mesa vibratoria – vibración).

## 1.5. Alcances y limitaciones

### 1.5.1. Alcances.

El presente trabajo de investigación determinará que el uso y aplicación de mesa vibratoria en pavimentos solucionará problemas de compactación en laboratorio y en campo.

### 1.5.2. Limitaciones.

Falta de antecedentes locales y nacionales debido a que hay escasa información de estudio con respecto al tema de investigación propuesto.

Costo elevado para la realización de los ensayos en laboratorio mediante la mesa vibratoria ASTM D4253.

## 1.6. Variables

### 1.6.1. Operacionalización de variables.

Independiente: Densidad máxima seca mediante mesa vibratoria

Dependiente: Capas estructurales del pavimento

**Tabla 2**

*Matriz de operacionalización de variables*

<b>Variables</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>	<b>Tipo de Variable</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Instrumento de Medición</b>
Densidad máxima seca mediante mesa vibratoria	Vibración vertical	Automatización	Numérica – discreta	Hertz	Minicontrolador SIEMENS
	Humedad	% Contenido de humedad	Numérica – continua	%	Horno eléctrico
	Tiempo	Tiempo de vibración.	Numérica – discreta	Minutos	Cronómetro
Capas estructurales del pavimento	Base granular Sub-base granular Subrasante	Compactación-densidad seca	Numérica - continua	g/cm <sup>3</sup>	Proctor modificado Mesa vibratoria Cono de arena

## **1.7. Hipótesis de la investigación**

### **1.7.1. Hipótesis general.**

La aplicación y uso de mesa vibratoria en pavimentos permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento.

### **1.7.2. Hipótesis derivadas.**

Los efectos de humedad, frecuencia y tiempo de vibración influyen en la densidad máxima seca mediante la aplicación y uso de mesa vibratoria en las capas estructurales del pavimento.

La aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento tendrá mayor influencia con respecto a la metodología de compactación tradicional.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1. Locales.**

No existen temas relacionados de investigación acerca de la aplicación y uso de la mesa vibratoria para determinar la densidad máxima debido a que es un aparato no muy común en Moquegua.

##### **2.1.2. Nacionales.**

Purizaca (2020) realizó un estudio de investigación en el cual su objetivo principal es comparar la metodología del ensayo de Proctor Modificado y el ensayo de Densidad Relativa (Mesa Vibratoria) para determinar la densidad seca máxima. El diseño empleado fue experimental cuya muestra es de seis muestras de calicatas (suelos SP-SM, GP) y cuatro muestras de material de préstamo (GP, GW, GP-GM). Los instrumentos utilizados fueron los equipos y herramientas del laboratorio de mecánica de suelos para poder determinar las características del suelo y los equipos especiales de Proctor modificado y mesa vibratoria para poder determinar la densidad seca máxima y su densidad relativa. En la presente investigación se concluyó que la D.M.S. obtenida por medio del método de compactación vibratoria

(Densidad relativa) son generalmente mayores con respecto a la compactación por impacto (Proctor modificado) con una variación porcentual de 2,81 % a 16,44%.

Apaza (2017) realizó la investigación, teniendo por finalidad en sus objetivos determinar el ángulo de fricción, resistencia al corte y las densidades relativas que presentan los suelos granulares con presencia de gravas inmersas mediante la mesa vibratoria y ensayos a escala reducida. El diseño empleado fue experimental, cuya muestra fue de 12 calicatas conformados por materiales granulares de clasificación GW, GP y GW-GM. Los instrumentos utilizados fueron los equipos y herramientas del laboratorio de mecánica de suelos para poder determinar el ángulo de fricción a partir de su densidad relativa mediante la mesa vibratoria y ensayos a escala reducida. En esta investigación se concluyó que el parámetro de resistencia al corte y ángulo de fricción calculados en función a la densidad relativa de la mesa vibratoria y en función a los ensayos de escala reducida, se obtienen valores similares con ciertas limitaciones en cada método.

Diez y Navarro (2008) realizó la investigación, teniendo por finalidad en sus objetivos determinar el comportamiento del suelo sometido a cargas verticales y conocer el tipo de suelo en estudio con fines de cimentación y pavimentación mediante la mesa vibratoria para obtener la densidad máxima. El diseño empleado fue experimental, cuya muestra fue de 12 calicatas conformados por materiales granulares de clasificación SP, SM y SP-SM. Los instrumentos utilizados fueron los equipos de laboratorio de suelos para poder determinar el ángulo de fricción a partir de su densidad relativa mediante la mesa vibratoria. En esta investigación indica en sus conclusiones que, al aumentar las vibraciones de la mesa vibratoria,

para llegar a alcanzar su densidad máxima seca, las agrupaciones sueltas y compactas dentro del suelo sufren un colapso.

### **2.1.3. Internacionales.**

Rahman (2019) realizó la investigación, teniendo como objetivo principal evaluar la densidad máxima seca mediante pruebas de compactación vibratoria de laboratorio a pequeña escala en suelos de grano grueso empleando diferentes frecuencias y amplitudes de vibración mediante la mesa vibratoria y un martillo vibratorio. El diseño empleado fue experimental, cuya muestra fueron cinco materiales diferentes dos materiales de arena con partículas menores a 4,75 mm y tres materiales con grava mayores a 4,75 mm. Los instrumentos utilizados fueron los equipos de laboratorio como mesa vibratoria, martillo vibratorio, tamices, corte directo, etc, equipos de computación, software Matlab y fichas de registro. En esta investigación se concluye que la compactación por vibración es la forma más efectiva de compactar materiales de grano grueso, el efecto de la frecuencia y amplitud en la densidad máxima seca influyen considerablemente, finalmente indica que la compactación con el martillo vibratorio es mayor que las obtenidas después de la compactación mediante la mesa vibratoria a la amplitud y frecuencia de vibración más altas disponibles en ambos equipos.

Drnevich, Evans y Prochaska (2007) realizó con la finalidad de desarrollar una especificación mejorada para INDOT (Proctor estándar y modificado) para el control de compactación de suelos granulares con sobretamaños, propone otros métodos de compactación tales como la mesa vibratoria y martillo vibratorio, ya que los resultados del Proctor en materiales granulares con sobretamaños no

proporcionan la forma característica “parabólico” que permite la determinación de la densidad máxima seca y el óptimo contenido de humedad, generando picos mal definidos, además indican que las pruebas de compactación por impacto no son apropiadas para los suelos granulares con tamaños de partículas mayores a  $\frac{3}{4}$ ”, sin embargo estas pruebas continúan siendo ampliamente utilizadas por el cual los asentamientos excesivos del pavimento ocurren con frecuencia donde la compactación de campo especificada se basa en densidades máximas secas del Proctor estándar o modificado provocando fallas en el pavimento, por lo que se evaluaron otros métodos de compactación por vibración tales como la mesa vibratoria y el martillo vibratorio para el control de los suelos granulares. El diseño empleado fue experimental, cuya muestra fueron 18 materiales diferentes, 13 materiales tipo SP, SM, SW-SM, SC, GM, GP-GM las cuales no presentaban sobretamaños, y cinco materiales tipo GW-GM y GP los cuales presentaban partículas con sobretamaños. Los instrumentos utilizados fueron los equipos de compactación tales como el Proctor estándar, modificado, mesa vibratoria y martillo vibratorio, registros, programas para el procesamiento de datos. En esta investigación se concluye que el método de compactación por vibración produce una mayor densidad máxima seca a comparación del método por impacto, es decir los equipos de compactación por vibración como la mesa vibratoria y martillo vibratorio son métodos alternativos eficaces para determinar la densidad máxima seca en suelos granulares con o sin sobretamaños, siendo el último equipo la gran promesa para la compactación de suelos granulares.

Xing y Zenghai (2003) el objetivo principal de este proyecto es investigar el uso de la compactación giratoria para la simulación de campo en suelos limosos y

arenosos, y comparar el método de compactación giratoria con los de impacto y vibración, se evaluaron varios procedimientos para determinar cuál replicaría mejor esfuerzo de compactación. El diseño es tipo experimental – correlacional, cuya muestra fue de dos materiales tipo A-3 y 2 tipo A-2-4. Los instrumentos utilizados fueron los equipos de laboratorio como compactador giratorio, mesa vibratoria, Proctor modificado, software, y fichas de registro. En esta investigación se concluye que el método de impacto no era adecuado para determinar la densidad máxima seca en suelos sin cohesión, ya que se obtuvo mayor densidad en campo que en laboratorio, el compactador giratorio logró alcanzar una mayor densidad en los dos tipos de suelo, sin embargo, el método vibratorio no funciona muy bien en suelos limosos ya que es más adecuado para la compactación en suelos sin cohesión.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Pavimentos.**

#### ***2.2.1.1. Definición.***

Como pavimento se denomina a la capa o conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben directamente las cargas de tránsito y las transmiten a las capas inferiores. Este conjunto de capas proporciona una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficazmente con un tránsito rápido y confortable. (Martínez, 2009)

Existen varios tipos de pavimentos; flexibles, rígidos y semi-rígidos, en el Perú los más utilizados son los dos primeros.

#### ***2.2.1.2. Pavimentos Flexibles.***

Se denomina pavimento flexible a aquellos en que su estructura se deflecta o flexiona. La superficie de la rodadura está conformada por una carpeta de cemento

asfáltico (material flexible), el cual no tiene juntas y es colocado sobre una base granular o también sobre un suelo cemento. Casi siempre se requiere de una capa extra el cual es la sub-base y en ocasiones el mejoramiento de la sub-rasante, por lo general la carpeta asfáltica debe de tener un espesor mínimo de 5 cm y es de color gris oscuro o negro. Los tipos de pavimentos flexibles son los siguientes; flexible (asfalto), concreto asfáltico, superficies estabilizadas con asfalto y superficie asfáltica de uso ligero. Algunas aplicaciones típicas de pavimentos flexibles son; carreteras, vías urbanas, líneas auxiliares, bermas, rampas, estacionamientos. Su composición estructural es la siguiente:

Está compuesto de una carpeta asfáltica el cual es relativamente delgada que está apoyada sobre dos capas estructurales las cuales son no rígidas (base y sub base granular) y a su vez apoyada sobre un terraplén. Asimismo, puede prescindirse la capa de sub base o base granular, los cuales dependen de las necesidades particulares en cada proyecto.

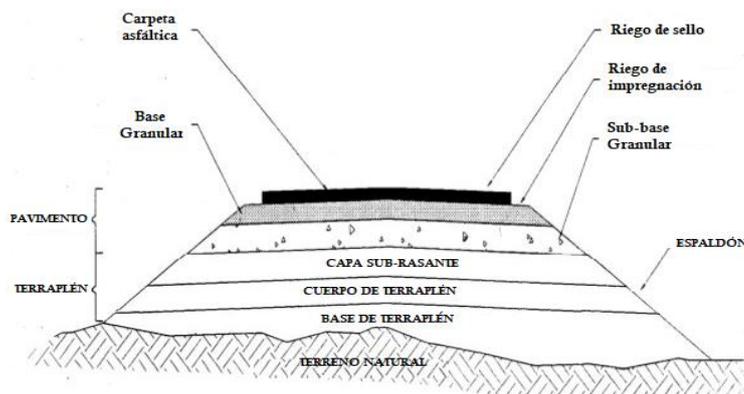


Figura 3. Composición estructural de un Pavimento Flexible.  
Fuente: Cross, 2013

*-Carpeta asfáltica o de rodamiento.-* Capa en la cual consta de la mezcla del material asfáltico con los agregados pétreos de buena calidad, estos previamente ensayados en laboratorio para el cumplimiento con la normativa dada. Su función consiste en proporcionar una superficie de rodadura uniforme, debe soportar efectos

abrasivos causados por la circulación de los vehículos y además debe ser totalmente impermeable.

- *Riego de impregnación.* - Consiste en la aplicación de un líquido asfáltico sobre la capa de base granular, el riego se efectuará una vez culminada y liberada la última capa estructural del pavimento (base granular), evita el deterioramiento y pérdida de humedad por evaporación, además impermeabiliza y ayuda para que haya una buena adherencia entre la base granular y la carpeta asfáltica.

-*Base granular.* -Es una capa estructural de material pétreo seleccionado, posee una mejor calidad a comparación de la sub base granular. Su función elemental es otorgar resistencia y a su vez transmitir a la siguiente capa estructural (sub base) y a la subrasante los esfuerzos que se producen por la circulación de vehículos en la capa de rodadura. Otra de sus funciones es disminuir el espesor de la carpeta asfáltica para reducir costos, además reduce las deformaciones de tracción provocadas por las cargas de cada eje que se da en la capa de rodadura, al ser un material granular tiene la capacidad de poder drenar el agua que se pueda filtrar en la carpeta.

-*Sub base granular.* - Es una capa estructural de material pétreo seleccionado, posee menos calidad a comparación de la base granular, sirve de transición entre las capas de subrasante y base granular, impide la penetración de los materiales, absorbe las deformaciones que puedan ocasionarse en la subrasante, disipa parcialmente los esfuerzos y transmite las cargas de los vehículos a la capa inferior, reduce el espesor de la base granular y asimismo permite el drenaje del agua que se pueda filtrar en las capas superiores.

*-Subrasante.-* Se denomina así debido a que sirve de fundación para toda la estructura del pavimento o afirmado, es la superficie terminada de la vía en la etapa de movimiento de tierras, el cual consta de cortes y rellenos, en general se define como el apoyo directo del paquete estructural del pavimento, es la capa superior del terraplén o fondo de la excavación debido a que es la que soportará la estructura.

Está conformada por suelos seleccionados y compactados por capas para afrontar un cuerpo estable, de tal manera que no sufra daños por los esfuerzos producidos por la carga de diseño. Es primordial para la determinación del espesor del diseño de un pavimento, a mayor calidad de la subrasante menor espesor en la capa de rodadura del pavimento.

*-Terraplén.-* El término terraplén se deriva del francés “terre” – tierra y “plein” – lleno, su función principal es elevar el nivel de un cierto terreno para así poder trabajar en un plano de apoyo que permitirá realizar un proyecto vial, además debe de garantizar la resistencia de las capas estructurales superiores y distribuirlas hacia el terreno natural, este funcionamiento puede ser afectado por una mala compactación, humectación óptima del material, materiales de baja calidad o uso de equipos inadecuados de medición, lo cual provoca problemas de fisuramiento, asentamiento y deformaciones que causan finalmente la inestabilidad e incluso el colapsamiento de la estructura.

*-Base del terraplén.-* Parte inferior del terraplén el cual está en contacto con la superficie de apoyo (terreno natural), generalmente su espesor mínimo es de un metro. Esta parte en ocasiones no es tomada en cuenta debido a que el terreno natural (terreno de fundación) sea de buena calidad o se considere apropiado.

*-Cuerpo del terraplén.-* Es la parte central del terraplén, también llamado “núcleo”, acapara la mayor parte del volumen de un terraplén y es el responsable directo de su forma geométrica, cumple un rol importante ya que es donde se materializa el talud para asegurar una mejor estabilidad y el nivel que será necesario para poder alcanzar la cota que está definida en el proyecto.

*-Corona del terraplén.-* Es la capa final del terraplén, donde se apoya la estructura del pavimento, como la corona del terraplén se encuentra más cerca de la superficie de rodadura conlleva a soportar las fuertes solicitaciones de cargas del tráfico, por lo que debe poseer una gran capacidad resistente.

*-Terreno natural o cimentación.-* Es aquel que se encarga de soportar el pavimento, generalmente después de haber culminado el movimiento de tierra o la compactación del terreno hasta alcanzar su capacidad soporte (CBR) el cual depende en la mayor parte para el diseño del espesor de un pavimento, usualmente requiere mejorar su condición.

#### *A. Mezcla asfáltica en caliente.*

También llamado mezcla bituminosa en caliente, es la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante asfáltico.

Las cantidades relativas de ligantes y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla, este se fabrica con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de 140 a 170 grados centígrados. Según la viscosidad del ligante se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. (Román y Valenzuela, 2019)

La puesta en obra se realiza a temperaturas entre los 100 y 150 grados centígrados, pues debajo de los 100 grados el pavimento ya no es trabajable y se

endurece, es decir esta no puede extenderse y menos aún compactarse adecuadamente. (Román y Valenzuela, 2019)

En el Perú el uso del asfalto en caliente en carreteras y vías urbanas es de un 80% aproximadamente, pues el asfalto frío solo se usa en pequeñas ciudades o para conservación de vías.



*Figura 4.* Aplicación de mezcla asfáltica en caliente.  
Fuente: Bernal, 2020.

#### *B. Mezcla asfáltica en frío.*

Es una combinación de agregado pétreo con o sin relleno mineral, con ligante (RC 250, MC 30 y/o emulsiones asfálticas), todo el proceso se lleva a cabo a temperaturas ambiente. Su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas y/o slurry (micro pavimento). (Román y Valenzuela, 2019)



*Figura 5.* Aplicación de mezcla asfáltica en frío.  
Fuente: Padegua, 2016.

### ***2.2.1.3. Fallas típicas en los pavimentos flexibles.***

Las fallas típicas que presenta una estructura de pavimento flexible se pueden clasificar en:

-Fisuras y Grietas

-Deterioro Superficial

-Deformaciones

Ahora describiremos brevemente cada una de las fallas típicas en los pavimentos flexibles con sus posibles consecuencias y un panel fotográfico lo cual nos permitirá tener una mejor visión de ellas.

#### *A. Fisuras y Grietas.*

*a. De borde.-* Este tipo de grietas presentan una tendencia longitudinal hacia semicircular, están localizadas al costado o borde de la calzada con un ancho de hasta 0,60 metros cuadrados.

Posibles causas:

-Generalmente se producen durante el proceso de compactación de la carpeta asfáltica, los bordes comienzan a ceder debido a la falta de confinamiento como bordillos, anchos de las bermas insuficientes.

-Sobrecarpeteo que termina en desnivel con la berma y el tráfico vehicular transita cerca del borde.

-Mala compactación de las capas estructurales inferiores del pavimento, ocasionando asentamientos diferenciales.



Figura 6. Grieta de borde.

*b. Longitudinales.*- Las grietas longitudinales se forman paralelas a la alineación del pavimento o la línea central del pavimento, es prueba de que existen esfuerzos en tensión en las capas estructurales del pavimento, lo cual ha llegado a superar la resistencia del material.

Posibles causas:

- Rigidización del concreto asfáltico por pérdida de flexibilidad ocasionado por un exceso de filler o también debido al envejecimiento del asfalto debido a las temperaturas bajas o gradientes térmicos altos.
- Espesor de capa de rodadura insuficiente.
- Mala compactación, deficiente humectación óptima del material, materiales de baja calidad o uso de equipos inadecuados de medición.



Figura 7. Grieta Longitudinal.

*c. Transversales.*- Son aquellas que se siguen un patrón transversal o perpendicular a la línea central del pavimento urbano.

Posibles causas:

- Contracción de la mezcla asfáltica por bajas temperaturas o elevadas temperaturas que produce el endurecimiento del asfalto.
- Espesor insuficiente en la carpeta o uso de ligantes muy duros.



*Figura 8.* Grieta Transversal.

Fuente: Gonzáles, 2015

*d. Por fatigamiento.*- Consiste en una serie de fisura enlazadas entre sí, las cuales presentan un patrón irregular, usualmente en las zonas donde hay reparticiones de carga, tiende a formarse en el fondo de la carpeta asfáltica, donde los esfuerzos traccionales son mayores debido a la acción de las cargas.

Posibles causas:

- Falla por fatiga de la estructura del pavimento o la carpeta asfáltica debido a un espesor de estructura insuficiente o elevadas deformaciones en la subrasante.
- Compactación deficiente en las capas estructurales del pavimento.
- Rigidización de la mezcla asfáltica en zonas de carga.



*Figura 9.* Grieta por fatigamiento.

Fuente: Miranda, 2010

### *B. Deterioros Superficiales.*

*a. Parches deteriorados.* - Estos parches son de áreas donde el pavimento existente original ha sido removido y sobrepuesto por un material que puede ser de las mismas características u otro material mejorado con el fin de reparar la estructura del pavimento (carpeta asfáltica y en ocasiones hasta los materiales granulares) o para la reinstalación, cambio o reparación de red de servicios.

Posibles causas:

- Deficiencias en las juntas, mala calidad de los agregados pétreos.
- Mal proceso constructivo en el parche (problemas de compactación, mal diseño de mezcla asfáltica)



*Figura 10.* Parches deteriorados.

Fuente: Miranda, 2010

*b. Baches.*- Es la desintegración parcial y total de la carpeta asfáltica e inclusive hasta la exposición de los materiales granulares, es una cavidad normalmente redondeada, con una profundidad variable.

Posibles causas:

- Defectos en el proceso constructivo (carencia de imprimación en la base granular o sellado asfáltico a nivel de carpeta), mal diseño estructural del pavimento (espesores)
- Materiales inadecuados impiden el drenaje del agua en zonas de fisura.



*Figura 11.* Bache.

Fuente: Calo, 2016

*c. Desgaste.*- Se produce por el deterioro de la carpeta asfáltica (pérdida de ligante) el cual es producido principalmente por la acción cargas de tránsito vehicular, agentes abrasivos y erosivos, sin llegar a afectar las capas inferiores. Este daño puede provocar que el deterioro del pavimento se acelere y posteriormente haya desprendimientos de agregados.

Posibles causas:

- Deficiencia de adherencia entre los agregados y el asfalto.
- Pobre dosificación de líquido asfáltico en la mezcla.
- Acción intensa del agua, tránsito y otros agentes abrasivos.



*Figura 12.* Desgaste superficial.  
Fuente: Calo, 2016

### *C. Deformaciones.*

*a. Ondulaciones.* - Es una deformación plástica de la carpeta asfáltica en la cual se produce ondas en la superficie del pavimento, también conocido como corrugación o rizado, estas ondas se producen generalmente en dirección perpendicular al eje del pavimento, con longitudes entre crestas habitualmente menores a 1,0 metro.

Posibles causas:

- Pérdida de estabilidad de la mezcla debido a una deficiente dosificación de asfalto.
- Materiales inadecuados (ligantes blandos o agregados de canto rodado).
- Compactación excesiva en la carpeta asfáltica.
- Deslizamiento de la capa de rodadura sobre la capa inferior debido al exceso de riego de liga.



*Figura 13.* Ondulación del pavimento.  
Fuente: Gonzáles, 2015

*b. Hundimiento.*- Son depresiones concentradas en el pavimento con respecto a la subrasante, es riesgoso para el tránsito vehicular cuando contienen agua el cual no permite la visibilidad de este daño, estos hundimientos pueden estar de forma longitudinal o transversal a la línea central del pavimento.

Posibles causas:

- Asentamientos de la subrasante o capas estructurales superiores.
- Compactación deficiente de las capas estructurales inferiores del pavimento.
- Falta de drenaje el cual afecta a los materiales granulares.
- Falta de rigidez de los materiales de la subrasante en sectores de transición entre corte y terraplén.



*Figura 14.* Hundimiento del pavimento.

Fuente: Gonzáles, 2015

*c. Ahuellamiento.*- Son depresiones canalizadas en la parte transversal que se producen a lo largo de la huella de rodamiento de los vehículos originado por la acción de cargas del tráfico vehicular, puede tener su origen por las deformaciones de la carpeta asfáltica o en las capas subyacentes.

Posibles causas:

- Combinación de elevados niveles de tránsito (tráfico pesado y/o lento) originado por la deformación plástica del concreto asfáltico debido a la fatiga de la estructura ante la acción repetitiva de cargas.

- Compactación deficiente e inadecuada de las capas estructurales inferiores.



*Figura 15.* Ahuellamiento del pavimento.  
Fuente: Miranda, 2010.

## **2.2.2. Compactación de suelos.**

### **2.2.2.1. Definición.**

La compactación se define como la densificación mecánica para mejorar la resistencia, reducir la compresibilidad y mejorar la rigidez de los suelos a través de la expulsión de burbujas de aire mediante la aplicación de energía bajo una humedad constante, por lo general implica una reducción bastante rápida del volumen de vacíos (pérdida de aire) y una reducción del volumen del suelo. Se cuantifica por densidad máxima seca del suelo (peso de partículas sólidas por unidad de volumen). El material más denso y compacto es capaz de soportar cargas más pesadas sin presentar deformaciones tales como los asentamientos y agrietamientos. (Chirinos, 2016)

Este proceso busca ajustar aspectos del comportamiento del suelo como la resistencia, deformabilidad, permeabilidad y absorción del agua, sin embargo, debe tenerse en cuenta que la compactación no es la simple reducción de los vacíos del suelo con reflexiones sobre su comportamiento, debido que, al interferir también en

la estructura del suelo, será necesario considerar el tipo de suelo o mezcla, método y condiciones de compactación. (Andrade de Aguiar, 2014)

Para una mejor comprensión de este proceso, es importante recordar la importancia de estas variables. Según Ferreira (2013) indica que el suelo es un conjunto natural de partículas minerales que pueden ser separados por agitación en agua, los huecos entre las partículas contienen agua y aire por separado y de forma conjunta.

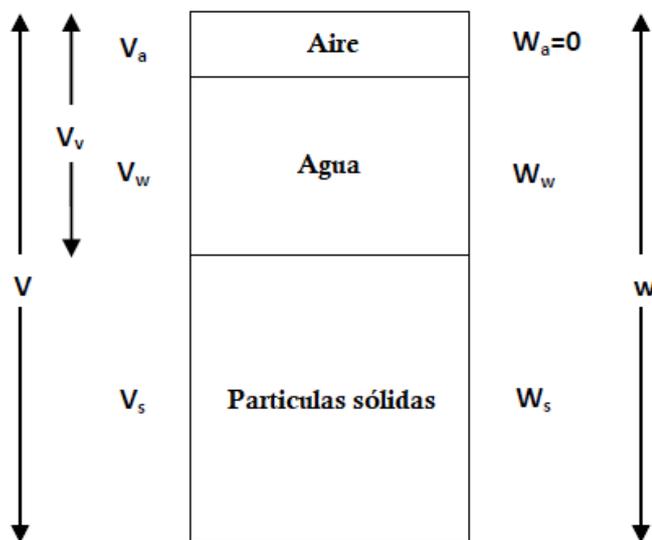


Figura 16. Condición física de un suelo.  
Fuente: Fernández, 2004.

Denota que el volumen del suelo incluye el volumen del aire, volumen del agua y volumen de las partículas sólidas. El resultante volumen vacío es la suma del volumen del aire y el volumen del agua.

$$V = V_a + V_w + V_s$$

$$V = V_v + V_s \dots \dots \dots [Ecuación 01]$$

Donde:

$V$ = Volumen del suelo (en  $m^3$ )

$V_a$ = Volumen del aire (en  $m^3$ )

$V_w$ = Volumen del agua (en  $m^3$ )

$V_s$ = Volumen de las partículas sólidas (en  $m^3$ )

Por lo tanto, podemos decir que el peso total de la muestra del suelo es la suma de la masa del aire, peso del agua y el peso de las partículas sólidas.

$$W = W_a + W_w + W_s$$

$$W = W_w + W_s \dots \dots \dots [Ecuación 02]$$

Donde:

$W$ = Peso de la muestra total del suelo (en  $m^3$ )

$W_a$ = Masa del aire (en  $m^3$ )

$W_w$ = Peso del agua (en  $m^3$ )

$W_s$ = Peso de las partículas sólidas (en  $m^3$ )

A partir de estas ecuaciones podemos determinar lo siguiente:

-*Peso específico o densidad de los sólidos* expresa la relación que hay entre el peso total y el volumen aparente total del suelo.

$$\gamma = \frac{W_s}{V}$$

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

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \dots \dots \dots [Ecuación 03]$$

Donde:

$\gamma$  = Peso específico aparente del suelo (en  $kg/m^3$ )

$\gamma_d$  = Peso específico seco del suelo (en  $kg/m^3$ )

$W_s$ = Peso de las partículas sólidas (en  $kg$ )

$w$ = Humedad del suelo (en %)

Es un indicativo donde mediante la relación de peso por volumen del suelo se obtiene la densidad, asimismo todo está en función a la porosidad del suelo ya que un suelo muy poroso será menos denso a comparación de un suelo poco poroso, esto está ligado directamente a las propiedades físicas del suelo. Asimismo, se sabe que los suelos arenosos que presentan baja porosidad tienen una mayor densidad a los suelos arcillosos quienes tienen un mayor volumen de poros, por este motivo la porosidad es uno de las principales razones para poder hallar la densidad de un suelo y de allí poder clasificarlo como densidad real y aparente las cuales se deberá analizar y calcular para obtener una comparación lógica e identificación del suelo según la densidad que posea el mismo. (Estrella y Ormachea, 2020)

Contenido de agua, expresa la relación que hay entre el peso de las partículas de agua y los sólidos de la muestra del suelo.

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100 \dots\dots\dots [Ecuación 04]$$

Donde:

w = Contenido de agua (en %)

Ww = Peso del agua (en kg)

Ws= Peso de las partículas sólidas (en kg)

Según Ferreira (2013), afirma que en el proceso de compactación de suelos la relación de vacíos se reduce debido a la disminución que hay en el volumen del aire y el aumento de la densidad aparente, a través de la aplicación de repetidas cargas (energía). No hay un cambio significativo en el contenido de agua o cambio en el volumen de las partículas sólidas durante este proceso.

#### **2.2.2.2. Teorías de compactación.**

Existen muchas teorías que tratan de dar a entender lo que ocurre en este proceso donde la estructura del suelo, sus propiedades y su comportamiento cambian debido a la distribución de sus partículas.

##### *A. Teoría de Proctor.*

Esta teoría se basa en los estudios de Proctor, el cual creía que la humedad de un suelo aparentemente seco creaba efectos de capilaridad lo cual hacía que las partículas se unan entre sí.

Según Proctor, cuando se compactaba un suelo con mayor contenido de agua, había una mayor lubricación entre las partículas haciendo que estas vuelvan a ordenarse con más facilidad y así el suelo pueda obtener más densidad.

El proceso de compactación finaliza cuando la humedad del suelo juntamente con el aire que no fue expulsado, ocupan todos los vacíos del suelo, es así que en este punto se dice que el suelo llega a alcanzar la mayor densidad. Por otro lado, explica que, a mayor contenido de humedad, la compactación llega a un punto donde los vacíos son iguales al volumen del aire y agua, por lo que a más vacíos menos densidad y más plasticidad. (Ocas de la Cruz, 2013)

##### *B. Teoría de Braja Das.*

Según Braja Das indica que la compactación de suelos para la construcción de diferentes obras tales como terraplenes para carreteras, presas de tierra y otras estructuras, los suelos que se encuentran en estado suelto deben ser compactados para así poder aumentar su peso específico, mejorar sus características como su resistencia, capacidad de carga de las cimentaciones que van a ser construidas sobre ellos, además afirma que la compactación disminuye los vacíos que existe.

### C. Teoría de Hogentogler.

Ocas de la Cruz, (2013) señala que en el proceso de compactación por la teoría de Hogentogler intervienen cuatro etapas: la hidratación, lubricación, expulsión y saturación.

1° Etapa de hidratación.- Contacto entre el agua y las partículas del suelo formando una película alrededor de ellas.

2° Etapa de lubricación.- Reacomodamiento de las partículas del suelo al estar adherida con el agua que facilita este proceso. Finalizado esta etapa, debido al exceso de agua inicia la expulsión.

3° Etapa de expulsión.- Inicio de expulsión de agua, debido a que la cantidad de aire que está retenida en el suelo no ha variado desde la etapa final de la lubricación causando que solo se remuevan partículas del suelo.

4° Etapa de saturamiento.- En teoría podemos decir que todos los vacíos de aire son reemplazados completamente por agua y se obtiene la curva de saturación.

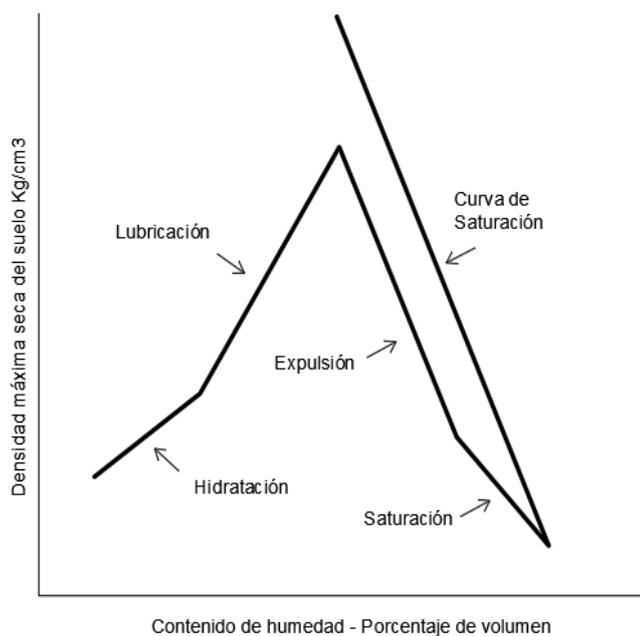


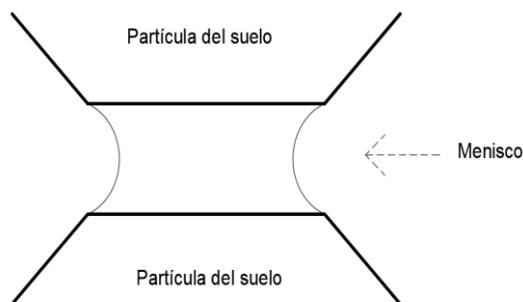
Figura 17. Fases de la curva de compactación.

Fuente: Ocas de la Cruz, 2013.

#### *D. Teoría de Hilf.*

Hilf indica en su teoría de presión de agua en poros del suelo no saturados, que los suelos secos son dificultosos para su compactación ya que la fuerza de fricción ocasiona que la curvatura de los meniscos que se forman debido al agua cubre las partículas de suelo en la parte de contacto entre los mismos.

Hilf concluye que, en la etapa de compactación, a mayor contenido de humedad los meniscos se apisonan o fracturan disminuyendo su resistencia al esfuerzo de compactación y logrando incrementar la densidad hasta llegar al máximo. (Ocas de la Cruz, 2013).



*Figura 18.* Menisco formado entre partículas.  
Fuente: Ocas de la Cruz, 2013.

#### *E. Teoría de Lambe.*

Lambe por otro lado trató de explicar el efecto de la compactación aduciendo que, a menor cantidad de agua, la floculación de las partículas (proceso químico donde las sustancias floculantes provoca el aglutinamiento de sustancias coloidales del agua) se origina por la elevada concentración de los electrolitos. (Ocas de la Cruz, 2013)

La causa de obtener bajas densidades es por la floculación, la cual mejora al aumentar el agua y disminuye la concentración de electrolitos resultando una estructura más dispersa y menor cantidad de vacíos (Ocas de la Cruz, 2013).

### *F. Teoría de Olson.*

El científico Olson basándose en los conceptos de esfuerzos efectivos entre partículas de suelo, explica la compactación del suelo indicando que, al aumentar el contenido de agua, aumenta el grado de saturación y la presión de aire, agua en los poros del suelo, provoca la debilitación del suelo y disminuye el esfuerzo efectivo.

Las partículas se deslizan entre las mismas hasta obtener esfuerzos laterales y horizontales de corte lo necesariamente grandes con la capa ya compactada, para otorgar al suelo el esfuerzo efectivo necesario. (Ocas de la Cruz, 2013)

#### **2.2.2.3. Curva de compactación.**

La curva de compactación es la representación de las densidades secas frente al contenido de humedad obtenido de una prueba de compactación. La densidad máxima seca alcanzada depende del contenido de humedad durante el proceso de compactación. Cuando las muestras del mismo material se compactan con la misma energía, pero con diferentes contenidos de agua, presentan diferentes etapas de densificación, tal y como se muestra en la figura N° 19.

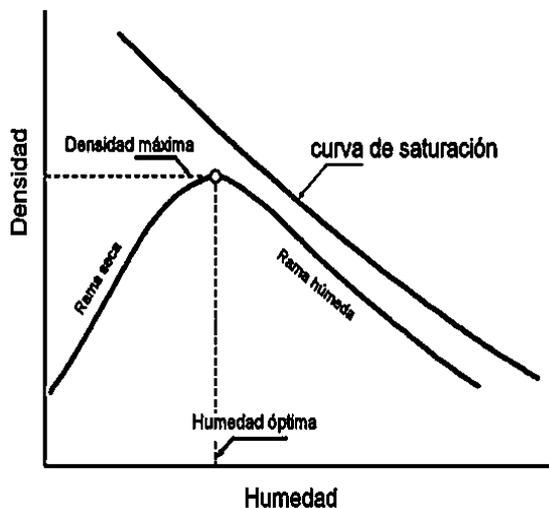


Figura 19. Curva de compactación.

Fuente: Ocas de la Cruz, 2013.

En esta etapa de densificación se representa la curva de compactación el cual tiene una forma particular, muchas teorías han tratado de explicar la forma de esta curva, una de ellas indica que la curva de compactación de los suelos fue desarrollada por Proctor en 1933, existe diferentes métodos de compactación que se puede llevar a cabo en laboratorio y campo, los más conocidos son por impacto, estático, amasado, vibratorio y el más reciente giratorio.

El objetivo de la compactación es establecer la curva de compactación, determinar el contenido de humedad óptimo y la densidad máxima seca. Típicamente, se usa la curva de compactación determinada como guía para el control de las especificaciones de compactación en campo.

El método de compactación por impacto como Proctor es el más común y estándar, utilizado en la mayoría de laboratorio a nivel mundial, sin embargo, tiene algunas deficiencias en la aplicación para correlacionarse con los datos de campo ya que los procedimientos de compactación usados en campo difieren de los valores obtenidos por el Proctor y aplica una entrada de energía definida que puede ser diferente de la energía de compactación aplicada en el campo. Se debe de tener en cuenta que las curvas de compactación de Proctor no siempre son parabólicas, la aparición de una densidad seca máxima a un contenido de humedad óptimo de agua ha sido interpretado de varias maneras, debido a que se presentaron diversos casos tales como curvas de compactación de forma irregular es decir que presentan doble pico, 1 ½ pico, línea recta, tal como se observa en la figura N° 20.

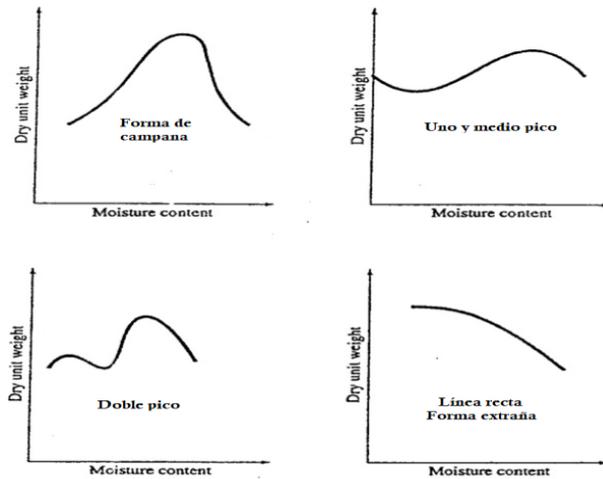


Figura 20. Tipos de curvas de compactación.  
Fuente: Das, 2014.

#### 2.2.2.4. Factores que afectan la compactación.

##### A. Energía de compactación.

En los proyectos de construcción ya sea de obras viales, edificaciones, aeropuertos, etc., siempre hay necesidad de compactar el suelo y las maquinarias se despliegan para proporcionar energía de compactación. Los tipos de maquinarias se deciden de acuerdo al tipo de suelo a ser compactado, el método de compactación se divide principalmente en cinco tipos, tales como el amasado, estático, impacto, vibratorio y giratorio, cada método produce una energía de compactación diferente y es aplicada para cada tipo de suelo ya sea cohesivo o no cohesivo.

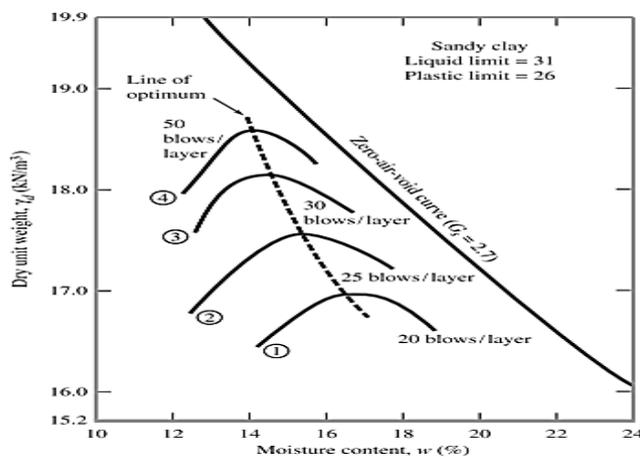


Figura 21. Curvas de compactación para diferentes energías  
Fuente: Ferreira, 2013

### B. Contenido de humedad.

Es uno de los factores más importantes que afectan la calidad y el nivel de compactación, ya que la humedad actúa como lubricante durante la compactación permitiendo que las partículas del material se deslicen y acomoden para lograr la densidad deseada, esta debe alcanzar el punto óptimo apropiado para obtener la densidad máxima, si el contenido de humedad natural es inferior a la óptima se deberá añadir la cantidad faltante al suelo con regadera mediante una cisterna o si el material está demasiado húmedo, requiere ser secado por aireación hasta llegar al óptimo.

Según Armas (2008) indica que la mayor resistencia de un suelo con una misma energía de compactación se alcanza con humedades ligeramente inferiores a la óptima (2 o 3%), además añade que, al compactar con humedades mayores a la óptima, la resistencia del suelo disminuye bruscamente.

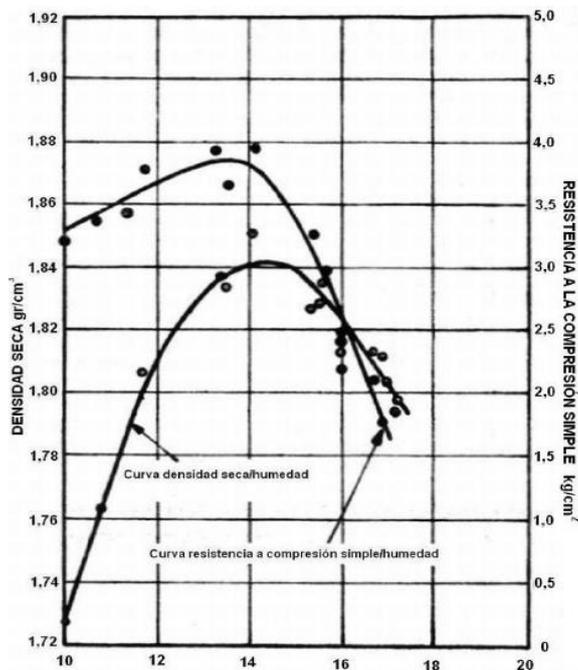


Figura 22. Variación de la resistencia y densidad máxima – humedad.  
Fuente: Armas, 2008.

### C. Tipo de suelo.

El tipo de suelo influye radicalmente en sus características de compactación, normalmente las arcillas pesadas (elevada plasticidad), arcillas y limos demanda mayor compactación y mayor humedad, en cambio los suelos arenosos de grano grueso o gravas son susceptibles para una fácil compactación, alcanzando su densidad máxima a una baja humedad. Los suelos de grano grueso producen densidades más altas en comparación con las arcillas, un suelo bien graduado se puede compactar a una mayor densidad.

Los diferentes tipos de suelo se comportan de manera diferente con respecto a la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad. Según Johnson y Sallberg en 1960 estudiaron el efecto del tipo de suelo y contenido de agua que influye en la densidad seca por compactación realizando pruebas de compactación Proctor en diferentes tipos de suelos. (Rahman, 2019).

Los resultados se muestran en la figura N°23 y la tabla N°03.

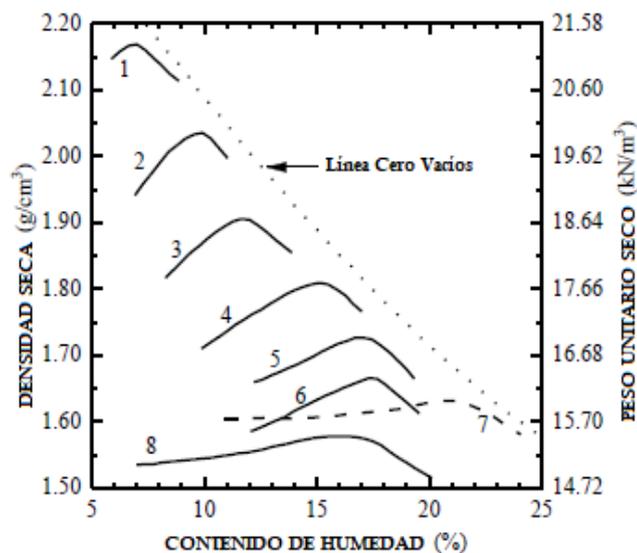


Figura 23. Relaciones de contenido de agua vs densidad seca.  
Fuente: Rahman, 2019.

**Tabla 3***Datos de textura y plasticidad del suelo según Johnson y Sallberg.*

N° de suelo	Descripción y símbolo SUCS	%	%	%	LL	IP
		Arena	Limo	Arcilla		
1	Arena bien graduada con limo SW-SM	88	10	2	16	NP
2	Limo bien graduado SM	72	15	13	16	NP
3	Arena Arcillosa SC	73	9	18	22	4
4	Arcilla arenosa CL	32	33	35	28	9
5	Arcilla limosa CL	5	64	31	36	15
6	Limo de baja plasticidad ML	5	85	10	26	2
7	Arcilla de alta plasticidad CH	6	22	72	67	40
8	Arena mal graduada SP	94	6	-	NP	-

Fuente: Rahman, 2019.

*D. Espesor de la capa.*

Mientras mayor sea el espesor de la capa a compactar, menor es la entrada de energía de compactación del rodillo en cada pase, trabajar con un espesor adecuado del suelo de cada capa es necesario para lograr un espesor uniforme y lograr la densidad máxima deseada. El espesor de la capa depende del tipo de suelo y el tipo de rodillo, su peso y la presión de contacto hacia el suelo, normalmente entre 15 a 20 cm de espesor de la capa es óptima en campo para lograr una compactación homogénea.

*E. Presión de contacto.*

La presión depende del peso de la rueda de rodillo y el área de contacto, en caso de rodillos neumáticos, la presión de inflado también determina la presión de contacto, además de la carga de la rueda. A mayor presión de contacto mayor densidad y reduce el contenido de humedad óptimo.

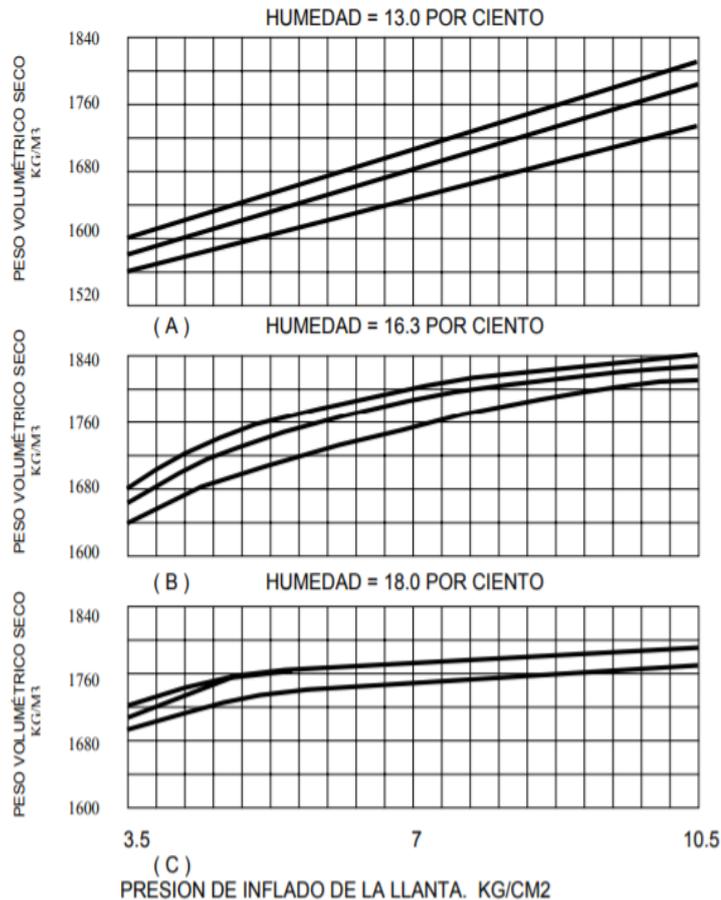


Figura 24. Efecto de la presión de inflado, del número de pasadas y el contenido de humedad.

Fuente: Rico y del Castillo, 1992

#### F. Número de pasadas.

La densidad del suelo aumenta con el número de pasadas de los rodillos, pero se debe tener en cuenta que después del número óptimo de pasadas, el material va perdiendo humedad y empieza a agrietarse, posteriormente si continua el compactado habrá disgregaciones y desprendimientos. Para determinar el número óptimo de pasadas para determinado rodillo y el espesor de la capa, es necesario realizar un tramo de prueba para sí poder calibrar el número de pasadas y espesor a trabajar.

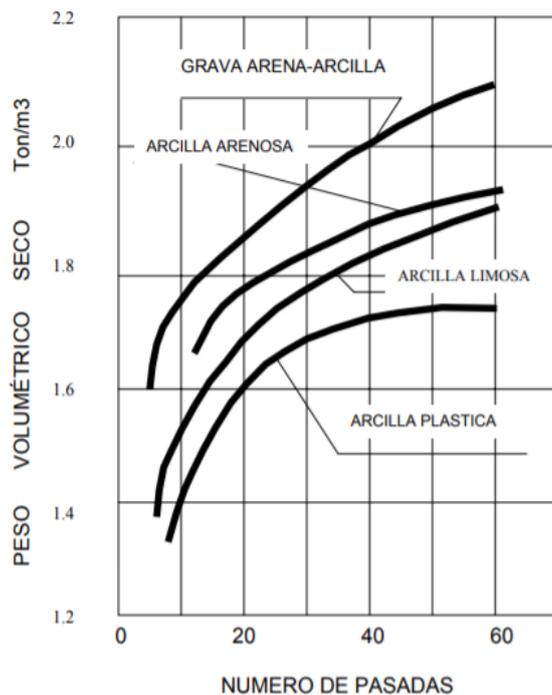


Figura 25. Compactación con rodillo pata de cabra  
- Efecto del número de pasadas.  
Fuente: Rico y del Castillo, 1992

### 2.2.2.5. Propiedades de los suelos compactados.

La compactación de los suelos genera que su estructura varíe y optimice sus propiedades físicas y mecánicas, ya que los suelos en estado suelto o sin compactación no permitirán servir de apoyo debido a que no podrá soportar las cargas ni resistir algunas otras condiciones por la obra.

#### A. Permeabilidad.

Se define como permeable a aquel material que no presenta resistencia al líquido de poder atravesarlo sin alterar su composición, esta propiedad depende del índice de vacíos, del grado de saturación y la estructura del suelo. Al disminuir el índice de vacíos se reduce la permeabilidad del suelo, ya que mientras menos vacíos haya, menos canales habrá para el paso del líquido. No obstante, si el grado de saturación del suelo aumenta, la permeabilidad también aumentará. Otro factor es la estructura

del suelo el cual después de ser sometido al proceso de compactación, influye en la permeabilidad debido a las cualidades de reordenamiento de sus partículas, contenido de humedad, en resumen, si el proceso de densificación es óptimo entonces menos es la permeabilidad del suelo.

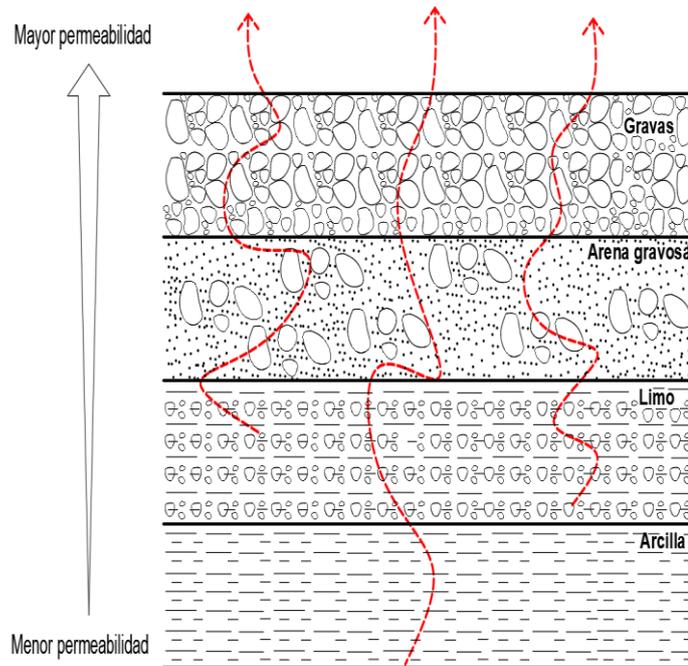


Figura 26. Permeabilidad en suelos típicos.  
Fuente: García, 2012.

### B. Compresibilidad.

Se define como el grado en el que cierta masa reduce su volumen debido al efecto de alguna carga, en otras palabras, es la relación entre la aplicación de una carga y la deformación o variación del volumen que produce dicha carga en el suelo, esta deformación depende de la magnitud de la carga aplicada, del índice de vacíos y la humedad del suelo. El componente a tener mayor cuidado es el contenido de humedad del suelo, ya que tiene mayor incidencia en la compresibilidad de un suelo compactado, a menor contenido de humedad en comparación al óptimo, menor variación del volumen y si el contenido de humedad tiende al grado de saturación

máxima, al momento de la aplicación de la carga al suelo, este colapsa creando grandes variaciones de volumen y por lo tanto la compresibilidad es mayor.

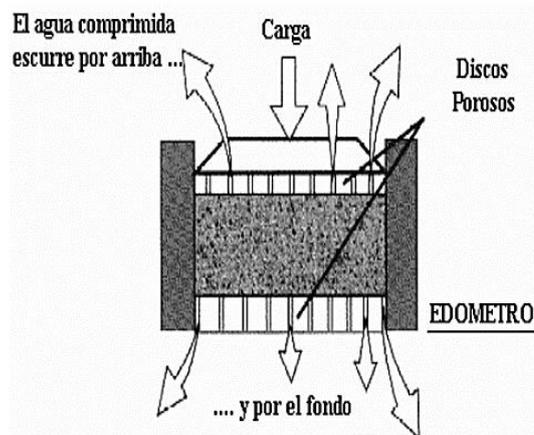


Figura 27. Ensayo edométrico o de consolidación.  
Fuente: Vergara, 2013.

### C. Resistencia al corte.

Es la propiedad más importante y más difícil de determinar experimentalmente a comparación de la permeabilidad y compresibilidad, se define como la tensión de corte sobre el plano de ruptura, en el momento de la ruptura o la resistencia interna por carga unitaria que otorga para soportar la falla y el desplazamiento en cualquier plano de la misma. (Revolorio, 2013)

La propiedad de los suelos es de servir de apoyo para soportar las cargas y otorgar estabilidad a la estructura esto depende de la resistencia al corte de suelos, una buena compactación aumenta la resistencia del suelo, según Mohr en 1900 sostenía que un suelo falla debido a una combinación crítica entre el esfuerzo normal y cortante. Por otro lado, Coulomb afirmaba que la resistencia al corte de los suelos, están compuestas básicamente por dos componentes: cohesión y ángulo de fricción. (Revolorio, 2013)

La resistencia al corte depende también de la densidad y la humedad del suelo al momento de producirse el corte, en la figura N° 28 observamos la variación

de la resistencia al corte (en líneas continuas expresadas en  $\text{kg/cm}^2$ ), para una densidad seca constante, la resistencia al corte disminuye cuando se incrementa el contenido de humedad.

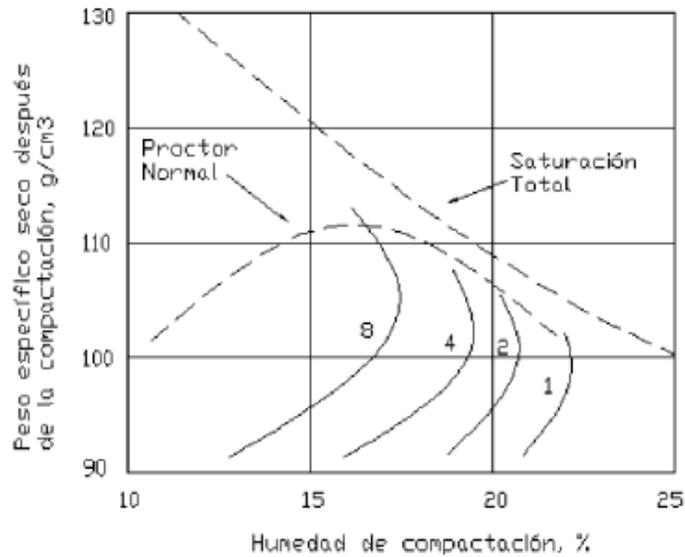


Figura 28. Relación de la resistencia al corte sin confinar ni drenar.  
Fuente: Revolorio, 2013.

#### 2.2.2.6. Comportamiento mecánico de los suelos compactados.

Analizaremos el comportamiento mecánico de los suelos cohesivos (arcilla) y los no cohesivos (arenas), con respecto a la curva de compactación de estos materiales, sabemos que es resultado de la experimentación el cual se procesa en el laboratorio o campo.

##### A. Suelos cohesivos.

Se componen de partículas de minerales de arcilla de forma laminar muy pequeña, estas partículas de suelos coloidales generalmente contienen cargas eléctricas en su superficie, la cual es alta y por lo tanto hay una influencia significativa de las cargas eléctricas en el comportamiento mecánico de estos materiales que son las fuerzas predominantes en la masa. También se debe tener en cuenta la tensión capilar que ejercen las partículas ya que influyen en el comportamiento de los suelos cohesivos.

El comportamiento de estos suelos se caracteriza generalmente por la relación entre la densidad máxima seca y el contenido de humedad para una energía de compactación dada, la simplicidad y la fiabilidad de estos dos parámetros en el control indirecto de los parámetros de diseño tales como la resistencia al corte y la compresibilidad, los hacen ampliamente utilizados.

En cuanto a la curva de compactación que presentan este suelo, se puede afirmar que cuanto más se acerca la humedad al contenido de humedad óptima por el lado de la rama seca, mayor será la resistencia al corte y menor compresibilidad, en cambio cuanto más se aleje de la rama húmeda respecto al óptimo la curva de compactación tiende a ser paralela a la curva de saturación del 100 % y el suelo compactado en este estado presenta menor resistencia al corte y mayor compresibilidad.

Según Buenfil (2007) indica que, en los suelos de baja plasticidad no saturados, ocurren los fenómenos de colapso e hinchamiento, debido a la reducción del volumen irrecuperable producido el aumento de la humedad. El colapso puede darse debido a la posible ruptura de las partículas al perder resistencia por humedecimiento. Además, indica que el colapso en los suelos cohesivos es progresivo, debido a que se produce en función al incremento del grado de saturación.

#### *B. Suelos no cohesivos.*

A comparación de los suelos cohesivos, las partículas de los suelos no cohesivos son muy diferentes, también llamados suelos granulares o friccionantes, son partículas que no tienden a unirse ni adherirse, están formados por partículas gruesas como arena y grava. Cuando se compactan los suelos no cohesivos estos no

presentan una curva de compactación bien definida, lo que quiere decir que son más propensos a que una variación en el contenido de humedad produzca una variación relevante en la densidad máxima seca, estos suelos presentan mayores densidades y menor humedad óptima, en comparación con los suelos cohesivos donde sus curvas resultan más abiertas y con mayores valores de humedad.

Según Drnevich, Evans y Porchaska (2007) afirma que la razón por la que se pueden obtener pesos unitarios secos más bajos en contenidos de agua intermedios se debe al fenómeno llamado aumento de volumen, donde los contenidos de agua en los que ocurre este fenómeno se conocen como contenido de agua a granel. El aumento del volumen se debe a las tensiones capilares que existen con el bajo contenido de agua en un suelo parcialmente saturado, se desarrolla una superficie curva en la interfaz agua-aire, el cual está tensionada. Este esfuerzo de tensión se transmite al agua, que actúa para mantener las partículas del suelo en su lugar y resistir la compactación. La superficie del agua curvada entre partículas posee tensión el cual dibuja partículas entre sí y aumenta la fricción de deslizamiento, estas tensiones capilares se reducen cuando se elimina la humedad o el suelo se aproxima a la saturación.

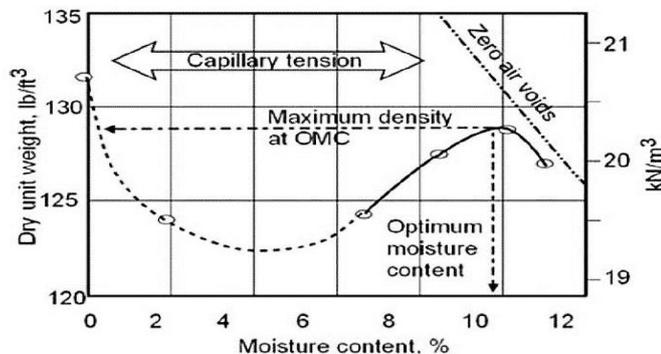


Figura 29. Relación densidad – humedad de un suelo no cohesivo.  
Fuente: Weber, 2018

Debido al efecto anteriormente mencionado, el contenido de humedad óptimo y los conceptos de densidad máxima seca pueden perder significado, por lo que es muy común caracterizar a los suelos no cohesivos por el parámetro de densidad relativa (DR).

### **2.2.3. Métodos de compactación.**

#### **2.2.3.1. Definición.**

La compactación es la densificación de un suelo mediante la expulsión de vacíos de aire, presenta cuatro tipos de esfuerzos de compactación usados para poder medir la compactación del suelo: impacto, estático (presión), amasado, vibratorio y las tendencias recientes en la investigación de compactación el método giratorio. Estos métodos de compactación son útiles para pruebas de laboratorio como en campo (in situ) usando una variedad de equipos, según Nazzal (2014) indica que los ensayos de compactación por impacto es el método común más utilizado en toda la industria de la ingeniería, esto es más probable porque todos los métodos se derivan de la primera estandarizada “ensayo de compactación”.

#### **2.2.3.2. En laboratorio.**

En la compactación de campo existe la incertidumbre de cómo deben de ser las características del suelo, es por ello que para obtener mejores resultados se debe realizar la compactación de los suelos en el laboratorio, el cual nos permitirá relacionar la compactación in situ con la compactación en laboratorio, por medio de la determinación de sus propiedades en el que obtendremos los resultados óptimos en las condiciones ideales. Del laboratorio, a través de diferentes métodos de compactación obtendremos la densidad máxima seca del suelo y los porcentajes de humedad óptima, el valor de la densidad in situ del suelo deberá ser el mismo

que la densidad máxima en laboratorio y así poder tener un grado de compactación al 100%, esto varía según la estructura a la cual se va a compactar, ya sea para una edificación, un relleno, muros, veredas, carreteras, según especificaciones técnicas, este proceso se ve afectado por distintos factores tales como el tipo de suelo, tamaño y distribución de las partículas y la energía de compactación aplicada.

**Tabla 4**

*Métodos de compactación en laboratorio.*

Método de Compactación	Equipo	Norma	
		ASTM	NTP
Impacto	Proctor Estándar, Proctor Modificado, Marshall	D-698, D-1557, D-1559	339.142, 339.141, -
Estático o de presión	Prueba de compactación estática	-	-
Amasado	Miniatura Harvard, Método Hveem	USBR 5510, D-1560	-
Vibratorio	Mesa vibratoria, Martillo vibratorio	D-4253, BS-1377	339.137, -
Giratorio	Compactador giratorio	D-6925	-

Fuente: Drnevich, Evans y Porchaska, 2007.

#### *A. Impacto.*

Es una compactación dinámica en la cual la energía de compactación se transmite a través de golpes continuos de alta fuerza de impacto, se aplica repetidamente aumentando la densidad del suelo, el equipo utilizado es el Pisón del método de Proctor, este equipo presenta una gran versatilidad y amplio uso a nivel mundial. Generalmente se recomienda ser utilizado para suelos cohesivos y semi-cohesivos tales como la arcilla o arena arcillosa. (Parada, 2018)

*a. Proctor estándar ASTM D-698.-* Este método antiguamente usado busca determinar la densidad máxima seca de un suelo y el contenido de humedad óptima para lograr dicha densidad, este método es conocido como Proctor estándar y fue desarrollado originalmente en base a estudios en la década de 1930 por Proctor, consta de un pisón metálico de 2,50 kg y 5 cm de diámetro el cual se deja caer una

altura de 30 cm, densificando el suelo en tres capas de 25 golpes en moldes de 4” y 6”. (Browne, 2006, p. 7).



Figura 30. Proctor estándar.  
Fuente: Ocas de la Cruz, 2013

b. *Proctor modificado ASTM D-1557*.- En 1940 se desarrolló el método de Proctor modificado que, a comparación con el estándar, este método utiliza un apisonador de 4,50 kg con una caída de 45,70 cm y 5 cm de diámetro el cual se deja caer a una altura de 45,70 cm, densificando el suelo en cinco capas de 56 golpes en moldes de 4 y 6 pulgadas. (Browne, 2006, p. 7).

En la figura N° 31 se observa que para un mismo suelo que ha sido compactado con distintas energías de compactación, notamos la diferencia que, debido al mayor esfuerzo de compactación utilizado en el Proctor modificado, la densidad máxima seca varía en un 5% a 10% más alta en comparación al Proctor estándar y la humedad óptima puede ser típicamente de 3% a 8% menor con Proctor Modificado que con el Proctor estándar. (Troost, 1987).

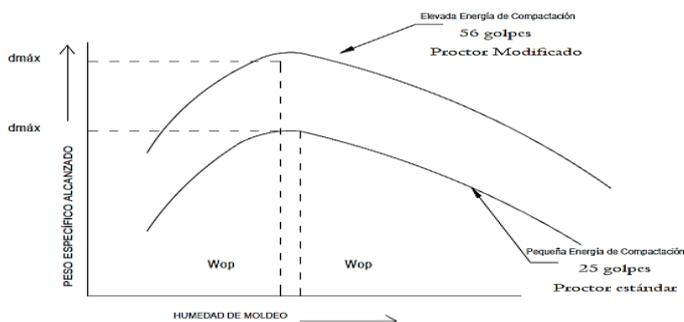


Figura 31. Curvas de compactación Proctor estándar y modificado.  
Fuente: Chirinos, 2016

c. *Martillo Marshall ASTM D-1559*.- Este método de compactación por impacto fue propuesto en 1976 por Roberts, el cual consta de un pisón de 4,50 kg y una caída libre de 45,70 cm, a diferencia del método del Proctor modificado, el martillo Marshall tiene un diámetro de 9,80 cm. Debido al mayor confinamiento proporcionado por el molde más pequeño y el diámetro del martillo más grande, se encontró que este ensayo proporciona pesos máximos unitarios seco de suelos graduados era más representativo de las condiciones de campo en comparación con los pesos unitarios máximos del Proctor modificado, la variación en promedio es de aproximadamente 48 kg/m<sup>3</sup> más alto que los obtenidos por el Proctor Modificado. (Drnevich, Evans y Porchaska, 2007)



Figura 32. Martillo Marshall ASTM D-1559.  
Fuente: Boris, 2018.

### B. *Estático o de presión.*

Este método se basa en la aplicación de presión sobre el suelo uniformemente distribuida, consiste en la compresión de cada capa con una prensa, aplicando una presión determinada durante cierto tiempo los cuales producen esfuerzos de corte en el suelo y provocan que las partículas se deslicen unas respecto a otras con posiciones más estables. Se lleva a cabo utilizando un equipo de peso pesado, donde la carga de la máquina aplica fuerzas hacia abajo, comprimiendo las partículas del suelo, es recomendable para suelos no cohesivos y gran tamaño de partícula. McLachlan y Bagshaw (2017)

Existen muy pocos trabajos de compactación por el método estático, la literatura es escasa, según Talukdar y Sharma, (2014) se diseñaron moldes estáticos con el fin de garantizar que el suelo en el interior no pueda sumergirse bajo una compactación estática excesiva por lo que concluyó que los resultados de presión estática son más altos que el Proctor estándar en lo que respecta al valor de la densidad máxima seca.

*a. Prueba de compactación estática.*- Este ensayo consta en la colocación de un peso constante en la muestra del suelo preparada con el contenido de humedad en el molde de 4" el cual se usa para ensayos de Proctor estándar, encima de la muestra se colocan dos placas de metal de 10 cm de diámetro, 5 mm de grosor y 16 mm respectivamente, una encima de otra. Todo el conjunto se coloca bajo un émbolo cilíndrico de 50 mm de diámetro en el marco de la carga, se aplica la carga estática al suelo con el anillo de prueba del equipo de CBR, el cual aplica presiones de 500 lb/in<sup>2</sup>, 1000 lb/in<sup>2</sup> y 2000 lb/in<sup>2</sup>, el material humedecido se coloca en tres capas dentro del molde. Para las diferentes cargas aplicadas, se calcula midiendo la altura del suelo compactado dentro del molde, la carga se aplica hasta que cese la penetración o la altura medida del suelo. Talukdar y Sharma, (2014).



*Figura 33.* Prueba de compactación estática.  
Fuente: Talukdar y Sharma, 2014.

### C. Amasado.

Ese método de compresión se basa en la aplicación sucesiva de altas presiones sobre pequeñas áreas de la muestra, no es fácil de definir el termino de amasamiento, por lo que según Álvarez (2005) indica que el amasamiento se produce cuando varias zonas de la masa de suelo son sometidas al proceso de compactación originando tensiones en al menos dos direcciones distintas en ciclos continuos aportando cada uno de ellos deformaciones en más de una dirección.

a. *Miniatura Harvard USBR 5510*.- Fue introducido por Wilson en 1950 el cual inicialmente fue utilizado por algunos investigadores para preparar muestras triaxiales y por otros para obtener relaciones peso unitario máximo y humedad de los suelos. El uso de este dispositivo da como resultado el peso unitario máximo y humedad rápida debido a que solo requiere entre 1,80 a 2,70 kg de material compactados en tres capas con 25 golpes por capa en un molde de 1416 cm<sup>3</sup> y con un esfuerzo de compactación de un apisonador de 2,50 kg y altura de 45,70 cm de caída al igual que el Proctor estándar. El método Harvard produce curvas de peso unitario máximo y su humedad óptima en menos tiempo a comparación del Proctor estándar y con menos material, los resultados garantizan una buena compactación en suelos arenosos arcillosos, arcillosos y limosos. (Scavuzzo, 1984).



Figura 34. Aparato de Miniatura Harvard.  
Fuente: Humboldt, 2016.

b. *Método Hveem ASTM D-1560.*- Desarrollado originalmente por Francis Hveem en la División de Carreteras de California entre los años de 1920 y 1930 para diseño de asfalto y verificaciones de mezclas con cemento o emulsiones asfálticas, el objetivo de este método es determinar el contenido óptimo de asfalto, estabilidad máxima y expansión de un diseño de mezcla. (Mokwa, Cuelho y Browne, 2008).



Figura 35. Aparato Hveem.  
Fuente: Browne, 2006.

#### D. *Vibratorio.*

Este método utiliza comúnmente fuerzas impulsadas a motor que junto con las fuerzas estáticas (carga de peso muerto), proporciona un efecto vibratorio al mecanismo en contacto con la superficie ya que esto produce una sucesión rápida de impactos y ondas de presión las cuales se propagan en profundidad del suelo, a una determinada frecuencia la cual varía generalmente entre 10 a 80 Hz vibraciones por segundo. Dicho movimiento que emiten las ondas de presión a las partículas del suelo disminuye rápidamente el rozamiento interno de su masa, ayudando así que los vacíos se rellenen y por lo tanto el suelo se densifique. (Abecasis, 2013)

a. *Mesa Vibratoria ASTM D-4253.*- Según Drnevich, Evans y Porchaska (2007) indican que este método permite determinar la densidad máxima seca de un suelo granular que consta de un molde lleno de muestra con un peso muerto (recargo) fijada en una mesa vibratoria sometida a vibraciones generalmente de 60 Hz en dos

estados, condición seca y saturada, el molde se hace vibrar por un tiempo determinado el cual varía dependiendo de la frecuencia de las vibraciones y otros factores.



Figura 36. Mesa vibratoria ASTM D-4253.  
Fuente: Cotecno, 2017.

*b. Martillo Vibratorio BS-1377.*- Este equipo fue diseñado inicialmente para trabajos de construcción, demolición estructural y geotécnica, se han adaptado de manera similar a las pruebas del Proctor modificado, se utiliza para determinar las características de compactación de suelos granulares. Las pruebas de compactación se llevan a cabo en diferentes contenidos de agua con el fin de determinar la densidad máxima seca y el óptimo de agua. Consta de un molde de 6" de diámetro y 5" de altura, un pisón con una energía de 600 a 750 Watts y una frecuencia de 25 a 45 Hz con un recargo de 2,40 kg a 3,20 kg. El mecanismo de compactación del martillo vibratorio es similar al de la mesa vibratoria, ya que la compactación del suelo es mediante la aplicación de una presión nominal fija sobre el molde y vibraciones verticales, mientras que la mesa vibratoria coloca un recargo estático en la parte superior del molde y vibra desde abajo. (Drnevich, Evans y Porchaska, 2007)



*Figura 37.* Martillo Vibratorio ASTM D-4253.  
Fuente: Cotecno, 2017.

### *E. Giratorio.*

Inicialmente este método fue desarrollado por el Departamento de la Carretera Texas (actualmente Departamento de Transporte de Texas) en 1939 para ayudar en el diseño y control de mezclas asfálticas, sin embargo en 1966 este método fue propuesto por John McRae para trabajos de compactación de suelos en donde se ha realizado investigaciones recientes sobre la compactación giratoria por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de la Florida (USACE) para determinar la variabilidad al utilizar este método en el control de compactación de suelos granulares, a consecuencia de que el método por impacto era inadecuado para la simulación de compactación en campo, ya que presentaba asentamientos excesivos en los materiales granulares del pavimento por la densificación insuficiente, por lo que se llevó a cabo este método mejorado y fue denominado como Prueba de máquina Giratoria. (Browne, 2006).

*a. Compactador Giratorio ASTM D-6925.-* Actualmente el método se logra aplicando un recargo estático vertical constante a una muestra de suelo en un molde de 6" de diámetro y girando el molde a través de un ligero ángulo sobre su eje

longitudinal, los parámetros que afectan dicho método en la compactación de suelos son: el ángulo giratorio, velocidad de giro, presión vertical y el número de giros. (Browne 2006)

Se realizaron pruebas de compactación giratoria en FSU junto con pruebas de Proctor Estándar y Modificado en suelos A-3 y A-2-4, los resultados fueron bastantes prometedores, los suelos probados produjeron pesos unitarios secos más altos y un contenido de agua óptimo más bajo que el Proctor Estándar y Modificado. Sin embargo, una desventaja importante de la compactación giratoria es que el equipo generalmente cuesta entre \$ 20 000 a \$ 25 000 dólares. (Drnevich, Evans y Porchaska, 2007)



Figura 38. Compactador giratorio.  
Fuente: Pérez, 2016.

### **2.2.3.3. En campo.**

En esta sección analizaremos los diferentes equipos y maquinarias de compactación en campo de acuerdo al método de compactación para la que están diseñadas cada una, el objetivo es alcanzar la densidad máxima seca que se obtuvo en el laboratorio aplicando la misma metodología con la que se compactó en laboratorio, las cuales

pueden ser de tipo impacto, estático o presión, amasado y vibratoria. Los buenos resultados dependerán de la elección del tipo de equipo o maquinaria a utilizar, además influyen factores como el tipo de material predominante en la obra, el aspecto económico y la producción del equipo.

**Tabla 5**

*Métodos de compactación según equipos y maquinarias.*

<b>Tipo de compactador</b>	<b>Impacto</b>	<b>Presión</b>	<b>Vibración</b>	<b>Amasado</b>
Apisonador	X	X		
Rodillo liso		X		
Rodillo liso vibratorio	X		X	
Plancha vibratoria	X		X	
Rodillo con perfil lobular	X			X
Neumáticos		X		X
Pata de cabra		X		

Fuente: Tello, 2016.

Asimismo, como ya se ha descrito antes, el tipo de suelo influye en la compactación, generalmente las arcillas y los limos necesitan una mayor energía de compactación, los suelos arenosos y grava son susceptibles de una fácil compactación, por lo que según la tabla N°6 se observa lo siguiente:

**Tabla 6**

*Equipos o maquinarias a usar según tipo de suelo.*

<b>Tipo de compactador</b>	<b>Grava</b>	<b>Arena</b>	<b>Limo</b>	<b>Arcilla</b>
Apisonador			X	X
Rodillo liso	X	X		
Rodillo liso vibratorio	X	X		
Plancha vibratoria	X	X		
Rodillo con perfil lobular			X	X
Neumáticos	X	X		
Pata de cabra			X	X

Fuente: Aburto y Rodríguez, 2012

*A. Compactadores por impacto.*

*a. Apisonador.* - Según Álvarez, (2005) indica que su uso se da en zonas confinadas y de difícil acceso, es clasificado como un apisonador de impacto vibratorio (gran cantidad de golpes por minuto), su rango de impacto oscila entre los 500 a 800 golpes por minuto. Algunos apisonadores pueden ser aplicados a suelos granulares y mixtos dependiendo del rango de impacto, su eficacia depende del peso del equipo y la amplitud, es decir a la altura de la zapata desde el suelo.



*Figura 39. Apisonador o canguro.*

*b. Rodillo con perfil lobular.*- Esta máquina se caracteriza por un tambor de tres a cinco lados, produce una alta energía al girar su esquina (radio mayor) y cayendo al lado plano (radio menor), su propósito es introducir energía en la superficie a una velocidad de 10 a 15 km/h, es decir de 90 a 120 impactos por minuto, generalmente se aplica a sitios donde se requiera una compactación profunda, su alcance es de hasta 3 metros en suelos cohesivos. (Yepes, 2014)



*Figura 40. Rodillo de impacto con perfil lobular.*  
Fuente: Yepes, 2014.

*B. Compactadores por presión estática.*

*a. Neumáticos.-* Generalmente es usado en proyectos de carreteras para la compactación de la carpeta asfáltica también para la compactación de bases, sub bases, concreto rígido y otros materiales, consta de dos ejes tándem y de siete a 13 neumáticos que pueden ser lastrados para aumentar el peso de cada rueda, el peso total puede variar entre las 10 Tn a 27 Tn según el tamaño de las llantas y de su presión de inflado. (Aburto y Rodríguez, 2012).



*Figura 41. Rodillos de neumáticos.*

*b. Rodillo liso.-* Según Gonzáles (2009) indica que los rodillos lisos constan de uno o dos tambores de acero que pueden ser llenados con lastre o arena aumentando su peso, el cual varía de 14 a 20 toneladas, sin embargo han perdido campo de acción en proyectos de movimientos de tierras debido a rendimientos bajos y limitaciones como compactar capas delgadas. Actualmente es sustituido por los rodillos vibratorios el cual también cumple la función del estático.



*Figura 42. Rodillos lisos de un tambor.*  
Fuente: Gonzáles, 2009.

### *C. Compactadores por Vibración.*

*a. Plancha vibratoria.-* Mayormente usado en zonas confinadas para compactar materiales sueltos como los granulares (grava y arena), mezclas granulares de baja plasticidad y mezclas asfálticas, consta de una placa metálica el cual se apoya en el suelo a compactar simulando un movimiento sinusoidal con frecuencias de vibración variables de 25 – 50 ciclos por segundo (Hz) y con un peso estático de 60 – 160 kg, por lo que es muy eficiente su aplicación. (Álvarez, 2005)



*Figura 43. Placa vibratoria.*

Fuente: Álvarez, 2005.

*b. Rodillo liso vibratorio.-* Consta de un o dos tambores metálicos vibrantes situados en la parte delantera y trasera, generalmente produce una buena compactación en suelos granulares, ya que los impulsos vibratorios neutralizan la fuerza de fricción entre las partículas del suelo compactando así las capas más profundas de hasta 50 cm con un peso estático desde 2 – 26 Tn, una frecuencia de 20 – 65 Hz y una amplitud de 2,05 – 0,35 mm. (Álvarez, 2005).



*Figura 44. Rodillo liso vibratorio.*

#### *D. Compactadores por Amasado.*

*a. Pata de cabra.-* Consiste en un tambor de acero en el que están fijadas protuberancias redondas o rectangulares ejerciendo presiones muy grandes en el suelo, el peso de la maquinaria varía según escala desde 2 – 30 toneladas (con lastre incluido). Se usan comúnmente para compactar suelos de grano fino como arcillas pesadas, limos ya que produce una acción mezcladora y rompedora muy beneficiosa si el terreno no es homogéneo. (González, 2009).



*Figura 45.* Rodillo pata de cabra.  
Fuente: Structuralia, 2018.

#### **2.2.3.4. Control de calidad de compactación.**

Se define como un ejercicio sistemático en el cual a intervalos regulares (frecuencia) se verifica dicha compactación que se viene realizando de acuerdo a las especificaciones (densidad y humedad de laboratorio) para lo cual es necesario establecer procedimientos de control de calidad y equipos de medición de las propiedades del suelo mediante el grado de compactación o densidad relativa dependiendo del suelo, todo esto con el fin de garantizar el rendimiento esperado de los suelos compactados.

Para comprobar la densidad máxima alcanzada en una serie de puntos se debe establecer lotes de control y el muestreo se realiza al azar, los ensayos de control de estas muestras pueden ser destructivos o no destructivos, el primero consta de la excavación y remoción de una parte del suelo compactado mientras

que el segundo determina de manera indirecta la densidad máxima seca y el contenido de humedad dejando un pequeño agujero en el terreno.

*A. Ensayos destructivos.*

Se denomina así ya que para poder realizar dicho ensayo es necesario excavar y remover una parte del suelo compactado perjudicando la capa estructural compactada, existen varios métodos con el cual se reemplaza el volumen del material extraído y posteriormente es compactado por uno de las mismas características.

**Tabla 7**

*Ensayos destructivos de densidad de campo.*

Ensayo	Norma		Profundidad (m)	Volumen de hoyo	T.M.
	ASTM	NTP			
Cono de arena 6"	D-1556	339.143	0,12 – 0,17	1420 – 2830 cm <sup>3</sup>	1 ½"
Cono de arena 12"	NP	-	0,20 – 0,30	0,014 – 0,021 m <sup>3</sup>	4"
Balón de hule	D-2167	339.256	0,10 – 0,15	1420 – 2840 cm <sup>3</sup>	1 ½"
Reemplazo de arena	D-4914	339.258	0,25 – 0,30	0,03 – 0,17 m <sup>3</sup>	5"
Reemplazo de agua	D-5030	339.253	0,40 – 0,90	0,08 – 2,83 m <sup>3</sup>	18"

Fuente: Drnevich, Evans y Porchaska, 2007.

*a. Cono de arena 6" ASTM D-1556.*- Este método es el más utilizado para el control de compactación de suelos, consiste en realizar la excavación de un agujero de 15 cm de diámetro en el suelo compactado el cual es llenado de arena con una densidad predeterminada, se mide el volumen del agujero, se pesa el material de suelo extraído, se tamiza el material por la malla 3/4" para poder determinar la densidad de la capa compactada. La precisión de este método dependerá de la experiencia del operador, por lo que algunos investigadores no recomiendan su uso como una herramienta de control. (Weber, 2018).



Figura 46. Ensayo cono de arena 6".  
Fuente: Unitest Perú, 2017.

b. *Cono de arena 12"*.- Según Francis (1965) indica que el procedimiento general del ensayo es similar al cono de arena ASTM D-1556 a diferencia de que este equipo es de mayor escala en cuanto a tamaño, capacidad, excavación de hoyo y alcance de lectura para suelos que contienen cantidades significativas de partículas mayores a 1 ½". Este método "mejorado" usa un diámetro de 12 pulgadas y proporciones similares al cono estándar, utilizado ampliamente para determinar las densidades in situ y tiene aplicación en una amplia gama de materiales como terraplenes o rellenos estructurales, incluidas las partículas de roca de hasta 4". La desventaja de este método es que aún no está normado en la ASTM, por lo que su para su aplicación debe ser validada con otros métodos.



Figura 47. Ensayo cono de arena 12".  
Fuente: Paredes, 2017.

c. *Balón de hule ASTM D-2167*.- Se basa en el mismo principio que del cono de arena, consiste en excavar un agujero cuya profundidad variará de acuerdo al

tamaño de equipo utilizado, se determinan el peso húmedo y el contenido de humedad del material extraído para hallar el volumen del hoyo, se introduce el balón de hule el cual se irá llenando con agua mediante una válvula la cual está conectado a un recipiente calibrado, se hace la lectura del volumen y se calcula la densidad del suelo. Sin embargo, la principal desventaja es que el globo pueda tener perforaciones en suelos granulares de gran aspereza con partículas irregulares y la exactitud dependerá de la experiencia del operador. (Weber, 2018)



Figura 48. Ensayo de Balón de hule.  
Fuente: Weber, 2018.

d. *Reemplazo de arena ASTM D-4914.*- Consta de una plantilla (marco metálico) de aproximadamente 0.70 m x 0.70 m x 1½” (varía según tamaño de la partícula) el cual se coloca y fija sobre la superficie del terreno compactado, se excava un agujero de una profundidad variable el cual dependerá del tamaño máximo del suelo y se llenará el espacio con arena calibrada usando un dispositivo de vertido. Se pesa la masa de la arena requerida para llenar la plantilla y la arena dentro del pozo para poder hallar el volumen del hoyo, se determina el contenido de humedad y se calcula la densidad seca in situ. Este método generalmente se aplica en terraplenes, rellenos estructurales que contengan partículas de más de tres pulgadas (75 mm) hasta un máximo de cinco pulgadas. (Freeman, Mann, Mason, Gartrell y Moore, 2008).



Figura 49. Ensayo reemplazo de arena.  
Fuente: Farah, 2013.

*e. Reemplazo de agua ASTM D5030.*- Este método permite determinar la densidad del suelo con partículas de rocas (partículas mayores a 75 mm) mediante el reemplazo de agua. Consta de una plantilla metálica circular con un diámetro interior de 90 cm o más con el cual se realizará la excavación del hoyo a una determinada profundidad, las dimensiones de la plantilla y la profundidad dependerán del tamaño de la partícula del suelo. Se extrae y pesa la muestra excavada del hoyo, se coloca una membrana de plástico flexible dentro del hoyo y se llena con agua hasta alcanzar el nivel de la plantilla, luego se calcula el volumen del hoyo con la masa o volumen del agua, posteriormente se obtiene el contenido de humedad y se calcula la densidad seca in situ. Se usa específicamente para suelos en condiciones insaturadas, la precisión de los resultados dependerá si el suelo se deforma fácilmente ocasionando cambios de volumen en el hoyo, este método es usado en varios proyectos de construcción tales como terraplenes, rellenos estructurales, etc. (Freeman, Mann, Mason, Gartrell y Moore, 2008).



Figura 50. Ensayo reemplazo de agua.

Fuente: Paredes, 2017.

### B. Ensayos no destructivos.

A diferencia de los ensayos destructivos donde se necesitaba excavar un hoyo, extraer muestra para reemplazar el volumen extraído y determinar el contenido de humedad, estos ensayos no requieren la perforación y extracción de una muestra del suelo compactado, ya que mediante aparatos de mayor tecnología permiten medir la densidad húmeda y seca en campo con mayor rapidez, precisión, confiabilidad y eficacia a través de ondas eléctricas o intensidades de radiación.

**Tabla 8**

*Ensayos no destructivos de densidad de campo.*

Ensayo	Norma		Profundidad de lectura	Tamaño máx. de partícula
	ASTM	NTP		
Densímetro Nuclear	D-6938	339.144	30 cm	1 ½"
Densímetro eléctrico (EDG)	D-7698	-	30 cm	3"
Densímetro eléctrico (SDG)	D-7830	-	30 cm	3"

Fuente: Drnevich, Evans y Porchaska, 2007.

a. *Densímetro nuclear ASTM D-6938.*- Este método no destructivo es el más usado en la actualidad, es un aparato electrónico con la capacidad de poder determinar con rapidez, precisión y confiabilidad la densidad seca, contenido de humedad y el grado de compactación in-situ de los suelos, agregados y asfalto.

El funcionamiento del densímetro nuclear se basa en elementos radioactivos de interacción de rayos gamma que provienen de una fuente radiactiva, puede operar de dos modos diferentes, en pequeños agujeros y en la superficie del terreno, además el equipo consta de detectores gamma que pueden estar situados sobre, dentro o adyacente al suelo compactado a medir, el suelo al contener un número electrones por unidad de volumen es proporcional a su densidad el cual se correlaciona entre los números relativos de rayos gamma dispersos en el suelo con el número de rayos detectados por el equipo, siendo este inversamente proporcional a la densidad húmeda del suelo. (Guzmán, 2013).

La lectura se basa en la intensidad de radiación transformada a densidad húmeda por medio de correlaciones, sin embargo, la desventaja de este método es que al no ser manipulado correctamente puede causar daños considerables a la salud humana, debido a que trabaja en base a fuentes de radiación. (Guzmán, 2013).

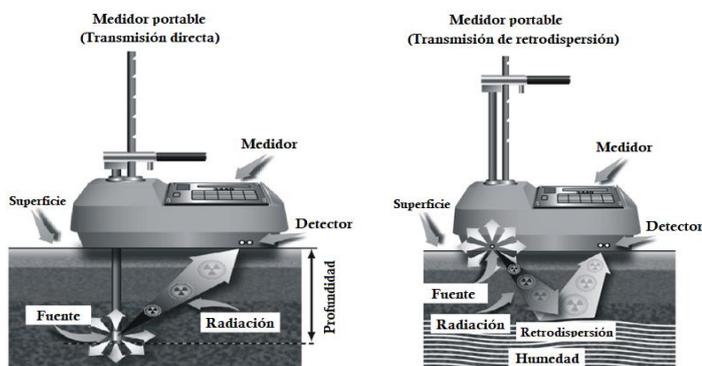


Figura 51. Métodos de medición del densímetro nuclear.  
Fuente: Moita, 2020.

b. *Densímetro eléctrico (EDG) ASTM D-7698*.- Es un dispositivo portátil usado para medir el contenido de humedad, densidad y porcentaje de compactación de suelos a través de ondas de radio de alta frecuencia, más conocido como radiofrecuencia para medir las propiedades dieléctricas del suelo. Consta de una

plantilla metálica con cuatro dardos que pueden ser incrustados hasta 30 cm de profundidad por donde viaja la radiofrecuencia el cual penetra los materiales del suelo desde la superficie y así poder hallar la densidad húmeda, contenido de humedad y grado de compactación. (Parada, 2018).



Figura 52. Densímetro eléctrico (EDG)  
Fuente: Corporación C, 2018.

c. *Densímetro eléctrico (SDG) ASTM D-7830.*- Es un dispositivo portátil de medición de campo como la densidad, contenido de humedad y grado de compactación, este método es ampliamente utilizado en muchos países en Europa y a nivel de Sudamérica, está destinado a sustituir al densímetro nuclear ya que es un método no invasivo. Su funcionamiento es a través de la propagación de ondas electromagnéticas con el cual miden las propiedades de compactación del suelo, tiene un anillo central y un anillo exterior como sensores, el anillo central genera una radiofrecuencia en el suelo y las respuestas de estas frecuencias son recibidas por el anillo exterior, su modo de medición es el promedio de cinco lecturas, su alcance es de hasta 30 cm de profundidad y no necesita un permiso especial para su uso y traslado. (Parada, 2018).



Figura 53. Densímetro eléctrico (SDG)

Fuente: Parada, 2018.

## **2.2.4. Ensayos básicos de laboratorio.**

### **2.2.4.1. Análisis granulométrico.**

Es uno de los ensayos más básicos que se realiza para la clasificación de un suelo, sabemos que el suelo está conformado por diferentes tamaños de partículas, por lo que su dimensión se determina minuciosamente mediante una magnitud que es el diámetro, mediante este ensayo podemos determinar la distribución de partículas de un suelo según su tamaño y así poder conocer las características geotécnicas principales de un determinado suelo. Este ensayo consiste en obtener una curva granulométrica de una muestra (representativa), para lo cual se tamiza por una serie de tamices o mallas con distintas aberturas vía seca, siendo la malla N°4 (4,75 mm) el cual separa las partículas gruesas y finas hasta la malla N°200 (0,075 mm), el procedimiento para realizar dicho ensayo es obtener una muestra representativa, secarla al horno durante 24 horas y pesarlo en conjunto, posteriormente se tamiza por los diferentes tamices según gradación ordenados de mayor a menor mediante agitación, finalmente se pesa el material retenido en cada tamiz y a partir de estos datos se puede obtener la curva granulométrica.

Referencia normativa: ASTM D422 – NTP 339.128 – MTC E106

$$\%R.I. = \frac{Pm}{PMt} * 100 \dots\dots\dots [Ecuación 05]$$

$$\%R.A. = (\sum \%R.I.) + \%R.I.a. \dots\dots\dots [Ecuación 06]$$

$$\%P = 100 - \%R.A. \dots\dots\dots [Ecuación 07]$$

Donde:

$\%R.I.$  = Porcentaje retenido individual (%)

$\%R.I.$  = Porcentaje retenido individual anterior (%)

$Pm$  = Peso retenido en la malla (g)

$PMt$  = Peso total de la muestra (g).

$\%R.A.$  = Porcentaje retenido acumulado (%)

$\%P$  = Porcentaje pasante (%)

#### **2.2.4.2. Límites de consistencia.**

Se basan el concepto de que los suelos finos los cuales están presentes en la naturaleza pueden hallarse en distintos estados que dependerán de su contenido de agua, pudiendo encontrarse un suelo en estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. Es usado para medir esos límites de humedad que son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad y se usan en la identificación y clasificación de un suelo. (Rodríguez, 2012).

Referencia normativa: ASTM D4318 – NTP 339.129 – MTC E110

##### *A. Límite Líquido.*

Es denominado también como el L.P. superior, es la cantidad de agua en el que el suelo varía de líquido a plástico, es la mínima humedad al que fluye un suelo después de la aplicación de una fuerza cortante reducida.

En el método de la copa de Casagrande, la muestra de suelo preparada se coloca en la taza de Casagrande y se hace una ranura en el centro de la misma, el límite se define como el contenido de humedad, en porcentaje, requerido para cerrar una distancia de 0,50 pulgadas a lo largo del fondo de una ranura después de 25 golpes en un dispositivo de límite de líquido. (Geotechnical, 2020)

Es difícil ajustar el contenido de humedad en el suelo para cumplir con el cierre requerido de 12,5 mm (0,50") De la ranura en la superficie del suelo a 25 golpes. Por lo tanto, se realizan al menos tres pruebas (método del multipunto) para el mismo suelo con diferentes contenidos de humedad, con un número de golpes, N, que varía entre 15 y 35. (Geotechnical, 2020)

$$LL = W^n \left[ \frac{N}{25} \right]^{0.121} \dots\dots\dots [Ecuación 08]$$

Ó

$$LL = kW^n \dots\dots\dots [Ecuación 09]$$

Donde:

%LL = Límite líquido (%)

N = Número de golpes donde ocurre el cierre de la ranura para el contenido de humedad.

$W^n$  = Contenido de humedad del suelo para N golpes.

k = Factor dado en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Factor de corrección “k” para límite líquido*

<b>N (Número de golpes)</b>	<b>K (Factor para límite líquido)</b>
20	0,974
21	0,979
22	0,985
23	0,990
24	0,995
25	1,000
26	1,005
27	1,009
28	1,014
29	1,018
30	1,022

Fuente: ASTM International, 2018.

*B. Límite Plástico.*

También conocido como límite plástico inferior, es el contenido de agua en el que un suelo cambia del estado plástico a un estado semisólido. La prueba de límite de plástico se realiza mediante el laminado repetido de una masa de suelo de tamaño elipsoidal a mano sobre una superficie lisa no porosa. Casagrande definió el límite plástico como el contenido de agua en el que un pequeño rollo de suelo se desmorona cuando se extiende con cuidado hasta un diámetro de 3 mm. Si el pequeño rollo se desmorona con un diámetro inferior a 3 mm, el suelo está demasiado húmedo. Si el hilo se desmorona con un diámetro superior a 3 mm, el suelo está más seco que el límite plástico. A continuación, se puede remodelar la muestra y repetir la prueba, una vez que se fabrican los rollos de tamaño adecuado, se evalúa su contenido de humedad. (Chaca, 2019)

$$\%LP = \frac{W_{agua}}{W_{SS}} * 100 \dots\dots\dots [Ecuación 10]$$

Donde:

%LP = Límite plástico (%)

Wagua = Peso del agua (g)

Wss = Peso del suelo seco (g)

### C. Índice de Plasticidad.

Según la Universidad Nacional de Ingeniería (2006) el índice de plasticidad de un suelo es la diferencia numérica entre su límite líquido y su límite plástico, y es un número adimensional. Asimismo, los límites de líquido como plástico son contenidos de humedad, hay determinadas circunstancias en las que el índice de plasticidad no se puede determinar cuándo:

a) No se pueda determinar el límite líquido o el límite plástico, informe el índice de plasticidad como NP (no plástico).

b) El suelo es extremadamente arenoso, la prueba de límite de plástico se debe realizar antes la prueba de límite de líquido. Si no se puede determinar el límite de plástico, informe el índice de plasticidad como NP (no plástico).

c) El límite de plástico sea igual o mayor que el límite de líquido, reportar el índice de plasticidad como NP (no plástico).

$$\%IP = \%LL - \%LP \dots\dots\dots [Ecuación 11]$$

Donde:

%IP = Índice de plasticidad (%)

%LL = Límite líquido (%)

%LP = Límite plástico (%)

### 2.2.4.3. Contenido de humedad.

También llamado contenido de agua o humedad es un factor el cual puede afectar directamente en la compactación de los suelos, ya que estos pueden encontrarse en

forma de parcialmente saturado, saturado o sumergido. Para poder determinar el contenido de humedad en una muestra de suelo, se debe tener en cuenta la relación del peso del agua entre el peso de los sólidos de un volumen dado de suelo, esta propiedad física es de mucha importancia en el rubro de la construcción civil, su cálculo se logra de manera sencilla ya que se expresa en porcentaje la relación que hay entre el peso del agua contenida en la muestra del suelo y el peso de su fase sólida. (Polanco, 2012)

Referencia normativa: ASTM D2216 – NTP 339.127 – MTC E108

$$\%W = \frac{W_w}{W_s} \dots\dots\dots [Ecuación 12]$$

Donde:

% W = Contenido de humedad (%)

Ww = Peso del agua (g)

Ws = Peso de los sólidos (g)

*A. Suelo parcialmente saturado.*

El suelo puede presentar tres fases, entre ellas se encuentran la fase sólida el cual está compuesta por partículas minerales, se tiene también la fase líquida de menor importancia y significancia, finalmente la fase gaseosa que ocupa el espacio libre que deja la fase líquida en la porosidad o vacíos del suelo, la cual está compuesta por aire. Universidad Nacional de Ingeniería (2006)

*B. Suelo saturado.*

Es aquella que se encuentra sobre un nivel freático y todos sus poros o vacíos están llenos de agua, por lo que consta solo de dos fases, la sólida y líquida. Universidad Nacional de Ingeniería (2006)

### C. Suelo sumergido.

A diferencia del suelo saturado, esta se encuentra bajo el nivel freático y por lo tanto todos sus vacíos están ocupados de agua, consta de dos fases siendo la sólida y líquida. Universidad Nacional de Ingeniería (2006)

## 2.2.5. Ensayos especiales en laboratorio

### 2.2.5.1. Proctor modificado.

Mediante este ensayo de compactación por impacto podremos calcular y determinar la densidad máxima de un determinado suelo, se entiende como un proceso en el cual se aplica una determinada energía mecánica a un suelo y así poder disminuir su volumen ocupando los vacíos y eliminando el aire de los poros. Dicha prueba de laboratorio consta de compactar un suelo mediante impacto a diferentes relaciones de contenido de humedad y pesos unitarios de suelo, con lo cual se podrá determinar la curva de compactación y obtener la densidad máxima seca, dicho ensayo se utiliza en suelos donde poseen el 30 % o menos de sus partículas retenidas en la malla  $\frac{3}{4}$ " (19,00 mm), para lo cual existen tres procedimientos para poder realizar dicho ensayo. Universidad Nacional de Ingeniería (2006)

Referencia Normativa: ASTM D1557 – NTP 339.141 – MTC E115

**Tabla 10**

*Métodos de aplicación de Proctor Modificado.*

Método	A	B	C
Energía		2700 kN-m/m <sup>3</sup>	
Peso y altura del martillo	10 lb (4,53 kg) – 18 pulg (457,0 mm)		
Diámetro y volumen del molde	4 pulg. (101,60 mm)	4 pulg. (101,6 mm)	6 pulg. (152,4 mm)

**Tabla 10 (Continuación)**

*Métodos de aplicación de Proctor Modificado.*

<b>Método</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Material</b>	Pasa por tamiz N°4 (4,75 mm)	Pasa por tamiz 3/8 pulg. (9,50 mm)	Pasa por tamiz 3/4 pulg. (19,0 mm)
<b>Nro. de capas</b>	5	5	5
<b># Golpes por capa</b>	25	25	56
<b>Uso</b>	% Ret. # 4 < 20%	% Ret. # 4 > 20% % Ret. 3/8" < 20% 20%	% Ret. 3/8" > 20% % Ret. 3/4" < 30%

Fuente: ASTM International, 2014.

La energía específica de compactación se entiende como la presión que se aplica al suelo por unidad de volumen, asimismo en cualquier procedimiento de compactación por método de impacto se define como:

$$E_c = \frac{NnWh}{V} \dots\dots\dots [Ecuación 13]$$

Donde:

E = Energía específica (kN-m/m<sup>3</sup>)

N = Número de golpes del pisón por capas

n = Número de capas

W = Peso del pisón compactador (kg)

h = Altura de caída del pisón (m)

V = Volumen total del molde de compactación (m<sup>3</sup>)

### **2.2.5.2. Mesa vibratoria.**

#### *A. Desarrollo histórico de la compactación por vibración.*

Se desarrolló una línea de tiempo según la Fig. N° 54 en el cual se observa el desarrollo histórico de la compactación por vibración y en la fig. N° 55 la evolución de la mesa vibratoria en el mundo.

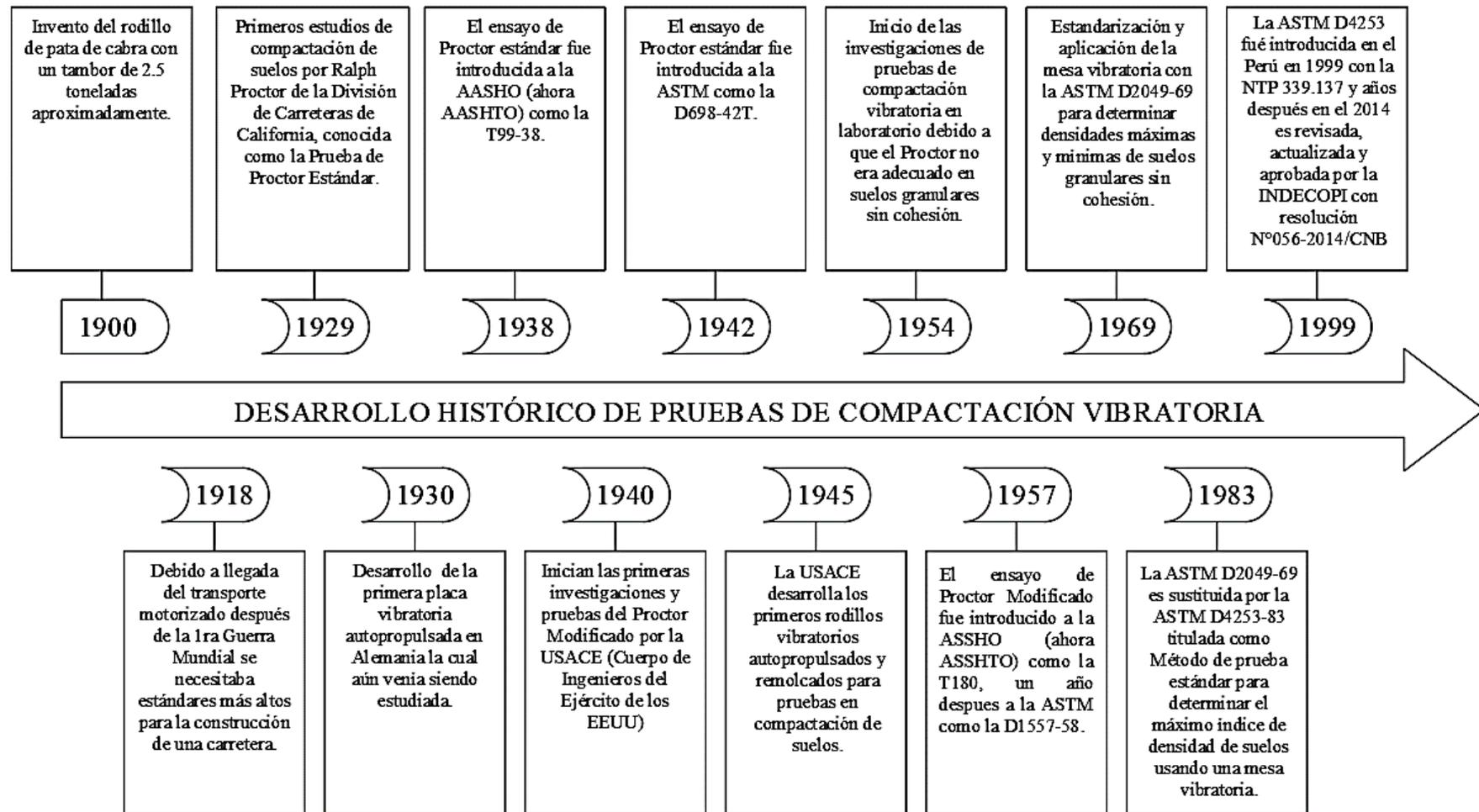


Figura 54. Desarrollo histórico de la compactación vibratoria.  
Fuente: Troost, 1987.

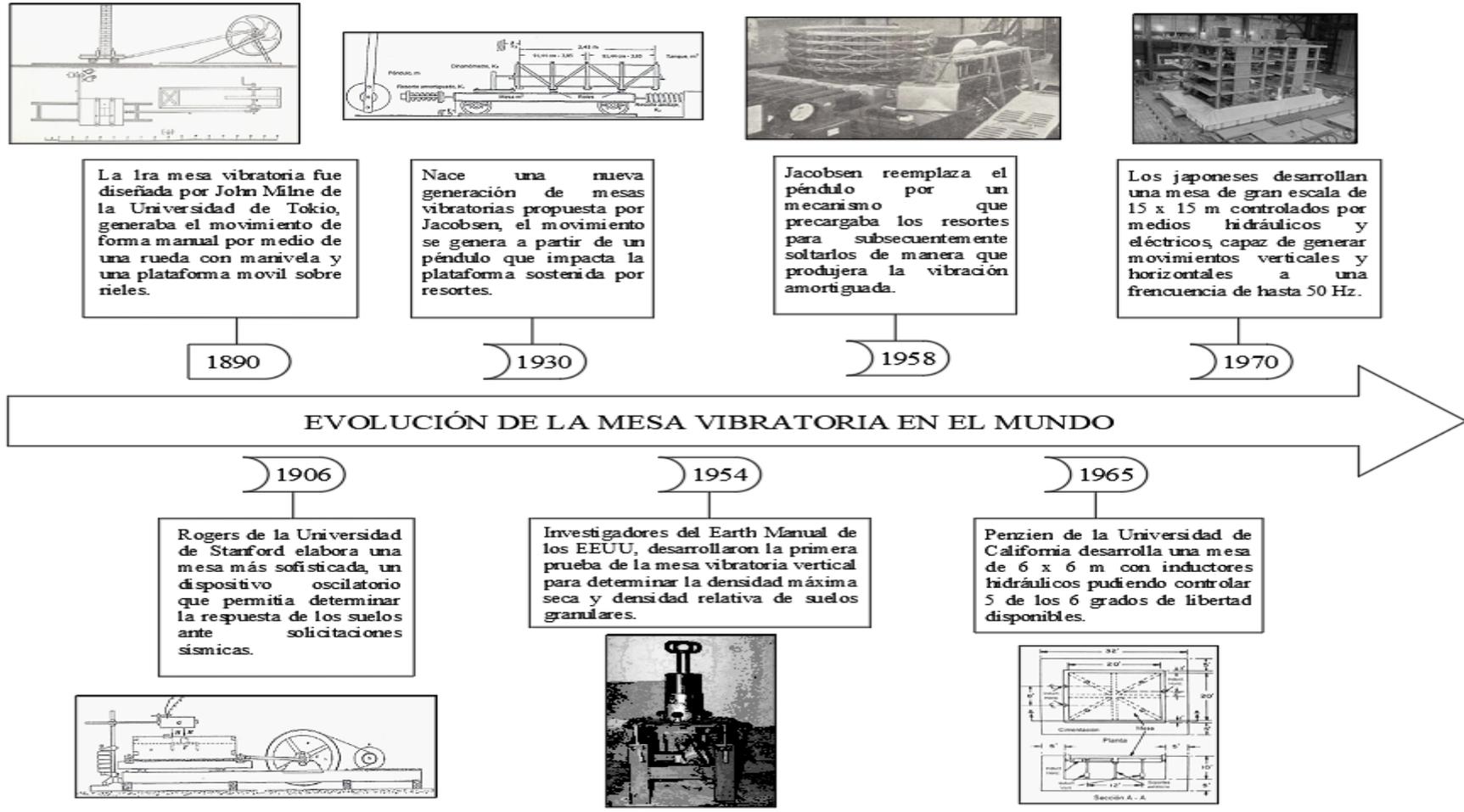


Figura 55. Evolución de la mesa vibratoria.  
Fuente: Troost, 1987.

## *B. Aplicaciones en la ingeniería.*

Sin duda alguna en la actualidad la mesa vibratoria se convirtió en una herramienta fundamental gracias a las investigaciones que se realizaron en Japón y EEUU, sin embargo, la mesa vibratoria no solo es aplicada en la ingeniería sísmica sino también en otras ramas como suelos y concreto.

La mesa vibratoria es un aparato que consta de una plataforma metálica, resortes, actuadores y un motovibrador, las dimensiones de la plataforma varían según escala, dicha mesa realiza ensayos dinámicos a través de vibraciones de baja y alta frecuencia de hasta tres direcciones, dos horizontales y una vertical, las aplicaciones se detallan a continuación:

### *a. Sismo-Resistente.*

Según Bernal, Aponte y Carrillo (2015) definen la mesa vibratoria como un aparato experimental de hasta seis grados de libertad que es utilizado para estudiar el comportamiento de estructuras (pequeña o gran escala) los cuales se someten a eventos sísmicos. Su objetivo es la reproducción de una excitación sísmica sobre la base de sistemas estructurales el cual es cuantificado por un micro-controlador (aceleración, velocidad y desplazamiento), los resultados son claves para validar, calibrar y complementar gran variedad de modelos de predicción los cuales son usados para análisis, diseño y rehabilitación de edificios, viviendas, puentes, etc.



*Figura 56. Mesa vibratoria sísmica.*  
Fuente: Verri, 2019.

*b. Suelos.*

Los materiales granulares de partículas gruesas como la grava y arenas, piedras trituradas y rellenos estructurales con sobretamaños para la construcción de las carreteras no eran adecuadas para la compactación con el método Proctor estándar o modificado ya que la compactación en laboratorio no se lograba la densidad máxima por lo que el grado de compactación en campo superaba las especificaciones del 100 % de la densidad máxima seca. Debido a este gran problema en 1954 en los EEUU iniciaron las investigaciones y primeras pruebas de la mesa vibratoria para determinar la densidad máxima aplicada a suelos granulares sin cohesión ya que el método por impacto no producía una curva bien definida de densidad vs humedad, se estableció que el aparato debía constar de una plataforma rígida vibratoria de acero de aproximadamente 0,80 x 0,80 m accionada por un motovibrador a una frecuencia fijada de 60 Hz y amplitud variable de 0,05 a 0,64 mm. (Troost, 1987).



*Figura 57.* Ensayo mesa vibratoria ASTM D4253.  
Fuente: Arcement y Wright, 2001.

*c. Concreto.*

Según Arrieta y Peñaherrera (2001) indican que la fabricación de bloques de concreto data desde los inicios del siglo XIX en Inglaterra, las primeras máquinas que se usaban en ese entonces eran simples moldes metálicos compactados

manualmente, hasta que a mediados del siglo XX se descubrió la compactación mediante la vibración, actualmente la más usada y eficiente para la elaboración de concretos prefabricados especialmente bloques de concreto. La mesa vibradora produce un concreto de características bien definidas en el cual entra a un proceso de acomodo y reduce considerablemente el aire atrapado a una alta frecuencia, la mesa consta principalmente de una plataforma metálica de 1,2 x 0,6 m, un motor de 3 HP y de 60 Hz, estas características varían según escala de la mesa vibradora.



*Figura 58.* Mesa vibradora para bloques de concreto.  
Fuente: Arrieta y Peñaherrera, 2001.

### *C. Tipos de vibración.*

El funcionamiento de las mesas vibratorias se logró gracias a los estudios durante y después de la segunda guerra mundial, sin embargo, las mesas vibratorias modernas trabajan con sistemas de control más avanzados, motovibradores y actuadores. Las mesas vibratorias pueden clasificarse según su tipo de aplicación, tamaño y a la vez según la cantidad de grados de libertad que pueda poseer, es decir los movimientos que puede generar durante su funcionamiento, existen mesas vibratorias unidireccionales, bidireccionales y las más avanzadas que son las tridimensionales. (Valdiviezo, 2019).

Las mesas unidireccionales son aquellas en el cual el movimiento que genera va en una sola dirección pudiendo ser en un plano horizontal o vertical, las

bidireccionales son aquellas donde el movimiento se genera en dos direcciones que pueden ser en un plano horizontal y uno vertical o en dos planos horizontales y por último las tridimensionales son aquellas que se mueven en tres direcciones, dos horizontales y uno vertical.

Las mesas vibratorias sísmicas pueden disponer de hasta seis grados de libertad, es decir tres desplazamientos y tres giros rotacionales de un sólido rígido mientras que la mesa vibratoria usadas en suelos y concreto generalmente son unidireccionales de un grado de libertad produciendo movimiento únicamente en la componente vertical. Las características de técnicas de las mesas vibratorias son sus dimensiones, número de grados de libertad, aceleraciones, frecuencias, velocidades y desplazamientos máximos que puedan alcanzar. (Clavijo y Ramirez, 2011)

#### *D. Mesa vibratoria ASTM D-4253.*

Según la ASTM D4253 (2006) explica que la mesa vibratoria es una plataforma vibratoria vertical de suficiente tamaño y rigidez donde el conjunto de moldes de 2800 cm<sup>3</sup> y 14 200 cm<sup>3</sup> que se utilizan pueden ser apoyados rígidamente sobre la mesa vibratoria durante la prueba. La mesa vibratoria puede ensayar materiales de hasta 80 milímetros (3") además debe ser capaz de vibrar verticalmente el molde de montaje con una relación de desplazamiento vertical en tiempo senoide como a una frecuencia de 3600 vibraciones por minuto es decir a 60 Hz por 8 minutos y una amplitud de vibrado vertical entre 0,05 y 0,64 milímetros bajo un recargo estático de 111,20 kg-f.

Según Humboldt (2016) define la mesa vibratoria como un aparato vibratorio de 60 Hz el cual determina la densidad relativa de suelos granulares con

sobre tamaños de hasta 3 pulgadas, que son de drenaje libre y que además proporciona resultados bien definidos en suelos que no responden bien a la prueba de compactación por impacto (Proctor). Este método es apropiado para suelos que contienen hasta un 12% de partículas de suelo que pasan por el tamiz N° 200, dependiendo de la distribución de tamaños de partículas, lo que hace que tengan características de drenaje libre. Para obtener la densidad relativa de suelos no cohesivos se utiliza la compactación vibratoria del cual obtenemos la máxima densidad seca y la densidad mínima.

Según el Instituto Nacional de Normalización (1999) establece que la mesa vibratoria se utiliza para poder determinar las densidades secas máximas y mínimas de los suelos no cohesivos, no cementados, de flujo libre de hasta un tamaño máximo nominal 3" (80 mm), que contienen hasta un 12% en masa de partículas menores a 0,075 mm. Asimismo recomienda aplicar dicho procedimiento a aquellos suelos que tengan un IP igual o menor a cinco.

Según Drnevich, Evans y Porchaska (2007) indica que la mesa vibratoria consta de un molde lleno de muestra que se fija a una mesa vibratoria vertical que imparte una relación de desplazamiento vertical y horizontal – tiempo sinusoidal. Se coloca una masa de recargo no fija en la superficie superior de la muestra, el molde se hace vibrar durante un período de tiempo determinado que varía según la frecuencia de vibraciones.

Referencia Normativa: ASTM D4253 – NTP 339.137

*a. Densidad relativa.*

El término de densidad relativa o índice de densidad se usa para expresar la compacidad relativa (o grado de compactación) de un depósito de suelo natural

sin cohesión. Este término fue discutido ampliamente por Lee en 1971, en este método de control, el porcentaje de densidad máxima vibrada en laboratorio se utiliza para poder determinar el índice de compactación.

Según Roston y Baron (1976) se desarrollaron procedimientos de densidad relativa para el control de compactación en 1960 por Terzaghi, la densidad relativa ( $D_r$ ), está expresada como un porcentaje, el cual se define como:

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} * e_n}{e_{m\acute{a}x} * e_{m\acute{i}n}} * 100 \dots\dots\dots [Ecuaci3n 14]$$

Donde:

$D_r$  = densidad relativa (%)

$e_{m\acute{a}x}$  = relaci3n de vacíos del suelo en la condici3n m\acute{a}s suelta.

$e_n$  = relaci3n de vacíos in situ del suelo natural.

$e_{m\acute{i}n}$  = relaci3n de vacíos del suelo en la condici3n m\acute{a}s densa.

Este criterio fue definido por Terzaghi como una ecuaci3n fraccionaria de relaciones de vacíos de los suelos considerando el estado m\acute{a}s suelto, natural y m\acute{a}s denso posible, tambi3n denominada índice de densidad (ID). Sin embargo, es mejor trabajar la ecuaci3n en funci3n a las densidades del suelo, pues para el c\acute{a}lculo de la relaci3n de vacíos necesitamos datos como la gravedad espec\acute{i}fica del suelo, la cual a veces no puede ser hallada, la f3rmula de densidad relativa en funci3n a las densidades puede ser calculada como:

$$ID = \frac{\rho_{m\acute{a}x}}{\rho_n} * \left( \frac{\rho_n - \rho_{m\acute{i}n}}{\rho_{m\acute{a}x} - \rho_{m\acute{i}n}} \right) * 100 \dots\dots\dots [Ecuaci3n 15]$$

Donde:

$\rho_{m\acute{a}x}$  = densidad m\acute{a}xima del suelo ( $g/cm^3$ )

$\rho_n$  = densidad natural del suelo ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_{\text{mín}}$  = densidad mínima del suelo ( $\text{g/cm}^3$ )

Sin embargo, el grado de compactación también puede expresarse en términos de densidad relativa, las ecuaciones propuestas por Lee para relacionar la compactación relativa con el porcentaje de densidad relativa son:

$$R_c = 80 + 0.2 ID \dots\dots\dots [Ecuación 16]$$

Donde:

$R_c$  = Compactación relativa (%)

$ID$  = Índice de densidad (%)

Este término se usa solo para suelos sin cohesión, no es aplicable para suelos cohesivos debido a las incertidumbres en la determinación de laboratorio de la relación de huecos en el estado más flojo del suelo ( $e_{\text{máx}}$ ).

Cuando el suelo está en su forma suelta  $ID=0$ , lo que da un valor mínimo como 80% de la ecuación, cuando el suelo está en su forma más densa  $ID=100\%$  por lo que da un valor de  $RC=100\%$  de la ecuación. Por lo tanto, la compactación relativa varía del 80% al 100% según la ecuación 16.

**Tabla 11**

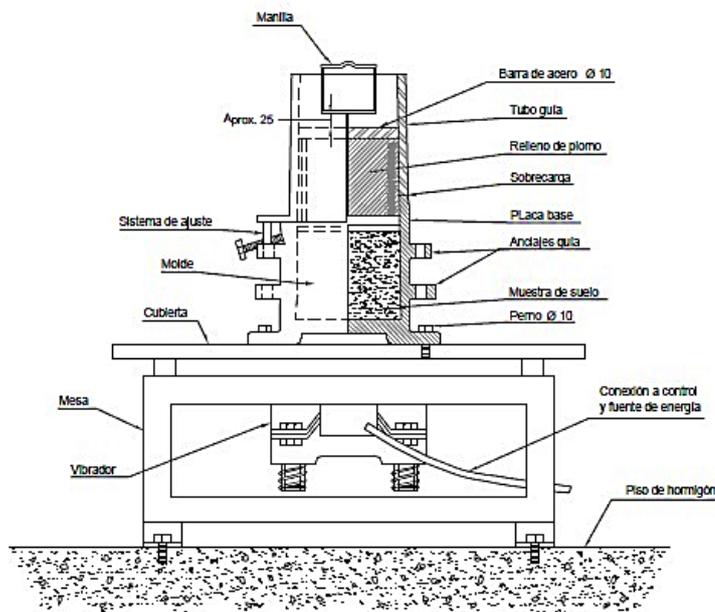
*Relación entre el índice de densidad y compactación relativa.*

Índice de densidad	Compactación relativa
100	100
90	98
80	96
70	94
60	92
50	90

Fuente: Shanklin, Reademacher y Talbot, 2014.

Un cambio de 1% en RC es aproximadamente igual a una densidad relativa de 5%, por lo tanto, el uso de la densidad relativa es más sensible a los cambios en la densidad del suelo. Los suelos uniformes con pequeñas diferencias entre mínimo y máximo no se controlan bien mediante la compactación relativa. El uso del control de densidad relativa es más confiable en materiales no cohesivos.

*E. Partes de la mesa vibratoria ASTM D4253.*



*Figura 59. Partes de la mesa vibratoria*  
Fuente: Instituto Nacional de Normalización, 1999.

*F. Factores que afectan la compactación por vibración.*

Según Troost (1987) indica que los factores que afectan la compactación por vibración son varios, entre ellos están la frecuencia de vibración, amplitud, tiempo de vibración, tipo de suelo, tamaño del molde, presión de recargo estático, número de capas y contenido de humedad.

*a. Frecuencia de vibración.*

La frecuencia es el número de oscilaciones por unidad de tiempo, es decir el número de veces que se repite un proceso periódico en un intervalo de tiempo

determinado, generalmente se mide en hercios (Hz) o en revoluciones por minuto (rpm). (Andrade, Losada y Lluís, 2019)

Según el Troost (1987) indica que las frecuencias con la que trabaja la mesa vibratoria pueden ser de 50 o 60 Hz, el uso de una u otra de estas frecuencias no es especificado para cualquier clasificación de suelo en particular, pero está permitido siempre que la amplitud y el tiempo de vibración se elijan en consecuencia. A mayor frecuencia de vibración inicial la densidad aumentará hasta lograr un pico, sin embargo, al ir incrementando la frecuencia puede ocurrir dos posibilidades, que la densidad disminuya o se mantenga casi constante, esto dependerá del tipo de suelo con el que trabajemos y otros factores.

Algunos investigadores coinciden en afirmar que la densidad máxima de un suelo se alcanza, cuando se compacta por vibración a la frecuencia de resonancia; otros, por otra parte, han comprobado que la densidad de un suelo compactado por vibración aumenta al aumentar la frecuencia, sin importar que las frecuencias aplicadas sean mayores que la frecuencia de resonancia. (Álvarez, 2005)

#### *b. Amplitud.*

La amplitud es la magnitud del desplazamiento máximo de un movimiento oscilatorio, se define como la distancia que hay entre el punto más alejado de una onda que puede ser positivo o negativo y el punto de equilibrio o medio, este valor puede medirse en milímetros, centímetros u otra unidad de longitud.

Según la ASTM 4253 indica que la amplitud es doble media cuando el desplazamiento de pico a pico puede ser de (0,05 – 0,33 mm) a una frecuencia de 60 Hz o de (0,08 – 0,48 mm) a una frecuencia de 50 Hz en condiciones de prueba.

Además, detalla que la mesa vibratoria deberá tener la capacidad para el ajuste de la doble amplitud de vibración entre aproximadamente (0,20 – 0,64 mm) a 60 Hz o (0,30 – 0,91 mm) a 50 Hz.

Según Troost (1987) indica que la doble amplitud de vibración vertical tiene un efecto significativo en la densidad obtenida del suelo, es decir que la densidad seca del suelo puede aumentar inicialmente con el aumento de la amplitud de vibración hasta alcanzar un pico y luego disminuye con incrementos adicionales en doble amplitud de vibración. La relación entre la densidad del suelo y la amplitud óptima de vibración (donde se obtiene la máxima densidad) puede variar con diferentes tipos de suelos y gradaciones, por esta razón estos métodos permiten el uso de dobles amplitudes de vibración. Concluye que la frecuencia de vibración tiene un impacto significativo en la densidad del material ya que a una frecuencia óptima se obtendrá la densidad deseada dependiendo de la clasificación del suelo.

La frecuencia y la amplitud de las vibraciones determinan el campo de aplicación más adecuado, si se trata de compactar suelos altamente plásticos será necesario aplicarles una vibración de gran amplitud y baja frecuencia, por otro lado, para compactar materiales granulares se requiere el empleo de una frecuencia alta y de una baja amplitud. (Álvarez, 2005)

*c. Número de capas y tiempo de vibración.*

Según la ASTM D4253 indica que el tiempo de vibración para amplitudes de 0,33 mm a 60 Hz será de 8 minutos y para amplitudes de 0,48 mm a 50 Hz será de 10 minutos compactadas en una sola capa.

Según Troost (1987) el tiempo mínimo de vibración debe ser de 8 minutos cuando se compacta en una sola capa de espesor, si debido a la naturaleza es probable que ocurra la segregación del material, la compactación de una muestra debe hacerse en tres o cuatro capas con dos minutos de compactación por capa y un mínimo de 10 minutos en total. Además, indica que el número de capas no afecta la densidad seca donde la segregación no es un problema.

*d. Tamaño de la partícula.*

La norma indica que este método es aplicable a suelos no cohesivos de libre drenaje, sin embargo, cuando se tratan de suelos que contienen partículas grandes, dos definiciones se usan comúnmente: partículas de gran tamaño y el material matriz, las partículas de gran tamaño son aquellos que son más grandes que un tamaño especificado. Este tamaño se determina típicamente por el tamaño del molde que será utilizado para las pruebas de compactación, el material matriz es el suelo restante que no se considera como de gran tamaño. El efecto de la presencia de partículas de gran tamaño en un espécimen compactado es similar a la de reducir el esfuerzo de compactación aplicado, la energía es absorbida durante la reorientación de las partículas grandes y la energía por lo tanto es de menos compactación que se imparte al material más fino.

A medida que el porcentaje de partículas de gran tamaño se incrementa (hasta un valor límite), la densidad seca del material total se incrementará, sin embargo, la densidad seca obtenible real comienza a desviarse del valor teórico, la causa de la desviación entre las densidades secas teóricas y reales es debido a la interferencia de partículas de gran tamaño y no habiendo material de matriz suficiente para llenar todos los huecos entre las partículas de gran tamaño.

Los equipos de compactación vibratoria han sido desarrollados para uso en la investigación donde el tamaño máximo de la partícula que puede ensayarse rutinariamente es de  $\frac{3}{4}$ " para ensayos de compactación por impacto y 3" para ensayos de compactación por vibración como la mesa vibratoria.

*e. Tamaño del molde.*

Según la ASTM D4253 el método consta de dos moldes metálicos estándar, los cuales pueden contener un volumen neto de 0,1 pies cúbicos ( $2830 \text{ cm}^3$ ) y 0,5 pies cúbicos ( $14\ 200 \text{ cm}^3$ ), siendo el molde de  $2830 \text{ cm}^3$  para materiales de hasta  $\frac{3}{4}$ " y el molde de  $14\ 200 \text{ cm}^3$  para materiales de hasta 3" de tamaño de la partícula.

El tamaño del molde de compactación utilizada tiene un efecto sobre la densidad seca que se puede obtener a partir del ensayo de compactación, algunos autores indican que los moldes con diámetros de seis a ocho veces el tamaño máximo de partícula proporcionarían densidades máximas secas. Para las pruebas de la mesa vibratoria, es lógico obtener mejores resultados en la densidad seca con moldes más grandes, ya que las muestras sometidas a ensayo en moldes más grandes recibirán menos esfuerzo de compactación por unidad de volumen. Además, el aumento del peso del conjunto del molde más grande sería reducir la amplitud de las vibraciones, las ASTM D4253 indica también que el tamaño del molde puede atribuir a la degradación de las partículas con el cual se obtendrá una mayor densidad seca.

*f. Presión del recargo estático.*

Existe una interacción entre la masa de recargo y el material vibrado bastante independiente de la amplitud de vibración, la aplicación de recargo según la norma

ASTM D4253 será de 2 lb/in<sup>2</sup> (14 kPa) de peso muerto a la superficie del suelo, cada molde estándar deberá de tener su recargo estático, una de 14 kPa (26 kg) y 27 kPa (50 kg). El efecto del recargo estático es importante ya que es directamente proporcional con la densidad seca que se pueda obtener.

Según Troost (1987) reveló que la amplitud tenía un efecto significativo en la eficiencia de la compactación vibratoria bajo varias masas de recargo estático, en el cual mostraron que la amplitud no fue afectada por el recargo para el equipo utilizado, por lo tanto, la presión de sobrecarga de 38 kPa (70 kg) no puede atribuirse a reducción en la amplitud de la vibración debido al aumento de la masa total en la mesa.

*g. Contenido de humedad.*

Según las ASTM D4253, existen dos métodos para obtener la densidad máxima seca mediante el ensayo de la mesa vibratoria, los cuales son en condiciones seca y saturada, además recomienda que tanto la seca y húmeda pueden realizarse al empezar un nuevo trabajo o encontrarse con cambios en los tipos de suelos, ya que el método húmedo puede producir densidades significativamente mayores para algunos suelos, a menudo se prefiere que el método sea en seco porque los resultados por lo general se pueden obtener más rápidamente,

Según Drnevich, Evans y Porchaska (2007) indica que las densidades más altas en una gran variedad de suelos granulares siempre se obtuvieron ya sea con el material secado al horno o en condición saturada, concluyó que sólo un aumento insignificante en unidad de peso seco se produjo después de ocho minutos de vibración, estas densidades secas aumentan como la amplitud de las vibraciones.

### 2.3. Definición de términos.

*Mesa vibratoria.* Mesa vibradora de acero, con cubierta vibradora de aproximadamente 750 x 750 mm, apoyada sobre amortiguadores y accionada por un vibrador electromagnético. Debe de tener una frecuencia de 3660 vibraciones/minuto y una amplitud de vibrado vertical entre 0,05 y 0,64 mm bajo un recargo estático. (Instituto Nacional de Normalización, 1999)

*Pavimentos.* Como pavimento se denomina a la capa o conjunto de capas de materiales seleccionados que reciben directamente las cargas de tránsito y las transmiten a las capas inferiores, pueden ser flexibles, rígidos o semirrígidos. (Ortega, 2015)

*Base granular.* Es una capa estructural de material pétreo seleccionado, posee una mejor calidad a comparación de la sub base granular. Su función elemental es otorgar resistencia y a su vez transmitir a la siguiente capa estructural (sub base) y a la subrasante los esfuerzos que se producen por la circulación de vehículos en la capa de rodadura. (Ortega, 2015)

*Sub base granular.* Es una capa estructural de material pétreo seleccionado, posee menos calidad a comparación de la base granular, sirve de transición entre las capas de subrasante y base granular, impide la penetración de los materiales, absorbe las deformaciones que puedan ocasionarse en la subrasante, disipa parcialmente los esfuerzos y transmite las cargas de los vehículos a la capa inferior. (Ortega, 2015)

*Subrasante.* Se denomina así debido a que sirve de fundación para toda la estructura del pavimento o afirmado, en general se define como el apoyo directo

del paquete estructural del pavimento, es la capa superior del terraplén o fondo de la excavación debido a que es la que soportará la estructura. (Ortega, 2015)

*Densidad seca.* Considerada como la relación entre la masa de las partículas sólidas y el volumen total del suelo. (Montalar, 2012)

*Densidad máxima seca.* Corresponde a la mayor densidad que puede alcanzar un suelo al ser compactado a la humedad óptima. (Cárdenas y Donoso, 2008)

*Contenido óptimo de humedad.* Es el contenido de agua al cual el suelo puede ser compactado al máximo Peso Unitario Seco usando el esfuerzo de Compactación Modificada. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006)

*Proctor modificado.* Se emplea para determinar la relación densidad seca – humedad de compactación de los materiales a utilizar en explanadas y en capas de firmes, y como referencia para el control de calidad de la compactación en obra. (Aranguren, 2015)

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

#### **3.1. Tipo de investigación.**

El presente trabajo experimental tiene como finalidad los siguientes tipos de investigación:

##### **3.1.1. Investigación descriptiva.**

En este nivel de investigación permite caracterizar el objeto en estudio, recopilar la información obtenida mediante la exploración, asimismo interpretar y responder de manera cuantitativa los cuestionamientos generados del objeto que se investiga. (Hernández, 2014)

##### **3.1.2. Investigación comparativa.**

Este nivel de investigación es una forma de generar o refutar teorías o hipótesis que utiliza comparaciones para probar la validez de argumentos, en el presente trabajo de investigación se realizará una comparativa de métodos de compactación para determinar la densidad máxima de los suelos, donde a través del mismo se buscará establecer las similitudes y diferencias entre ellos.

### **3.1.3. Investigación explicativa.**

En este nivel de investigación se estudia fenómenos puntuales nuevos que no han sido abordados con profundidad cuya finalidad es poder determinar las razones o motivos por los cuales ocurren los hechos del fenómeno estudiado observando las causas y efectos que existen.

### **3.2. Diseño de la investigación**

La presente investigación es de carácter cuasi-experimental ya que según Massons y Rodriguez (2019), debido a que los sujetos no se asignan aleatoriamente a los grupos, se busca determinar el valor de la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento mediante la mesa vibratoria para lo cual se manipulará a criterio sus dimensiones definidas.

### **3.3. Población y muestra**

Se aplicará un diseño no probabilístico en el cual la selección de la muestra será de forma intencional a criterio que estarán relacionadas con las características de la investigación o propósitos del investigador. (Hernández, 2014)

#### **3.3.1. Población.**

Se ha considerado como nuestra población a los tramos que presentan fallas en el pavimento flexible los cuales estén comprendidos dentro de los 35 kilómetros del tramo I de la carretera Moquegua – Omate – Arequipa.

#### **3.3.2. Muestra.**

La muestra de estudio para el presente trabajo de investigación será obtenida mediante la intervención del tramo Km 06+000 al Km 07+000 perteneciente al total de los 35 Km del tramo I en estudio, dicho kilómetro en intervención se dividió en 03 zonas las cuales se encuentran con fallas en su capa de rodadura, por

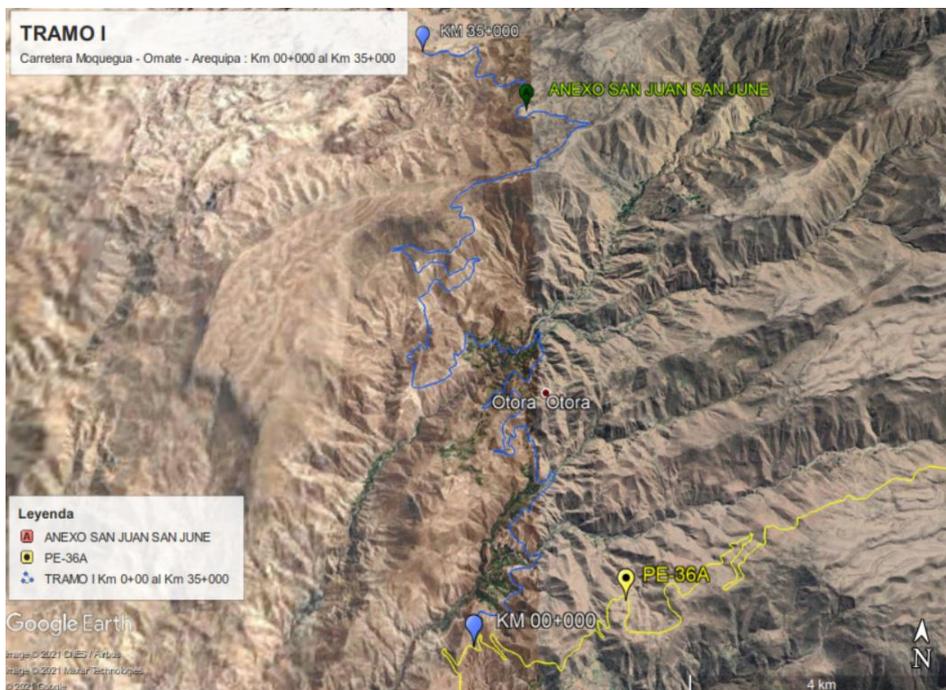
consiguiente, se realizaron una calicata en cada zona para su intervención, siendo las siguientes:

**Tabla 12**

*Zonas seleccionadas del Km 06+000 al Km 07+000.*

Tramo Km 06+000 al Km 07+000 intervenido							
Zona	Prog. inicial (Km)	Prog. final (Km)	Lado	Inicio		Final	
				Este	Norte	Este	Norte
Z-01	06+180	6+220	Izq.	302802,14	8116957,36	302796,65	8116993,11
Z-02	06+565	06+620	Izq.	302752,08	8117135,42	302735,34	8117183,20
Z-03	06+780	06+820	Izq.	302538,15	8117101,42	302547,35	8117060,45

En la figura N°60 se puede observar el tramo en estudio el cual consta de 35 kilómetros del cual se eligió un tramo de 01 kilómetro dividido en 03 zonas para su intervención (visualizar la figura N°61).



**Figura 60.** Tramo I, carretera Moquegua – Omate – Arequipa.

Fuente: Google Earth, 2021.



Figura 61. Zonas en estudio.  
Fuente: Google Earth, 2021.

### 3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos

Para poder realizar el presente trabajo de investigación se realizaron los siguientes planteamientos operacionales.

#### 3.4.1. Planteamiento.

Para obtener una correcta recopilación de datos y estadísticas se planteó el siguiente procedimiento:

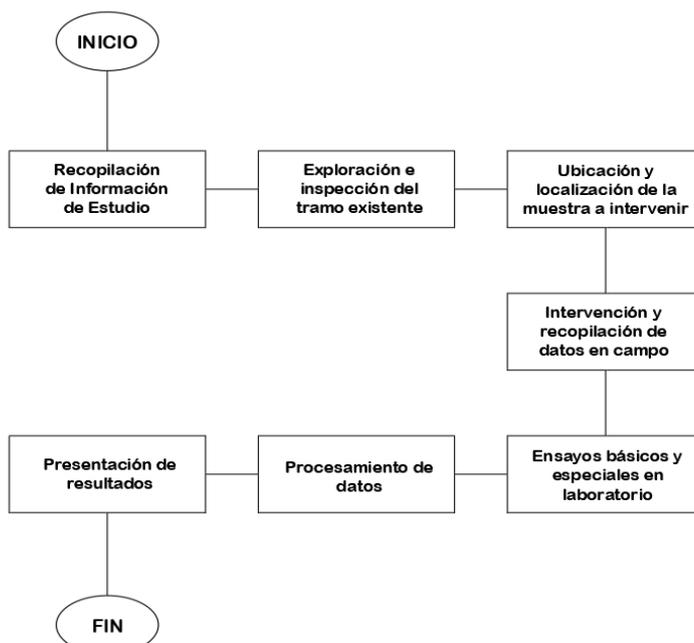


Figura 62. Esquema del procedimiento metodológico a seguir.

#### **3.4.1.1. Recopilación de información de estudio.**

Se realizó el análisis documental de información necesaria como textos, libros, artículos científicos, normas y trabajos de investigación relacionados con la Mesa Vibratoria ASTM D4253 y así poder realizar correctamente su aplicación estableciendo una metodología de estudio.

#### **3.4.1.2. Exploración e inspección del tramo existente.**

Mediante la observación experimental se realizó el recorrido del tramo I el cual comprende los 35 kilómetros siendo el inicio el empalme PE-36A con la MO-108 (Km 0+000) hasta el final del anexo de San Juan San June (Km 35+000), se dio mayor énfasis a los tramos que presentaban fallas en el pavimento flexible ya que en la presente investigación trata de demostrar que la causa de dichas fallas han sido generadas el inadecuado uso de metodología de compactación en laboratorio lo cual ha generado las bajas compactaciones en campo.

#### **3.4.1.3. Ubicación y localización de la muestra a intervenir.**

Al ser un diseño no probabilístico se consideró un tramo de 01 km a criterio del investigador, dicho tramo consta de tres zonas siendo las antes mencionadas en la tabla N°12 del numeral 3.3.2.



Figura 63. Zona 01: Km 06+200 (Presencia de falla)



Figura 64. Zona 02: Km 06+580 (Presencia de falla)



Figura 65. Zona 03: Km 06+830 (Presencia de falla)

#### ***3.4.1.4. Intervención y recopilación de datos en campo.***

Para cumplir con los objetivos del presente trabajo de investigación es necesario realizar el estudio de las capas estructurales del pavimento para lo cual se realizó la excavación de una calicata en cada zona y toma de muestra de cada una de las capas estructurales encontradas.



Figura 66. Calicata Nro. 01 – Km 06+200 (lado izquierdo)



Figura 67. Calicata Nro. 02 – Km 06+580 (lado izquierdo)



Figura 68. Calicata Nro. 03 – Km 06+830 (lado izquierdo)

#### ***3.4.1.5. Ensayos básicos y especiales en laboratorio.***

Una vez realizado la toma de muestra en campo, se realizaron los ensayos básicos y especiales en el laboratorio Geotecnia y Pavimentos del Sur SAC para poder conocer las propiedades de las muestras obtenidas en campo y asimismo establecer la metodología a seguir para la aplicación de la mesa vibratoria.

- Análisis de suelos por tamizado (ASTM D422)
- Contenido de humedad (ASTM D2216)
- Límites de Atterberg (ASTM D4318)
- Clasificación de suelos
- Proctor modificado (ASTM D1557)
- Índice de densidad máxima mediante mesa vibratoria (ASTM D4253)

#### ***3.4.1.6. Procesamiento de datos.***

A partir de la recolección de datos que se obtuvo en campo y mediante los ensayos básicos y especiales en laboratorio, los cuales se agruparán y estructurarán de forma adecuada con el propósito de responder al problema de investigación, objetivos e hipótesis. Para el presente trabajo de investigación, el procesamiento de datos se realizará mediante hojas de cálculo de Excel y con el apoyo del software IBM SPSS v25 el cual nos ayudará a poder validar nuestros resultados y aceptar o rechazar nuestra hipótesis.

#### ***3.4.1.7. Presentación de resultados.***

La presentación de resultados se efectuará mediante la presentación de gráficos, barras y tablas, asimismo mediante la elaboración de un análisis estadístico lo cual permitirá contrastar la hipótesis.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. Presentación de resultados**

Para obtener los resultados del presente trabajo de investigación de acuerdo al planteamiento inicial en el cual detalla el procedimiento a seguir se pudo visualizar en el capítulo anterior el siguiente proceso:

- Recopilación de información de estudio
- Exploración e inspección del tramo existente
- Ubicación y localización de la muestra a intervenir
- Intervención y recopilación de datos en campo

Por lo consiguiente en este capítulo se presentarán los resultados de los ensayos básicos y especiales en laboratorio de las tres muestras obtenidas de cada calicata (tres) en campo para poder conocer las propiedades físicas del suelo y lo más importante poder determinar la densidad máxima de cada una de las capas estructurales mediante la aplicación de la mesa vibratoria, estudiar los efectos de humedad, tiempo y frecuencia de vibración y finalmente realizar una comparativa entre la densidad máxima obtenida por la mesa vibratoria y el Proctor modificado, finalmente se realizará la contrastación de hipótesis para validar nuestro resultados.

#### 4.1.1. Descripción de los materiales obtenidos en campo

Se realizaron tres calicatas el tramo descrito anteriormente en el cual se desarrollará la investigación, cada calicata se realizó con una profundidad de 1,00 m, según norma indica que la profundidad mínima deberá ser 1,50 m sin embargo, a dicha altura se encontró una capa de bolonerías por lo que con fines de estudios y de no perjudicar la estructura definida de la carretera no se profundizó la calicata, asimismo solo se intervendrá tres capas estructurales de la conformación del pavimento las cuales están conformadas por la base granular, sub-base granular y subrasante, según figura N°69 y tabla N°13.



Figura 69. Zonificación de calicatas realizadas.

Fuente: Google Earth, 2021.

Tabla 13

Cuadro de localización de calicatas realizadas.

Calicata	Progresiva (Km)	Profundidad (m)	Lado	Coordenadas UTM	
				Este	Norte
C-01	06+200	1,00	Izq.	302895,00	8116968,00
C-02	06+580	1,00	Izq.	302745,00	8117150,00
C-03	06+830	1,00	Izq.	302544,00	8117081,00

#### 4.1.1.1. Calicata 01.

Se realizó en la progresiva Km 06+200, al lado izquierdo de la vía, donde se pudo detectar la siguiente composición del pavimento, carpeta asfáltica, base granular, sub base granular y subrasante, la profundidad de la calicata es de aproximadamente 1,00 m, se extrajo tres sacos de 60 kg para poder realizar los ensayos en laboratorio. A continuación, en la figura N°70 se muestra el perfil estratigráfico de la calicata intervenida.

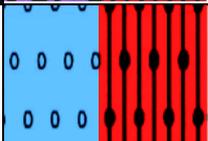
PROF.	M.	SIMBOLOGÍA	ESTRATO	CLASIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN
			Espesor	AASHTO	SUCS	
0.15 m			E-01	A-1-a Fragmentos de roca, grava y arena	Grava mal graduada con limo con arena GP GM	<b>BASE GRANULAR</b> -Material aluvial con consistencia muy firme. -No presenta plasticidad. -No se encontró nivel freático
0.30 m			E-02	A-1-a Fragmentos de roca, grava y arena	Grava bien graduada con limo con arena GW GM	<b>SUB-BASE GRANULAR</b> -Material aluvial con consistencia muy firme. -Ligeramente plástico. -No se encontró nivel freático
0.45 m			E-03	A-2-4 Grava y arena arcillosa o limiosa	Grava arcillosa con arena con bloques GC	<b>SUBRASANTE</b> -Material aluvial con consistencia muy dura. -Plasticidad baja. -No se encontró nivel freático
0.60 m						
0.75 m						
1.00 m						

Figura 70. Perfil estratigráfico C-01, Km 06+200.

#### 4.1.1.2. Calicata 02.

Se realizó en la progresiva Km 06+580, al lado izquierdo de la vía, donde se pudo detectar la siguiente composición del pavimento, carpeta asfáltica, base granular, sub base granular y subrasante, la profundidad de la calicata es de aproximadamente 1,00 m, se extrajo tres sacos de 60 kg para poder realizar los ensayos en laboratorio. A continuación, en la figura N°71 se muestra el perfil estratigráfico de la calicata intervenida.

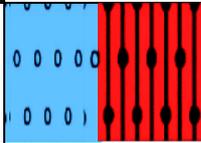
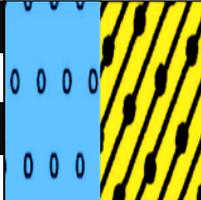
PROF.	M.	SIMBOLOGÍA	ESTRATO	CLASIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN
			Espesor	AASHTO	SUCS	
0.15 m			E-01	A-1-a Fragmentos de roca, grava y arena	Grava mal graduada con limo con arena GP GM	<b>BASE GRANULAR</b> -Material aluvial con consistencia muy firme. -No presenta plasticidad. -No se encontró nivel freático
0.30 m			E-02	A-1-a Fragmentos de roca, grava y arena	Grava bien graduada con limo con arena GW GM	<b>SUB-BASE GRANULAR</b> -Material aluvial con consistencia muy firme. -Ligeramente plástico. -No se encontró nivel freático
0.45 m			E-03	A-2-4 Grava y arena arcillosa o limosa	Grava bien graduada con arcillosa con arena con bloques GW-GC	<b>SUBRASANTE</b> -Material aluvial con consistencia muy dura. -Plasticidad baja. -No se encontró nivel freático
0.60 m						
0.75 m						
1.00 m						

Figura 71. Perfil estratigráfico C-02, Km 06+580.

#### 4.1.1.3. Calicata 03.

Se realizó en la progresiva Km 06+830, al lado izquierdo de la vía, donde se pudo detectar la siguiente composición del pavimento, carpeta asfáltica, base granular, sub base granular y subrasante, la profundidad de la calicata es de aproximadamente 1,00 m, se extrajo tres sacos de 60 kg para poder realizar los ensayos en laboratorio. A continuación, en la figura N°72 se muestra el perfil estratigráfico de la calicata intervenida.

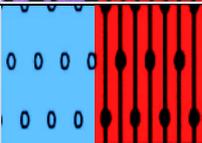
PROF.	M.	SIMBOLOGÍA	ESTRATO	CLASIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN
			Espesor	AASHTO	SUCS	
0.15 m			E-01	A-1-a Fragmentos de roca, grava y arena	Grava mal graduada con limo con arena GP GM	<b>BASE GRANULAR</b> -Material aluvial con consistencia muy firme. -No presenta plasticidad. -No se encontró nivel freático
0.30 m			E-02	A-1-a Fragmentos de roca, grava y arena	Grava bien graduada con limo con arena GW GM	<b>SUB-BASE GRANULAR</b> -Material aluvial con consistencia muy firme. -Ligeramente plástico. -No se encontró nivel freático
0.45 m			E-03	A-2-4 Grava y arena arcillosa o limosa	Grava arcillosa con arena con bloques GC	<b>SUBRASANTE</b> -Material aluvial con consistencia muy dura. -Plasticidad baja. -No se encontró nivel freático
0.60 m						
0.75 m						
1.00 m						

Figura 72. Perfil estratigráfico C-03, Km 06+830.

#### 4.1.2. Ensayos básicos en laboratorio

Una vez obtenidas las muestras en campo, se procedió a realizar los ensayos básicos en el laboratorio de Geotecnia y Pavimentos del Sur SAC con asesoría del Jefe de Laboratorio, para lo cual se siguieron los procedimientos según ASTM y del manual de ensayos de materiales MTC-2016.

##### 4.1.2.1. Análisis granulométrico por tamizado.

Se realizó el ensayo de análisis granulométrico por tamizado de las 03 calicatas, cada calicata presenta tres estratos (capas estructurales) siendo la base granular, sub base granular y subrasante, el procedimiento a seguir para dicho ensayo se realizó de acuerdo a norma MTC E-107 y ASTM D 422 para poder determinar la distribución de tamaños de partículas.



Figura 73. Cuarteo de muestra y análisis granulométrico

En la tabla N°14 y 15 se puede visualizar los resultados del análisis granulométrico de la base en las tres progresivas intervenidas.

**Tabla 14**

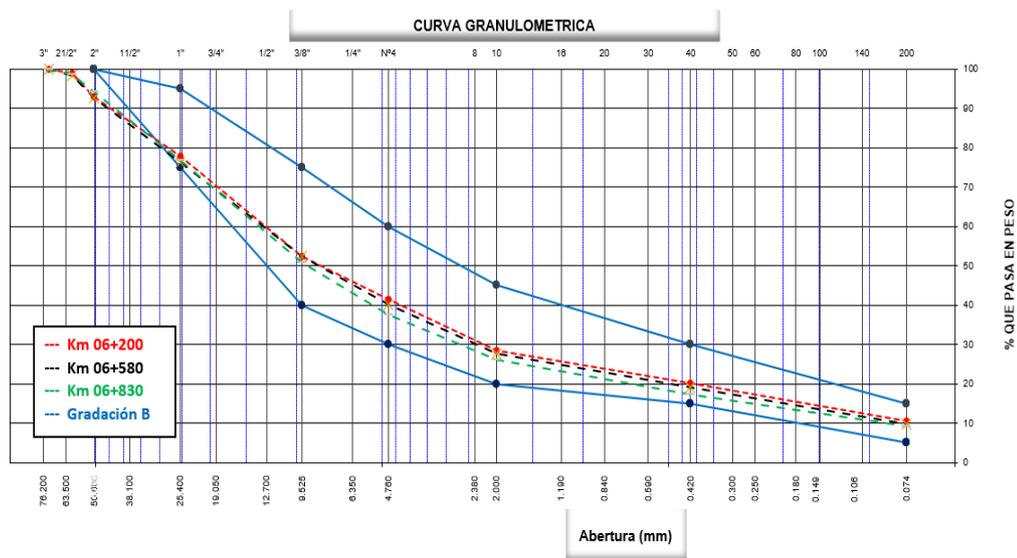
*Análisis granulométrico de Base granular.*

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje Pasante (%)			Gradación B Base Granular	
		C-01 06+200	C-02 06+200	C-03 06+200		
3"	75,00	100,00	100,00	100,00	-	-
2 ½"	60,30	98,80	98,50	98,70	-	-
2"	50,80	92,90	92,70	94,10	100	100
1"	25,40	77,70	76,30	76,80	75	95
3/8"	9,52	52,50	52,30	50,80	40	75
N° 4	4,75	41,60	40,10	37,50	30	60
N° 10	2,00	28,60	27,60	26,10	20	45
N° 40	0,42	20,20	19,0	17,40	15	30
N° 200	0,074	10,70	9,80	9,20	5	15

**Tabla 15**

*Clasificación según su distribución de tamaños de la base granular.*

Tipo de material	Tamaño (mm)	Porcentaje Pasante (%)		
		C-01 06+200	C-02 06+200	C-03 06+200
Grava	75,00 – 4,75	58,44	59,91	62,53
Arena	4,75 – 0,0075	30,91	30,32	28,26
Finos	0,075 – 0,005	10,65	9,77	9,21



*Figura 74. Comparativa de curvas granulométricas de la base granular.*

En la tabla N° 16 y 17 se puede visualizar los resultados del análisis granulométrico de la sub-base en las tres progresivas intervenidas.

**Tabla 16**

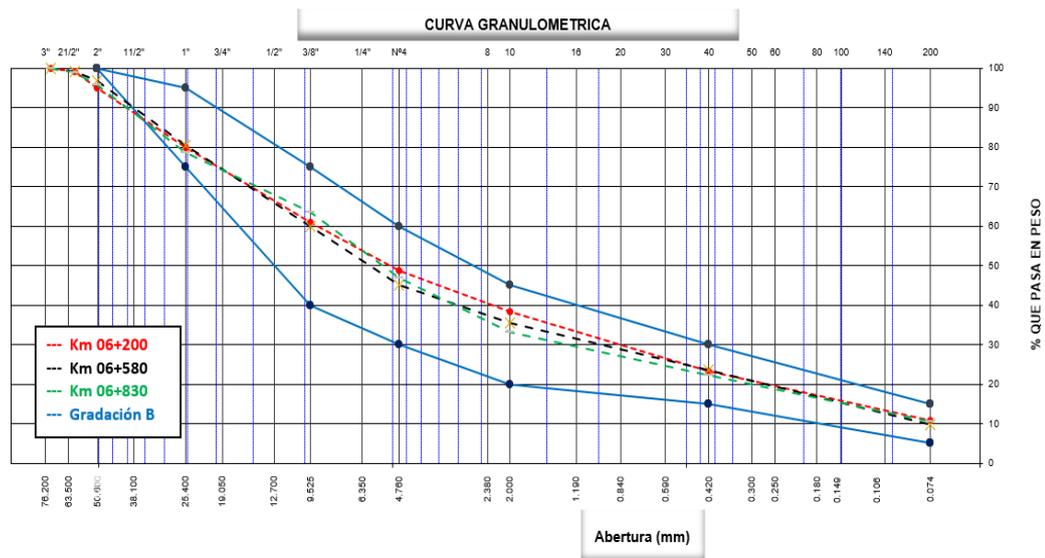
*Análisis granulométrico de Sub-base granular.*

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje Pasante (%)			Gradación B Sub-base Granular	
		C-01 06+200	C-02 06+200	C-03 06+200		
3"	75,00	100,00	100,00	100,00	-	-
2 ½"	60,30	99,20	99,20	98,90	-	-
2"	50,80	94,90	96,80	95,70	100	100
1"	25,40	79,90	80,50	78,70	75	95
3/8"	9,52	60,80	60,00	63,50	40	75
N° 4	4,75	48,70	45,10	46,50	30	60
N° 10	2,00	38,50	35,50	33,10	20	45
N° 40	0,42	23,30	23,50	22,30	15	30
N° 200	0,074	10,80	9,70	10,40	5	15

**Tabla 17**

*Clasificación según su distribución de tamaños de la Sub-base granular.*

Tipo de material	Tamaño (mm)	Porcentaje Pasante (%)		
		C-01 06+200	C-02 06+200	C-03 06+200
Grava	75,00 – 4,75	51,32	54,86	53,11
Arena	4,75 – 0,0075	37,85	35,40	36,47
Finos	0,075 – 0,005	10,83	9,74	10,42



*Figura 75. Comparativa de curvas granulométricas de la sub-base.*

En la tabla N°18 y 19 se puede visualizar los resultados del análisis granulométrico de la subrasante en las tres progresivas intervenidas.

**Tabla 18**

*Análisis granulométrico de Subrasante.*

Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje Pasante (%)		
		C-01 06+200	C-02 06+200	C-03 06+200
3"	75,00	94,00	95,90	97,00
2 ½"	60,30	91,70	92,90	95,10
2"	50,80	86,70	88,00	89,50
1½"	37,50	76,20	77,40	78,90
1"	25,40	67,40	67,50	69,80
¾"	19,00	61,70	61,50	62,60
½"	12,70	56,70	57,50	57,10
3/8"	9,52	52,60	52,60	52,40
N° 4	4,75	43,80	41,60	42,40
N° 10	2,00	34,70	33,10	34,40
N° 20	0,85	27,00	24,40	27,10
N° 40	0,42	21,50	18,50	21,80
N°100	0,15	15,80	13,70	14,30
N° 200	0,074	12,70	11,70	12,60

**Tabla 19**

*Clasificación según su distribución de tamaños de la Subrasante.*

Tipo de material	Tamaño (mm)	Porcentaje Pasante (%)		
		C-01 06+200	C-02 06+580	C-03 06+830
Grava	75,00 – 4,75	56,19	58,38	57,60
Arena	4,75 – 0,0075	31,13	29,89	29,80
Finos	0,075 – 0,005	12,68	11,70	12,60

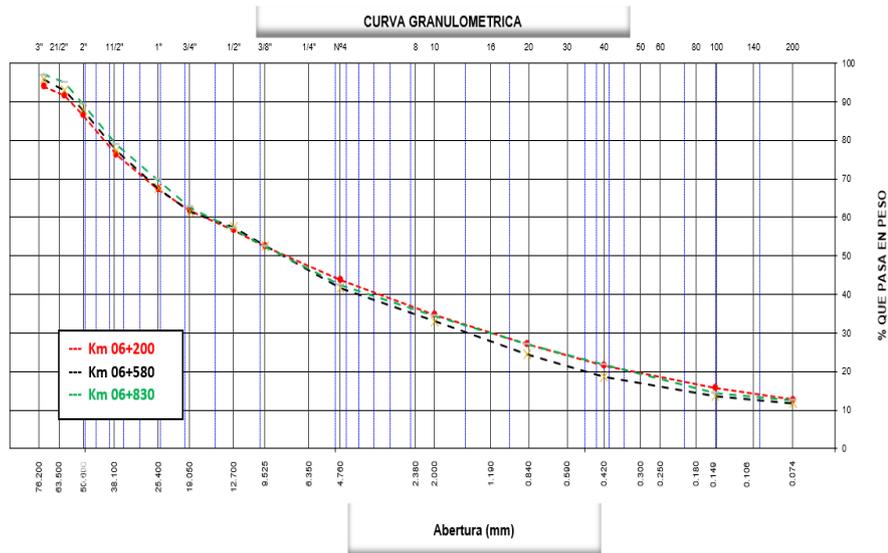


Figura 76. Comparativa de curvas granulométricas de la subrasante

#### 4.1.2.2. Contenido de humedad.

Se realizó el ensayo de contenido de humedad de suelos y rocas de cada una de las muestras extraídas de las tres calicatas realizadas en campo, dicho procedimiento se realizó de acuerdo a norma MTC E-108 y ASTM D 2216.



Figura 77. Determinación del contenido de humedad.

En las tablas N° 20, 21 y 22 se puede visualizar los resultados del % Contenido de humedad natural de la base granular, sub base granular y subrasante, se tiene lo siguiente:

**Tabla 20**

*Contenido de humedad de la base granular.*

<b>Descripción</b>	<b>C-01 06+200</b>	<b>C-02 06+580</b>	<b>C-03 06+830</b>
% Contenido de humedad	4,46	4,34	3,91

**Tabla 21**

*Contenido de humedad de la sub-base granular.*

<b>Descripción</b>	<b>C-01 06+200</b>	<b>C-02 06+580</b>	<b>C-03 06+830</b>
% Contenido de humedad	4,65	5,15	4,90

**Tabla 22**

*Contenido de humedad de la subrasante.*

<b>Descripción</b>	<b>C-01 06+200</b>	<b>C-02 06+580</b>	<b>C-03 06+830</b>
% Contenido de humedad	7,19	7,52	8,31

#### **4.1.2.3. Límites de Atterberg.**

Se realizó el ensayo de límites de Atterberg de cada una de las muestras extraídas de las tres calicatas realizadas en campo, dicho procedimiento se realizó de acuerdo a norma MTC E-110 y ASTM D 4318.



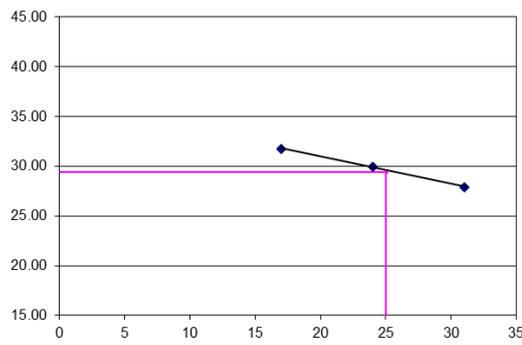
*Figura 78. Determinación límite líquido y plástico.*

En la tabla N° 23 se muestra los resultados de los límites líquidos y plásticos, así como también los índices de plasticidad de la base granular que nos será útil para poder clasificar el tipo de suelo.

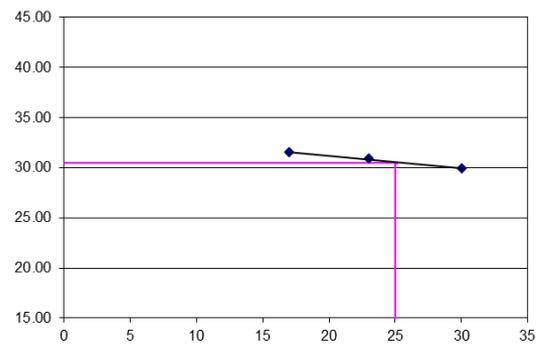
**Tabla 23**

*Límites de Atterberg de la base granular.*

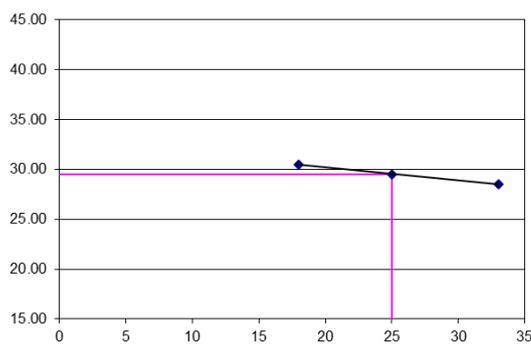
Descripción	C-01 06+200	C-02 06+580	C-03 06+830
Límite líquido (%)	29,40	30,50	29,50
Límite plástico (%)	N.P.	N.P.	N.P.
Índice de plasticidad (%)	N.P.	N.P.	N.P.



(a)



(b)



(c)

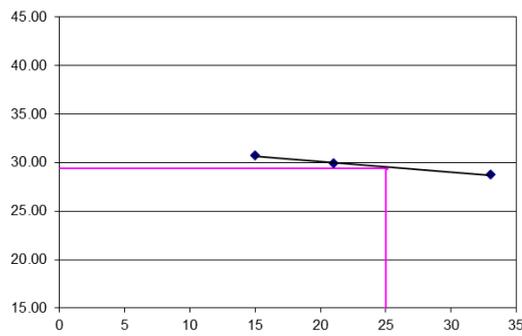
*Figura 79. Límite líquido base granular de la C-01 (a), C-02 (b) y C-03 (c).*

En la tabla N° 24 se muestra los resultados de los límites líquidos y plásticos, así como también los índices de plasticidad de la sub-base granular que nos será útil para poder clasificar el tipo de suelo.

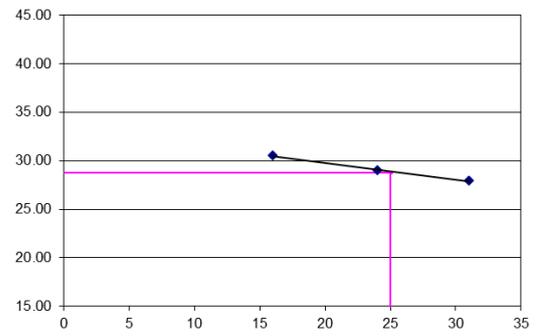
**Tabla 24**

*Límites de Atterberg de la sub-base granular.*

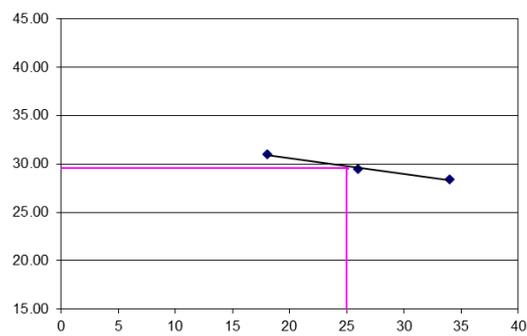
Descripción	C-01 06+200	C-02 06+580	C-03 06+830
Límite líquido (%)	29,40	28,80	29,60
Límite plástico (%)	25,70	25,50	25,50
Índice de plasticidad (%)	3,70	3,30	4,10



(a)



(b)



(c)

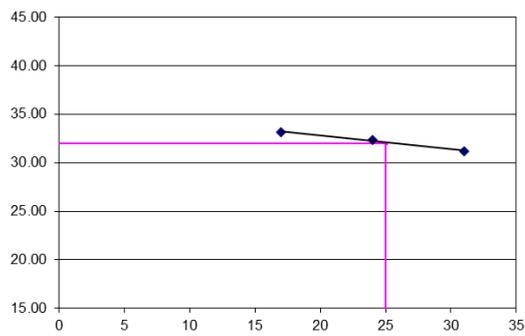
*Figura 80. Límite líquido sub-base granular de la C-01 (a), C-02 (b) y C-03 (c).*

En la tabla N° 25 se muestra los resultados de los límites líquidos y plásticos, así como también los índices de plasticidad de la subrasante que nos será útil para poder clasificar el tipo de suelo.

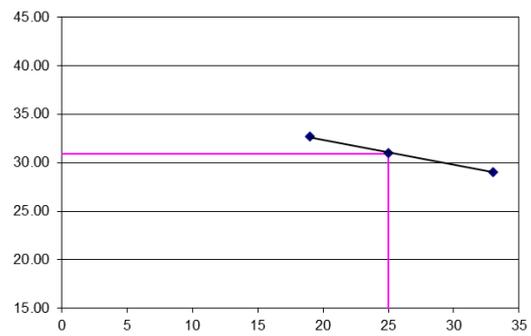
**Tabla 25**

*Límites de Atterberg de la subrasante.*

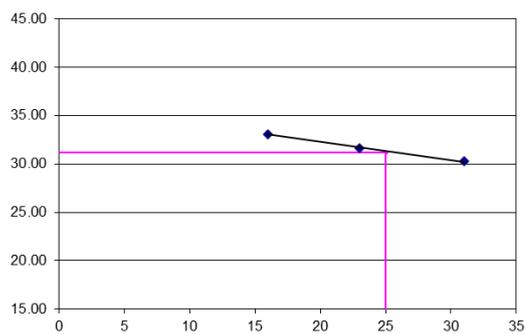
Descripción	C-01 06+200	C-02 06+580	C-03 06+830
Límite líquido (%)	32,00	30,90	31,20
Límite plástico (%)	22,20	21,60	21,10
Índice de plasticidad (%)	9,80	9,30	10,10



(a)



(b)



(c)

*Figura 81. Límite líquido subrasante de la C-01 (a), C-02 (b) y C-03 (c).*

#### 4.1.2.4. Clasificación de suelos.

Se realizó la clasificación de suelo de cada una de las muestras extraídas de las tres calicatas realizadas en campo, para lograr la clasificación del suelo es necesario conocer su granulometría, contenido de humedad y límites de Atterberg, dicho procedimiento se realizó de acuerdo a norma NTP 339.134, NTP 339.135, ASTM D 2487 y ASTM D 3282.

En la tabla N° 26 se muestra la clasificación del tipo de suelo de la base granular teniendo en cuenta los siguientes criterios.

**Tabla 26**

*Sistemas de clasificación de suelos de la base granular – SUCS y AASTHO.*

<b>Descripción</b>	<b>C-1 06+200</b>	<b>C-02 06+580</b>	<b>C-03 06+800</b>
% pasa N°4	41,60	40,10	37,50
% pasa N°10	28,60	27,60	26,10
% pasa N°40	20,20	19,00	17,40
% pasa N°200	10,70	9,80	9,20
% Límite líquido	29,40	30,50	29,50
% Límite plástico	N.P.	N.P.	N.P.
% Índice de plasticidad	N.P.	N.P.	N.P.
Coefficiente de uniformidad (Cu)	197,14	171,62	148,42
Coefficiente de curvatura (Cc)	6,21	6,86	5,44
Clasificación SUCS	GP-GM	GP-GM	GP-GM
Denominación	Grava mal graduada con limo, con arena	Grava mal graduada con limo, con arena	Grava mal graduada con limo, con arena
Clasificación AASTHO	A-1-a	A-1-a	A-1-a
Denominación	Fragmentos de roca, grava y arena	Fragmentos de roca, grava y arena	Fragmentos de roca, grava y arena

En la tabla N° 27 se muestra la clasificación del tipo de suelo de la sub-base granular teniendo en cuenta los siguientes criterios.

**Tabla 27***Sistemas de clasificación de suelos de la sub-base granular – SUCS y AASHTO.*

<b>Descripción</b>	<b>C-1 06+200</b>	<b>C-02 06+580</b>	<b>C-03 06+800</b>
% pasa N°4	48,70	45,10	46,90
% pasa N°10	38,50	35,50	33,10
% pasa N°40	23,30	23,50	22,30
% pasa N°200	10,80	9,70	10,40
% Límite líquido	29,40	28,80	29,60
% Límite plástico	25,70	25,50	25,50
% Índice de plasticidad	3,70	3,30	4,10
Coefficiente de uniformidad (Cu)	136,00	136,43	127,00
Coefficiente de curvatura (Cc)	1,06	1,47	2,93
Clasificación SUCS	GW-GM	GW-GM	GW-GM
Denominación	Grava bien graduada con limo con arena	Grava bien graduada con limo con arena	Grava bien graduada con limo con arena
Clasificación AASTHO	A-1-a	A-1-a	A-1-a
Denominación	Fragmentos de roca, grava y arena.	Fragmentos de roca, grava y arena.	Fragmentos de roca, grava y arena.

En la tabla N° 28 se muestra la clasificación del tipo de suelo de la subrasante granular teniendo en cuenta los siguientes criterios.

**Tabla 28***Sistemas de clasificación de suelos de la subrasante – SUCS y AASHTO.*

<b>Descripción</b>	<b>C-1 06+200</b>	<b>C-02 06+580</b>	<b>C-03 06+800</b>
% pasa N°4	43,80	41,60	42,40
% pasa N°10	34,70	33,10	34,40
% pasa N°40	21,50	18,50	21,80
% pasa N°200	12,70	11,70	12,60
% Límite líquido	32,00	30,90	31,20
% Límite plástico	22,20	21,60	21,10
% Índice de plasticidad	9,80	9,30	10,10
Coefficiente de uniformidad (Cu)	250,00	217,14	222,86

**Tabla 28 (Continuación)**

*Sistemas de clasificación de suelos de la subrasante – SUCS y AASHTO.*

Descripción	C-1 06+200	C-02 06+580	C-03 06+800
Coefficiente de curvatura (Cc)	1,16	2,11	1,30
Clasificación SUCS	GC	GW-GC	GC
Denominación	Grava arcillosa con arena con bloques	Grava bien graduada con arcilla, arena y bloques	Grava arcillosa con arena con bloques
Clasificación AASTHO	A-2-4	A-2-4	A-2-4
Denominación	Grava y arena arcillosa o limosa	Grava y arena arcillosa o limosa	Grava y arena arcillosa o limosa

### 4.1.3. Ensayos especiales en laboratorio

#### 4.1.3.1. Proctor modificado.

Se determinaron las densidades máximas secas en laboratorio utilizando la energía modificada – también denominado Proctor modificado (MTC E115, ASTM D1557), dicho método se empleó para determinar la D.M.S. de las muestras obtenidas en cada calicata.



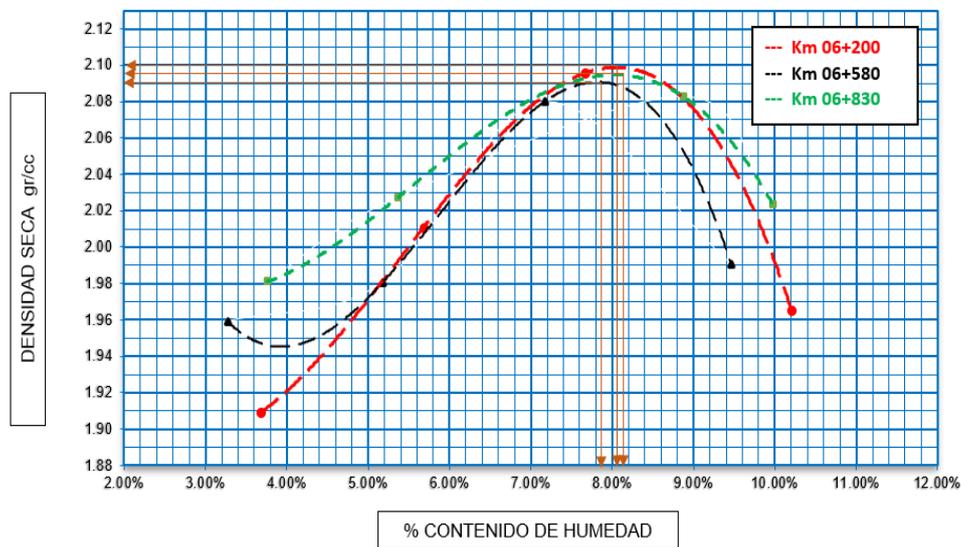
*Figura 82. Ensayo Proctor modificado ASTM D1557.*

En la tabla N° 29 se muestra los resultados de las D.M.S. obtenidas en laboratorio para la base granular.

**Tabla 29**

*Resultados de Proctor modificado de la base granular.*

Descripción	C-1	C-02	C-03
	06+200	06+580	06+800
Contenido de humedad óptima (%)	8,07	7,93	8,11
Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,100	2,092	2,094



*Figura 83. Proctor modificado de la base granular C-01, C-02 y C-03.*

En la tabla N°30 se muestra los resultados de las D.M.S. obtenidas en laboratorio para la sub-base granular.

**Tabla 30**

*Resultados de Proctor modificado de la sub-base granular.*

Descripción	C-1	C-02	C-03
	06+200	06+580	06+800
Contenido de humedad óptima (%)	7,24	7,51	7,03
Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,045	2,054	2,063

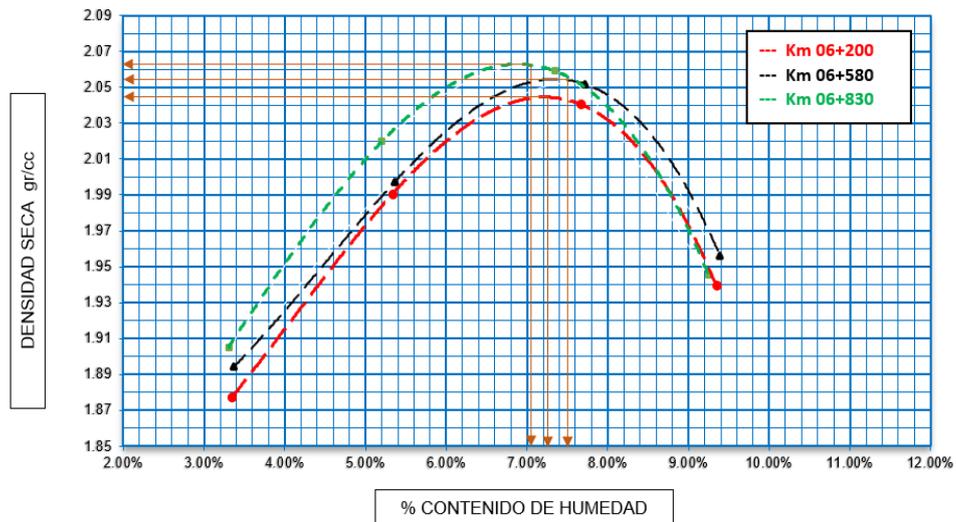


Figura 84. Proctor modificado de la sub-base granular C-01, C-02 y C-03.

En la tabla N°31 se muestra los resultados de las D.M.S. obtenidas en laboratorio para la subrasante.

**Tabla 31**

Resultados de Proctor modificado de la subrasante.

Descripción	C-1 06+200	C-02 06+580	C-03 06+800
Contenido de humedad óptima (%)	10,26	10,68	9,78
Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	1,984	1,962	1,972

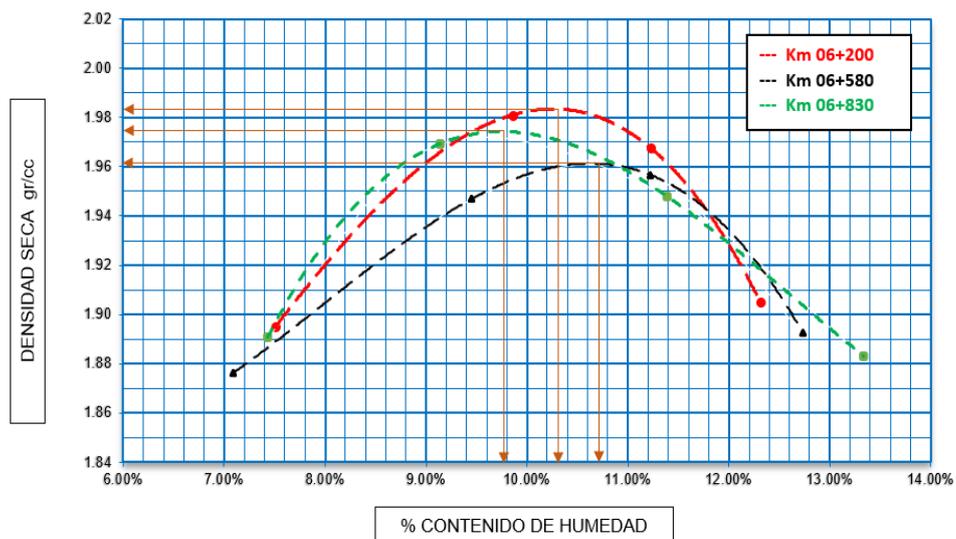


Figura 85. Proctor modificado de la subrasante C-01, C-02 y C-03.

#### 4.1.3.2. Índice de densidad máxima mediante mesa vibratoria.

##### A. Instrumentos.

En la figura N°86 se puede visualizar los instrumentos que se necesitará para poder realizar el ensayo de índice de densidad máxima mediante mesa vibratoria vertical.



Figura 86. Instrumentos para realizar el ensayo de mesa vibratoria.

- Mesa vibratoria vertical, cubierta vibratoria de acero de aproximadamente 750 x 750 mm, apoyada sobre amortiguadores y accionada por un vibrador electromagnético con una frecuencia de hasta 60 Hz (3600 vibraciones por minuto) y una amplitud de vibrado vertical entre 0,05 y 0,64 mm.

- Minicontrolador, equipo con capacidad máxima de 60 Hertz el cual servirá para regular la frecuencia de vibración de la mesa vibratoria.

- Molde metálico, con una capacidad de 14,20 litros, diámetro interior de 27,9 cm y altura interior de 22,9 cm.

- Tubo guía metálico, ajustables a cada tipo de molde, con un sistema consistente en tres juegos de tornillos, de los cuales dos deben de tener tuercas de fijación.

- Collarín guía, placa de acero de 12,5 mm de espesor el cual deberá ajustarse al molde metálico y servir como recipiente para la sobrecarga.

- Sobrecargas metálicas, una para cada tamaño de molde, 25,9 kg para el molde de 2,8 litros y 86,2 kg para el molde de 14,2 litros.

- Dial indicador, con precisión de 0,01 milímetros el cual servirá para tomar lecturas con precisión.

#### *B. Preparación de muestra.*

Presenta dos tipos de procedimientos para poder realizar el ensayo pudiendo ser en método seco y húmedo para poder obtener la densidad máxima, ambos procedimientos son válidos, sin embargo, se debe de tener en cuenta su aplicación y así definir el método a emplear. Frecuentemente se suele usar el método seco para obtener densidades máximas, pero se debe tomar en cuenta que mediante el método húmedo puede producir valores mayores esto dependiendo de las características del material a ensayar.

- Método 1A, consiste en utilizar suelos que son secados al horno y una mesa vibratoria electromagnética cuya vibración es vertical.

- Método 1B, consiste en utilizar suelos húmedos y una mesa vibratoria electromagnética cuya vibración es vertical.

A continuación, en la tabla N° 32 se visualiza la cantidad requerida de material que es necesario para poder realizar el ensayo de mesa vibratoria, asimismo esto depende mucho del tamaño máximo de la partícula de la muestra ya que en función a esta también podremos definir el tamaño del molde a trabajar.

**Tabla 32**

*Masa de muestra requerida, tamaño de molde según el T.M. de las partículas*

<b>Tamaño máximo de partículas de suelo mm – pulg.</b>	<b>Muestra requerida (kg)</b>	<b>Tamaño de molde a utilizar cm<sup>3</sup> – pie<sup>3</sup></b>
75,0 (3)	34	14 200 (0,50)
38,1 (1 ½)	34	14 200 (0,50)
19,0 (3/4)	11	2830 (0,10)
9,5 (3/8)	11	2830 (0,10)
4,75 (N°4) ó menos	11	2830 (0,10)

Fuente: ASTM International, 2006.

Para la presente investigación según análisis granulométrico se tienen partículas de 2 ½ pulg. hasta 3 pulg. por lo que, según tabla N° 33 se necesita una muestra representativa de aproximadamente 34 kg, molde a utilizar será el de 14,2 litros (14 200 cm<sup>3</sup>) y la sobrecarga que se empleará será el de 86,2 kg.

**Tabla 33**

*Efectos a considerar en la compactación mediante la mesa vibratoria.*

<b>Descripción</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Intervención</b>
<b>Molde (lt)</b>	14,20	Constante
<b>Sobrecarga (Kg)</b>	86,20	Constante
<b>Capas (Nro.)</b>	1,00	Constante
<b>Humedad (%)</b>	$x_{1,2,3,4}$	Variable
<b>Tiempo de vibración (min)</b>	$x_{1,2,3}$	Variable
<b>Frecuencia de vibración (Hz)</b>	$x_{1,2,3}$	Variable

La vibración según norma ASTM D4253, recomienda que se debe vibrar el molde y la muestra por un período de 8 min  $\pm$  1,4 min a 60 Hz o de 12 min  $\pm$  1,4 min a 50 Hz, para el presente trabajo uno de sus objetivos es estudiar cómo influye los efectos de humedad, tiempo y frecuencia de vibración para obtener la densidad máxima, por lo que se consideró la siguiente serie de ensayos:

**Tabla 34**

*Serie de ensayos a realizar para alcanzar la densidad máxima de compactación.*

Frecuencia (f= "x" Hz)		Tiempo (minutos)		
		6	8	10
	<b>Seco</b>	Dato 01	Dato 02	Dato 03
<b>% Contenido de humedad</b>	<b>Valor 1</b>	Dato 04	Dato 05	Dato 06
	<b>Valor 2</b>	Dato 07	Dato 08	Dato 09
	<b>Valor 3</b>	Dato 10	Dato 11	Dato 12

Donde el valor de la frecuencia "x" se alternará para valores de 40 Hz, 50 Hz y 60 Hz respectivamente, asimismo los valores de contenidos de humedad variarán respecto al tipo de material a ensayar, ya que tenemos diferentes materiales como base granular, sub base granular y subrasante cada uno con características diferentes.

*a. Método seco (IA).*

Después de obtener la muestra representativa se debe de secar la muestra al horno por 24 horas, una vez seco se debe mezclar para homogenizar las partículas.

Se procede a llenar el molde seleccionado con ayuda de un cucharón evitando la segregación del material al momento del vaciado, la colocación de la muestra debe ser en forma de espiral de tal manera que el molde sea llenado de manera uniforme, enrasar y limpiar los residuos. Una vez llenado y enrasado se

pesa el molde más el material y se coloca el molde en el tablero de la mesa vibratoria tratando de evitar movimientos bruscos o golpes que puedan asentar la muestra, se atornilla a la mesa firmemente.

Seguidamente se coloca la placa de la sobrecarga y se toma la lectura inicial con el dial de precisión 0,01 milímetros, se retira el dial y se coloca la sobrecarga el cual debe encajar exactamente en el diámetro del molde debiendo ser de manera firme y uniforme al contacto con la superficie del espécimen, luego se coloca el collarín guía y se ajusta firmemente con los tornillos sujetadores.

Se vibra a la frecuencia deseada para cada tiempo de vibración detallado según Tabla N° 34, una vez culminado se debe realizar la lectura, registrarlo y continuar con el siguiente tiempo de vibración, tomar lectura, registrarlo hasta que finalmente se retira el collarín guía y se procede a tomar nuevamente la lectura final después de la vibración el cual habrá producido un asentamiento.



*Figura 87.* Colocación de molde con muestra a la mesa y sobrecarga.



Figura 88. Toma de lectura inicial y después del vibrado.



Figura 89. Visualización del asentamiento de la muestra después de la vibración.

#### *b. Método húmedo (1B).*

Se debe secar al horno la muestra representativa por 24 horas después se deberá homogenizar y añadir la cantidad de agua en función al peso total del material según criterio del investigador para obtener los puntos necesarios que puedan permitir hallar la densidad máxima.

Se protege el material humedecido con la finalidad de no perder humedad, se coloca el material humedecido de manera cuidadosa sin segregar el material, se enrasa, elimina residuos y se registra su peso total de la muestra más molde.

Se adhiere el molde más la muestra a la mesa vibratoria, se fijan los tornillos, se coloca la sobrecarga, el collarín guía y el tubo guía, se toma la lectura inicial y se procede a realizar la vibración según frecuencia y tiempo establecida en la tabla N°34. una vez culminado se debe realizar la lectura, registrarlo y continuar con el siguiente tiempo de vibración, tomar lectura, registrarlo hasta que finalmente se retira el collarín guía y se procede a tomar nuevamente la lectura final después de la vibración el cual habrá producido un asentamiento.



Figura 90. Preparación de muestra y llenado de material al molde.



Figura 91. Vibración, toma de lectura y visualización del material asentado después del ensayo.

**c. Resultados.**

En ambos métodos de prueba para poder conocer la densidad máxima previamente se deberá calcular los siguientes datos:

- Peso de la muestra del suelo a ensayar.
- Volumen del molde
- Volumen del molde vacío producto del asentamiento por vibración y sus respectivas mediciones.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se deberá emplear la fórmula de densidad, la cual se describe a continuación:

$$\gamma = \frac{W_m}{V_m - V_v} \dots\dots\dots [Ecuación 17]$$

Donde,

$W_m$  = Peso de la muestra (g)

$V_m$  = Volumen del molde (cm<sup>3</sup>)

$V_v$  = Volumen de la parte asentada producido por la vibración. (cm<sup>3</sup>)

Una vez obtenidos los datos del laboratorio y aplicando dicha fórmula se podrá calcular la densidad máxima del suelo.

A continuación, se muestra las densidades máximas secas (D.M.S.) obtenidas en laboratorio mediante los ensayos, asimismo para poder estudiar la influencia de los efectos tales como la humedad, tiempo y frecuencia de vibración se ha realizado una serie de ensayos variando el contenido de humedad (0%, 5%, 8% y 11%), tiempos (6 min, 8 min y 10 min) y frecuencias (40 Hz, 50 Hz y 60 Hz) para cada muestra tomada en campo.

En la tabla N° 35 se puede observar los resultados de las densidades secas de la base granular obtenidas en laboratorio a distintas frecuencias, tiempos y porcentajes de humedad.

**Tabla 35**

*Resultados densidades secas (g/cm<sup>3</sup>) base granular, C-01, C-02 y C-03.*

		<b>C-01: Km 06+200</b>			<b>C-02: Km 06+580</b>			<b>C-03: Km 06+830</b>		
		<b>Tiempo (min)</b>			<b>Tiempo (min)</b>			<b>Tiempo (min)</b>		
		<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>f= 40 Hz</b>										
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>0,00%</b>	2,102	2,112	2,117	2,097	2,107	2,112	2,099	2,109	2,114
	<b>5,00%</b>	2,151	2,158	2,163	2,134	2,141	2,146	2,142	2,149	2,154
	<b>8,00%</b>	2,162	2,172	2,176	2,152	2,162	2,166	2,158	2,168	2,172
	<b>11,00%</b>	2,133	2,143	2,149	2,130	2,140	2,146	2,133	2,145	2,151
<b>f= 50 Hz</b>										
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>0,00%</b>	2,113	2,120	2,123	2,109	2,117	2,120	2,112	2,120	2,123
	<b>5,00%</b>	2,162	2,171	2,176	2,145	2,154	2,159	2,152	2,161	2,166
	<b>8,00%</b>	2,175	2,184	2,188	2,163	2,170	2,174	2,169	2,176	2,180
	<b>11,00%</b>	2,145	2,154	2,158	2,142	2,151	2,155	2,145	2,154	2,158
<b>f= 60 Hz</b>										
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>0,00%</b>	2,128	2,139	2,143	2,123	2,136	2,140	2,125	2,137	2,141
	<b>5,00%</b>	2,176	2,191	2,193	2,165	2,180	2,182	2,170	2,185	2,185
	<b>8,00%</b>	2,192	2,209	2,210	2,177	2,194	2,195	2,183	2,200	2,202
	<b>11,00%</b>	2,159	2,172	2,175	2,156	2,169	2,172	2,159	2,172	2,174

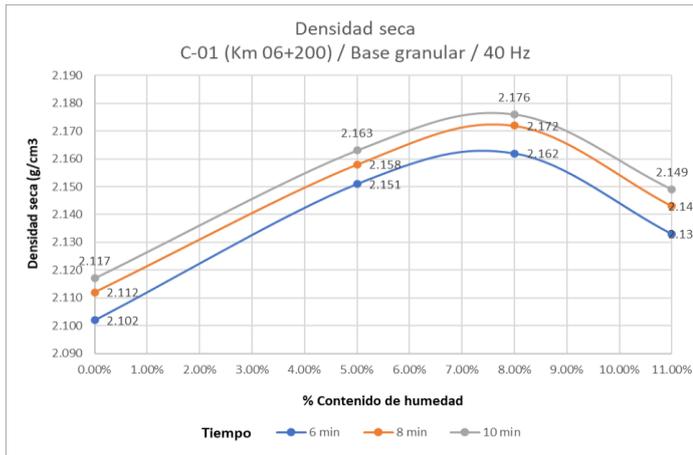


Figura 92. Densidades para la base granular Km 06+200 (f=40 Hz).

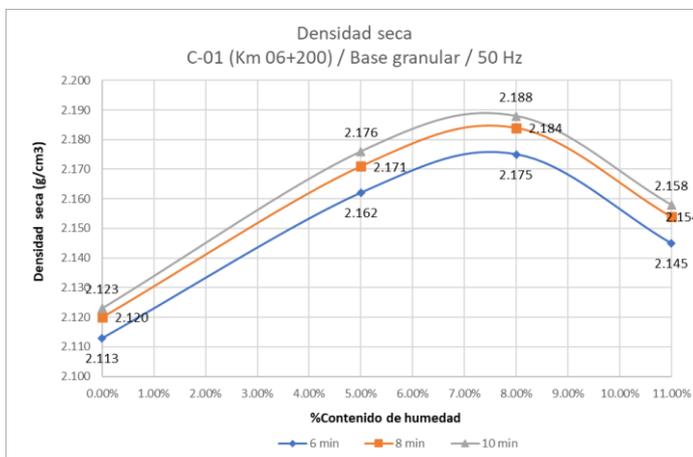


Figura 93. Densidades para la base granular Km 06+200 (f=50 Hz).

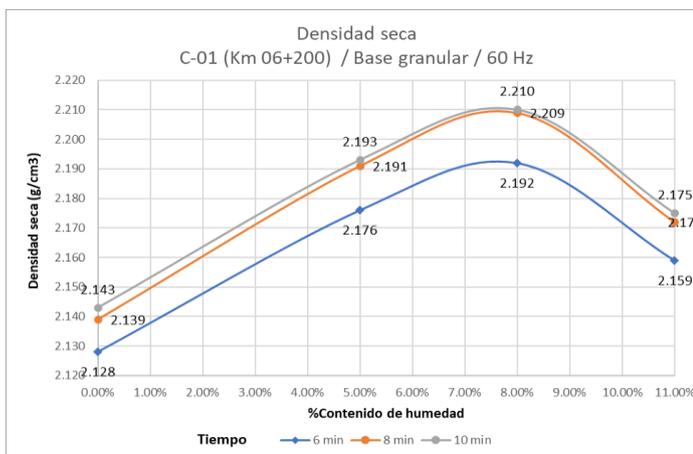


Figura 94. Densidades para la base granular Km 06+200 (f=60 Hz).

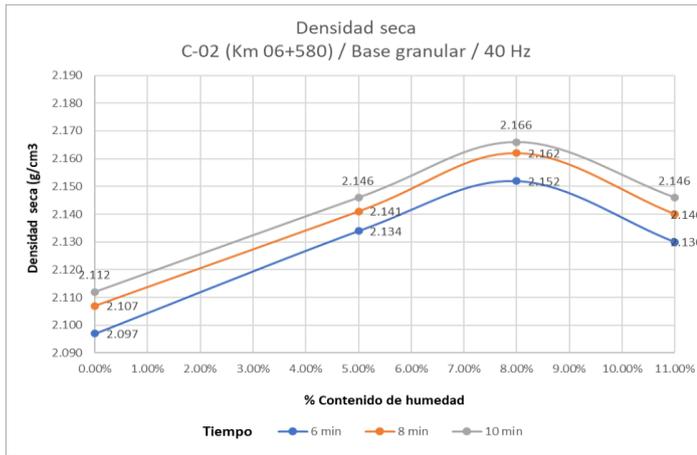


Figura 95. Densidades para la base granular Km 06+580 (f=40 Hz).

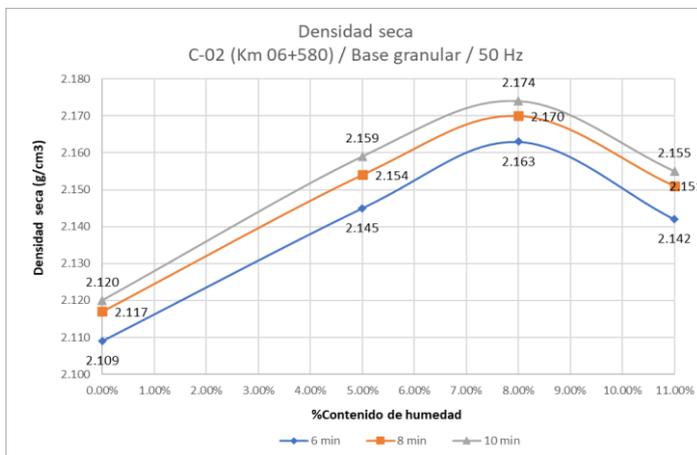


Figura 96. Densidades para la base granular Km 06+580 (f=50 Hz).

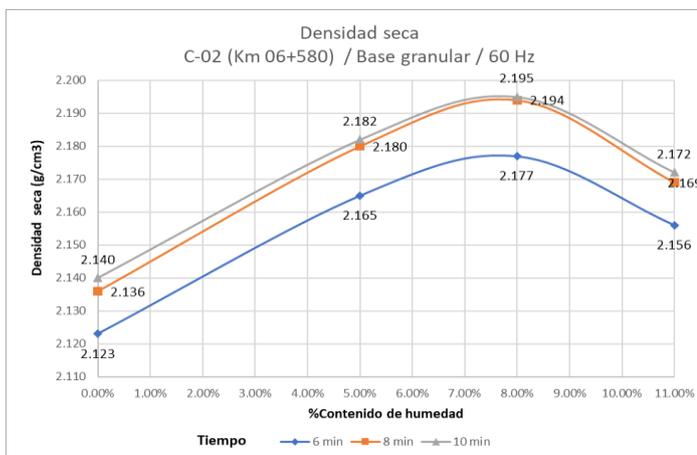


Figura 97. Densidades para la base granular Km 06+580 (f=60 Hz).

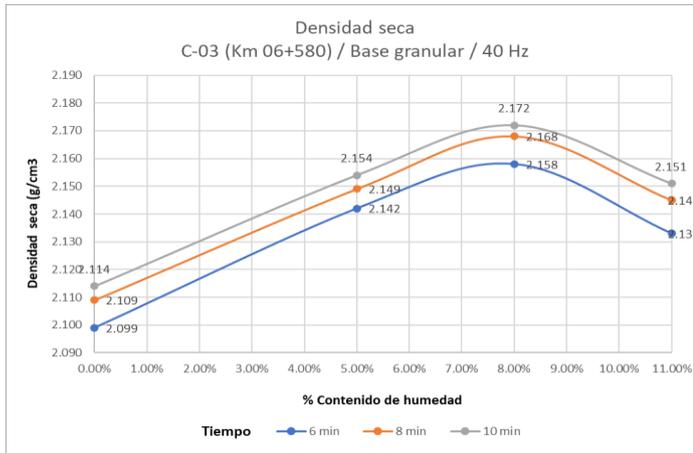


Figura 98. Densidades para la base granular Km 06+830 (f=40 Hz).

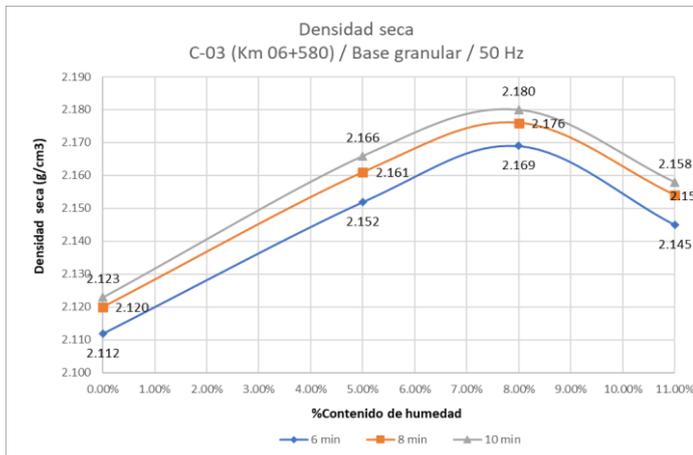


Figura 99. Densidades para la base granular Km 06+830 (f=50 Hz).

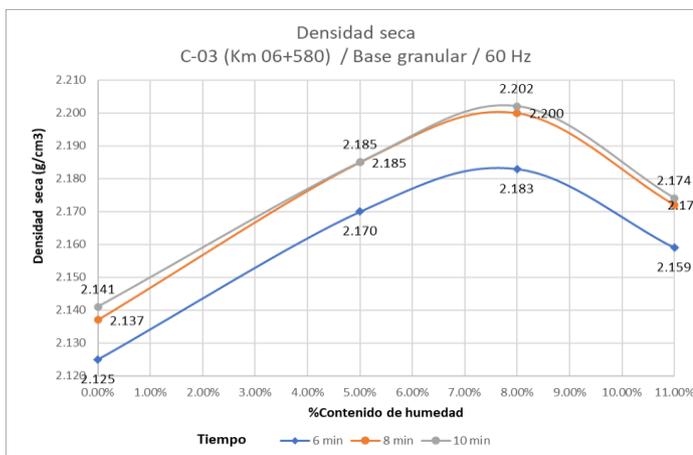


Figura 100. Densidades para la base granular Km 06+830 (f=60 Hz).

De los resultados anteriormente obtenidos en la tabla N° 35 se utilizará los valores máximos obtenidos en estado seco y húmedo de acuerdo a norma ASTM D4253, el cual detalla que para la obtención de la densidad máxima seca mediante el uso de la mesa vibratoria se tendrá que efectuar ambos métodos para analizar y definir correctamente el valor de la densidad máxima seca de la base granular.

**Tabla 36**

*Densidad máxima seca a nivel de base granular en estado seco.*

Calicata	Progresiva (Km)	Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	Frecuencia (Hz)	Tiempo (min)
C-01	06+200	2,139		
C-02	06+580	2,136	60	8
C-03	06+830	2,137		

**Tabla 37**

*Densidad máxima seca a nivel de base granular en estado húmedo.*

Calicata	Progresiva (Km)	Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)	Frecuencia (Hz)	Tiempo (min)
C-01	06+200	2,209	7,60		
C-02	06+580	2,194	7,80	60	8
C-03	06+830	2,200	7,70		

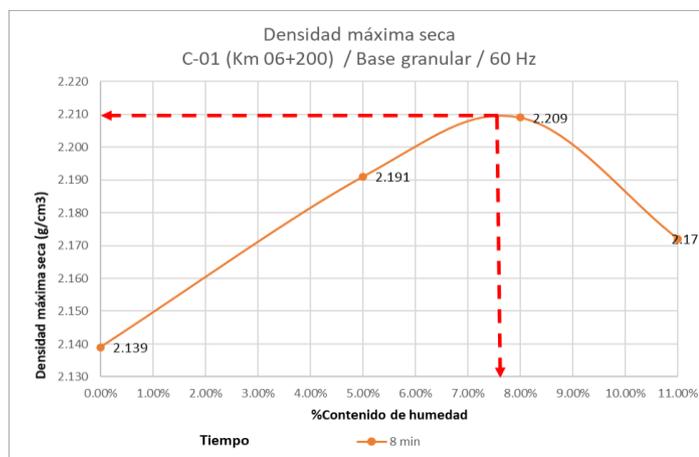


Figura 101. D.M.S. de la base granular Km 06+200.

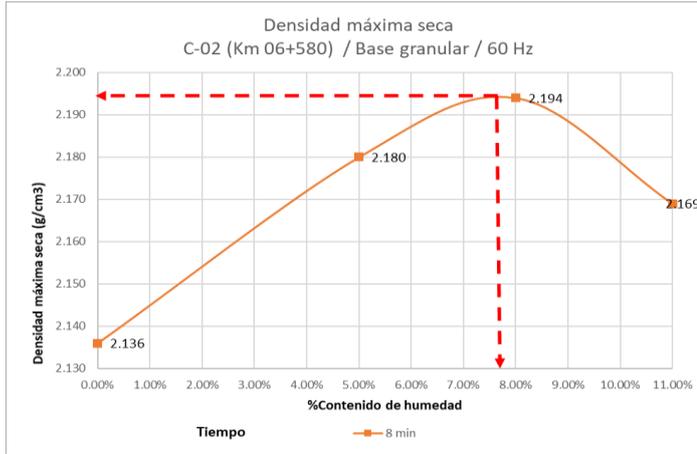


Figura 102. D.M.S. de la base granular Km 06+580.

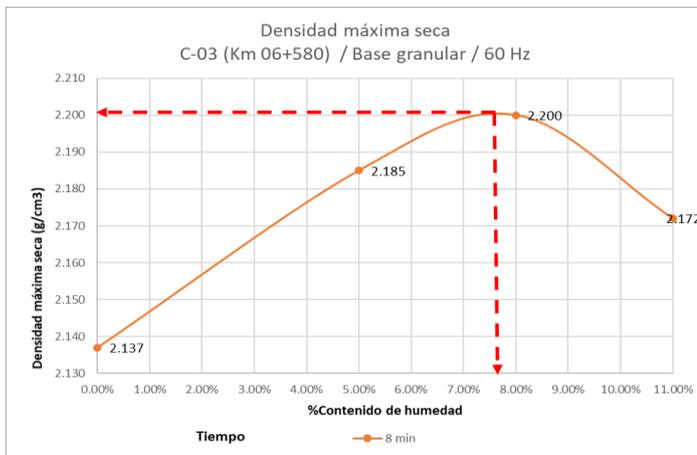


Figura 103. D.M.S. de la base granular Km 06+830.

En la tabla N° 38 se puede observar los resultados de las densidades secas de la sub-base granular obtenidas en laboratorio a distintas frecuencias, tiempos y porcentajes de humedad.

**Tabla 38**

*Resultados densidades secas (g/cm<sup>3</sup>) sub-base granular, C-01, C-02 y C-03.*

		<b>C-01: Km 06+200</b>			<b>C-02: Km 06+580</b>			<b>C-03: Km 06+830</b>		
		<b>Tiempo (min)</b>			<b>Tiempo (min)</b>			<b>Tiempo (min)</b>		
		<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>f= 40 Hz</b>	<b>0,00%</b>	2,037	2,047	2,053	2,042	2,052	2,058	2,072	2,085	2,091
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>4,00%</b>	2,078	2,085	2,089	2,083	2,092	2,098	2,111	2,120	2,126
	<b>7,00%</b>	2,113	2,123	2,127	2,129	2,139	2,0143	2,145	2,155	2,159
	<b>10,00%</b>	2,088	2,100	2,105	2,092	2,104	2,109	2,102	2,114	2,119
<b>f= 50 Hz</b>	<b>0,00%</b>	2,049	2,057	2,060	2,054	2,062	2,065	2,084	2,092	2,095
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>4,00%</b>	2,087	2,096	2,101	2,095	2,104	2,109	2,123	2,131	2,136
	<b>7,00%</b>	2,123	2,130	2,134	2,139	2,145	2,149	2,155	2,159	2,163
	<b>10,00%</b>	2,099	2,108	2,112	2,103	2,112	2,116	2,113	2,121	2,125
<b>f= 60 Hz</b>	<b>0,00%</b>	2,064	2,076	0,078	2,069	2,081	2,082	2,099	2,111	2,115
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>4,00%</b>	2,108	2,121	2,125	2,116	2,129	2,134	2,144	2,157	2,159
	<b>7,00%</b>	2,141	2,156	2,157	2,148	2,164	2,166	2,164	2,180	2,180
	<b>10,00%</b>	2,114	2,127	2,131	2,118	2,131	2,132	2,127	2,140	2,144

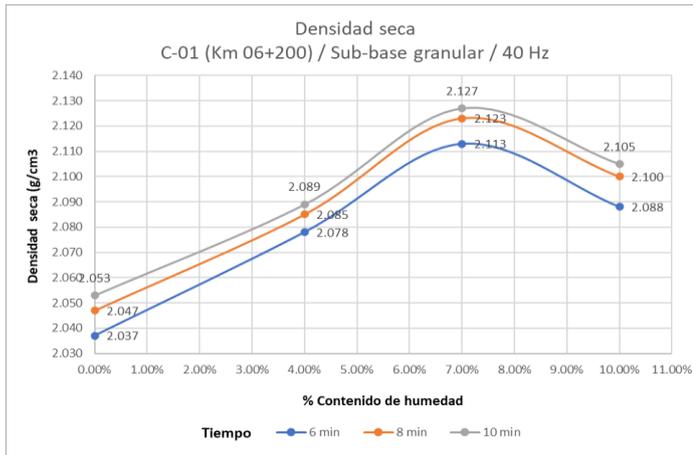


Figura 104. Densidades para la sub-base granular Km 06+200 (f=40 Hz).

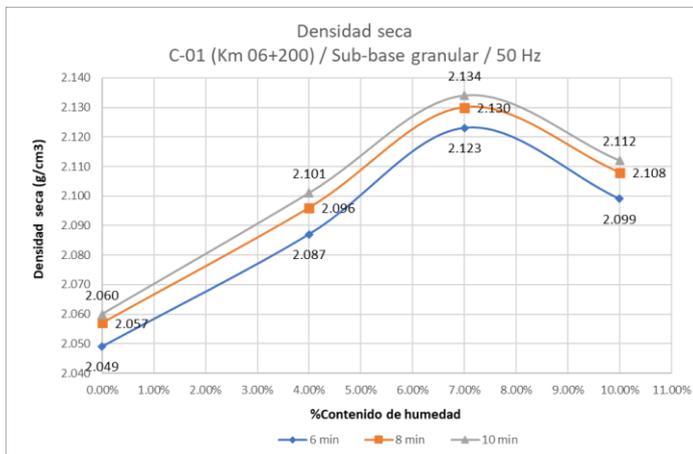


Figura 105. Densidades para la sub-base granular Km 06+200 (f=50 Hz).

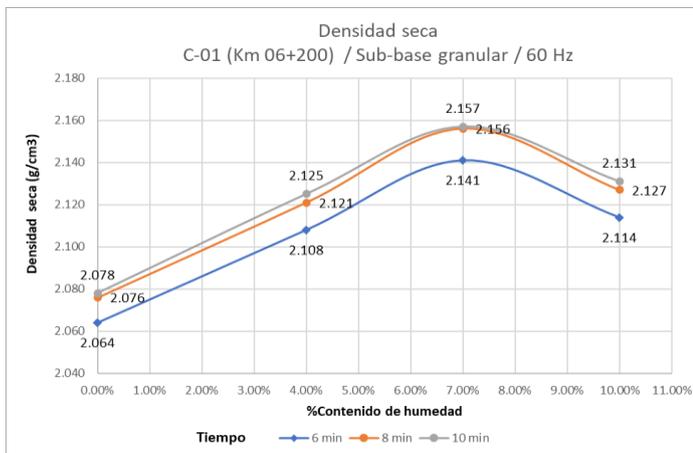


Figura 106. Densidades para la sub-base granular Km 06+200 (f=60 Hz).

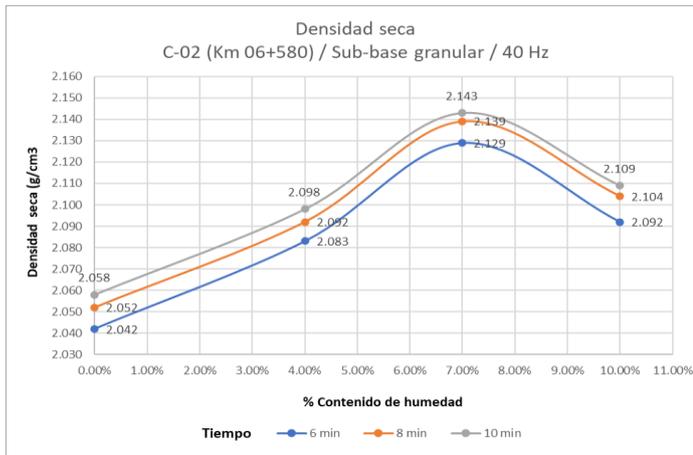


Figura 107. Densidades para la sub-base granular Km 06+580 (f=40 Hz).

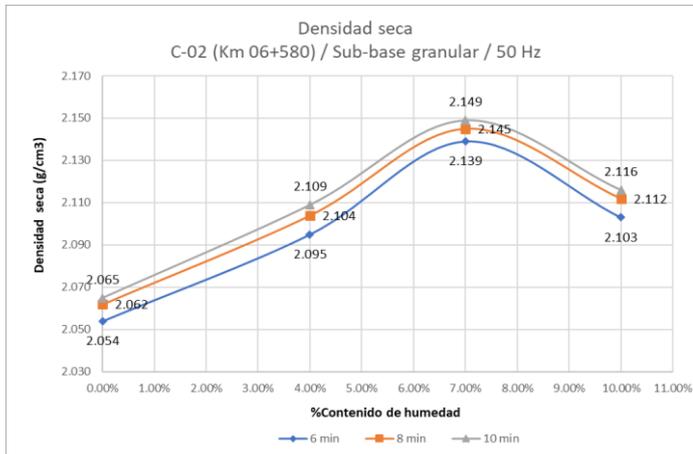


Figura 108. Densidades para la sub-base granular Km 06+580 (f=50 Hz).

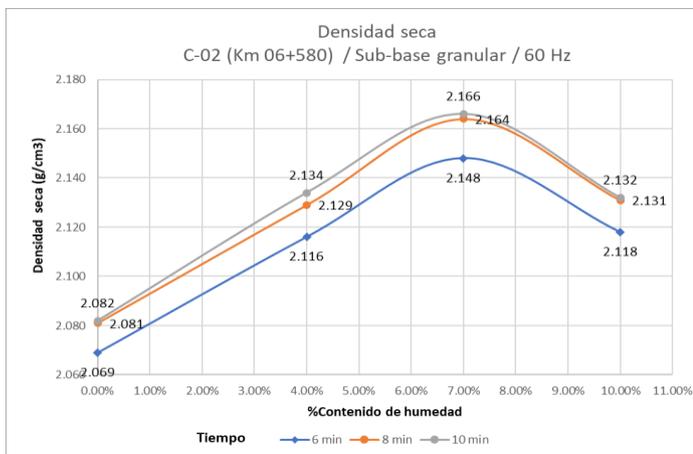


Figura 109. Densidades para la sub-base granular Km 06+580 (f=60 Hz).

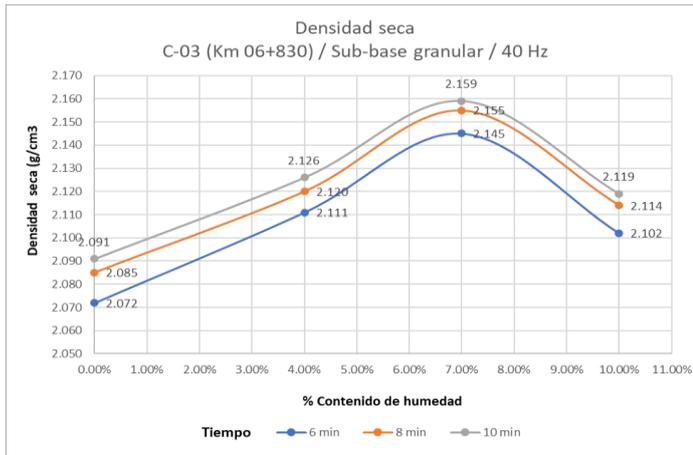


Figura 110. Densidades para la sub-base granular Km 06+830 (f=40 Hz).

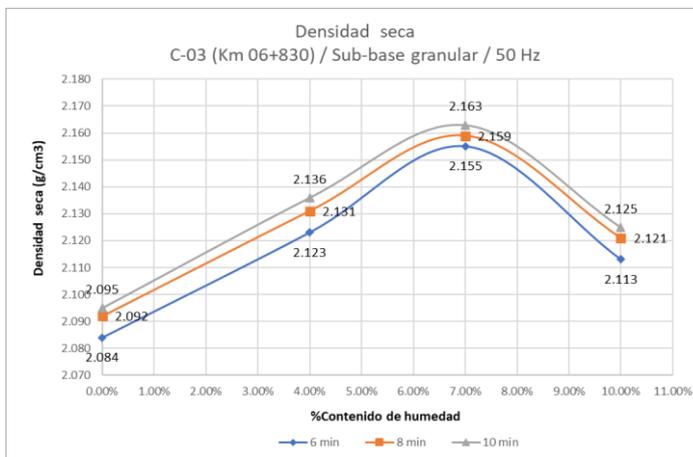


Figura 111. Densidades para la sub-base granular Km 06+830 (f=50 Hz).

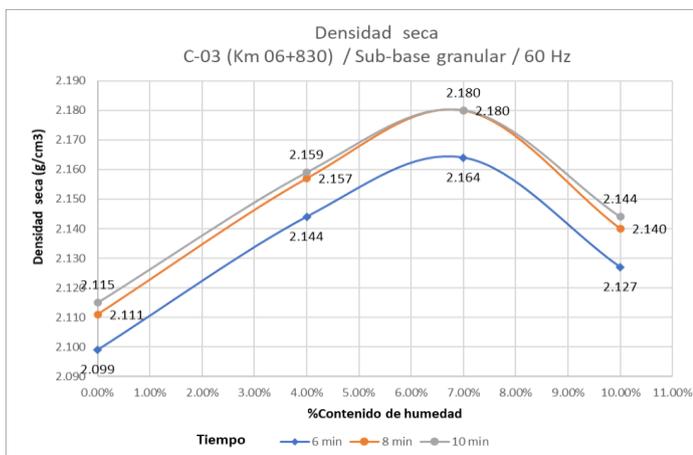


Figura 112. Densidades para la sub-base granular Km 06+830 (f=60 Hz).

De los resultados anteriormente obtenidos en la tabla N° 38 se utilizará los valores máximos obtenidos en estado seco y húmedo de acuerdo a norma ASTM D4253, el cual detalla que para la obtención de la densidad máxima seca mediante el uso de la mesa vibratoria se tendrá que efectuar ambos métodos para analizar y definir correctamente el valor de la densidad máxima seca de la sub-base granular.

**Tabla 39**

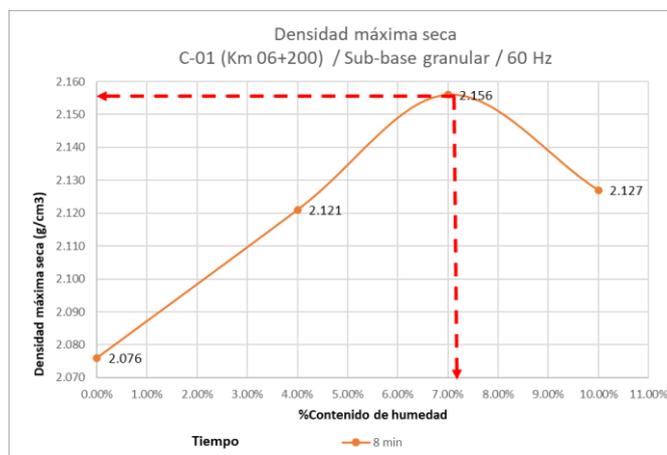
*Densidad máxima seca a nivel de sub-base granular en estado seco.*

Calicata	Progresiva (Km)	Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	Frecuencia (Hz)	Tiempo (min)
C-01	06+200	2,076		
C-02	06+580	2,081	60	8
C-03	06+830	2,111		

**Tabla 40**

*Densidad máxima seca a nivel de sub-base granular en estado húmedo.*

Calicata	Progresiva (Km)	Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)	Frecuencia (Hz)	Tiempo (min)
C-01	06+200	2,156	7,10		
C-02	06+580	2,164	7,00	60	8
C-03	06+830	2,180	6,80		



*Figura 113. D.M.S. de la base granular Km 06+200.*

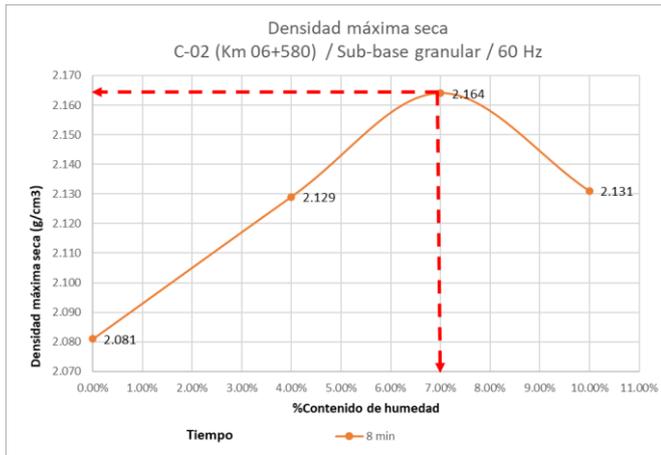


Figura 114. D.M.S. de la base granular Km 06+580.

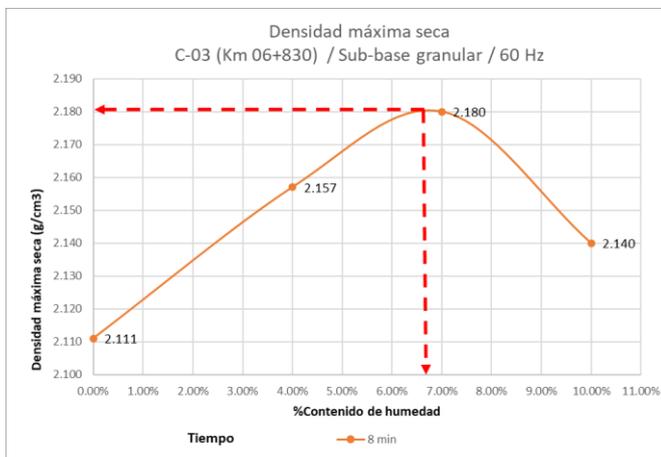


Figura 115. D.M.S. de la base granular Km 06+830.

En la tabla N° 41 se puede observar los resultados de las densidades secas de la subrasante obtenidas en laboratorio a distintas frecuencias, tiempos y porcentajes de humedad.

**Tabla 41**

*Resultados densidades secas (g/cm<sup>3</sup>) subrasante, C-01, C-02 y C-03.*

		<b>C-01: Km 06+200</b>			<b>C-02: Km 06+580</b>			<b>C-03: Km 06+830</b>		
		<b>Tiempo (min)</b>			<b>Tiempo (min)</b>			<b>Tiempo (min)</b>		
		<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>
<b>f= 40 Hz</b>										
	<b>0,00%</b>	1,834	1,847	1,851	1,818	1,831	1,835	1,831	1,844	1,848
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>7,00%</b>	1,940	1,949	1,953	1,921	1,930	1,934	1,929	1,935	1,939
	<b>10,00%</b>	1,975	1,985	1,987	1,957	1,967	1,969	1,966	1,976	1,978
	<b>13,00%</b>	1,910	1,922	1,925	1,891	1,903	1,906	1,902	1,914	1,917
<b>f= 50 Hz</b>										
	<b>0,00%</b>	1,846	1,854	1,856	1,832	1,840	1,842	1,845	1,853	1,855
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>7,00%</b>	1,952	1,960	1,962	1,933	1,941	1,943	1,942	1,950	1,952
	<b>10,00%</b>	1,985	1,991	1,994	1,966	1,972	1,975	1,977	1,983	1,986
	<b>13,00%</b>	1,921	1,929	1,931	1,902	1,910	1,912	1,913	1,921	1,923
<b>f= 60 Hz</b>										
	<b>0,00%</b>	1,859	1,873	1,875	1,849	1,860	1,862	1,857	1,869	1,870
<b>%Contenido de humedad</b>	<b>7,00%</b>	1,963	1,975	1,978	1,950	1,955	1,959	1,959	1,967	1,970
	<b>10,00%</b>	1,997	2,008	2,009	1,982	1,989	1,991	1,993	2,001	2,002
	<b>13,00%</b>	1,935	1,948	1,948	1,921	1,925	1,927	1,931	1,935	1,936

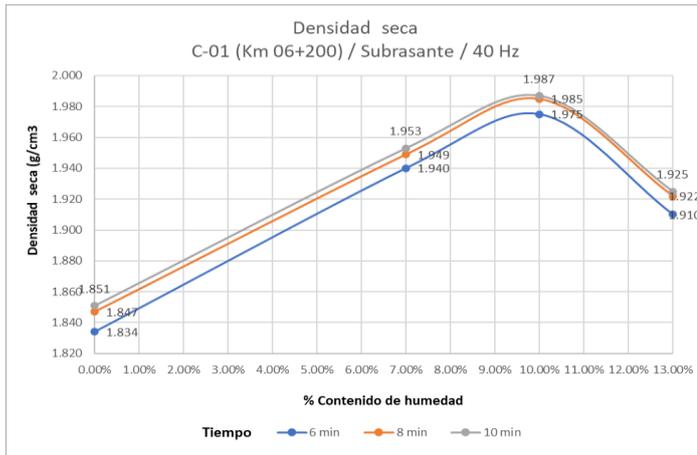


Figura 116. D.M.S. de la subrasante Km 06+200 (f=40 Hz).

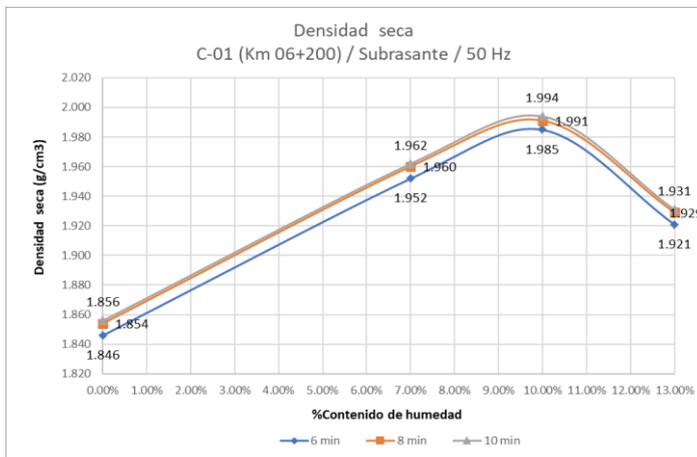


Figura 117. D.M.S. de la subrasante Km 06+200 (f=50 Hz).

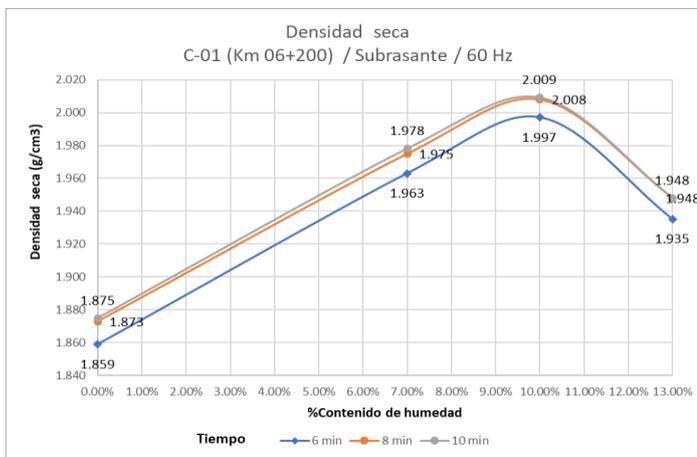


Figura 118. D.M.S. de la subrasante Km 06+200 (f=60 Hz).

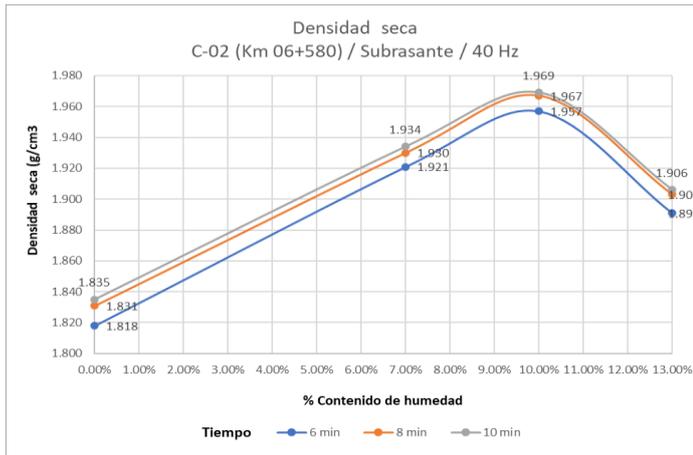


Figura 119. D.M.S. de la subrasante Km 06+580 (f=40 Hz).

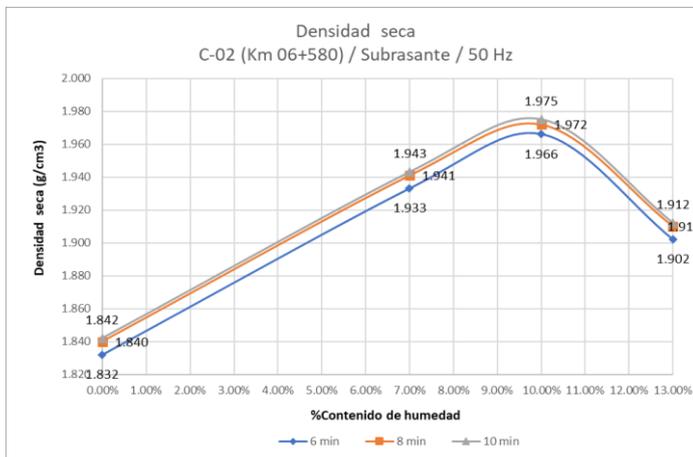


Figura 120. D.M.S. de la subrasante Km 06+580 (f=50 Hz).

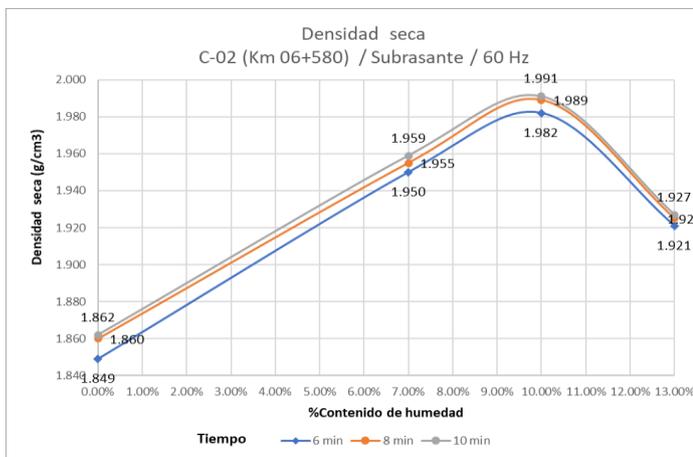


Figura 121. D.M.S. de la subrasante Km 06+580 (f=60 Hz).

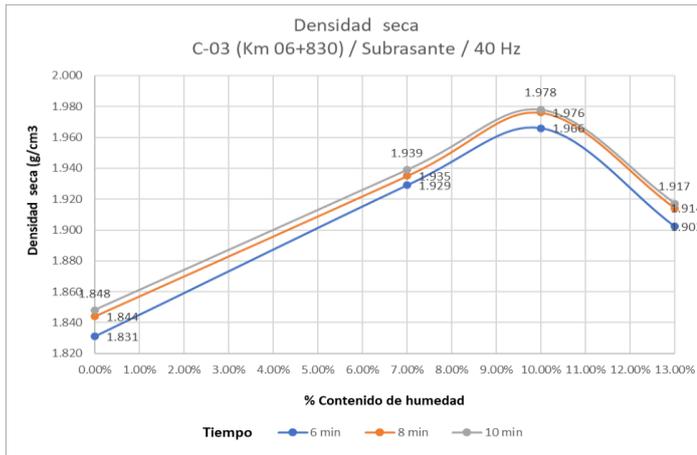


Figura 122. D.M.S. de la subrasante Km 06+830 ( $f=40$  Hz).

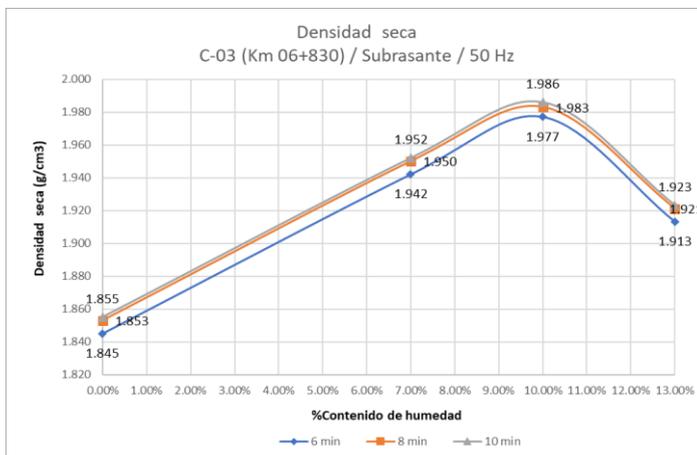


Figura 123. D.M.S. de la subrasante Km 06+830 ( $f=50$  Hz).

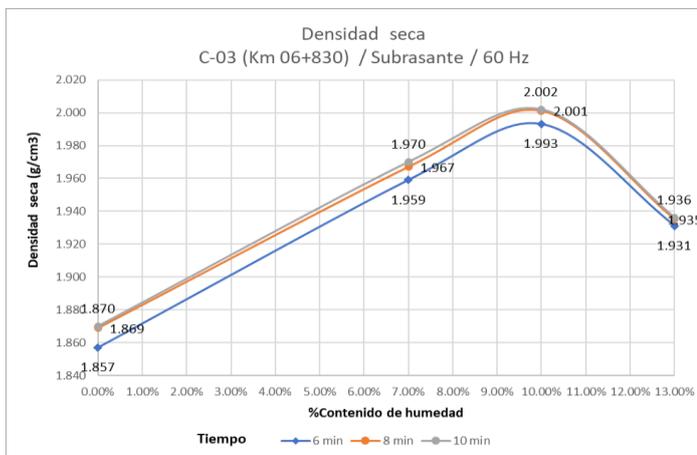


Figura 124. D.M.S. de la subrasante Km 06+830 ( $f=60$  Hz).

De los resultados anteriormente obtenidos en la tabla N° 41 se utilizará los valores máximos obtenidos en estado seco y húmedo de acuerdo a norma ASTM D4253, el cual detalla que para la obtención de la densidad máxima seca mediante el uso de la mesa vibratoria se tendrá que efectuar ambos métodos para analizar y definir correctamente el valor de la densidad máxima seca de la subrasante.

**Tabla 42**

*Densidad máxima seca a nivel de subrasante en estado seco.*

Calicata	Progresiva (Km)	Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	Frecuencia (Hz)	Tiempo (min)
C-01	06+200	1,873		
C-02	06+580	1,860	60	8
C-03	06+830	1,869		

**Tabla 43**

*Densidad máxima seca a nivel de subrasante en estado húmedo.*

Calicata	Progresiva (Km)	Densidad máxima seca (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad (%)	Frecuencia (Hz)	Tiempo (min)
C-01	06+200	2,008	9,80		
C-02	06+580	1,989	9,80	60	8
C-03	06+830	2,001	9,70		

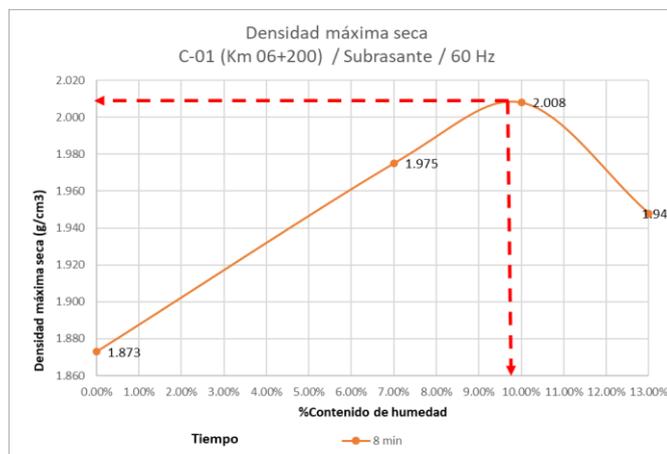


Figura 125. D.M.S. de la subrasante Km 06+200 (f=60 Hz).

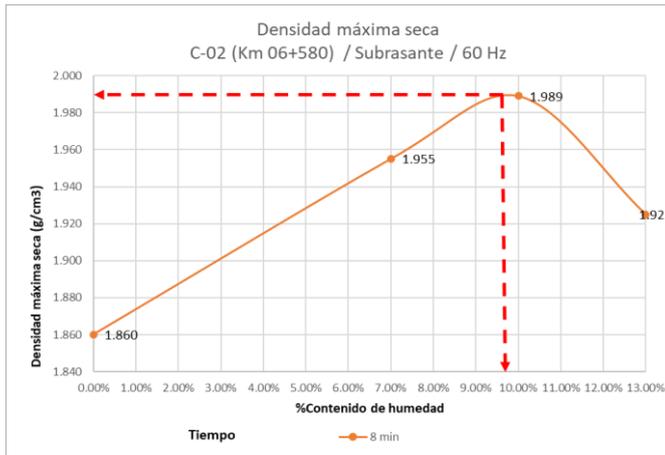


Figura 126. D.M.S. de la subrasante Km 06+580 ( $f=60$  Hz).

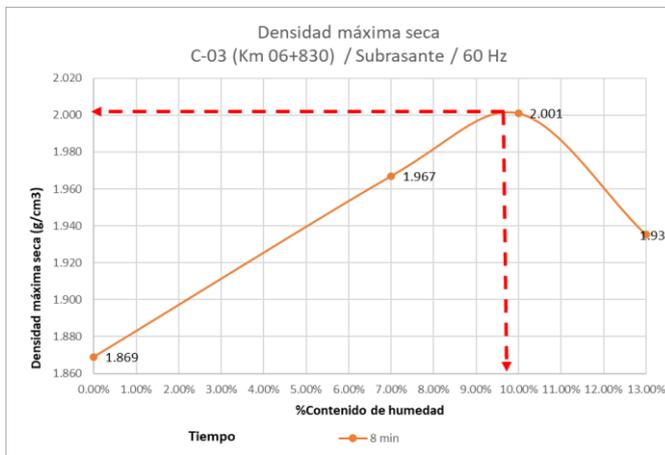


Figura 127. D.M.S. de la subrasante Km 06+830 ( $f=60$  Hz).

## 4.2. Contrastación de hipótesis

Para realizar la contrastación de hipótesis del presente trabajo de investigación se empleará el programa estadístico IBM SPSS Statistics v.25

### 4.2.1. Hipótesis general.

La aplicación y uso de mesa vibratoria en pavimentos permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento.

#### **4.2.1.1. Formulación de hipótesis.**

$H_0$ : La aplicación y uso de mesa vibratoria en pavimentos no permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento.

$H_a$ : La aplicación y uso de mesa vibratoria en pavimentos permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento.

#### **4.2.1.2. Estadístico prueba y toma de decisión.**

El estadístico prueba utilizada para el presente trabajo de investigación es mediante el T-Student en el cual se planteó la hipótesis estadística al 5% de error para cada capa estructural analizada.

Regla para poder tomar una decisión:

- Si Sig. < 0,05 Se rechaza la hipótesis nula.
- Si Sig. > 0,05 No se rechaza la hipótesis nula.

El estadístico prueba se analizará para cada capa estructural que está conformada el pavimento, siendo la base granular, sub-base granular y subrasante.

**Tabla 44**

*Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la base granular.*

<b>Etiqueta</b>	<b>Método</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Media de error estándar</b>
Densidad	Húmedo	3	2,2010	0,0075	0,0043
máxima seca	Seco	3	2,1373	0,0015	0,0008

**Tabla 45***Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la base granular*

Prueba de Levene de calidad de varianzas		F		3,610
		Sig.		0,130
		t		14,316
		gl		4
Se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)		0,0001
		Diferencia de medias		0,0636
		Diferencia de error estándar		0,0044
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	0,0513
			Superior	0,7601
<b>Categorías</b>		t		14,316
		gl		2,163
No se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)		0,0034
		Diferencia de medias		0,0636
		Diferencia de error estándar		0,0044
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	0,0458
			Superior	0,0814

Se puede observar que la prueba F de Levene para homogeneidad de varianzas es  $F=3,610$ ,  $p > 0,05$  por lo que se asumen varianzas iguales.

Al obtenerse un valor P (Sig.) de 0,0001 y a la vez siendo menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, a un nivel de significancia de 0,05 la aplicación y uso de mesa vibratoria en pavimentos permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de la base granular.

**Tabla 46***Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la sub-base granular.*

Etiqueta	Método	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Densidad máxima seca	Húmedo	3	2,1667	0,0122	0,0070
	Seco	3	2,0893	0,0189	0,0109

**Tabla 47***Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la sub-base granular*

Prueba de Levene de calidad de varianzas		F	1,215		
		Sig.	0,332		
<b>Categorías</b>		t	5,945		
		gl	4		
		Se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)	0,0040
				Diferencia de medias	0,0773
				Diferencia de error estándar	0,0130
				95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior 0,0412
					Superior 0,1134
				t	5,945
				gl	3,420
		No se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)	0,0065
		Diferencia de medias	0,0773		
		Diferencia de error estándar	0,0130		
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior 0,0386		
			Superior 0,1159		

Se puede observar que la prueba F de Levene para homogeneidad de varianzas es  $F=1,215$ ,  $p > 0,05$  por lo que se asumen varianzas iguales.

Al obtenerse un valor P (Sig.) de 0,004 y a la vez siendo menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, a un nivel de significancia de 0,05 la aplicación y uso de mesa vibratoria en pavimentos permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de la sub-base granular.

**Tabla 48***Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la subrasante.*

Etiqueta	Método	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Densidad máxima seca	Húmedo	3	1,9993	0,0096	0,0055
	Seco	3	1,8690	0,0655	0,0037

**Tabla 49***Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar D.M.S. de la subrasante.*

Prueba de Levene de calidad de varianzas		F		0,471
		Sig.		0,530
		t		19,405
		gl		4
Se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)		0,000
		Diferencia de medias		0,1303
		Diferencia de error estándar		0,0067
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	0,1116
			Superior	0,1489
<b>Categorías</b>		t		19,405
		gl		3,531
No se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)		0,000
		Diferencia de medias		0,1303
		Diferencia de error estándar		0,0067
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	0,1106
			Superior	0,1500

Se puede observar que la prueba F de Levene para homogeneidad de varianzas es  $F=0,471$ ,  $p > 0,05$  por lo que se asumen varianzas iguales.

Al obtenerse un valor P (Sig.) de 0,000 y a la vez siendo menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, a un nivel de significancia de 0,05 la aplicación y uso de mesa vibratoria en pavimentos permitirá analizar y medir correctamente la densidad máxima seca de la subrasante.

#### **4.2.2. Hipótesis específicas.**

##### **4.2.2.1. Hipótesis específica 01.**

Los efectos de humedad, frecuencia y tiempo de vibración influyen en la densidad máxima seca mediante la aplicación y uso de mesa vibratoria en las capas estructurales del pavimento.

a. *Formulación de hipótesis.*

$H_0$ : Los efectos de humedad, frecuencia y tiempo de vibración no influyen en la densidad máxima seca mediante la aplicación y uso de mesa vibratoria en las capas estructurales del pavimento.

$H_a$ : Los efectos de humedad, frecuencia y tiempo de vibración influyen en la densidad máxima seca mediante la aplicación y uso de mesa vibratoria en las capas estructurales del pavimento.

b. *Estadístico prueba y toma de decisión.*

Se analizará la influencia de los efectos antes mencionados mediante gráficos, según figuras N° 128, 129 y 130 para la base granular se tiene lo siguiente:

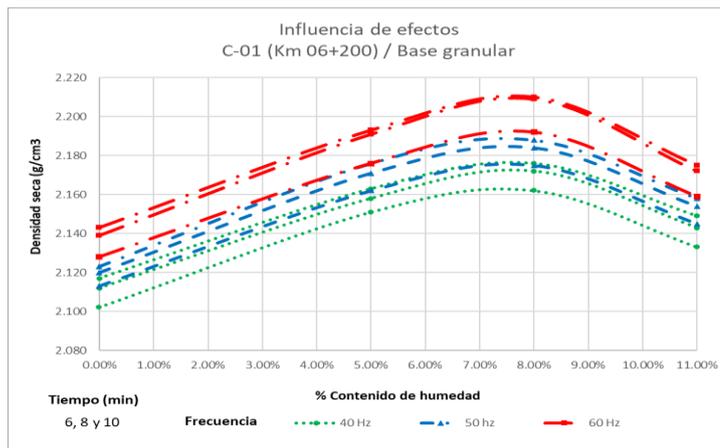


Figura 128. Influencia de efectos - base granular Km 06+200.

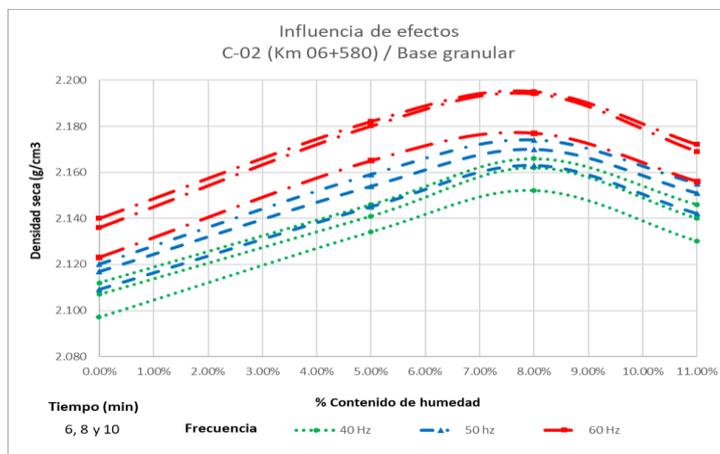


Figura 129. Influencia de efectos - base granular Km 06+580.

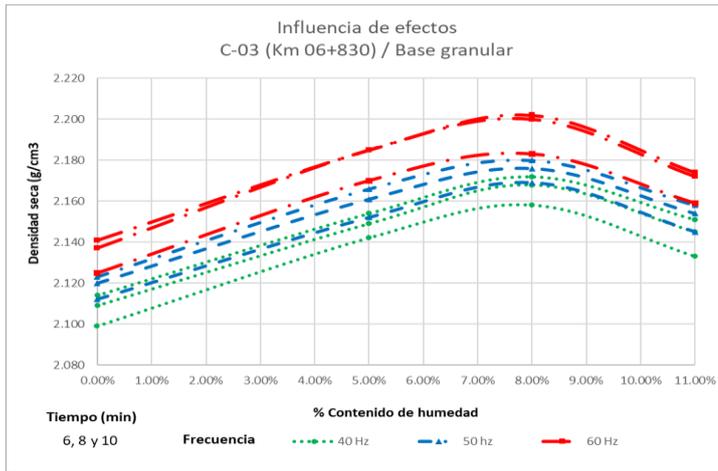


Figura 130. Influencia de efectos - base granular Km 06+830.

Según figuras N° 131, 132 y 133 para la sub-base granular se tiene lo siguiente:

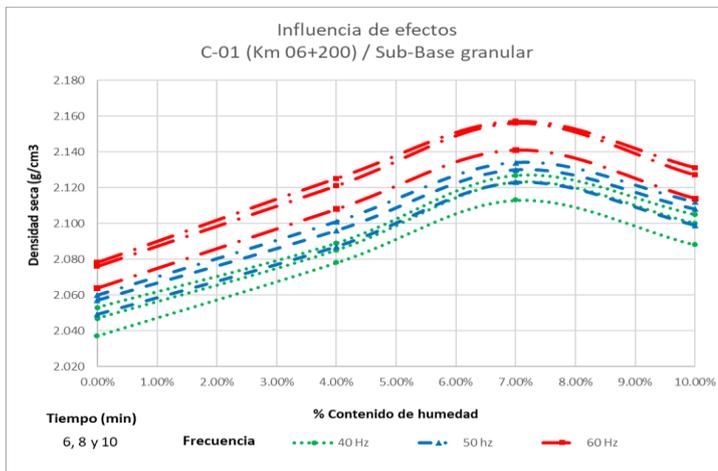


Figura 131. Influencia de efectos - subbase granular Km 06+200.

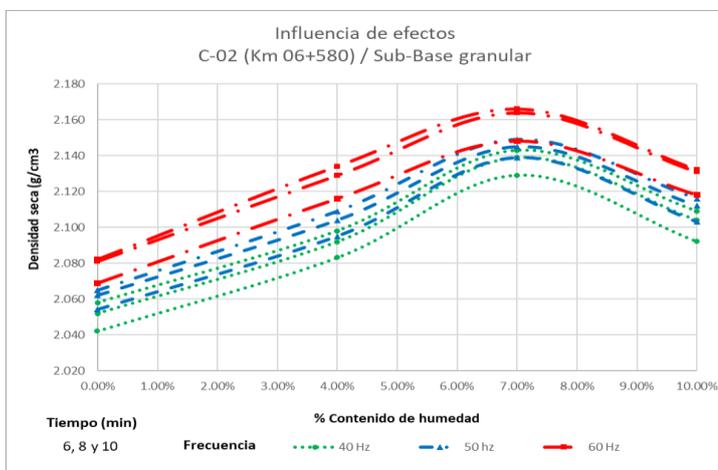


Figura 132. Influencia de efectos - subbase granular Km 06+580.

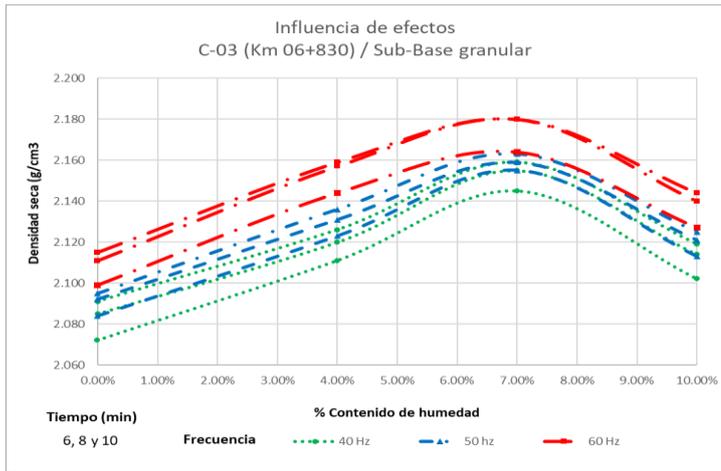


Figura 133. Influencia de efectos - subbase granular Km 06+830.

Según figuras N° 134, 135 y 136 para la subrasante se tiene lo siguiente:

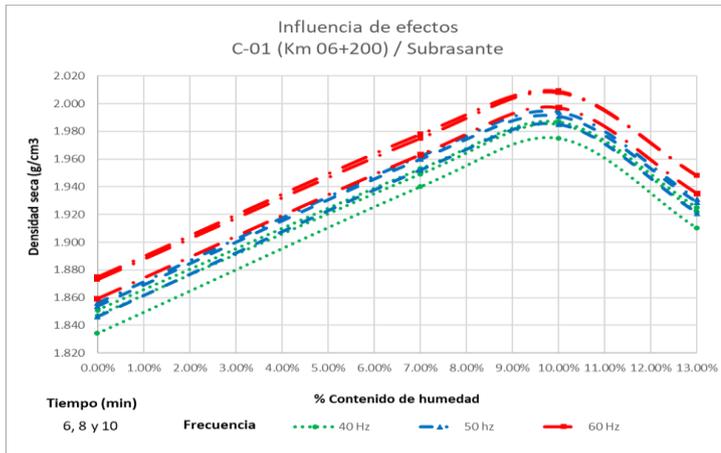


Figura 134. Influencia de efectos - subrasante Km 06+200.

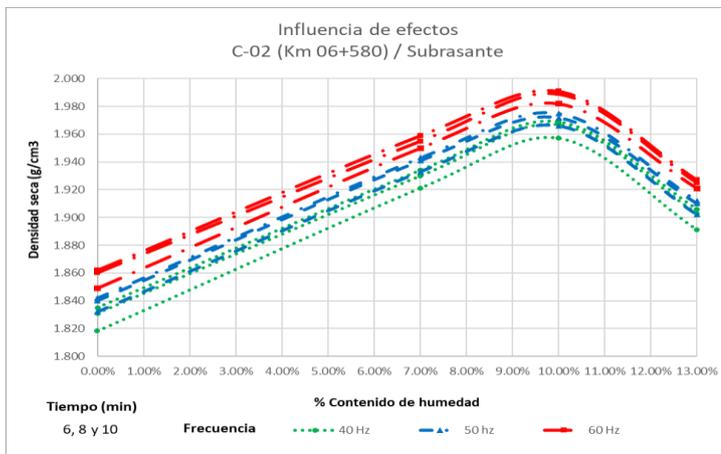


Figura 135. Influencia de efectos - subrasante Km 06+580.

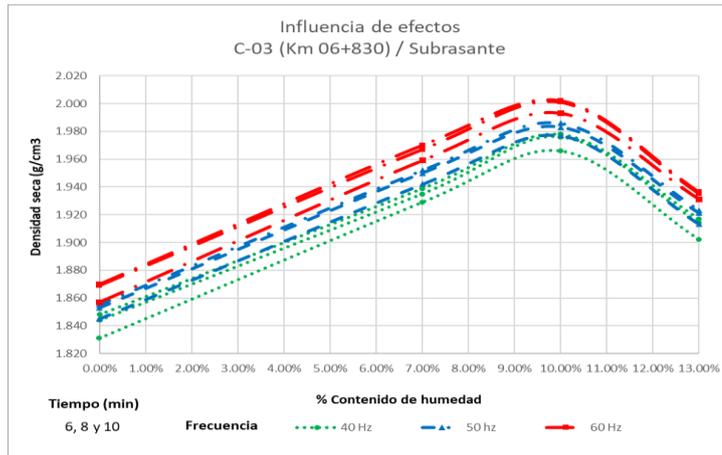


Figura 136. Influencia de efectos - subrasante Km 06+830.

Se puede observar que los efectos de humedad, tiempo y frecuencia de vibración si influyen para la obtención de la D.M.S. en las tres capas estructurales.

#### 4.2.2.2. Hipótesis específica 02.

La aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima de la base granular del pavimento tendrá mayor influencia con respecto a la metodología de compactación tradicional.

##### a. Formulación de hipótesis.

$H_0$ : La aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima de la base granular del pavimento no tendrá mayor influencia con respecto a la metodología de compactación tradicional.

$H_a$ : La aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima de la base granular del pavimento tendrá mayor influencia con respecto a la metodología de compactación tradicional.

##### b. Estadístico prueba y toma de decisión.

El estadístico prueba utilizada para el presente trabajo de investigación es mediante el T-Student en el cual se planteó la hipótesis estadística al 5% de error para cada capa estructural analizada.

Regla para poder tomar una decisión:

- Si Sig. < 0,05 Se rechaza la hipótesis nula.

- Si Sig. > 0,05 No se rechaza la hipótesis nula.

**Tabla 50**

*Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para base granular.*

Etiqueta	Método de compactación	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Densidad máxima seca	Mesa vibratoria	3	2,2010	0,0075	0,0043
	Proctor modificado	3	2,0953	0,0041	0,0024

**Tabla 51**

*Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para base granular.*

Prueba de Levene de calidad de varianzas		F	0,864		
		Sig.	0,405		
		t	21,228		
		gl	4		
Se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)	0,0002		
		Diferencia de medias	0,1056		
		Diferencia de error estándar	0,0049		
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	0,0918	
			Superior	0,1194	
		<b>Categorías</b>		t	21,228
				gl	3,113
No se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)	0,0001		
		Diferencia de medias	0,1056		
		Diferencia de error estándar	0,0049		
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	0,0901	
			Superior	0,1211	

Se puede observar que la prueba F de Levene para homogeneidad de varianzas es  $F=0,864$ ,  $p > 0,05$  por lo que se asumen varianzas iguales.

Al obtenerse un valor P (Sig.) de 0,0002 y a la vez siendo menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, a un nivel de

significancia de 0,05 la aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima de la base granula del pavimento tendrá mayor influencia con respecto a la metodología de compactación tradicional.

**Tabla 52**

*Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para sub-base granular.*

Etiqueta	Método de compactación	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Densidad máxima seca	Mesa vibratoria	3	2,1666	0,0122	0,0070
	Proctor modificado	3	2,0540	0,0090	0,0051

**Tabla 53**

*Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para sub-base granular.*

Prueba de Levene de calidad de varianzas		F	0,433
		Sig.	0,546
		t	12,858
		gl	4
Se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)	0,0002
		Diferencia de medias	0,1126
		Diferencia de error estándar	0,0876
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior 0,0883
			Superior 01369
Categorías	No se asumen varianzas iguales	t	12,858
		gl	3,676
		Sig. (bilateral)	0,0003
		Diferencia de medias	0,1126
		Diferencia de error estándar	0,0876
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior 0,8747
	Superior 0,1378		

Se puede observar que la prueba F de Levene para homogeneidad de varianzas es  $F=0,433$ ,  $p > 0,05$  por lo que se asumen varianzas iguales.

Al obtenerse un valor P (Sig.) de 0,0002 y a la vez siendo menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, a un nivel de significancia de 0,05 la aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima

de la sub-base granular del pavimento tendrá mayor influencia con respecto a la metodología de compactación tradicional.

**Tabla 54**

*Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para subrasante.*

Etiqueta	Método de compactación	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Densidad máxima seca	Mesa vibratoria	3	1,9993	0,0096	0,0055
	Proctor modificado	3	1,9733	0,0120	0,0069

**Tabla 55**

*Estadística descriptiva de hipótesis específica 02 para subrasante.*

Prueba de Levene de calidad de varianzas		F	0,122		
		Sig.	0,745		
		t	2,921		
		gl	4		
Se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)	0,043		
		Diferencia de medias	0,0260		
		Diferencia de error estándar	0,0089		
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior 0,0012		
			Superior 0,0507		
		<b>Categorías</b>		t	2,921
				gl	3,811
No se asumen varianzas iguales	Prueba T para la igualdad de medias	Sig. (bilateral)	0,046		
		Diferencia de medias	0,0260		
		Diferencia de error estándar	0,0089		
		95% de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior 0,0007		
			Superior 0,0512		

Se puede observar que la prueba F de Levene para homogeneidad de varianzas es  $F=0,122$ ,  $p > 0,05$  por lo que se asumen varianzas iguales.

Al obtenerse un valor P (Sig.) de 0,043 y a la vez siendo menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir, a un nivel de

significancia de 0,05 la aplicación y uso de mesa vibratoria en la densidad máxima de la subrasante del pavimento tendrá mayor influencia con respecto a la metodología de compactación tradicional.

#### **4.3. Discusión de resultados**

En cuanto al análisis realizado para la obtención de la densidad máxima seca mediante la mesa vibratoria se tuvo que realizar una serie de ensayos y toma de lecturas, verificar si los resultados podían responder a los problemas planteados en el capítulo I de este trabajo de investigación y corroborar al mismo tiempo con las investigaciones de otros autores.

Respecto a la hipótesis general planteada en el ítem 1,7,1. podemos observar en las tablas N° 56, 57 y 58 que mediante la aplicación y uso de mesa vibratoria para la obtención de la densidad máxima seca de las capas estructurales del pavimento; base granular (figura N°101, 102 y 103), sub-base granular (figura N°113, 114 y 115) y subrasante (figura N° 125, 126 y 127) se obtienen resultados favorables en método 1B (húmedo), ya que se utilizó la metodología correcta para el tipo de suelo dado a excepción de la subrasante ya que según norma ASTM D4253 señala dicho método es aplicable para suelos granulares no cohesivos, libre drenaje que pueden contener hasta un 15% de finos y con partículas de TM 3”, asimismo la Nch1726 señala que pueden aplicarse a suelos que tengan un IP igual o menor que cinco, dicho esto se puede observar que la subrasante en teoría no cumple con los parámetros dados no obstante con fines de investigación y de poder hacer un análisis completo de toda la estructura del pavimento es que se consideró dicha capa estructural para la presente tesis, asimismo se puede observar que a pesar de no cumplir con las condiciones dadas para la aplicación de la mesa vibratoria se

obtuvo densidades secas mayores a la del Proctor modificado, sin embargo, durante el proceso de ensayo en la mesa vibratoria al ser un suelo cohesivo con baja plasticidad se produce un acolchonamiento elástico con a medida que se va aumentado la humedad y presenta mayor deformación a comparación de los suelos granulares, por lo que el método de compactación vibratoria no es recomendable usarlo en este tipo de suelos.

**Tabla 56**

*Variación porcentual en la D.M.S. para la base granular.*

N° Calicata	Progresiva	Mesa vibratoria Método 1A (g/cm <sup>3</sup> )	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Variación porcentual (%)
C-01	06+200	2,139	2,209	3,169
C-02	06+580	2,136	2,194	2,644
C-03	06+830	2,137	2,200	2,864

**Tabla 57**

*Variación porcentual en la D.M.S. para la sub-base granular.*

N° Calicata	Progresiva	Mesa vibratoria Método 1A (g/cm <sup>3</sup> )	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Variación porcentual (%)
C-01	06+200	2,076	2,156	3,711
C-02	06+580	2,081	2,164	3,835
C-03	06+830	2,111	2,180	3,165

**Tabla 58**

*Variación porcentual en la D.M.S. para la subrasante.*

N° Calicata	Progresiva	Mesa vibratoria Método 1A (g/cm <sup>3</sup> )	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Variación porcentual (%)
C-01	06+200	1,875	2,008	6,624
C-02	06+580	1,862	1,989	6,385
C-03	06+830	1,870	2,001	6,547

De los resultados también presentados en los ítems 4.1 y 4.2, responden a los problemas específicos planteados en el capítulo I y según las hipótesis específicas dadas se tiene lo siguiente:

Respecto a la hipótesis específica uno dada en ítem 4.2.2.1. sobre la influencia de los efectos de humedad, tiempo y frecuencia de vibración para la obtención de la densidad máxima seca en las capas estructurales del pavimento se puede visualizar que para la base granular (figura N° 128, 129 y 130), sub base granular (figura N° 131, 132 y 133) y subrasante (figura N° 134, 135 y 136) que fueron analizados mediante una serie de ensayos en el cual se verifica que a medida que se aumenta la humedad, frecuencia y tiempo de vibración, la densidad seca aumenta hasta un punto en el que se obtiene la densidad máxima seca y luego disminuye debido a que sobrepasa su contenido óptimo de humedad, por lo que la mayor densidad seca se obtuvo en estado húmedo (método 1B), dicho esto se tiene que a una frecuencia de 60 Hz para tiempos de ocho y 10 minutos la densidad seca no varía significativamente lo cual es validado por Drnevich, Evans y Porchaska (2007) donde nos indica que sólo un aumento insignificante en unidad de peso seco (densidad) se produce después de ocho minutos de vibración. Asimismo, sobre la frecuencia de vibración Troost (1987) indica que a mayor frecuencia de vibración inicial la densidad seca aumentará hasta lograr un pico, sin embargo, al ir incrementando la frecuencia puede ocurrir dos posibilidades, que la densidad disminuya o se mantenga casi constante, esto dependerá del tipo de suelo con el que trabajemos y otros factores. Por lo que se consideró según ASTM D4253 que el valor de densidad máxima seca se obtiene mediante una frecuencia de 60 Hz la cual es la más influyente con respecto a las frecuencias de 40 Hz y 50 Hz para la

obtención de la D.M.S., respecto al tiempo de vibrado se consideró de ocho minutos como el tiempo de vibrado óptimo para los suelos dados.

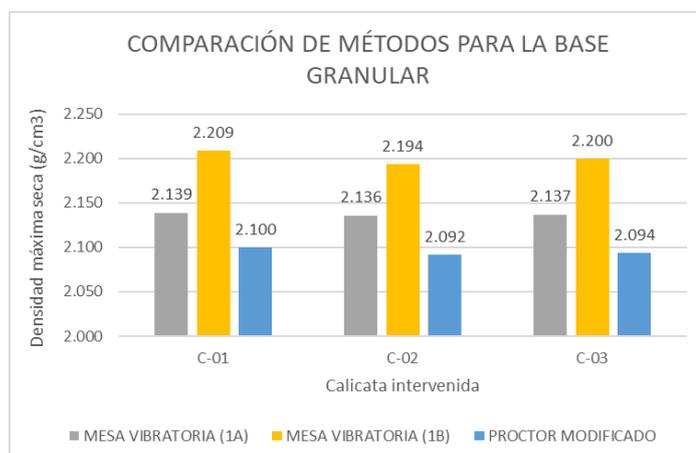
Respecto a la hipótesis específica dos dada en ítem 4.2.2.2. sobre la influencia de la compactación vibratoria mediante la mesa vibratoria con respecto a la metodología tradicional (Proctor modificado) para la obtención de la densidad máxima seca en las capas estructurales del pavimento se puede visualizar que para la base granular (tabla N°59 y figura N°137), sub base granular (tabla N°60 y figura N°138) y subrasante (tabla N°61 y figura N°139) se tiene lo siguiente:

Comparación e influencia de resultados obtenidos mediante la mesa vibratoria y Proctor modificado para las capas estructurales del pavimento.

**Tabla 59**

*Comparación de D.M.S. mediante vibración e impacto para la base granular.*

N° Calicata	Progresiva	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Proctor Modificado	Variación porcentual (%)
C-01	06+200	2,209	2,100	4,934
C-02	06+580	2,194	2,092	4,649
C-03	06+830	2,200	2,094	4,818

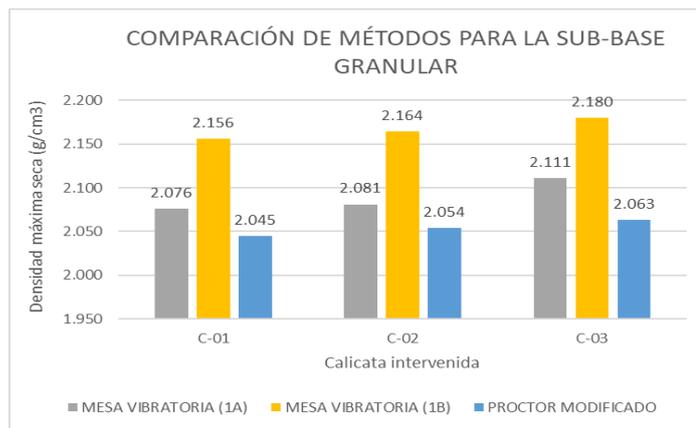


*Figura 137. Comparación de densidades máximas secas para base granular.*

**Tabla 60**

*Comparación de D.M.S. mediante vibración e impacto para la sub-base granular.*

N° Calicata	Progresiva	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Proctor Modificado	Variación porcentual (%)
C-01	06+200	2,156	2,045	5,148
C-02	06+580	2,164	2,054	5,083
C-03	06+830	2,180	2,063	5,367

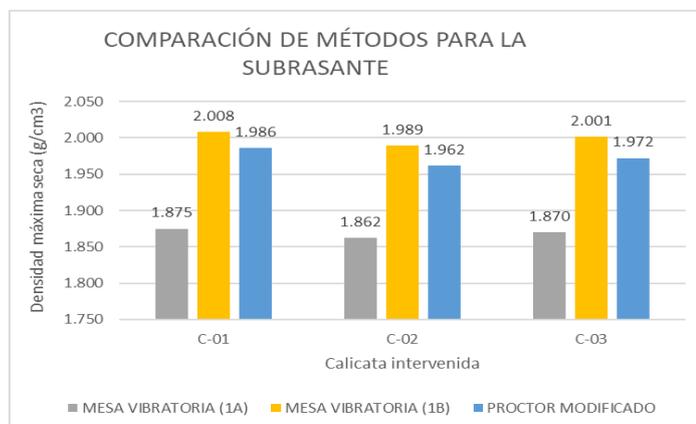


*Figura 138. Comparación de densidades máximas secas para sub-base granular.*

**Tabla 61**

*Comparación de D.M.S. mediante vibración e impacto para la subrasante.*

N° Calicata	Progresiva	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Proctor Modificado	Variación porcentual (%)
C-01	06+200	2,008	1,986	1,096
C-02	06+580	1,989	1,962	1,357
C-03	06+830	2,001	1,972	1,449



*Figura 139. Comparación de densidades máximas secas para subrasante.*

Se puede observar en la tabla N°59, 60 y 61 que la mayor densidad máxima seca se obtiene mediante la mesa vibratoria con respecto al Proctor modificado, asimismo se puede observar que la variación porcentual es significativa ya que si asumimos que en campo se logró un grado de compactación al 100% con respecto a la D.M.S. obtenida por el Proctor modificado sería un valor irreal debido a que la D.M.S. real es la que se obtuvo por la mesa vibratoria, por lo que el grado de compactación disminuiría teniéndose lo siguiente:

**Tabla 62**

*Influencia en el grado de compactación de la base granular.*

N° Calicata	Prog. (Km)	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad de campo (g/cm <sup>3</sup> )	Grado de compactación real (%)	Grado de compactación mínimo requerido según EG-2013
C-01	06+200	2,209	2,100	95	
C-02	06+580	2,194	2,092	95	100
C-03	06+830	2,200	2,094	95	

Nota: Se asume el valor del Proctor modificado como la densidad de campo al 100%

**Tabla 63**

*Influencia en el grado de compactación de la sub-base granular.*

N° Calicata	Prog. (Km)	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad de campo (g/cm <sup>3</sup> )	Grado de compactación real (%)	Grado de compactación mínimo requerido según EG-2013
C-01	06+200	2,156	2,045	94	
C-02	06+580	2,164	2,054	95	100
C-03	06+830	2,180	2,063	94	

Nota: Se asume el valor del Proctor modificado como la densidad de campo al 100%

**Tabla 64**

*Influencia en el grado de compactación de la subrasante.*

N° Calicata	Prog. (Km)	Mesa vibratoria Método 1B (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad de campo (g/cm <sup>3</sup> )	Grado de compactación real (%)	Grado de compactación mínimo requerido según EG-2013
C-01	06+200	2,008	1,986	98	
C-02	06+580	1,989	1,962	98	100
C-03	06+830	2,001	1,972	98	

Nota: Se asume el valor del Proctor modificado como la densidad de campo al 100%

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Primera.** Mediante la mesa vibratoria ASTM D4253 se pudo determinar el valor correcto de la D.M.S. en las capas estructurales del pavimento de la carretera Moquegua – Omate – Arequipa, de los cuales se obtuvo una densidad máxima seca promedio; para la base granular de 2,201 g/cm<sup>3</sup>, sub base granular de 2,167 g/cm<sup>3</sup>, subrasante de 1,999 g/cm<sup>3</sup>.
- Segunda.** Respecto a la influencia de los efectos (humedad, frecuencia y tiempo de vibración) en la compactación vibratoria se pudo observar que dichos efectos influyen significativamente para la obtención de la densidad máxima seca, esta presenta una variación promedio para la base granular de 2,9%, sub base granular 3,6% y subrasante 6,5%.
- Tercera.** En la comparación de metodologías de compactación se pudo observar que la compactación mediante la mesa vibratoria ASTM D4253 es mayor a la compactación tradicional (Proctor modificado) teniéndose variaciones porcentuales promedio entre ambos métodos de 4,8%, 5,2% y 1,3% respectivamente.

## 5.2. Recomendaciones

- Primera.** Se recomienda emplear la mesa vibratoria ASTM D4253 solo para suelos los cuales cumplan con los requerimientos dados por la norma ya que ensayar otros tipos de suelos no especificados pueden obtenerse resultados no confiables.
- Segunda.** Se recomienda que para suelos GP-GM y GW-GM se realicé el ensayo mediante el método húmedo (1B), frecuencia de 60 Hz y por un intervalo de tiempo de 8 minutos, asimismo se debe de tener cuidado al considerar dichas magnitudes para otros tipos de suelos ya que estos pueden variar significativamente.
- Tercera.** Se recomienda a los profesionales (ingenieros, técnicos, etc) poder investigar y conocer más sobre esta metodología de compactación en laboratorio que no es muy usado en el Perú debido a varios factores entre ellos, su alto costo con respecto al equipo de mesa vibratoria en comparación al proctor modificado, desconocimiento de nuevas metodologías de compactación por parte de los profesionales, dificultad para la realización del ensayo y tiempo de demora.
- Cuarta.** Se sugiere incentivar a los investigadores que puedan realizar trabajos de investigación similares aplicados a las diferentes ramas de la ingeniería donde puedan considerar otros factores más además de los considerados en esta investigación, lo cual permitirá que logre un análisis diferente, recopilación de información y base de datos y mayor

precisión en la obtención de la densidad máxima seca según ASTM D4253.

**Quinta.** Se aconseja que para la medición de compactación en suelos no cohesivos libres de drenaje se realice mediante la densidad relativa ASTM D 4253 y 4254 y no mediante el grado de compactación, ya que la D.R. considera los tres estados de densidades del suelo; densidad mínima, natural y máxima obteniéndose así un valor más confiable.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abecasis, J. (2013). *Sistematización de los medios de compactación y su control*. Madrid: Editorial MOPU.
- Aburto M. y Rodríguez D. (2012). *Caracterización de la resistencia de un material de banco para su uso como relleno compactado*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Álvarez, J. (2005). *Maquinaria utilizada para la compactación del suelo en área de tamaño limitado*. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Andrade de Aguiar, L. (2014). *Análise do comportamento mecânico de solos compactados e estabilizados químicamente para uso em barragens*. (Tesis de doctorado). Universidad de Brasilia, Brasilia, Brasil.
- Andrade, D., Losada, R. y Lluís, J. (2019). *Frecuencias – GeoGebra*. Recuperado de <https://www.geogebra.org/m/m6pr9e64>
- Apaza, Y. (2017). *Estimación del parámetro de resistencia al corte, ángulo de fricción en suelos granulares mediante ensayos de escala reducida* (Tesis de Pregrado). Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú.
- Aranguren, N. (2015). *Ensayo de compactación – Proctor modificado*. Recuperado de [http://www.caminos.upm.es/departamentos/ict/lcweb/ensayos\\_suelos/proctor\\_modificado.html](http://www.caminos.upm.es/departamentos/ict/lcweb/ensayos_suelos/proctor_modificado.html)
- Arcement, B. y Wright, S. (2001). *Evaluation of laboratory compaction procedures for specification of densities for compacting fine sands*. (Tesis de maestría). The university of Texas, Austin, EEUU.

- Armas, R. (2008). Criterios sobre la compactación de suelos y el control de calidad de terraplenes. *Revista de Convención científica de ingeniería y arquitectura – Universidad Tecnológica de la Habana, 01(01)*, 1-9.
- Arrieta, J. y Peñaherrera, E. (2001). *Fabricación de bloques de concreto con una mensa vibradora*. Recuperado de <http://www.cismid.uni.edu.pe/wp-content/uploads/2019/12/E01A.pdf>
- ASTM International. (2006). *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table*. Recuperado de <https://www.astm.org/d4253-00.html>
- ASTM International. (2014). *Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort*. Recuperado de <https://www.astm.org/d1557-12r21.html>
- ASTM International. (2018). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. Recuperado de <https://www.astm.org/d4318-17e01.html>
- Bernal, G. (2020). *Grupo propuesta ciudadana*. Recuperado de <https://propuestaciudadana.org.pe/vigilancia/cual-es-el-estado-de-avance-del-proyecto-vial-mas-importante-de-moquegua/>
- Bernal, M., Aponte, J. y Carrillo, J. (2015). Sistemas de control para mesas vibratorias: una revisión crítica. *Revista de Ingeniería y Desarrollo – Colombia, 33(02)*, 333-338.
- Boris, A. (2018). *Ingeniero de Caminos – Ensayo Marshall para suelos*. Recuperado de <https://html.rincondelvago.com/ensayo-marshall-de-parasuelos.html>

- Browne, J. (2006). *Feasibility of using a rotary compactor to determine soil compaction characteristics*. (Tesis de maestría). Montana State University, Bozeman, EEUU.
- Buenfil, C. (2007). *Caracterización experimental del comportamiento hidromecánico de una arcilla compactada*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Calo, D. (2016). *Reparación y mantenimiento de pavimentos – Dpto. Técnico de pavimentos*. Recuperado de [https://web1.icpa.org.ar/wp-content/uploads-Recuperacion\\_y\\_mantenimiento\\_de\\_pavimentos.pdf](https://web1.icpa.org.ar/wp-content/uploads/Recuperacion_y_mantenimiento_de_pavimentos.pdf)
- Cárdenas, A. y Donoso, A. (2008). *Proposición de una metodología particular para obtener la capacidad soporte para suelos granulares sin curva Proctor definida*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Magallanes, Chile.
- Chaca, C. (2019). *Estudio del mucílago de penca de tuna para la estabilización de suelos arenoso arcilloso en la subrasante*. (Tesis de pregrado). Universidad Cesar Vallejo, Perú.
- Chirinos, J. (2016). *Efecto de la energía de compactación en la densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad del suelo granular de la cantera el Gavilán, 2015*. (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.
- Clavijo, J. y Ramírez, L. (2011). *Diseño, modelamiento y simulación de una mesa vibradora unidireccional hidráulica*. (Tesis de Grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

- Corporación, C. (2018). *Densímetro eléctrico EGD – Norma ASTM D7698-11*. Recuperado de <http://cc4peru.com/servicios-y-proyectos/equipos-de-innovacion>
- Cotecno (2017). *Equipo de densidad relativa ASTM D4253*. Recuperado de <https://www.cotecno.cl/aparato-de-densidad-relativa/>
- Cross, N. (2013). *Propuesta de Diseño alterno de espesores de pavimento rígido para proyecto de construcción de la circunvalación de carretera Masaya-Las flores, utilizando el método de la AASHTO 93*. (Tesis de Pregrado). Universidad Centroamericana, Managua, Nicaragua.
- Das, B. (2014). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. CDMX, México: Cengage Learning.
- Diez, M. y Navarro, J. (2008). *Estudio geotécnico con fines de cimentación y pavimentación en zonas de expansión urbana en Lurín*. (Tesis de Pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Drnevich, V., Evans, A. y Prochaska, A. (2007). A study of effective soil compaction control of granular soils. *Joint Transportation Research Program – Purdue University, EEUU., 01(01)*, 1-26.
- Estrella, R. y Ormachea, G. (2020). *Análisis y determinación de la variabilidad de los ensayos de mecánica de suelos basados en las normas NTP, MTC y ASTM*. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Santa María, Perú.
- Farah, J. (2013). *Estabilidad de taludes de suelos granulares*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/jorgeberrios7737/sesin-1-suelos-granulares>
- Fernandes, M. (2004). *Mecânica dois solos conceitos e princípios fundamentais*. Sao Paulo, Brasil: Câmara Brasileira do Livro.

- Ferreira, A. (2013). *Controlo da compactação com recurso a gamadensímetro-Caso de estudo: ETAR de Castelo Branco*. (Tesis de maestría). Instituto Superior de Ingeniería do Porto, Porto, Brasil.
- Francis, C. (1965). *Laboratory and field test procedures for control of density and moisture of compacted earth embankments*. Washington D.C., EEUU: USDA.
- Freeman, R., Mann T., Mason L., Gartrell C. y Moore V. (2008). *Quality Assurance for Rapid Airfield Construction*. Washington DC., EEUU: ERDC/GSL.
- García, A. (2012). *Factores de permeabilidad de suelos*. Recuperado de <https://www.arqhys.com/construccion/factores-permeabilidad-suelos.html>
- Geotechnical, C. (2020). *Ensayo de límite de Atterberg aplicado a la mecánica de suelos*. Recuperado de <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/limites-atterberg/>
- González, C. (2009). *Modelación de la compactación del suelo*. Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Feijoo.
- González, C. (2015). *Fallas en el pavimento flexible de la avenida vía de evitamiento sur, Cajamarca, 2015*. (Tesis de Pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca.
- Guzmán, A. (2013). *Manual operativo del aparato de globo de hule ASTM D 2167, análisis comparativo y descriptivo con el método del cono de arena ASTM D 1556 para la determinación de la densidad de campo*. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. Revista México D.F., México. 01(06), 88-99.

- Humboldt, M. (2016). *Relative Density Apparatus*. Recuperado de <https://www.humboldtmfg.com/relative-density-cohesionless-soils-apparatus.html>
- Instituto Nacional de Normalización (1999). *Mecánica de Suelos – Determinación de las densidades máxima y mínima y cálculo de la densidad relativa en suelos no cohesivos*. Recuperado de <https://www.chilecubica.com/app/download/13004945931/DETERMINACION+DE+LAS+DENSIDADES+MAXIMA+Y+MINIMA+%28D.R%29.pdf?t=1578759174>
- Martínez, F. (2009). Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá D.C. *Revista de Infraestructura Vial - Colombia – 01(22)*, 20-25.
- McLachlan, R. y Bagshaw S. (2017). Standardization of laboratory compaction energies. *Investigation report from the New Zealand– Transport Agency, Wellington, New Zealand, 01(01)*, 9-30.
- Massons, J. y Rodriguez, M. (2019). Investigación científica: Diseño de estudios. *Fundamentos de diseño y estadística, Barcelona, España, 01(08)*, 30-43.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas generales para construcción*. Recuperado de [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH\\_PDF/MAN\\_10%20EG%202013.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf)
- Miranda, R. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles y rígido* (Tesis de Pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

- Moita, M. (2020). *Gamadensímetros*. Recuperado de <https://intervir.pt/2020/03/08/gamadensímetros/>
- Mokwa, R., Cuelho, E. y Browne, M. (2008). Laboratory testing of soil using the Superpave gyratory compactor. *Transportation Research Board 87th Annual Meeting Proceedings, Committee AFS10, Transportation Earthworks, Advanced Technologies for Accelerated Earthwork Construction and Performance Monitoring. Washington, DC – 01(01)*, 1-10.
- Montalar, F. (2012). *Densidad, humedad y parámetros de estado*. Recuperado de <https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-2-densidad-humedad-y-parametros-de-estado/>
- Nazzal, M. (2014). Non-Nuclear Methods for Compaction Control of Unbound Materials. *National Cooperative Highway Research Program. Washington, DC – 01(02)*, 125-130.
- Ocas de la Cruz, J. (2013). *Influencia de la energía de compactación en el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca en los suelos granulares*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Ortega, A. (2015). *Pavimentos Flexibles*. Recuperado de <https://www.construaprende.com/docs/trabajos/310-pavimentos-flexibles>
- Padegua, A. (2016). *Pavimento Flexible – asfalto en frío*. Recuperado de <https://www.padegua.com/pavimento-flexible-asfalto/>
- Parada, G. (2018). *Comparison study between field compaction control devices of unbound materials*. (Tesis de pregrado). The State University of New Jersey, Rutgers, EEUU.

- Paredes, W. (2017). *Consecuencias técnicas y legal con ensayos de compactación*. Recuperado de [https://es.scribd.com/document/545557407/Exposicion-cono-2017?secret\\_password=3lr0TFYweeZ2t0TtlyF2](https://es.scribd.com/document/545557407/Exposicion-cono-2017?secret_password=3lr0TFYweeZ2t0TtlyF2)
- Pérez, N. (2016). Compaction and mechanical properties of soils compacted in the gyratory compactor. *Revista Infraestructura Vial – Washington*, 18(31), 20-29.
- Polanco, A. (2012). *Prácticas de Laboratorio de Mecánica de Suelos I*. Recuperado de [http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL\\_DE\\_LAB\\_MEC\\_DE\\_SUELOS\\_I.pdf](http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL_DE_LAB_MEC_DE_SUELOS_I.pdf)
- Purizaca, J. (2020). *Evaluación y análisis comparativo entre los ensayos de densidad máxima por medio de una mesa vibratoria y el ensayo de compactación mecánica*. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
- Rahman, S. (2019). *Improvement of stiffness and strength of backfill soils through optimization of compaction procedures and specifications*. (Tesis de maestría). Lyles School of Civil Engineering, Indiana, EEUU.
- Revolorio, F. (2013). *Incidencias de resultados del ensayo Proctor por la influencia del clima, humedad, equipo y superficie de base de compactación durante su desarrollo*. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Rico, A. y Del Castillo, H. (1992). *Consideraciones sobre compactación de suelo en obras de infraestructura de transportes*. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt7.pdf>

- Rodríguez, J. (2012). *Límites de Atterberg ASTM D-4318*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/92252565/Limites-de-Atterberg-Informe>
- Román, C. y Valenzuela, N. (2019). *Análisis comparativo de la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica en caliente, respecto a una mezcla asfáltica en caliente modificado con vidrio reciclado Cusco 2018*. (Tesis de pregrado). Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú.
- Roston, J. y Baron, W. (1976). *Density Standards for Field Compaction of Granular Bases and Subbases*. Washington DC, EEUU: Research Program
- Scavuzzo, R. (1984). Use of the Harvard Miniature Apparatus for Obtaining Moisture-Unit Weight Relationships of Soils. *Engineering and Research Center – Laboratory Geotechnical Branch, Denver, Poland*, 2(1), 1-3.
- Shanklin, D., Rademacher, K. y Talbot, J. (2014). Compaction effort applied by hand-operated compactors. *Constructing and controlling Compaction of Earth Fills, Canada*, 01(02), 47.
- Structuralia (2018). *Compactadores de Tambor simple Volvo*. Recuperado de [https://ascendum.mx/media/6288/brochure\\_sd105\\_t3\\_es\\_a6\\_20050835\\_a.pdf](https://ascendum.mx/media/6288/brochure_sd105_t3_es_a6_20050835_a.pdf)
- Talukdar, P. y Sharma, B. (2014). Determination of soil compaction characteristics by method of static compaction. Civil Engineering Department – *Assam Engineering College, Guwahati, India*. 01(01), 3-9.
- Tello, G. (2016). *Departamento de mecánica de suelos – Compactación de suelos*. Recuperado de <https://es.scribd.com/presentation/350991/Compactacion-de-Suelos-Fic-uni>

- Troost, J. (1987). *Factors influencing laboratory vibratory compaction*. (Tesis de maestría). University of Cape Town, Cabo, South Africa.
- Unitest Perú. (2017). *Ensayo Cono de arena 6" ASTM D1556*. Recuperado de <http://www.unitestperu.com/portfolio/trabajos-densidad-de-campo/>
- Universidad Nacional de Ingeniería (2006). *Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo ASTM D-2216*. Recuperado de <http://www.lms.uni.edu.pe/Determinacion%20del%20contenido%20de%20Humedad.pdf>
- Universidad Nacional de Ingeniería (2006). *Determinación del límite líquido (Atterberg) de los suelos ASTM D-4318*. Recuperado de <http://www.lms.uni.edu.pe/labsuelos/MODOS%20OPERATIVOS/Determinacion%20del%20limite%20liquido.pdf>
- Universidad Nacional de Ingeniería (2006). *Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada – ASTM D-1557*. Recuperado de <http://www.lms.uni.edu.pe/Proctor%20Modificado.pdf>
- Valdiviezo, F. (2019). *Implementación de una mesa vibratoria bidireccional para simulación de sismos*. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.
- Vergara, S. (2013). *Guía: Ensayo edométrico o de Consolidación*. Recuperado de <http://suelos2oocc.blogspot.com/2013/07/guia-ensayo-edometrico-o-de.html>
- Verri, A. (2019). *Consideraciones de diseño y construcción de una mesa vibradora para ejecución de ensayos dinámicos*. Revista Research Gate, Argentina. 01(02), 2-5.

- Weber, J. (2018). *Compaction testing of granular material*. (Tesis de maestría). South Dakota State University, Brookings, EEUU.
- White, D., Bergeson, K., Jahren, C. y Wermager, M. (1999). *Embankment Quality Phase II Final Report*. Revista CTRE Management Project the Iowa State University. *01(12)* 124-130.
- Xing, G. y Zenghai, M. (2003). Evaluation of Laboratory Compaction Techniques for Simulating Field Soil compaction. *Department of Civil & Environmental Engineering Florida – Florida State University, Tallahassee, EEUU, 1(02)*, 19-195.
- Yepes, V. (2014). *Compactador por impactos con rodillo de perfil lobular*. Recuperado de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/05/09/compactador-por-impactos-con-rodillo-de-perfil-lobular/>