



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis:

Tratamiento con estabilizadores para mejorar el desempeño del afirmado de la ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000), distrito Circa-Apurímac, 2017.

**Para optar el Título de:
Ingeniero Civil**

Presentada por:

Bach. GUTIÉRREZ MONTERREY, Roy Roger
Bach. QUISPETUPA CHOQUENAIRA, Daniela

Abancay-Apurímac-Perú

2019

Tesis:

Tratamiento con estabilizadores para mejorar el desempeño del afirmado de la ruta AP-830 (km 0+000-km12+000), distrito Circa-Apurímac, 2017.

Línea de investigación:

Geotecnia

Asesor:

Ing. Édgar Acurio Cruz

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

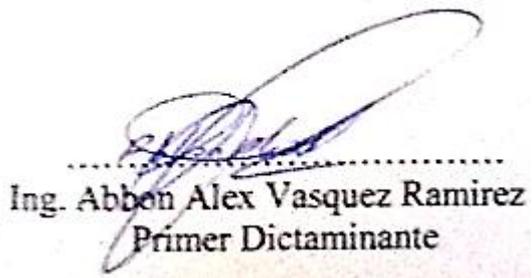
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis:

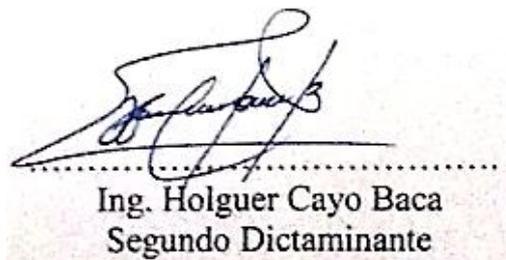
**Tratamiento con estabilizadores para mejorar el desempeño del
afirmado de la ruta AP-830 (km 0+000-km12+000), distrito Circa-
Apurímac, 2017.**



.....
Ing. Fredy Quispe Ferrel
Presidente del Jurado



.....
Ing. Abbon Alex Vasquez Ramirez
Primer Dictaminante



.....
Ing. Holguer Cayo Baca
Segundo Dictaminante

Dedicatoria:

A Dios por darnos fuerza, perseverancia y consecuencia en el trayecto de nuestra investigación; así como a nuestros padres, familia y amigos que han sido nuestra motivación e incentivo para terminar con éxito nuestra tesis.

Agradecimiento:

A nuestros asesores, los Ingenieros David Salas Pacheco y Edgar Acurio Cruz, por apoyarnos de manera constante e impetuosa.

Índice

Resumen.....	xxiii
Abstract	xxiv
Introducción	1
Capítulo 1 Planteamiento del problema de la investigación.....	3
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	3
1.2. Formulación e identificación del problema	6
1.2.1. Problema general.	6
1.2.2. Problemas específicos.....	6
1.3. Objetivos de la investigación	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos:	7
1.4. Justificación de la investigación	7
1.5. Delimitación de la investigación.....	8
1.5.1. Delimitación espacial.....	8
1.5.2. Delimitación temporal.	8
1.6. Limitaciones de la investigación.....	9
Capítulo 2 Marco teórico	10
2.1. Antecedentes de la investigación	10
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	10
2.1.2. Antecedentes de ámbito nacional.....	13

2.1.3.	Antecedentes locales.....	17
2.2.	Bases teóricas.....	18
2.2.1.	Tratamiento con estabilizadores.....	18
2.2.2.	Desempeño del afirmado.....	32
2.3.	Definición de términos básicos.....	55
2.4.	Formulación de la hipótesis.....	59
2.4.1.	Hipótesis general.....	59
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	59
2.5.	Operacionalización de variables e indicadores.....	59
2.5.1.	Variable independiente.....	59
2.5.2.	Variable dependiente.....	59
2.5.3.	Operacionalización de las variables.....	60
Capítulo 3	Metodología.....	61
3.1.	Tipo y nivel de la investigación.....	61
3.2.	Diseño de la investigación.....	61
3.3.	Población y muestra.....	62
3.3.1.	Población.....	62
3.3.2.	Muestra.....	62
3.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	62
3.4.1.	Técnicas.....	62
3.4.2.	Instrumentos.....	63

3.5.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos	63
3.5.1.	Técnicas de procesamiento.	63
3.5.2.	Análisis de datos.	64
Capítulo 4	Presentación y análisis de los resultados	65
4.1.	Procesamiento de datos: resultados	65
4.1.1.	Evaluación y diagnóstico de la situación actual.	65
4.1.2.	Metodología de la estabilización.	138
4.1.3.	Resultados de la incorporación de suelo CL.....	141
4.1.4.	Resultados de la incorporación de suelo CL y CaO.	162
4.1.5.	Aplicación del experimento en campo.....	192
4.1.6.	Resultados de la evaluación del IRI.....	197
4.1.7.	Evaluación económica de la estabilización.....	202
4.1.8.	Resumen de los resultados.....	206
4.2.	Prueba de hipótesis	208
4.2.1.	Prueba de hipótesis específica 01.	208
4.2.2.	Prueba de hipótesis específica 02.	209
4.2.3.	Prueba de hipótesis específica 03.	209
4.2.4.	Prueba de hipótesis específica 04.	210
4.2.5.	Prueba de la hipótesis general.....	211
4.3.	Discusión de resultados.....	211
Conclusiones	218
Recomendaciones	220

Referencias bibliográficas	221
Glosario	227
Anexos.....	229

Índice de tablas

Tabla 1 Guía complementaria referencial para la selección del tipo de estabilizador	21
Tabla 2 Especificaciones técnicas de tipos de estabilizadores y parámetros.....	24
Tabla 3 Materiales para la estabilización de pavimentos.....	27
Tabla 4 Clasificación de suelos según índice de plasticidad	29
Tabla 5 Granulometría para cada tipo de afirmado, según el IMD proyectado.....	43
Tabla 6 Niveles de servicio para calzada de afirmado.....	44
Tabla 7 Rugosidad IRI (m/km) de caminos no pavimentados – afirmados.....	48
Tabla 8 Estado del camino de caminos no pavimentados.....	49
Tabla 9 Operacionalización de las variables.....	60
Tabla 10 Determinación de las características físicas, mecánicas y químicas.	63
Tabla 11 Análisis de datos	64
Tabla 12 Ubicación de los puntos de referencia	67
Tabla 13 Deterioros o fallas de las carreteras no pavimentadas	70
Tabla 14 Calificación del tramo Yaca – Circa (km 0+000 al km 12+000)	71
Tabla 15 Tipos de condición según calificación de condición	71
Tabla 16 Tipos de conservación según calificación de condición	72
Tabla 17 Ubicación de la estación de conteo de volumen de tránsito	73
Tabla 18 Resumen semanal de la medición del volumen de vehículos.....	77
Tabla 19 Cálculo de índice medio diario semanal	79
Tabla 20 Factores de corrección del peaje Pampa Galera y peaje Casinchiua	80
Tabla 21 Cálculo de índice medio diario anual	80
Tabla 22 Distribución vehicular.....	81

Tabla 23 Tasa de crecimiento del departamento de Apurímac.....	84
Tabla 24 Proyección del tráfico del tramo Yaca – Circa (km 0+000 al km 12+000).....	87
Tabla 25 Ubicación de las fuentes de agua.....	89
Tabla 26 Temperaturas máximas, mínimas y medias de Abancay.....	91
Tabla 27 Precipitación promedio mensual en mm/mes para las provincias de Apurímac	93
Tabla 28 Precipitación promedio mensual expresadas en mm/mes de Apurímac.....	95
Tabla 29 Análisis granulométrico por tamizado del material de subrasante	96
Tabla 30 Contenido de humedad del material de subrasante.....	98
Tabla 31 Límite líquido del material de subrasante.....	98
Tabla 32 Limite plástico del material de subrasante.....	99
Tabla 33 Obtención del índice de plasticidad del material de subrasante	99
Tabla 34 Porcentaje de desgaste del material de subrasante.....	100
Tabla 35 Ensayo de proctor modificado del material de subrasante	101
Tabla 36 CBR de la subrasante ubicada en el km 01+000	102
Tabla 37 Resumen de los ensayos del material de subrasante.....	105
Tabla 38 Ubicación de las canteras A, B y C	106
Tabla 39 Cálculo de potencias de las canteras.....	107
Tabla 40 Cálculo del rendimiento de las canteras	108
Tabla 41 Análisis granulométrico por tamizado del material de la cantera A.....	108
Tabla 42 Contenido de humedad del material de la cantera A	110
Tabla 43 Límite líquido del material de la cantera A	110
Tabla 44 Limite plástico del material de la cantera A	111
Tabla 45 Obtención del índice de plasticidad del material de la cantera A.....	112

Tabla 46 Porcentaje de desgaste del material de la cantera A	112
Tabla 47 Ensayo de proctor modificado del material de la cantera A	113
Tabla 48 Porcentaje de CBR de la cantera A.....	114
Tabla 49 Resumen de los ensayos realizados al material de la cantera A	117
Tabla 50 Análisis granulométrico por tamizado del material de la cantera B	118
Tabla 51 Contenido de humedad del material de la cantera B	119
Tabla 52 Límite líquido del material de la cantera B.....	120
Tabla 53 Límite plástico del material de la cantera B	120
Tabla 54 Obtención del índice de plasticidad del material de la cantera B	121
Tabla 55 Porcentaje de desgaste del material de la cantera B	122
Tabla 56 Ensayo de proctor modificado del material de la cantera B	123
Tabla 57 CBR de la cantera B.....	124
Tabla 58 Resumen de los ensayos realizados al material de la cantera B	127
Tabla 59 Análisis granulométrico por tamizado del material de la cantera C	127
Tabla 60 Contenido de humedad del material de la cantera C	129
Tabla 61 Límite líquido del material de la cantera C.....	129
Tabla 62 Límite plástico del material de la cantera C	130
Tabla 63 Obtención del índice de plasticidad del material de la cantera C	131
Tabla 64 Porcentaje de desgaste del material de la cantera C	131
Tabla 65 Ensayo de proctor modificado del material de la cantera C	132
Tabla 66 CBR de la cantera C.....	133
Tabla 67 Resumen de los ensayos realizados al material de la cantera C	136
Tabla 68 Resultado del análisis químico de suelo de la cantera A	137

Tabla 69 Resultado del análisis químico realizado a la cal	138
Tabla 70 Especificaciones mínimas y máximas para un tráfico tipo 4.....	141
Tabla 71 Análisis granulométrico con gradación seleccionada de la Cantera A.....	142
Tabla 72 Análisis granulométrico con gradación seleccionada de la cantera B.....	143
Tabla 73 Análisis granulométrico con gradación seleccionada de la Cantera C.....	145
Tabla 74 Resumen del porcentaje que pasa de la cantera A y C.....	146
Tabla 75 Resumen del porcentaje que pasa de las canteras B y C.....	149
Tabla 76 Análisis granulométrico de la combinación A y C.....	152
Tabla 77 Contenido de humedad del material de la combinación A y C.....	154
Tabla 78 Límite líquido de la combinación A y C.....	154
Tabla 79 Límite plástico de la combinación A y C.....	155
Tabla 80 Obtención del índice de plasticidad de la combinación A y C.....	156
Tabla 81 Peso unitario suelo seco de la combinación A y C.....	156
Tabla 82 Peso unitario compactado seco de la combinación A y C.....	156
Tabla 83 Porcentaje de desgaste de la combinación A y C.....	157
Tabla 84 Ensayo de próctor modificado de la combinación A y C.....	158
Tabla 85 CBR de la combinación A y C.....	159
Tabla 86 Resumen de los ensayos realizados a la combinación A y C.....	162
Tabla 87 Análisis granulométrico del suelo “D” más 1.5% cal.....	163
Tabla 88 Contenido de humedad del suelo “D” más 1.5% cal.....	165
Tabla 89 Límite líquido del suelo “D” más 1.5% cal.....	165
Tabla 90 Límite plástico del suelo “D” más 1.5% cal.....	166
Tabla 91 Obtención del índice de plasticidad del suelo “D” más 1.5% cal.....	167

Tabla 92 Porcentaje de desgaste del suelo “D” más 1.5% cal	167
Tabla 93 Ensayo de próctor modificado del suelo “D” más 1.5% cal	168
Tabla 94 CBR del suelo D más 1.5% cal.....	169
Tabla 95 Resumen de los ensayos realizados del suelo D más 1.5% cal.....	172
Tabla 96 Análisis granulométrico del suelo D más 3.0% cal	173
Tabla 97 Contenido de humedad del suelo D más 3.0% cal.....	174
Tabla 98 Límite líquido del suelo D más 3.0% cal.....	175
Tabla 99 Límite plástico del suelo D más 3.0% cal.....	175
Tabla 100 Obtención del índice de plasticidad del suelo D más 3.0% cal	176
Tabla 101 Porcentaje de desgaste del suelo D más 3.0% cal.....	177
Tabla 102 Ensayo de próctor modificado del suelo D más 3.0% cal	178
Tabla 103 CBR del suelo D más 3.0% cal.....	179
Tabla 104 Resumen de los ensayos realizados del suelo D más 1.5% cal.....	182
Tabla 105 Análisis granulométrico del suelo D más 4.5% cal	183
Tabla 106 Contenido de humedad del suelo D más 4.5% cal.....	184
Tabla 107 Límite líquido del suelo D más 4.5% cal.....	185
Tabla 108 Límite plástico del suelo D más 4.5% cal.....	185
Tabla 109 Obtención del índice de plasticidad del suelo D más 4.5% cal	186
Tabla 110 Porcentaje de desgaste del suelo D más 4.5% cal.....	187
Tabla 111 Ensayo de proctor modificado del suelo D más 4.5% cal.	188
Tabla 112 CBR del suelo D más 4.5% cal.....	189
Tabla 113 Resumen de los ensayos realizados del suelo D más 4.5% cal.....	192
Tabla 114 Rugosidad 1er. Monitoreo.	198

Tabla 115 Rugosidad 2do. monitoreo.....	199
Tabla 116 Rugosidad 3er. monitoreo.....	199
Tabla 117 Rugosidad 4to. monitoreo.....	200
Tabla 118 Rugosidad 5to. monitoreo.....	200
Tabla 119 Evolución de la rugosidad durante agosto 2018 – mayo 2019	201
Tabla 120 Presupuesto de la estabilización granular - incorporación de suelo CL	202
Tabla 121 Presupuesto de la estabilización química - incorporación de 1.5 % de cal	203
Tabla 122 Presupuesto de la estabilización química - incorporación de 3.0 % de cal.	204
Tabla 123 Presupuesto de la estabilización química - incorporación de 4.5 % de cal.	205
Tabla 124 Resumen de laboratorio del suelo A, B, C y las adiciones de cal.....	206
Tabla 125 Resumen del rugosímetro de Merlín de los tramos I y II	207
Tabla 126 Resumen de la evaluación económica	207

Índice de figuras

Figura 2. Diagrama para seleccionar el estabilizador.	20
Figura 3. Espesor de capa de revestimiento granular.	35
Figura 4. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T0.	36
Figura 5. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T1.	37
Figura 6. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T2.	38
Figura 7. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T3.	39
Figura 8. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T4.	40
Figura 9. Condición de la vía sin mantenimiento.	46
Figura 10. Condición de la vía con mantenimiento.	46
Figura 11. Diagrama de flujo del ciclo de vida fatal y deseable.....	47
Figura 12. Instrumento del rugosímetro de Merlín.....	52
Figura 13. Histograma de la distribución de frecuencias.....	54
Figura 14. Mapas políticos de Perú, Apurímac y mapa vial de Abancay.....	66
Figura 15. Imagen satelital de la red vial vecinal de Ruta N°AP-830.....	68
Figura 16. Ubicación de los peajes y estación (E-1) de conteo de volumen de tránsito.....	74
Figura 17. Estación E-1: progresiva km 1+200 de la Ruta AP-830 (Yaca – Circa).....	76
Figura 18. Estación E-1: progresiva km 1+200 de la Ruta AP-830 (Yaca – Circa).....	76
Figura 19. Porcentaje vehicular por tipo de vehículo.	82
Figura 20. Clasificación vehicular del índice medio diario.	82
Figura 21. Variación diaria de vehículos.	83
Figura 22. Variación horaria del tráfico.....	83
Figura 23. Imagen satelital de la fuente de agua N°01	90

Figura 24. Fuente de agua N°01	90
Figura 25. Imagen satelital de la fuente de agua N°02	90
Figura 26. Fuente de agua N°02	90
Figura 27. Imagen satelital de la fuente de agua N°03	90
Figura 28. Fuente de agua N°03	90
Figura 29. Imagen satelital de la fuente de agua N°04	91
Figura 30. Fuente de agua N°04	91
Figura 31. Precipitación promedio mensual de las provincias de Apurímac.....	93
Figura 32. Evapotranspiración potencial total de las provincias de Apurímac.....	94
Figura 33. Subrasante del tramo Yaca – Soccos.....	96
Figura 34. Extracción del material de subrasante del tramo Yaca – Soccos	96
Figura 35. Curva granulométrica del material de subrasante.	97
Figura 36. Relación del contenido de humedad (%) y N° de golpes de la subrasante.	99
Figura 37. Relación: contenido de humedad – densidad de la subrasante.....	102
Figura 38. EC 56 golpes de la subrasante.	103
Figura 39. EC 25 golpes de la subrasante.	103
Figura 40. EC 12 golpes de la subrasante.	104
Figura 41. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la subrasante.	104
Figura 42. Imagen satelital de la cantera A.....	106
Figura 43. Material granular de la cantera A.	106
Figura 44. Imagen satelital de la cantera B.....	106
Figura 45. Material granular de la cantera B.	106
Figura 46. Imagen satelital de la cantera C.....	107

Figura 47. Material granular de la cantera C.	107
Figura 48. Curva granulométrica del material de cantera A.	109
Figura 49. Relación del contenido de humedad (%) y N° de golpes de la cantera A.	111
Figura 50. Relación: contenido de humedad – densidad de la cantera A.	114
Figura 51. EC 56 golpes de la cantera A.	115
Figura 52. EC 25 golpes de la cantera A.	115
Figura 53. EC 12 golpes de la cantera A.	116
Figura 54. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la cantera A.	116
Figura 55. Curva granulométrica del material de cantera B.	119
Figura 56. Relación del contenido de humedad (%) y N° de golpes de la cantera B.	121
Figura 57. Relación: contenido de humedad – densidad de la cantera B.	124
Figura 58. EC 56 golpes de la cantera B.	125
Figura 59. EC 25 golpes de la cantera B.	125
Figura 60. EC 12 golpes de la cantera B.	126
Figura 61. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la cantera B.	126
Figura 62. Curva granulométrica del material de cantera C.	128
Figura 63. Relación del contenido de humedad (%) y el N° de golpes de la cantera C.	130
Figura 64. Relación: contenido de humedad – densidad de la cantera C.	133
Figura 65. EC 56 golpes de la cantera C.	134
Figura 66. EC 25 golpes de la cantera C.	134
Figura 67. EC 12 golpes de la cantera C.	135
Figura 68. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la cantera C.	135
Figura 69. Curva granulométrica del material seleccionado de la Cantera A.	143

Figura 70. Curva granulométrica del material seleccionado de la Cantera B.....	144
Figura 71. Curva granulométrica del material seleccionado de la Cantera C.....	146
Figura 72. Curva granulométrica de la combinación de las canteras A y C.....	149
Figura 73. Curva granulométrica de la combinación de las canteras B y C.	152
Figura 74. Curva granulométrica de la combinación A y C.	153
Figura 75. Relación: cont. de humedad (%) y N° de golpes de la combinación A y C.....	155
Figura 76. Relación: contenido de humedad – densidad de la combinación A y C.	159
Figura 77. EC 56 golpes de la combinación A y C.....	160
Figura 78. EC 25 golpes de la combinación A y C.....	160
Figura 79. EC 56 golpes de la combinación A y C.....	161
Figura 80. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la combinación A y C.	161
Figura 81. Proceso para determinar a cantidad de cal óptima.	163
Figura 82. Curva granulométrica del suelo “D” más 1.5% cal.	164
Figura 83. Relación: contenido de humedad (%) y N° de golpes del suelo D más 1.5% cal.	166
Figura 84. Relación: contenido de humedad – densidad del suelo D más 1.5% cal.....	169
Figura 85. EC 56 golpes del suelo D más 1.5% cal.....	170
Figura 86. EC 25 golpes del suelo D más 1.5% cal.....	170
Figura 87. EC 56 golpes del suelo D más 1.5% cal.....	171
Figura 88. Relación: CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) del suelo D más 1.5% cal.	171
Figura 89. Curva granulométrica del suelo D más 3.0% cal.	174
Figura 90. Relación: contenido de humedad (%) y N° de golpes del suelo D más 3.0% cal.	176
Figura 91. Relación: contenido de humedad – densidad del suelo D más 3.0% cal.....	179
Figura 92. EC 56 golpes del suelo D más 3.0% cal.....	180

Figura 93. EC 25 golpes del suelo D más 3.0% cal.....	180
Figura 94. EC 56 golpes del suelo D más 3.0% cal.....	181
Figura 95. Relación: CBR (%) y densidad seca (gr/cm) del suelo D más 3.0% cal.	181
Figura 96. Curva granulométrica del suelo D más 4.5% cal.	184
Figura 97. Relación: cont. de humedad (%) y el N° de golpes del suelo D más 4.5% cal.....	186
Figura 98. Relación: contenido de humedad – densidad del suelo D más 4.5% cal.....	189
Figura 99. EC 56 golpes del suelo D más 4.5% cal.....	190
Figura 100. EC 25 golpes del suelo D más 4.5% cal.....	190
Figura 101. EC 56 golpes del suelo D más 4.5% cal.....	191
Figura 102. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) del suelo D más 4.5% cal.	191
Figura 103. Extracción de suelo de la Cantera C.....	194
Figura 104. Extracción de suelo de la Cantera A.....	194
Figura 105. Escarificado del afirmado.....	194
Figura 106. Extendido del afirmado.	194
Figura 107. Tesistas y personal de apoyo.	195
Figura 108. Distribución de la cal.....	195
Figura 109. Distribución de la cal.....	195
Figura 110. Distribución de la cal.....	195
Figura 111. Batido del afirmado con cal.....	196
Figura 112. Homogenización del afirmado con cal.....	196
Figura 113. Riego del afirmado del tramo I.....	196
Figura 114. Riego del afirmado del tramo II.	196
Figura 115. Compactación del afirmado.....	197

Figura 116. Compactación del afirmado.....	197
Figura 117. Tramo I - del km 03+900 al km 04+100.	197
Figura 118. Tramo II - del km 04+100 al km 04+300.....	197
Figura 119. Evaluación del índice de rugosidad del tramo I.	198
Figura 120. Evaluación del índice de rugosidad del tramo II.	198
Figura 121. Índice de rugosidad característico del tramo I versus tramo II.	201
Figura 122. Estación E-1, conteo de tráfico.....	233
Figura 123. Estación E-1, monitoreo de la dirección del tráfico.	233
Figura 124. Vehículo liviano.	233
Figura 125. Vehículo liviano.	233
Figura 126. Vehículo liviano.	233
Figura 127. Vehículo pesado.	233
Figura 128. Vehículo liviano.	234
Figura 129. Miniband que circula Circa-Abancay.....	234
Figura 130. Extracción de material de subrasante.	234
Figura 131. Determinación de la granulometría.	234
Figura 132. Gradación del material de subrasante.....	234
Figura 133. Ensayo CBR del material de subrasante.....	234
Figura 134. Cuarteo del suelo A.	235
Figura 135. Cuarteo suelo C.	235
Figura 136. Granulometría - suelo A.	235
Figura 137. Granulometría - suelo B.	235
Figura 138. Granulometría - suelo C.	235

Figura 139. Determinación de la gradacion de los suelos.	235
Figura 140. Ensayo de límite líquido.	236
Figura 141. Índice plástico de suelos A, B y C.	236
Figura 142. Determinación del desgaste de los suelos – Ensayo Abrahación.	236
Figura 143. Desgaste de los suelos.	236
Figura 144. Próctor modificado A.	236
Figura 145. Próctor modificado de los suelos A, B y C.	236
Figura 146. CBR – suelo A.	237
Figura 147. CBR de los suelos A, B y C.	237
Figura 148. Combinación de los suelos A y C.	237
Figura 149. Tamizado del suelo D para determinar su granulometría.	237
Figura 150. Incorporación de 1.5 %, 3.0 %, 4.5 % de cal al suelo D.	237
Figura 151. Determinación del IP del suelo D + 1.5 %, 3.0 %, 4.5 % de cal.	237
Figura 152. Ensayo para determinar el IP del suelo D + 1.5 % cal.	238
Figura 153. Ensayo para determinar el IP del suelo D + 3.0 % cal.	238
Figura 154. Ensayo para determinar el IP del suelo D + 4.5 % cal.	238
Figura 155. Determinación del CBR del suelo D + 1.5 %, 3.0 %, 4.5 % de cal.	238
Figura 156. Obtención de suelo de la cantera C para usar en el experimento in situ.	238
Figura 157. Obtención de suelo de la cantera A para usar en el experimento in situ.	238
Figura 158. Distribución de la plataforma del tramo I.	239
Figura 159. Distribución de la plataforma del tramo II.	239
Figura 160. Tesistas y personal de apoyo.	239
Figura 161. Distribución de la cal en 1.5 % del suelo seco.	239

Figura 162. Distribución de la cal.....	239
Figura 163. Distribución de la cal.....	239
Figura 164. Escarificado del afirmado con la motoniveladora.	240
Figura 165. Batido del afirmado con la motoniveladora.	240
Figura 166. Riego del afirmado del tramo I.....	240
Figura 167. Riego del afirmado del tramo II.	240
Figura 168. Compactación del afirmado.....	240
Figura 169. Compactación del afirmado.....	240
Figura 170. Tramo I - Del km 03+900 al km 04+100.	241
Figura 171. Tramo II - Del km 04+100 al km 04+300.	241
Figura 172. Evaluación del índice de rugosidad del tramo I – 1er monitoreo.....	241
Figura 173. Evaluación del índice de rugosidad del tramo II - 1er monitoreo.	241
Figura 174. Evaluación del índice de rugosidad del tramo I – 5to monitoreo.....	241
Figura 175. Evaluación del índice de rugosidad del tramo II- 5to monitoreo.	241

Resumen

La presente tesis tiene el objeto de mejorar por medio del tratamiento con estabilizadores el desempeño del afirmado de la ruta AP-830 (km 0+000 al km 12+000), ubicada en el distrito de Circa, provincia de Abancay, departamento de Apurímac; para ello se adoptó la metodología de investigación de tipo descriptiva, diseño experimental, por manipular intencionalmente la variable independiente y medir la variable dependiente. Para mejorar el desempeño del afirmado mediante el uso de estabilizadores, se propuso la incorporación de dos (02) estabilizadores en el afirmado, material cohesivo (CL: arcilla fina gravosa con arena) y 1.5% de material aglomerante (CaO: Cal), mediante los métodos de estabilización granular y química. Después de haber realizado la aplicación de investigación en campo en dos tramos de 200 metros lineales, el primer tramo corresponde al tramo empleado mediante los métodos de estabilización granular y química desde la progresiva (km 3+900 al km 4+100); el segundo tramo con fines de comparación corresponde al tramo estabilizado solo mediante el método granular desde la progresiva (km 4+100 al km 4+300). Con la evaluación de la rugosidad del afirmado mediante el ensayo de Merlín realizado el monitoreo en un tiempo de nueve meses, resultado menor desgaste en el afirmado en el primer tramo, concluyendo que los estabilizadores empleados mejoran el desempeño del afirmado.

Palabras clave: tratamiento, estabilizadores, desempeño del afirmado e índice de rugosidad.

Abstract

The purpose of this thesis is to improve through performance with stabilizers the performance of the AP-830 route (km 0 + 000 to km 12 + 000), located in the district of Circa, province of Abancay, department of Apurimac To this end, the research methodology of descriptive type, experimental design, by intentionally manipulating the independent variable and measuring the dependent variable is adopted. In order to improve the performance of the affirmative through the use of stabilizers, the transformation of two (02) stabilizers in the affirmative, cohesive material (CL: gravelly fine clay with sand) and 1.5% of binder material (CaO: Cal) was proposed, through Granular and chemical stabilization methods. After having carried out the application of field research in two stretches of 200 linear meters, the first section corresponding to the section used by the methods of granular and chemical stabilization from the progressive (km 3 + 900 to km 4 + 100), the second section with comparison fines corresponding to the stabilized section only by the granular method from the progressive one (km 4 + 100 to km 4 + 300). With the evaluation of the roughness of the affirmed by means of the Merlin test carried out the monitoring in a period of nine months, the less wear on the affirmed in the first section, concluding that the stabilizers used improve the performance of the affirmed.

Keywords: treatment, stabilizers, performance of the affirmed, roughness index.

Introducción

Las redes viales generan desarrollo económico y social en las poblaciones interconectadas, por ello, es importante contar con un camino que ofrezca a los usuarios transitar de forma segura y cómoda.

El problema es que los caminos vecinales son los que más adolecen de buena calidad en el tránsito, siendo el afirmado el componente de la vía, el que presenta mayor deterioro en una carretera no pavimentada por efecto de agentes climáticos y cargas vehiculares, generando deterioro prematuro en la carpeta de rodadura por la pérdida de materiales finos cohesivos que mantengan unidos las demás partículas del afirmado.

El nivel de servicio y la vida útil de los caminos vecinales se han mejorado según la recomendación de la entidad competente que indica ciertos parámetros para la utilización de estabilizadores según región, así es que, el uso de la cal como estabilizador es utilizado frecuentemente en suelos altamente cohesivos o plásticos; no obstante, el uso de cal en suelos no cohesivos ha sido poco abordado, sin tener en cuenta las propiedades aglomerantes, pudiendo ser una solución a la falta de cohesión de las partículas de suelo de un afirmado.

En el presente trabajo de investigación, se realizó un tratamiento con estabilizadores con el objetivo de mejorar el desempeño del afirmado del camino vecinal ruta AP-830 del km 0+000 al km 12+000, incorporando dos (02) estabilizadores en el afirmado, material cohesivo (CL: arcilla fina gravosa con arena) y 1.5% de material aglomerante (CaO: Cal).

La evaluación del desempeño del afirmado se determinó con los ensayos en laboratorio y campo, en los cuales se calculó la cantidad óptima de los estabilizadores, se realizó la

clasificación granulométrica, el índice plástico, CBR y rugosidad con el ensayo de Merlín, apoyados a las normas y especificaciones establecidas

La investigación de tesis se desarrolla en cinco (05) capítulos: inicia en el capítulo I, en el cual se formula el problema de investigación; consecuentemente se desarrolla el marco teórico en el capítulo II; en el capítulo III, se da a conocer la metodología de la investigación; se presenta y analiza los resultados en el capítulo IV; se expone las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada en el capítulo V; para culminar se presenta el anexo 01 (matriz de consistencia), anexo 02 (matriz de operacionalización de variables), anexo 03 (matriz de instrumentos de recolección), anexos 04 (fotografías), anexo 05 (inventario de condición vial), anexo 06 (estudio de tráfico), anexo 07 (análisis de laboratorio de la subrasante), anexo 08 (análisis de laboratorio de las canteras), anexo 09 (análisis químico de los suelos), anexo 10 (análisis químico de la cal), anexo 11 (análisis de laboratorio con incorporación de suelo CL-arcilla fina gravosa con arena), anexo 12 (análisis de laboratorio con incorporación de suelo CL-arcilla fina gravosa con arena más a adición de CaO) y anexo 13 (resultados del índice de rugosidad).

Capítulo 1

Planteamiento del problema de la investigación

1.1. Descripción de la realidad problemática

La conectividad y la calidad en la infraestructura vial, son el primer y segundo componente del pilar de infraestructura del grupo de los 12 pilares que utiliza el Foro Económico Mundial para evaluar y comparar la competitividad entre 140 países para el año 2018. A nivel global, la conectividad vial está encabezada por Estados Unidos y la calidad en transporte por Singapur quienes se encuentran en el primer puesto respectivamente. Dentro de la Alianza del Pacífico respecto a la conectividad, México se encuentra en el puesto 7, le sigue Chile en el puesto 14, luego esta Perú en el puesto 96 y Colombia en el puesto 97; y respecto a la calidad vial, Chile se encuentra en el puesto 24, le sigue México en el puesto 47, luego Colombia en el puesto 102 y por último Perú en el puesto 108. La conectividad en nuestro país ha mejorado para el año 2019, alcanzando un puntaje de 64 respecto a 48.3 del año 2018 (puntaje de 1 a 100), en

cambio la calidad vial no ha mejorado, manteniéndose en 3.2 (puntaje de 1 a 7), en los años 2018 y 2019. (World Economic Forum, 2018)

Se ha logrado aumentar la conectividad en infraestructura vial mediante la construcción de carreteras nacionales, departamentales y vecinales; esto permitió integrar y conectar diversas poblaciones; no obstante, mejorar la calidad en la infraestructura vial, es decir mejorar la transitabilidad y seguridad en el desplazamiento de una localidad a otra sigue pendiente.

Estos resultados demuestran la gran brecha que tenemos que cerrar en nuestro país, en cuanto a conectividad y calidad de infraestructura vial, razón por la cual, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) proyecta que para el año 2030, el 98% de la red vial nacional pavimentada, 50% de la red vial departamental y 33% de la red vial vecinal estarán en estado bueno. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

La proyección que ofrece el MTC es alentadora respecto a la red vial nacional, puesto que por su envergadura y conexión cuenta con mayor recepción por parte de las inversiones, por ello, es que mayor parte es pavimentado (rígido, semirrígido o flexible); lo contrario ocurre con los caminos departamentales y vecinales, como el tránsito es menor, la superficie de rodadura es proyectada en su mayoría como caminos afirmados o con soluciones básicas incorporando estabilizadores.

La red vial vecinal tiene la mayor extensión en carreteras del país, teniendo una longitud de 107,000 Km. de vías inventariadas, de las cuales 78% se encuentran en mal estado, solo el 22% tienen mantenimiento rutinario insuficiente. (Plan Estratégico Sectorial Multianual del Sector de Transportes y Comunicaciones, 2018)

Las redes viales departamentales y vecinales son las que conectan las provincias, distritos y centros poblados más alejados, es por ello que dotar de mejor calidad a estos caminos es generar una real inclusión e igualdad de oportunidades a las poblaciones más vulnerables,

En relación a todo lo expuesto, concebimos que los caminos vecinales son los que más requieren mejorar su infraestructura vial, que genere mejor calidad de vida a los usuarios; por lo cual, proponemos ofrecer con la presente investigación una alternativa de solución al problema de transitabilidad, incorporando estabilizadores para mejorar la calidad del afirmado.

La investigación se realizó en la red vial vecinal ruta N°AP-830, Trayectoria Emp. PE-30A (Yaca) – Circa, encargada de su conservación vial por el gobierno local a través del Instituto Vial Provincial de Abancay, siendo este uno de los 18 caminos vecinales que cuentan con Mantenimiento Rutinario, a su vez es una vía alterna de la carretera nacional PE-3S F, Trayectoria: Emp. PE-3S (Dv. Chuquibambilla) – Matara – Lambrama – abra Llullita – Chuquibambilla – Progreso – Chalhahuacho (PE-3S G) – Tambobamba – Abra Chanacairo – Cotabambas – Chinchaypujio – Emp. PE -3S (Dv. Cotabambas), cuando se interrumpe el tránsito por acontecimientos climatológicos o porque las características geométricas de la carretera ofrecen mejores condiciones para llegar en menor tiempo al distrito de Chuquibambilla, provincia de Grau.

El camino vecinal Yaca-Circa presenta deterioro prematuro del afirmado en los primeros 12.0 km, por la acción de los neumáticos de los vehículos y factores climatológicos, junto a ello, la ausencia de material cohesivo que mantenga unido el material granular y fino, genera como consecuencia que se reduzca el espesor de la carpeta de rodadura, polución en la vía, y finalmente insatisfacción en el desplazamiento de los usuarios.

Por las razones expuestas, es que la presente investigación busca mejorar el desempeño del afirmado incorporando estabilizadores.

1.2. Formulación e identificación del problema

1.2.1. Problema general.

¿Mejorará el tratamiento con estabilizadores el desempeño del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000), distrito de Circa, Apurímac-2017?

1.2.2. Problemas específicos.

- a) ¿Optimará con la incorporación de suelo CL¹ y CaO², la clasificación granulométrica del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000)?
- b) ¿Incrementará con la incorporación de suelo CL y CaO, el índice plástico del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000)?
- c) ¿Aumentará con la incorporación de suelo CL y CaO, el CBR del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000)?
- d) ¿Conservará con la incorporación de suelo CL y CaO, el Índice de Rugosidad Internacional del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000)?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Mejorar por medio del tratamiento con estabilizadores el desempeño del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000), distrito de Circa, Apurímac-2017.

¹ CL: Arcilla fina gravosa con arena

² CaO: Óxido de Calcio (Cal).

1.3.2. Objetivos específicos:

- a) Optimizar con la incorporación de suelo CL¹ y CaO², la clasificación granulométrica del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).
- b) Incrementar con la incorporación de suelo CL y CaO, el índice plástico del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).
- c) Aumentar con la incorporación de suelo CL y CaO, el CBR del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000 - km 12+000).
- d) Conservar con la incorporación de suelo CL y CaO, el Índice de Rugosidad Internacional del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000 - km 12+000).

1.4. Justificación de la investigación

La presente investigación tiene la intención de contribuir a la ingeniería y a las entidades encargadas de la conservación de infraestructura vial, en mejorar el nivel de servicio de un camino vecinal, realizando el tratamiento del afirmado con la incorporación de los estabilizadores y encontrar la metodología adecuada para manipular las variables en laboratorio y campo.

Finalmente, es importante la presente investigación, porque los resultados de la experimentación con estabilizadores accesibles en la zona del proyecto servirán como ejemplo y antecedente a investigaciones posteriores.

¹ CL: Arcilla fina gravosa con arena

² CaO: Óxido de calcio (Cal).

1.5. Delimitación de la investigación

1.5.1. Delimitación espacial.

La ruta AP-830 Yaca-Circa, Trayectoria Emp. PE-30A (Yaca) – Circa, distrito de Circa, provincia de Abancay, departamento de Apurímac.

1.5.2. Delimitación temporal.

En el año 2017, se realizó el reconocimiento y diagnóstico del estado de conservación del afirmado de la vía Yaca - Circa (km 0+000 al km 12+000), consecutivamente se realizó los ensayos de mecánica de suelos de las canteras A (km 02+840), B (km 08+140) y C (km 14+380).

En el año 2018, se realizó la investigación en gabinete y laboratorio para determinar la dosificación del suelo CL (arcilla fina gravosa con arena) y de cal (óxido de calcio); se realizaron los ensayos químicos de las canteras en el laboratorio de agua, suelo, medio ambiente y fertirriego de la Universidad Nacional Agraria la Molina y la cal fue evaluada en el Laboratorio SGS-Perú; posteriormente, en agosto se realizó la aplicación del experimento en campo desde el mes de agosto hasta diciembre del mismo año, se llevó a cabo la evaluación del Índice de Rugosidad Internacional del tramo de experimentación.

En el año 2019, se continuó con la evaluación del Índice de Rugosidad Internacional del tramo de experimentación hasta el mes de mayo. Se culminó con el procesamiento de los resultados.

1.6. Limitaciones de la investigación

La ciudad de Abancay, no cuenta con laboratorios de análisis químico de suelos, ni con equipos, ni maquinarias sofisticadas que distribuyan los estabilizadores de forma homogénea, tampoco cuenta con instrumentos especializados que midan la polución.

Debido a lo expuesto en el párrafo anterior, la finalización de la investigación conllevó mayor tiempo.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales.

Rodríguez, M y Hidalgo C (2005). Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4(6). Presenta su investigación sobre la estabilización de un suelo residual de diorita utilizando cal. Realizó el análisis del efecto de un suelo fino granular MH con otro granular, en la proporción de suelo fino y suelo grueso siguiente: de 0 y 100%, de 10 y 90%, de 20 y 80%, de 30 y 70 %, 40 y 60% y de 50 y 50% del peso seco del suelo; también analizó el tiempo de curado sobre penetración (CBR) de especímenes cilíndricos compactados con la adición de 3%, 6%, 9% y 12% de cal. El ensayo de CBR se realizó para el suelo con 10% y 50% de suelos finos, se obtuvo que para la adición de 9% de cal, tiene un CBR sin inundar de 105% e

inundado de 219%; para el mismo, con la adición de 6% de cal se obtuvo el 126% y 257%, respectivamente. (pp. 111-122)

Huezo, H y Orellana, A (2009). *Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el Salvador* (tesis de pregrado). Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador. Su investigación tiene como objetivo elaborar una guía para la estabilización de suelos que tenga índice plástico mayor a 10, para el cual uso la mezcla de suelo y cal, en caminos de baja intensidad vehicular en la ciudad de El Salvador. Como conclusión obtiene que, la adición óptima de cal es 4% en suelos con índice plástico mayor a 10, disminuye la plasticidad a cero; además, cambia su granulometría de suelo arcilloso (CL) a ser suelo limoso (ML). (pp. 220-222)

Beltrán, M y Copado, J (2011). *Estabilización de un suelo arcilloso con cal hidratada, para ser utilizada como capa subrasante de pavimentos en la colonia San Juan Capistrano de ciudad de Obregón*, (tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Sonora. Sonora, México. Presenta en su investigación la determinación del porcentaje óptimo de cal que debe agregarse al suelo para ser utilizado como capa subrasante. El procedimiento que siguió Beltrán fue de agregar cal desde 0% a 8% en intervalos de 1%, a las muestras de suelo. Siguiendo con la normativa de materiales para subrasante N-CMT-1-03 de la SCT, que exige un valor de CBR del 20% como mínimo y una expansión de 2% máximo, se procedió al estudio del material. El suelo se clasificó como una arcilla de baja comprensibilidad (CL), arrojando valores relativamente bajos, con un valor CBR del 2.17% y un porcentaje de expansión de 2.79%. La investigación concluye que al añadir 2.5% de cal en peso al

suelo en su estado natural logra aumentar su CBR de 2.20% a 22%, reduce el índice de plasticidad de 21% a 6% y el porcentaje de expansión de 2.79% a 0.99%, por lo que confirma que el material con suelo-cal a 2.5% es factible para la realización de una subrasante. (p. 46)

Sánchez M (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical de Cantón Tosagua provincia de Manabí* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito - Ecuador. Su investigación se centra en el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo incorporando cal viva y cemento portland puzolánico, el suelo inicial se caracteriza como un material de tipo CH, según S.U.C.S son arcillas de alta plasticidad, con un potencial expansivo alto. Sánchez, determinó las propiedades del suelo, hinchamiento y porcentaje de expansión, en estado natural y con porcentajes de estabilizante de 3,5 y 7%. Concluyendo en la investigación que, con el 7% de cal se ha logrado disminuir en 11.5% el índice de plasticidad. Asimismo, con respecto al comportamiento expansivo del suelo utilizando la cal viva reduce el porcentaje de hinchamiento de los suelos, con un 3% de cal viva reduce un 20%, con 5% de cal viva reduce un 40% y con el uso del 7% de cal viva reduce a 57%. Por medio del uso de cal se logra reducir el potencial de hinchamiento de alto a medio con 3 y 5% de estabilizante y se alcanza un potencial de hinchamiento bajo con el 7% de cal. (pp. 133-135)

Castillo, B. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos de Macas con valores de CBR menores al 5% y límites líquidos superiores al 100%, para utilizarlos como subrasantes en carreteras* (tesis de maestría). Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador. Su

investigación buscó estabilizar mediante el uso de la cal viva, los suelos arcillosos encontrados en el km 3+000 del paso lateral de Macas que tienen límite líquido mayor a 100% y CBR menor a 5%, para ser usado en la capa de subrasante de un pavimento flexible. Para el cual tomó muestras del suelo de la subrasante en el sector antes mencionado, posteriormente determinó las características del material, y realizó el tratamiento de estabilización del suelo, incorporando en relación al peso seco del suelo 10%, 20%, 30% y 40% de cal. Los resultados demostraron un incremento en el valor de CBR, observó que el aumento varía linealmente en función al porcentaje de cal añadida, este aumenta en el suelo tratado un 15.8% por cada porcentaje de cal, a porcentajes superiores al 30% de cal los valores de CBR, son mayores a 100. (p. 53)

2.1.2. Antecedentes de ámbito nacional.

Jara, R (2014). *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca. Presenta su investigación que tuvo como objetivo general evaluar el efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso; específicamente evaluó el efecto de la cal en el límite líquido, límite plástico, densidad seca máxima y CBR. El primer punto de las conclusiones fue que la dosis óptima para estabilizar la subrasante es de 4% de cal, consecutivamente tiene las siguientes conclusiones: con la adición de cal 0%, 2%, 4%, 6% el LL disminuye como máximo a 57.15 con la adición de 4% de cal y con la adición de cal de 0% el LL es de 67.57; el límite plástico aumenta cuando se incrementa la cal, obteniendo su máximo IP de 47.60 con cal al 4%, el IP menor es de 30.70 con cal al 0%; el índice de plasticidad

disminuye, logrando obtener un IP de 9.26, la máxima disminución con la adición de 6% de cal, con adición de 0% de cal se obtiene un IP de 36.87, esto demuestra que disminuye en un 74.97% del índice plástico; con la adición de 6% de cal, la densidad seca máxima disminuye a 1.55 y el contenido de humedad aumenta a 22.20%; el CBR al 95 % máximo es de 11.48% con la adición de 4% de cal y sin adición de cal el CBR es de 2.55 %. (p.60)

García, J (2015). *Estabilización de suelos arcillosos con cal aplicación a la carretera Tingo Maria-Pucallpa Sector III: Neshuya-Pucallpa*. (Informe de suficiencia). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima: Nigun Editorial. En su investigación presenta los efectos de la cal en las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso, concluyendo que la adición de cal disminuye el índice de plasticidad del suelo arcilloso, sus resultados demuestran que; para un tipo de suelo A-4 (2), la adición de 3.5 % de cal su IP inicial es de 6.4 y final de 5.8; para un tipo de suelo A-6 (5), la adición de 5.0 % de cal su IP inicial es de 14.7 y final de 10.2; para un tipo de suelo A-6 (7), la adición de 4.5 % de cal su IP inicial es de 11.4 y final de 7.2; para un tipo de suelo A-6 (9), la adición de 4.5 % de cal su IP inicial es de 15.1 y final de 10.9; para un tipo de suelo A-6 (13), la adición de 7.0 % de cal su IP inicial es de 14.6 y final de 8.0; para un tipo de suelo A-7-6 (17), la adición de 7.0 % de cal su IP inicial es de 21.2 y final de 8.6; para un tipo de suelo A-7-6 (12), la adición de 5.0% de cal su IP inicial es de 14.3 y final de 12.7; para un tipo de suelo A-7-6 (11), la adición de 5.0 de % cal su IP inicial es de 20.7 y final de 12.1; para un tipo de suelo A-7-6 (7), la adición de 4.5 % cal su IP inicial es de 21.2% y final de 9.7%. (p. 65)

García, A (2015). *Determinación de la resistencia de la subrasante incorporando cal estructural en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca, 2015* (tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca. En esta investigación su objetivo principal fue investigar si los porcentajes de 2%, 4%, 6% y 8% de cal en suelo aumenta su resistencia y disminuye su plasticidad. Al procesar los datos de los diferentes ensayos realizados, se confirma que el CBR aumenta progresivamente; teniendo así el CBR al 0.1” del suelo natural igual a 5.20%, incorporando 2% de cal aumenta a un CBR de 5.30%; incorporando 4% de cal aumenta a un CBR de 6.30%; incorporando 6% de cal aumenta a un CBR de 7.20%; e incorporando 8% de cal aumenta a un CBR de 8.05. Para el CBR al 0.2” de un suelo natural con CBR de 5.40%, incorporando 2% de cal aumenta a un CBR de 5.70%; incorporando 4% de cal aumenta un CBR de 6.60%; incorporando 6% de cal resulta un CBR de 7.50%; e incorporando 8% de cal resulta un CBR de 8.30%. (p. 73)

Cuadros, C (2017). *Mejoramiento de las propiedades físico - mecánicas de la subrasante en una vía afirmada de la red vial departamental de la región Junín mediante la estabilización química con óxido de calcio – 2016* (tesis de pregrado). Universidad Peruana los Andes. Huancayo-Junín. En su investigación implementa el óxido de calcio para mejorar las propiedades físico - mecánicas del suelo, para ello, buscó la proporción óptima de suelo-óxido de calcio que obtenga la mayor capacidad de soporte CBR, economía y estabilidad. Utilizando muestras de suelo, extraído del camino de la red vial departamental. Su investigación aplica 1%, 3%, 5% y 7% de óxido de calcio respecto al peso del suelo; de los resultados, concluye que el

porcentaje óptimo de óxido de calcio es de 3% respecto al peso del suelo, mejorando así las propiedades del suelo de subrasante, logrando que se reduzca el índice de plasticidad de un suelo natural con un IP de 19.08% a un IP de 4.17%, además aumentó significativamente el valor de C.B.R. de un 4.85% para suelo natural a un valor de C.B.R de 15.64%, categorizándolo como un material de subrasante buena. (p. 83)

Vásquez, A (2018). *Capacidad de soporte al estabilizar el suelo de la Vía Cascajal con adición de carbón y cal a nivel de sub rasante* (tesis de pregrado). Universidad San Pedro, Chimbote-Áncash. Su investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la cal y carbón mineral como estabilizador de subrasante de suelo limoso para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas y físicas. La estabilización se realizó con la incorporación de 4% de cal y 7% de carbón mineral de peso seco de la muestra del suelo, los cuales para fines de estudio obtuvieron 03 calicatas donde presentan suelos de tipo A-4 (suelo limoso) según clasificación AASHTO y la clasificación SUCS de tipo ML (limo baja plasticidad arenosa). Según los resultados finales para las tres calicatas obtuvieron los valores de CBR patrón al 100%; calicata N° 01 se tuvo un CBR de 16.2%, adicionando 7% de carbón y 4% de cal incrementando el CBR a 29.0 %, en la calicata N° 02 se obtuvieron un CBR inicial de 15.4% adicionando 7% de carbón y 4% de cal aumenta el CBR en 35.3% y en la calicata N° 03 se obtuvieron un CBR inicial de 14.0% al incorporar 7% de carbón y 4% de cal incrementa a 32.2%. (pp. 51-52)

2.1.3. Antecedentes locales.

López, J y Ortiz, G (2018). *Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay-Apurímac. Su investigación tiene como objetivo general, estabilizar el suelo existente de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la urbanización San Luis, adicionando un porcentaje de cal, para que posteriormente pueda ser usado como subrasante de un pavimento. En los resultados de la investigación de López y Ortiz indica que el índice de plasticidad para la muestra C-01, con adición de cal de 2%, 4%, 6%, 8%, resulta 13.80, 7.54, 4.78, 7.32, respectivamente, y para para la muestra C-02, con adición de cal de 2%, 4%, 6%, 8%, resulta 1.29, 0.44, 4.38, 4.35, respectivamente. (p.76)

Condori, V y Huamaní, Z (2018). *Aplicación del estabilizador Z con polímero en el incremento del valor del CBR del material utilizado como afirmado en la carretera departamental AP-103, tramo puente Ullpuhuaycco – Karkatera (L= 14.050 kms) Abancay-Apurímac 2018* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay-Apurímac. En la investigación plantearon la incorporación del estabilizador químico en el afirmado de una vía departamental. El objetivo principal de esta investigación fue determinar si la aplicación del estabilizador Z con polímero sintético incrementa el valor de CBR del material utilizado como afirmado en la carretera departamental AP-103. Con los estudios realizados de las características físicas y mecánicas del material, lograron demostrar mediante la experimentación que el valor del CBR, con la muestra patrón al 95% fue de

12.55%, incorporando polímero incrementa a 13.09% y con la muestra patrón al 100% fue de 15.44%, incorporando polímero incrementa a 18.57%. (pp. 90-91)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Tratamiento con estabilizadores.

Es el proceso mediante el cual se incorpora estabilizadores a un suelo para mejorar algunas de sus características geotécnicas, con el objetivo principal de elevar el nivel de servicio del afirmado y conservarlo durante la vida útil de la carretera.

La incorporación de estabilizadores en el afirmado es un procedimiento que viene llevándose a cabo desde el año 2009, ejecutadas mediante el estudio y monitoreo de la Dirección de Estudios Especiales de la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles dentro del marco de sus funciones establecidas en el Reglamento de Organización y Funciones del MTC, el cual ha dispuesto diversas normativas, documentos y manuales que establecen los criterios que deben emplearse en la aplicación de estabilizadores en caminos afirmados.

La estabilización de un suelo en su sentido más amplio, comprende todos los métodos físicos, fisicoquímicos y químicos empleados para hacer que un suelo sirva mejor a su propósito de ingeniería". (Winterkorn H. F., 1955)

2.2.1.1. Criterios para realizar el tratamiento con estabilizadores.

Para determinar el tipo de estabilizador y metodología, se aconseja tomar las siguientes consideraciones:

- Se debe realizar un estudio de las características físicas, mecánicas, químicas, mineralógicas y otros que sean necesarios para conocer las propiedades del suelo que sea desea mejorar.
- Es necesario establecer para que se desea estabilizar el suelo, ya sea para la subrasante, subbase, base, en el caso de un pavimento o podría ser para estabilizar taludes, etc.
- Se deberá tener una lista de estabilizadores que posiblemente ayudaría a mejorar el desempeño del suelo, estos deberán discriminarse de acuerdo a los antecedentes, resultados de los laboratorios y tramos de prueba.
- Los antecedentes que tuviera la utilización de algún estabilizador en suelos parecidos, ayudarían a ser más certeros en la elección del estabilizador.
- En la medida de lo posible, se deberá dar mayor prioridad a los estabilizadores que se generen en la zona, con el objetivo de economizar y de contar con este para la construcción y conservación vial.
- El procedimiento para incorporar estabilizadores a un afirmado, muchas veces es muy complejo, por ello, es necesario de maquinarias muy sofisticadas que en muchos casos no se cuenta, por eso, es necesario ser realista y escoger estabilizadores que sean manejables y fácilmente aplicables, teniendo en cuenta la envergadura del proyecto.
- Es preciso comparar las ventajas y desventajas en cuestión de precios de cada tipo de estabilizador con el que se puede mejorar un suelo.

Adicionalmente, se presenta el diagrama donde se explica el procedimiento para escoger el estabilizador más adecuado:

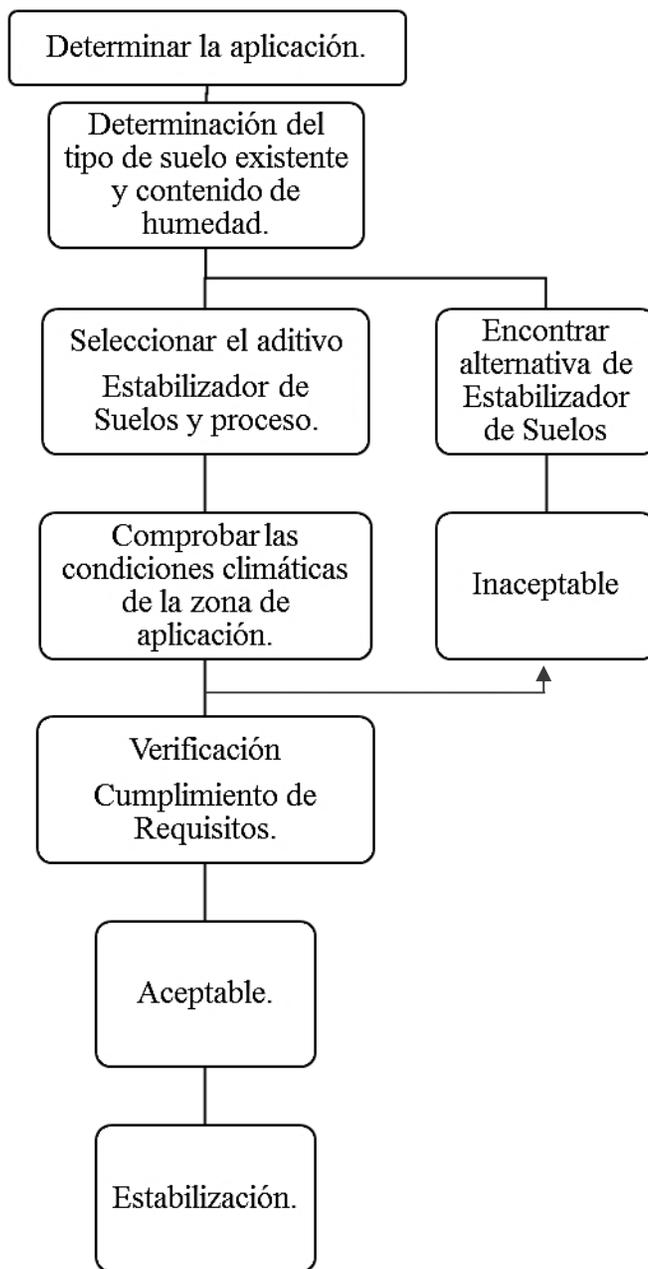


Figura 1. Diagrama para seleccionar el estabilizador.

Fuente: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2014)

Tabla 1
Guía complementaria referencial para la selección del tipo de estabilizador

Tipo de Estabilizador Recomendado	Normas Técnicas	Suelo ⁽¹⁾	Dosificación ⁽³⁾	Curado (Apertura al tránsito) ⁽⁵⁾	Observaciones
Cemento	EG-CBT-2008 Sección 3068 ASTM C150 AASTHO M85	A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7 LL > 40% IP ≥ 18% CMO ⁽²⁾ < 1.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.2% Abrasión < 50% Durabilidad SO ₄ Ca ⁽⁴⁾ -AF ≤ 10% -AG ≤ 12% Durabilidad SO ₄ Mg -AF ≤ 15% -AG ≤ 18%	2-12%	7 días	Diseño de mezcla de acuerdo a recomendaciones de la PCA (portland Cement Association)
Emulsión	ASTM D2397 o AASTHO M208	A-1, A-2 y A-3 Pasante malla N°200 ≤ 10% IP ≤ 8% Equiv. Arena ≥ 40% CMO ⁽²⁾ < 1.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.6% Abrasión < 50% Durabilidad SO ₄ Ca ⁽⁴⁾ -AF ≤ 10% -AG ≤ 12% Durabilidad SO ₄ Mg -AF ≤ 15% -AG ≤ 18%	4-8%	Mínimo 24 horas	Cantidad de aplicación a ser definida de acuerdo a resultados del ensayo Marshall modificado o Illinois

Cal	EG-CBT-2008 Sección 3068 AASTHO M216 AST C977 ASTM D98	A-2-6, A-2-7, A-6, A-7 10% ≤ IP ≤ 50% CMO ⁽²⁾ < 3.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.2% Abrasión < 50% A-1, A-2 y A-3 IP ≤ 15%	2-8%	Mínimo 72 horas.	Para IP > 50%. Se puede aplicar cal en dos etapas. Diseño de mezcla de acuerdo a la Norma Astm D6276
Cloruro de Calcio	ASTM D345 ASTM E449 MTC E 1109	CMO ⁽²⁾ < 3.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.2% Abrasión < 50%	1 a 3% en peso del suelo seco.	24 horas	
Cloruro de Sodio	EG-CBT-2008 Sección 309B ASTM E534 MTC E 1109	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 8% ≤ IP ≤ 15% CMO ⁽²⁾ < 3.0% Abrasión < 50% A-1, A-2 y A-3 IP ≤ 15%	50-80 Kg/m ³	07 días	La cantidad de sal depende de los resultados (dosificación) y tramo de prueba.
Cloruro de Magnesio	MTC E 1109	CMO ⁽²⁾ < 3.0% pH: mínimo 5 Abrasión < 50% A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7	50-80 Kg/m ³	48 horas	La cantidad de sal depende de los resultados (dosificación) y tramo de prueba.
Enzimas	EG-CBT-2008 Sección 308B MTC E 1109	6% ≤ IP ≤ 15% 4.5 < pH < 8.5 CMO ⁽²⁾ No debe contener Abrasión < 50% % > N° 200: 10 - 35%	1L / 30-33 m ³	De acuerdo a Especificaciones del fabricante	
Aceites sulfonados		Aplicable en suelos con partículas finas limosas o arcillosas, con LL bajo, arcillas y limos		De acuerdo a Especificaciones del fabricante	

muy plásticos
CMO ⁽²⁾ < 1.0%
Abrasión < 50%

Fuente: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2014, págs. 96-97)

- (1) Espesor de tratamiento por capas de 6 a 8"
- (2) Tamaño máximo: 2", debe carecer de restos vegetales.
- (3)"Los suelos naturales, materiales de bancos de préstamo o mezcla de ambos que sean objeto de estabilización, deben estar definidos en el Expediente Técnico del Proyecto".
- (4) CMO: Contenido de materia orgánica.
- (5)"Los diseños o dosificaciones deben indicar: fórmula de trabajo, tipo de suelo, cantidad de estabilizador, volumen de agua, valor de CBR o resistencia a compresión simple o resultados de ensayos Marshall modificado o Illinois, según corresponda al tipo de estabilizador aplicado."
- (6) Para altitudes mayores a 3000 msnm.
- (7) Después de finalizado el proceso de compactación.

Tabla 2
Especificaciones técnicas de tipos de estabilizadores y parámetros.

Suelo estabilizado con:	Parámetros
Cemento	<ol style="list-style-type: none"> Resistencia a compresión simple =1.8 Mpa mínimo (MTC E 1103) Humedecimiento-secado (MTC E 1104) <ul style="list-style-type: none"> -Para suelos A-1, A-2-4, A-2-5, A-3 = 14% de Pérdida máxima -Para suelos A-2-6, A-2-7, A-4, A-5= 10% de Pérdida máxima -Para suelos A-6, A-7 = 7% de Pérdida Máxima
Emulsión Asfáltica	<ol style="list-style-type: none"> Estabilidad Marshall =230 kg mínimo (MTC E 504) Pérdida de estabilidad después de saturado = 50 % máximo Porcentaje de recubrimiento y trabajabilidad de la mezcla debe estar entre 50 y 100%
Cal	<ol style="list-style-type: none"> CBR* = 100% mínimo (MTC E 115, MTC E 132) Expansión ≤ 0.5 %
Sales	<ol style="list-style-type: none"> CBR* = 100% mínimo, CBR no saturado (MTC E 115, MTC E 132)
Productos químicos (aceites sulfonados, ionizadores, polímeros, enzimas, sistemas, etc.)	<ol style="list-style-type: none"> CBR* = 100% mínimo (MTC E 115, MTC E 132) Expansión ≤ 0.5 %

(*) CBR corresponde a la penetración de 0.1 "

Fuente: (Documento Técnico Soluciones Básicas en Carreteras no Pavimentadas, 2015, pág. 4)

2.2.1.2. Métodos de estabilización.

Existen diversos métodos y tipos de estabilizadores para mejorar las propiedades de un suelo que conforma el afirmado, en todos los casos se buscará que la clasificación granulométrica, índice plástico, abrasión, CBR y otras características intrínsecas del material mejorado, se encuentre dentro de los parámetros de las especificaciones técnicas para caminos no pavimentados.

Un método convencional es la denominada estabilización mecánica, busca mejorar el comportamiento de la carpeta de rodadura mediante el proceso de compactación, por el cual se cambia la disposición de las partículas del suelo, quedando más resistente. Este método se emplea asiduamente en los mantenimientos periódicos; además, sin perjuicio del método y tipo de estabilizador, el procedimiento de compactación se aplica en la conformación del afirmado.

Como se dijo anteriormente, la bibliografía es extensa en cuanto a teorías y prácticas de estabilización existen; no obstante, Winterkorn y Pamukcu han identificado como soluciones económicas y prácticas a:

- Estabilización granular.
- Estabilización química.
- Estabilización térmica.
- Estabilización electrocinética.

2.2.1.2.1. Estabilización granular.

Consiste en la combinación de un suelo natural o del suelo que predomine en la zona del proyecto, con otros suelos que ayuden a obtener mejor respuesta cuando formen parte de la infraestructura de un camino.

Es una combinación de métodos de estabilización física y química en el que el esqueleto de rodamiento granular se modifica con materiales naturales y extraños que rellenan los poros y/o cementan (arcilla y otros hormigones y morteros). (Winterkorn & Pamukcu, 1991)

Este método es usado con frecuencia, pudiendo ser la combinación de suelos finos y suelos de grano grueso, suelos cohesivos y suelos friccionantes; logrando que se equilibre las propiedades de resistencia y cohesión entre las partículas del suelo y el material resultante sea más trabajable durante la construcción.

La combinación resultante estará compuesta de manera proporcionada de grava, arena, finos o limos, los cuales deberán cumplir con la gradación continua, plasticidad adecuada y otros parámetros establecidos por la normativa nacional.

La inversión económica para aplicar este método dependerá de la distancia en la que se encuentra el otro suelo que mejorará las características del afirmado, frecuentemente los costos iniciales son más bajos que emplear un estabilizador químico.

La estabilización granulométrica se puede controlar con ensayos simples de laboratorio, cuando se realice la combinación de suelos finos y gruesos se utilizará AASHTO T27 (ASTM C136), para suelos finos que fueron lavados sobre la malla N°200 (ASTM C 117), cuando se busque una combinación con gran cantidad de suelo fino que pase la malla N°200 se puede usar AASHTO T88 (ASTM D 422). (Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, 2005)

2.2.1.2.2. Estabilización química.

Es el procedimiento mediante el cual se incorpora estabilizadores químicos al suelo que presenta deficiencia en sus características naturales, estos aditivos actuarán cambiando sus propiedades moleculares superficiales.

Como resultado de la combinación suelo - estabilizador químico, podrá ser: hidratación, intercambio iónico, reacción puzolánica (cementación), floculación, precipitación, polimerización, oxidación y carbonización. (Winterkorn & Pamukcu, 1991)

Los estabilizadores químicos presentan limitaciones económicas; sin embargo, existen aditivos a los que se puede acceder con mayor facilidad como cal, cemento y asfalto.

Existe una gran variedad de estabilizadores, a continuación, se clasifica los estabilizadores químicos más empleados:

Tabla 3
Materiales para la estabilización de pavimentos

Tipos de materiales	
Ligantes asfálticos	Emulsiones asfálticas Asfalto espumado
Agentes Cementantes	Cemento Cal Cenizas
Otros aditivos químicos	Aditivos NT Residuos Formulaciones
	Sales Cloruro de sodio
	Cloruro de magnesio
	Cloruro de calcio

Fuente: (Thenoux Zeballos, 2018)

2.2.1.2.3. Estabilización térmica.

Es el proceso físico mediante el cual se aplica calor o congelación para mejorar las propiedades del suelo con características mecánicas deficientes.

- a) Calentamiento de suelos a altas temperaturas (típicamente por encima de 300 ° C) por métodos que pueden involucrar combustión, electricidad, microondas o aplicación de rayo láser, para causar permanente cambios en sus propiedades físicas. (Yurdanov, 1978); (Eggestad, 1983). Los métodos de calentamiento pueden ser: tratamiento in situ, con el uso de algún elemento que caliente el suelo; o tratamiento en hornos estacionarios donde se rellena el suelo para producir un nuevo material. Los suelos finos son los más adecuados para la estabilización por calentamiento, arcillas y loess. Los beneficios de este tipo de tratamiento son el aumento de la capacidad de resistencia, menor sensibilidad al agua, compresibilidad, reducción de la presión lateral y eliminación de características de colapso. Otra aplicación de la técnica es la vitrificación de la contención de residuos peligrosos sitios o suelos contaminados para crear un vidrio inerte bloque para el control de la migración de contaminantes o encapsulación del sitio. (Timmermann, 1984)
- b) La congelación (refrigeración) es usado de temporalmente para para controlar aguas subterráneas de terrenos inestables o cuando se encuentren debajo de la napa freática; también es utilizado de forma continua en regiones donde exista permafrost, en los lugares donde haya descongelamiento, se debe prevenir con este método. (Schuster, 1972) (Jessberger, 1983). Este método se puede aplicar en todo tipo de suelo, los beneficios que se puede lograr son: reducción de permeabilidad, aumento de fuerza compresiva; estas mejoras dependerán del tiempo, temperatura, distribución granular del suelo. (Winterkorn & Pamukcu, 1991, pág. 338)

2.2.1.2.4. Estabilización electrocinética.

Este método de estabilización utiliza la influencia de un campo eléctrico, facilita la consolidación de suelos de grano fino, desvía la filtración natural creando barrera de flujo. (Winterkorn H. F., 1947)

En la actualidad, estos fenómenos electrocinéticos se encuentran en investigación para desarrollar técnicas de descontaminación de suelo y agua subterránea. (Segall, O'Bannon, & Matthias, 1980)

2.2.1.3. Estabilización con la incorporación de suelo CL.

La incorporación de un suelo CL (arcilla fina gravosa con arena) a otro tipo de suelo corresponde a la denominada estabilización granulométrica o estabilización por combinación de suelos, tiene el objetivo de mejorar sus características hidráulicas.

Se deben tener en cuenta los tipos de arcilla que existen y la plasticidad que brinde, a continuación, se muestra la clasificación según su plasticidad:

Tabla 4
Clasificación de suelos según índice de plasticidad

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
IP>20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP<20	Media	Suelos arcillosos
IP>7	Baja	Suelos poco arcillosos plasticidad
IP=0	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2014, pág. 32)

2.2.1.3.1. Método de mínimos cuadrados para determinar el porcentaje de combinación con otro suelo.

Con el método de mínimos cuadrados, se pretende encontrar los porcentajes que al multiplicar con los materiales de cantera se ajuste más a las especificaciones promedio de los agregados utilizando la técnica de mínimos cuadrados, el cual es un ajuste lineal y cuadrático utilizando matrices.

Así tenemos que:

$$[E_{prom}] = [U] \times [C]$$

$$[U] = \begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} \text{CANTERA 01} & \text{CANTERA 02} \\ a_{11} & a_{21} \\ \vdots & \vdots \\ a_{1m} & a_{2n} \end{bmatrix}$$

Donde:

m y n : son los porcentajes que deben multiplicarse al material de cantera.

E_{prom} : se calcula de las especificaciones mínimas y máximas establecidas para el material de afirmado.

Para determinar los porcentajes de m y n de la matriz [U], se emplea la siguiente notación matricial:

$$[U] = [C^T \cdot C]^{-1} [C^T \cdot E_{prom}]$$

2.2.1.4. Estabilización con la incorporación de suelo CL y CaO.

La incorporación de un suelo CL, de por sí ya mejora la plasticidad del suelo, al añadir óxido de calcio, actuará de mejor forma debido a que es necesario que exista cierto grado de plasticidad en el suelo al que se incorporará la cal.

La incorporación de óxido de calcio corresponde a una estabilización química, debido a que se producirá un intercambio iónico y se producirá rápidamente floculación, producto del cual resultaran otros elementos químicos. En el proceso constructivo la cal ante la presencia del agua formará silicatos y aluminatos insolubles con las partículas de sílice y alúmina de los suelos.

2.2.1.4.1. Definición del óxido de calcio - CaO.

La cal, denominado químicamente como óxido de calcio y su simbología es CaO, conocido también como cal viva, es el resultado de la transformación química por la calcinación a temperaturas elevadas de la roca sedimentaria caliza (carbonato de calcio - CaCO_3) o dolomías (carbonato de calcio y magnesio - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). La cal hidratada denominado químicamente como hidróxido de calcio y su símbolo es $\text{Ca}(\text{OH})_2$, también es el resultado de la reacción química que tiene la cal viva con el agua.

El mejoramiento del suelo en base a los tratamientos con cal se puede dar haciendo uso de la cal en tres formas: cal viva, cal hidratada, o lechada de cal.

La cal que tiene mayor uso en las estabilizaciones de suelos es la que contiene mayor calcio y como máximo 5% de óxido o hidróxido de magnesio, debido a su reacción rápida para cementar.

2.2.1.4.2. Clasificación de la cal.

La cal utilizada en la construcción son las cales aéreas cálcicas, denominado así, por su reacción de cementación con el CO_2 de la atmosfera. Están compuestas principalmente por óxido e hidróxido de calcio y de magnesio, sin adición de materiales puzolánicos e hidráulicos, se clasifican, como sigue:

- Cales vivas Q: son cales aéreas que están constituidas por óxido de calcio (CaO) y magnesio (MgO), son resultado de la calcinación de caliza.
- Cales apagadas o hidratadas, S: son también cales aéreas, resultado de la cal viva apagada bajo control. Su composición es mayormente por hidróxido de calcio Ca(OH)_2 . (Sampedro Rodriguez, 2005)

2.2.2. Desempeño del afirmado.

El desempeño del afirmado se define como el comportamiento funcional y estructural estimado a lo largo del periodo. (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2014, pág. 12)

El comportamiento funcional del afirmado está directamente relacionado con las propiedades mecánicas de los materiales que la componen, requiriendo los porcentajes de piedra (soportar las cargas), arena clasificada (llenar los vacíos y dar estabilidad) y finos plásticos (cohesionar los materiales).

El afirmado puede tener tratamiento para su estabilización si sus características geotécnicas ameritan un mejoramiento; asimismo, el afirmado presentara mejor desempeño si se

realiza una adecuada conservación vial con la finalidad de conservar el nivel de servicio durante su ciclo de vida.

2.2.2.1. Definición básica del afirmado.

El afirmado es la superficie que resistirá las cargas de tráfico, los factores climáticos y otros factores exógenos que deterioren o disgreguen los materiales que lo componen.

La superficie de rodadura está compuesta por grava, arena y finos, cada uno de ellos debe ser proporcional en la medida que ofrezca su mejor comportamiento funcional.

La capa inferior del afirmado deberá tener mayor porcentaje de piedras y menos porcentaje de arcilla y finos.

Un buen afirmado para capa inferior tendrá mayor porcentaje de piedras que en el caso de la capa de superficie y muy poco porcentaje de arcillas y de materiales finos en general. La razón de ello es que la capa inferior debe tener buena resistencia para soportar las cargas del tránsito y además debe tener la cualidad de ser drenante.

Además, deberán satisfacer los siguientes requisitos de calidad:

- Desgaste Los Ángeles: 50% máximo (MTC E 207).
- Límite líquido: 35% máximo (MTC E 110).
- CBR (1): 40% mínimo (MTC E 132).

Si el índice de plasticidad fuera del rango 4 - 12%, deberá considerarse realizar un tratamiento superficial, como la imprimación reforzada bituminosa, estabilización con cal o

cemento, cloruros de sodio (sal) o magnesio u otros estabilizadores químicos con la finalidad de mantener y/o prolongar la vida útil del camino. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2005)

2.2.2.1.1. Espesor del afirmado.

Para el espesor del afirmado, se adoptó la siguiente ecuación del método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities (hoy AUSTROADS) que relaciona el valor soporte del suelo (CBR) y la carga actuante sobre el afirmado, expresada en número de repeticiones de EE:

$$e = [219 - 211 \times (\log_{10}\text{CBR}) + 58 \times (\log_{10}\text{CBR})^2] \times \log_{10} \times (\text{Nrep}/120)$$

Donde:

e = espesor de la capa de afirmado en mm.

CBR = valor del CBR de la subrasante.

Nrep = número de repeticiones de EE para el carril de diseño.

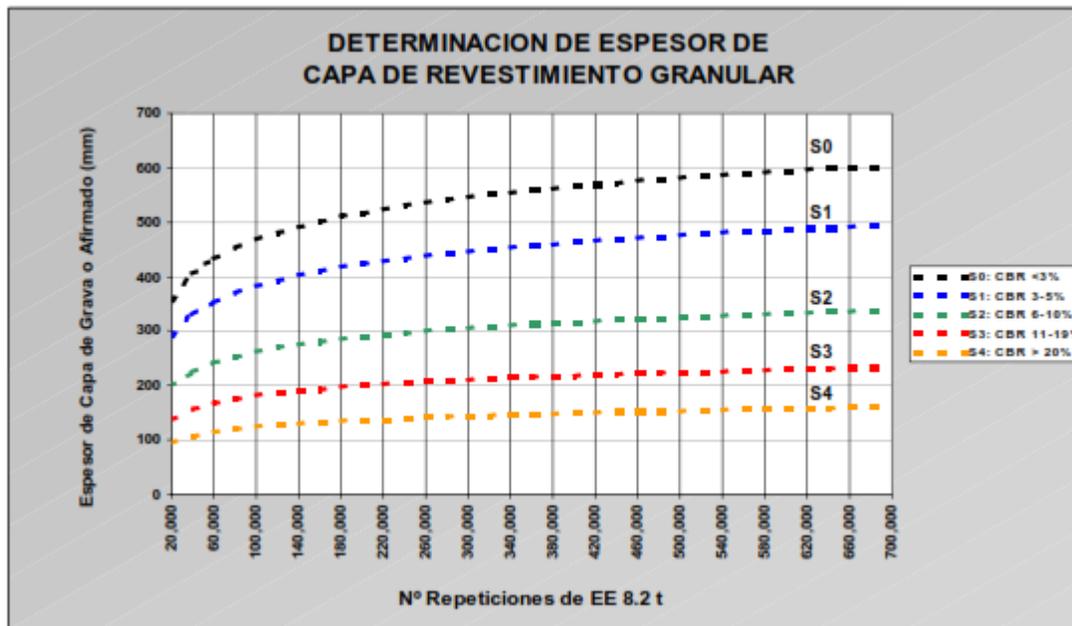


Figura 2. Espesor de capa de revestimiento granular.
Fuente: Elaboración con base en la ecuación de diseño del método NAASRA.

A continuación, se muestran catálogos de secciones de capas granulares de rodadura, en función al tipo de tráfico y de subrasante, elaborados de acuerdo a la ecuación antes mencionada.

CATALOGO DE CAPAS DE REVESTIMIENTO GRANULAR

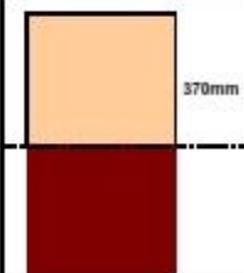
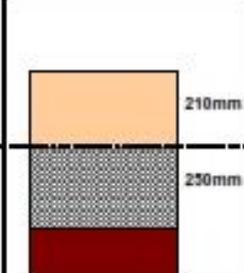
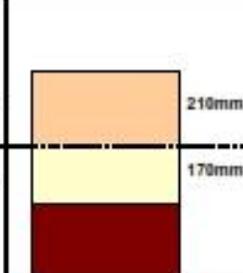
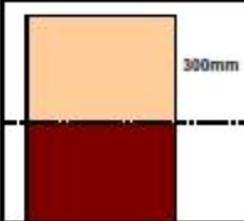
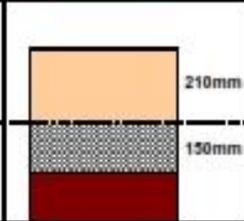
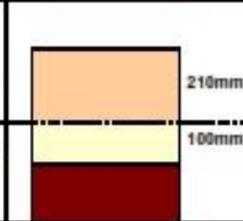
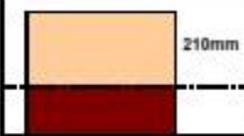
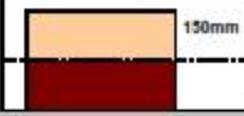
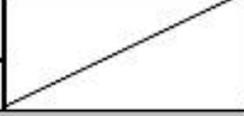
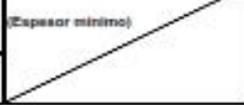
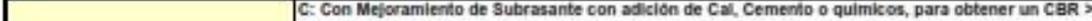
TIPO DE SUBRASANTE	CLASE TRAFICO: T0 IMDa: ≤ 15 vehiculos Vehiculos Pesados (Buses+Camiones) carril de diseño: = 6 vehiculos pesados Número de Repeticiones de EE 8.2t (carril de diseño): = $2.5E+04$		
	A: subrasante sin mejoramiento, perfilado y compactado	B: con mejoramiento de subrasante con reemplazo por material granular de CBR $> 6\%$	C: con mejoramiento de subrasante con adición de cal, cemento o químico
S0 SUBRASANTE MUY POBRE CBR $< 3\%$			
S1 SUBRASANTE POBRE CBR $3\% - 5\%$			
S2 SUBRASANTE REGULAR CBR $6\% - 10\%$			
S3 SUBRASANTE BUENA CBR $11\% - 19\%$			
S4 CBR $\geq 20\%$			
----- Nivel superior de la subrasante perfilado y compactado al 95% de la MDS			
 Subrasante			
 B: Con Mejoramiento de Subrasante con reemplazo por material granular de CBR $> 6\%$			
 C: Con Mejoramiento de Subrasante con adición de Cal, Cemento o químicos, para obtener un CBR $> 6\%$			
 Capa de Afirmado Tipo 1			
Nota: En caso se requiriese proteger la superficie de los caminos, podrá colocarse una capa protectora, que podría ser una Imprimación Reforzada Bituminosa; o una Estabilización con Cloruros de sodio (Sal), de magnesio; u otros estabilizadores químicos.			

Figura 3. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T0.

Fuente: (Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, 2005)

CATALOGO DE CAPAS DE REVESTIMIENTO GRANULAR

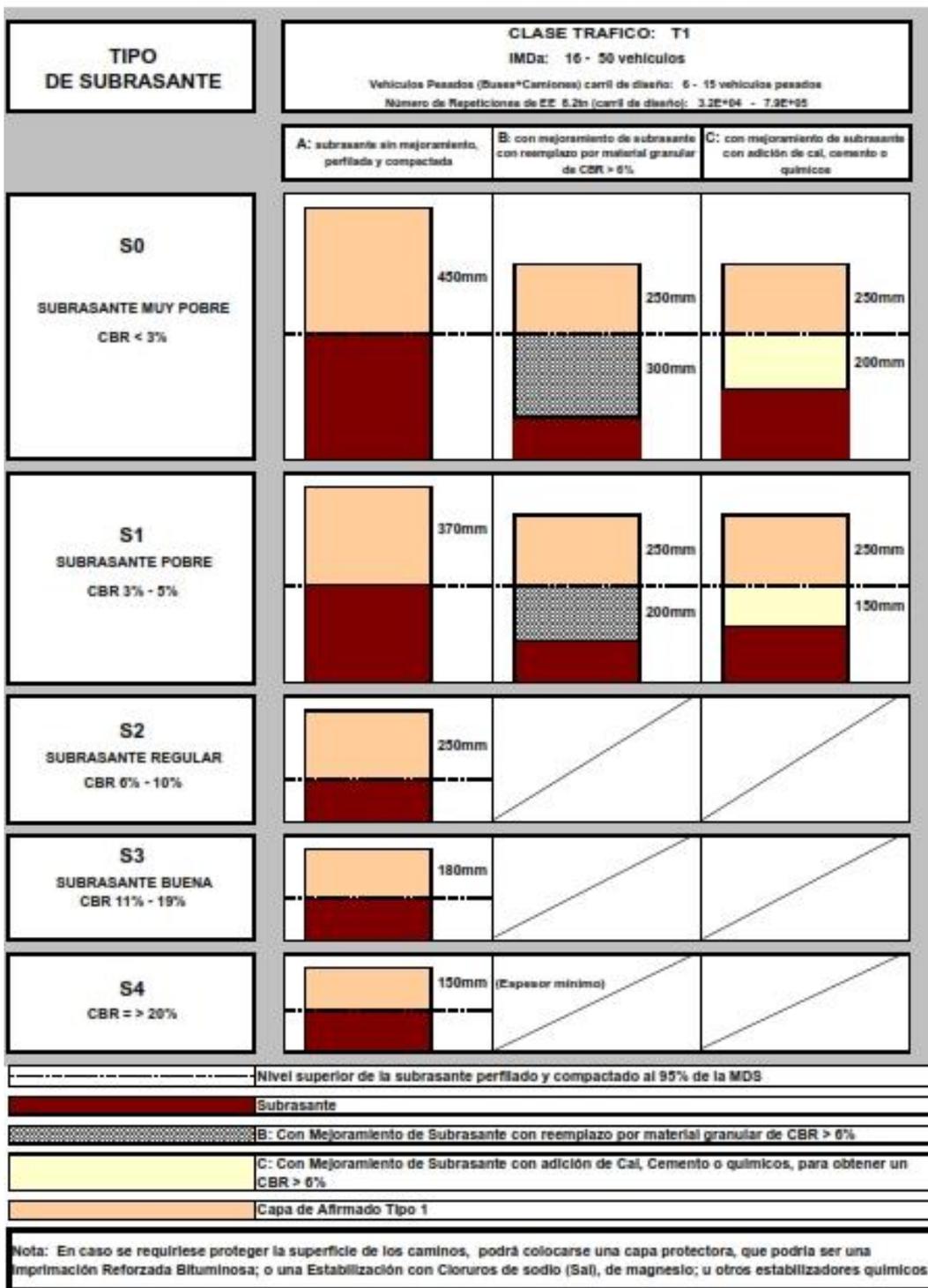


Figura 4. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T1.
Fuente: (Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, 2005)

CATALOGO DE CAPAS DE REVESTIMIENTO GRANULAR

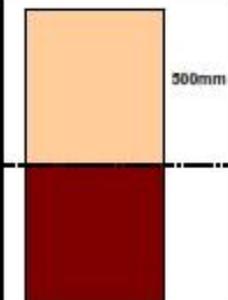
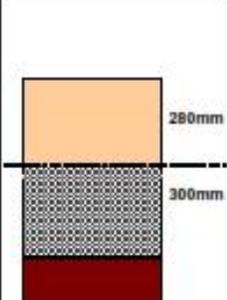
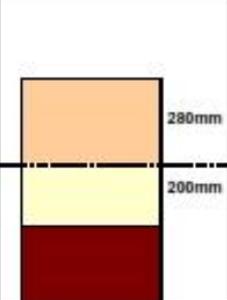
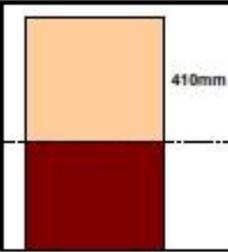
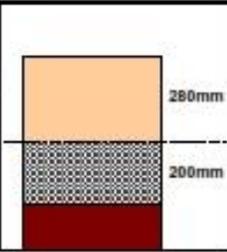
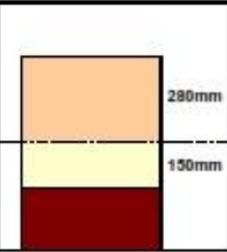
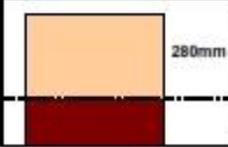
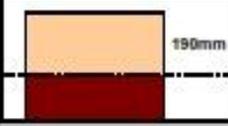
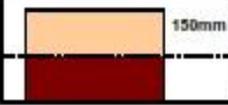
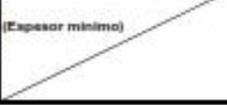
TIPO DE SUBRASANTE	CLASE TRAFICO: T2 IMDa: 51 - 100 vehículos Vehículos Pesados (Buses+Camiones) carril de diseño: 18 - 28 vehículos pesados Número de Repeticiones de EE: 8.2ln (carril de diseño): 7.9E+04 - 1.5E+05		
	A: subrasante sin mejoramiento, perfilado y compactado	B: con mejoramiento de subrasante con reemplazo por material granular de CBR > 6%	C: con mejoramiento de subrasante con adición de cal, cemento o químicos
S0 SUBRASANTE MUY POBRE CBR < 3%			
S1 SUBRASANTE POBRE CBR 3% - 5%			
S2 SUBRASANTE REGULAR CBR 6% - 10%			
S3 SUBRASANTE BUENA CBR 11% - 19%			
S4 CBR >= 20%			
	----- Nivel superior de la subrasante perfilado y compactado al 95% de la MDS		
	Subrasante		
	B: Con Mejoramiento de Subrasante con reemplazo por material granular de CBR > 6%		
	C: Con Mejoramiento de Subrasante con adición de Cal, Cemento o químicos, para obtener un CBR > 6%		
	Capa de Afirmado Tipo 2		
Nota: En caso se requiriese proteger la superficie de los caminos, podrá colocarse una capa protectora, que podría ser una Imprimación Reforzada Bituminosa; o una Estabilización con Cloruros de sodio (Sal), de magnesio; u otros estabilizadores químicos.			

Figura 5. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T2.

Fuente: (Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, 2005)

CATALOGO DE CAPAS DE REVESTIMIENTO GRANULAR

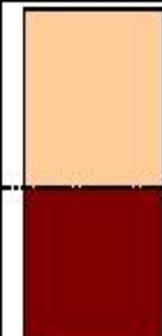
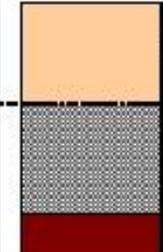
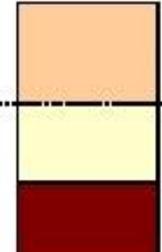
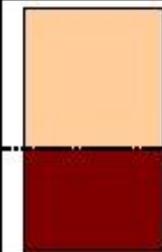
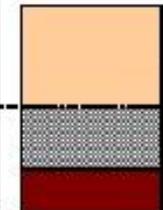
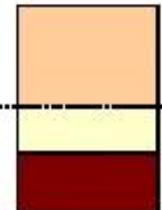
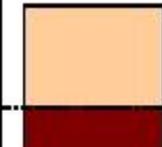
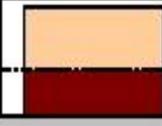
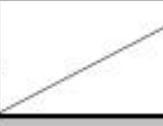
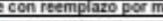
TIPO DE SUBRASANTE	CLASE TRAFICO: T3 IMDa: 101 - 200 vehículos Vehículos Pesados (Buses+Camiones) carril de diseño: 29 - 56 vehículos pesados Número de Repeticiones de EE: 3.2m (carril de diseño): 1.6E+05 - 3.1E+05		
	A: subrasante sin mejoramiento, perfilado y compactado	B: con mejoramiento de subrasante con reemplazo por material granular de CBR > 6%	C: con mejoramiento de subrasante con adición de cal, cemento o químico
S0 SUBRASANTE MUY POBRE CBR < 3%			
S1 SUBRASANTE POBRE CBR 3% - 5%			
S2 SUBRASANTE REGULAR CBR 6% - 10%			
S3 SUBRASANTE BUENA CBR 11% - 19%			
S4 CBR > 20%			
----- Nivel superior de la subrasante perfilado y compactado al 95% de la MDS			
 Subrasante			
 B: Con Mejoramiento de Subrasante con reemplazo por material granular de CBR > 6%			
 C: Con mejoramiento de subrasante con adición de Cal, Cemento o químicos, para obtener un CBR > 6%			
 (Capa de Almacado Tipo 1)			
Nota: En caso se requiriese proteger la superficie de los caminos, podrá colocarse una capa protectora, que podría ser una Imprimación Reforzada Bituminosa; o una Estabilización con Cloruros de sodio (Sal), de magnesio; u otros estabilizadores químicos.			

Figura 6. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T3.
Fuente: (Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, 2005)

CATALOGO DE CAPAS DE REVESTIMIENTO GRANULAR

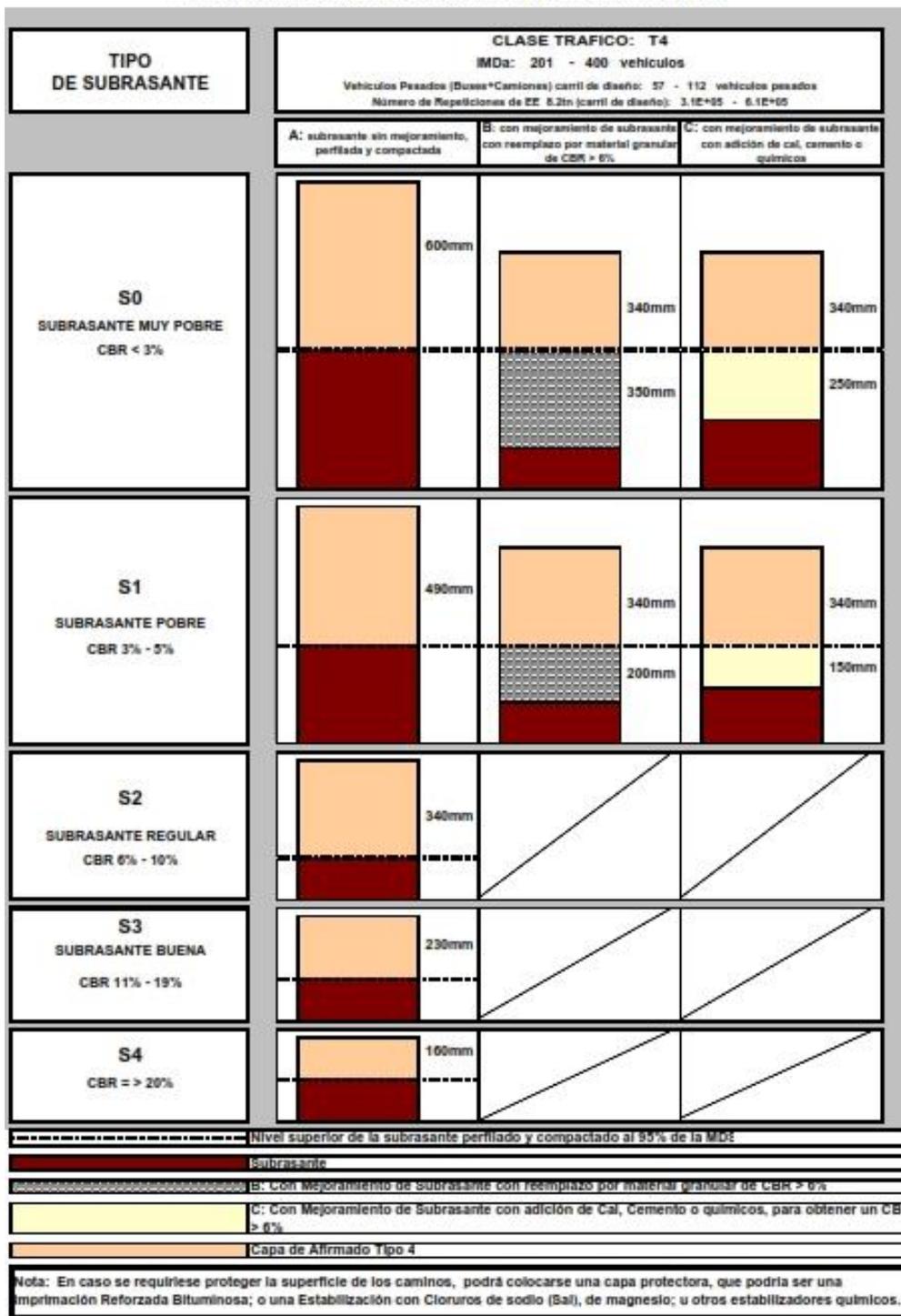


Figura 7. Catálogo de capas de revestimiento granular, tráfico T4.
Fuente: (Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, 2005)

La dosificación y mezcla del material para afirmado debe considerar las gradaciones que recomienda la Especificación Técnica EG- CBT 2005, sección 302B.

Es a partir de esta especificación que se efectúan los ensayos y dosificaciones hasta conseguir un material de afirmado de buena calidad, de ser el caso, se establecerán las diferencias que sustenten una especificación especial, como variante de la EG-CBT 2005, sección 302B. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2005)

2.2.2.1.2. Clasificación granulométrica.

La granulometría de un suelo es dispersa en la naturaleza, por lo que es poco probable encontrar una gradación ideal para que conforme el afirmado, ante esta situación se hace necesario realizar zarandeo de acuerdo a las especificaciones de la granulometría. La procedencia de los agregados puede ser de alguna excavación excedente, cantera, o de la fracturación de rocas y gravas.

Las piedras que sean rugosas y que tengan caras fracturadas actuarán mejor que las piedras lisas, permitiendo tener mayores lados de cohesión y finalmente aportando mayor resistencia al afirmado.

Antes de que los agregados se utilicen en obra, se deberá realizar los ensayos que comprueben su calidad y determinen la dosificación del material.

El manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito determina que está compuesto por cuatro tipos, el espesor y las especificaciones del afirmado en función del IMD, a continuación, se mencionan:

- Afirmado tipo 1: pertenece al material granular natural o grava seleccionada por zarandeo que tiene un índice de plasticidad hasta 9; excepcionalmente, se podrá incrementar la plasticidad hasta 12, previa justificación técnica. Se utilizará en los caminos de bajo volumen de tránsito, clases T0 y T1, con IMD proyectado menor a 50 vehículos por día.
- Afirmado tipo 2: pertenece al material granular natural o de grava seleccionada por zarandeo que tiene un índice de plasticidad hasta 9; excepcionalmente, se podrá incrementar la plasticidad hasta 12, previa justificación técnica. Se utilizará en los caminos de bajo volumen de tránsito, clase T2, con IMD proyectado entre 51 y 100 vehículos día.
- Afirmado tipo 3: pertenece al material granular natural o grava seleccionada resultado del zarandeo o chancado, tendrá un índice de plástico máximo de 9 y solo en casos especiales será hasta 12. Su uso será en caminos de bajo volumen de tránsito, clase T3, con IMD proyectado entre 101 y 200 vehículos por día.
- Afirmado tipo 4: pertenece al material granular o grava seleccionada por chancado o trituración, tendrá un índice de plástico máximo de 9 y solo en casos especiales será hasta 12. Su uso será en caminos de bajo volumen de tránsito, clase T4, con IMD proyectado entre 201 y 400 vehículos por día.

Según lo mencionado anteriormente, se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 5
Granulometría para cada tipo de afirmado, según el IMD proyectado

Porcentaje que pasa del tamiz	Tipo y afirmado			
	Tráfico T0 y T1: Tipo 1 IMD<50 veh.	Tráfico T2: Tipo 2 51-100 veh.	Tráfico T3: Tipo 3 101 – 200 veh.	Tráfico T4: Tipo 4 201 – 400 veh.
50 mm (2")	100	100		
37.5 mm (1½")		95 – 100	100	
25 mm (1")	50 – 80	75 – 95	90 – 100	100
19 mm (¾")			65 – 100	80 – 100
12.5 mm (½")				
9.5 mm (3/8")		40 – 75	45 – 80	65 – 100
4.75 mm (Nº 4)	20 - 50	30 – 60	30 – 65	50 – 85
2.36 mm (Nº 8)				
2.0 mm (Nº 10)		20 – 45	22 – 52	33 – 67
4.25 um (Nº 40)		15 – 30	15 – 35	20 – 45
75 um (Nº 200)	4 - 12	5 – 15	5 – 20	5 – 20
Índice de Plasticidad	4 – 9	4 - 9	4 - 9	4 - 9

Fuente: (Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, 2005, pág. 148)

2.2.2.2. Nivel de servicio del afirmado.

La calificación y cuantificación del estado de servicio de un camino por medio de indicadores es denominado nivel de servicio del afirmado, debe tenerse en cuenta que estos indicadores muestran los límites hasta los cuales debería llegar la condición superficial, estructural y de seguridad de un camino. Cada vía posee sus propios indicadores, estos varían en función a factores técnicos, económicos y perspectiva de satisfacción del usuario.

Las actividades de conservación vial deben realizarse cumpliendo los estándares que indican los niveles de servicio y no por la cantidad ejecutada. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018, pág. 33)

Tabla 6
Niveles de servicio para calzada de afirmado

Parámetro	Medida	Nivel de servicio
Deformación	Porcentaje máximo de área con deformaciones mayores a 50 mm	5%
Erosión	Porcentaje máximo de área con erosión mayores a 50 mm	10%
Baches (Huecos)	Porcentaje máximo de área con baches (huecos)	0%
Encalaminado	Porcentaje máximo de área con Encalaminado	10%
Lodazal y cruce de agua	Porcentaje máximo de área con lodazal y cruces de agua.	5%
Rugosidad obras nuevas	Rugosidad características tramo obra nueva	5.0 IRI _c (*)
Rugosidad con mantenimiento periódico	Rugosidad característica del tramo con mantenimiento periódico.	6.0 IRI _c (*)
Rugosidad durante el periodo de servicio	Rugosidad característica del tramo en periodo de servicio	8.0 IRI _c (*)

Fuente: (Manual de Carreteras Mantenimiento o Conservación Vial, 2018, pág. 35)

(*) IRI característico (IRI_c), a la confiabilidad de 70%

IRI_c = IRI_p + 0.524 x ds

IRI_p = IRI promedio

ds = desviación estándar

2.2.2.3. Ciclo de vida fatal y deseable del camino.

El deterioro prematuro de los caminos sin conservación vial, es considerado como el ciclo de vida fatal; el deterioro natural del camino por los diversos agentes climáticos y cargas

de tráfico, suele ser más lento y progresivo cuando cuenta con mantenimiento, es considerado como el ciclo de vida deseable del camino.

El manual técnico de mantenimiento rutinario de caminos con microempresas, 2003, resumen en cuatro fases el deterioro que tienen que pasar todos los caminos (pp. 3,4), a continuación, se muestra:

- Fase A: Construcción, constituye el estado inicial de la vía una vez culminada la ejecución de la obra.
- Fase B: Deterioro lento y poco visible; es el daño inicial que presenta el camino, los primeros años no será notorio es desgaste del afirmado; sin embargo, se estará produciendo debilitamiento de la infraestructura del pavimento. Este deterioro será proporcional a la carga vehicular y a los agentes climatológicos.
- Fase C: Deterioro acelerado es cuando la superficie de rodadura y todos los elementos de la vía presentan desgaste mayor, se produce en corto tiempo y es el inicio a la aceleración del deterioro del afirmado.
- Fase D: Descomposición total es la fase final del camino, generando dificultades en el tránsito, elevando los costos de operación de los vehículos, lo

que afecta directamente a los neumáticos, ejes y otros propios del vehículo.

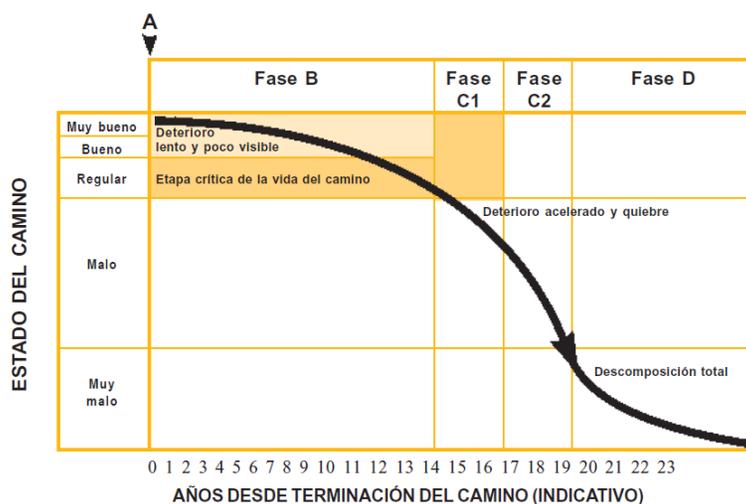


Figura 8. Condición de la vía sin mantenimiento.

Nota: El gráfico es la representación del deterioro de un pavimento de hormigón asfáltico. En caminos no pavimentados el deterioro inicia a los 2 a 3 años, no obstante, la curva de descomposición se puede utilizar para los caminos de cualquier tipo.

Fuente: (Manual técnico de mantenimiento rutinario de caminos con microempresas, 2003)

En la siguiente figura se aprecia, un adecuado sistema de mantenimiento que mantiene el camino dentro de un rango de deterioro aceptable.

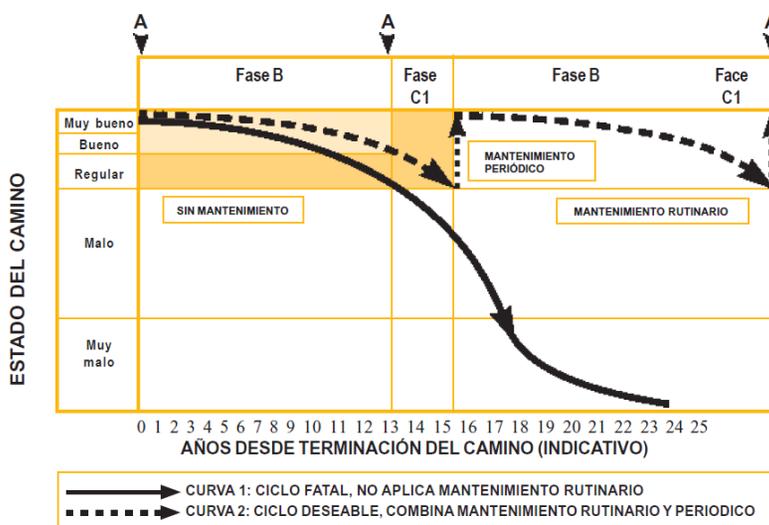


Figura 9. Condición de la vía con mantenimiento.

Fuente: (Manual técnico de mantenimiento rutinario de caminos con microempresas, 2003)

A continuación, se muestra el proceso del camino sin y con mantenimiento:

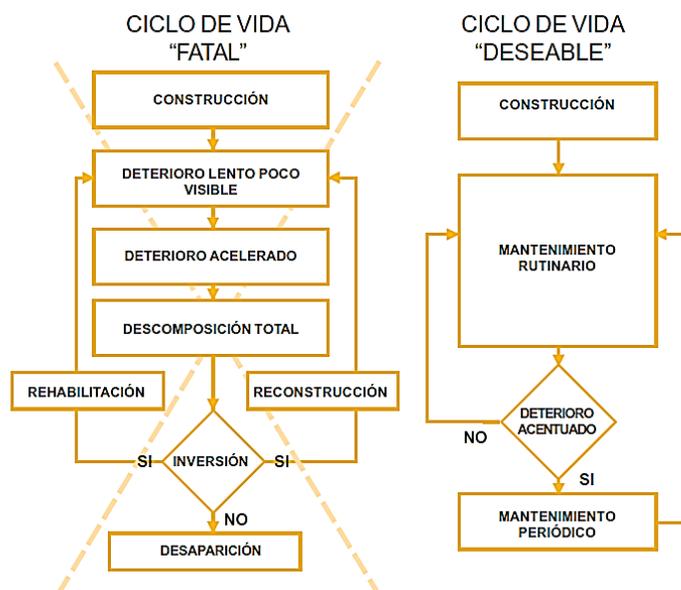


Figura 10. Diagrama de flujo del ciclo de vida fatal y deseable
Fuente: (Manual técnico de mantenimiento rutinario de caminos con microempresas, 2003)

2.2.2.4. Índice de rugosidad internacional.

Parámetro que evalúa el estado de la superficie de rodadura de una vía desde el punto de vista de irregularidades como ondulaciones y deformaciones con respecto a una superficie plana teórica (Sachún Quispe, 2016). El Índice de Rugosidad Internacional (IRI), es aceptado como estándar de medida de la regularidad superficial de un camino por el Banco Mundial en el año 1986.

La unidad de medida del IRI es expresado en metros por kilómetro (m/km), el valor más bajo es IRI= 0 m/km correspondiente a un perfil plano, no existiendo un límite superior. Los valores mayores a 8 m/km en la práctica, se consideran como intransitables, excepto a velocidades reducidas. (Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics, 2016)

Conocer el Índice de Rugosidad Internacional, es importante porque nos da una apreciación técnica del nivel de serviciabilidad de un afirmado, estos resultados se pueden relacionar con el tiempo, precipitaciones y otros factores que pudieran estar implicados.

Los caminos afirmados presentan valores de rugosidad más alto que las carreteras asfaltadas y pavimentadas, por ello, es que la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles - MTC, ha establecido ciertos valores característicos para el afirmado nuevo, afirmado con recapa afirmada durante el periodo de servicio, a continuación, se detalla:

Tabla 7
Rugosidad IRI (m/km) de caminos no pavimentados – afirmados

Tipo de carretera	Rugosidad característica inicial afirmado nuevo IRI (m/km)	Rugosidad característica inicial afirmado con recapa IRI (m/km)	Rugosidad característica durante el periodo de servicio IRI (m/km)	Observación
Carreteras de Bajo Volumen de Transito No Pavimentadas - Afirmadas	5.00	6.00	8.00	Rugosidad característica para una confiabilidad de 70%

Fuente: (Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2014, pág. 271)

Para establecer los estados de un camino según su rugosidad en caminos vecinales, tomamos en cuenta lo establecido por el MTC para las vías departamentales no pavimentadas, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8
Estado del camino de caminos no pavimentados

Estado del camino		Superficie de rodadura IRI	Criterios y condiciones del camino
Muy mal estado	MM	>18	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie de rodadura presenta elevado deterioro, grandes deformaciones, hundimientos y baches. • La circulación muy restringida durante la mayor parte del año • Obras de arte insuficientes y obras de drenaje insuficientes y colmatadas • La velocidad de circulación es menor a 10 km/hora en tramos rectos • La superficie de rodadura presenta deterioro, grandes deformaciones, hundimientos y baches. • La circulación muy restringida durante ciertos periodos del año
Mal estado	M	14 -18	<ul style="list-style-type: none"> • Obras de arte insuficientes y obras de drenaje insuficientes y colmatadas • La velocidad de circulación es menor a 20 km/hora en tramos rectos • La superficie de rodadura presenta deterioro superficial y presencia de baches y hundimientos puntuales.
Regular estado	R	10 - 14	<ul style="list-style-type: none"> • La circulación sin restricciones durante el año • Obras de arte con daños menores y obras de drenaje parcialmente colmatados

Buen estado	B	6-10	<ul style="list-style-type: none"> • La velocidad de circulación es aproximadamente entre 20 y 40Km/Hora en tramos rectos • La superficie de rodadura no presenta deterioro apreciable • De circulación sin restricciones durante el año • Obras de arte en buen estado y obras de drenaje limpias • La velocidad de circulación es aproximadamente entre 40 kilómetros por hora en tramos • Superficie de rodadura sin efectos y con excelente regularidad superficial. • De circulación sin restricciones durante el año.
Muy buen estado	MB	4-6	<ul style="list-style-type: none"> • Todas las obras de arte y drenaje en buen estado y limpias. • La velocidad de circulación puede llegar a ser mayor a 60 km/hora en tramos rectos

Fuente: (Manual técnico de mantenimiento periodico para la red vial departamental no pavimentada, 2006)

2.2.2.4.1. Clasificación y equipos para evaluar la rugosidad.

El índice de rugosidad se puede medir por distintos métodos, el Banco Mundial clasifica los métodos para la medición de la rugosidad en 4 clases:

- Clase 1: Perfiles de precisión.
- Clase 2: Otros métodos perfilométricos.
- Clase 3: Estimaciones del IRI mediante correlaciones.

- Clase 4: Valoraciones subjetivas y medida sin calibrar. (Sayers, Gillespie, & Paterson , 1986)

Los equipos son diversos, entre los cuales se encuentran: los perfilómetros dinámicos y los sistemas estáticos.

Equipos de medición dinámicos:

- Perfilógrafos.
- Perfilómetro inercial APL.
- Perfilómetro inercial.

Equipos de medición estáticos:

- Levantamientos con mira y nivel.
- Perfilómetros de barra del TRRL.
- Face Dipstick.
- Rugosímetro Merlín.

2.2.2.4.2. Rugosímetro Merlín.

Denominado así por la abreviatura de “Machine for Evaluating Roughness using Low cost Instrumentation”, consiste de una estructura metálica de 1.80 m de longitud, en frente con una rueda, atrás un pie de apoyo fijo y al centro un apoyo oscilante. El apoyo oscilante mide las desviaciones de cota de un punto respecto en la rasante que definen los otros dos puntos, esta

a su vez unido a un brazo en su extremo superior posee un puntero que permite registrar estas desviaciones en una planilla de papel. (Sachún Quispe, 2016)



Figura 11. Instrumento del rugosímetro de Merlín.

2.2.2.4.3. Metodología para determinar el IRI.

Para la ejecución de los ensayos, se requiere como mínimo de dos personas, un operador que conduce el equipo y realiza las lecturas y un auxiliar que las anota. Asimismo, se recomienda seleccionar el carril de una vía, las mediciones se efectúan siguiendo la huella exterior del tráfico.

Determina un valor de rugosidad 200 observaciones efectuadas de las “irregularidades que presenta el afirmado” (desviaciones relativas a la cuerda promedio), cada una de las cuales son detectadas por el patín móvil del Merlín, indicando la posición que adopta el puntero sobre la escala graduada del tablero, generándose de esa manera las lecturas. Las observaciones deben realizarse estacionando el equipo a intervalos regulares, generalmente cada 2m de distancia; en la práctica esto se resuelve tomando como referencia la circunferencia de la rueda del MERLIN, que es aproximadamente esa dimensión, es decir, cada ensayo se realiza al cabo de una vuelta de la rueda.

La medición es continua, a una velocidad promedio de 2 km/h. El ensayo inicia cuando el equipo se encuentra estacionado al inicio del tramo, el operador espera que el puntero se estabilice y observa la posición que adopta respecto de la escala colocada sobre el tablero, realizando así la lectura que es anotada por el auxiliar. Paso seguido, el operador toma el instrumento por las manijas, elevándolo y desplazándolo la distancia constante seleccionada para usarse entre un ensayo y otro (una vuelta de la rueda). En la nueva ubicación, se repite la operación explicada y así sucesivamente hasta completar las 200 lecturas. El espaciado entre los ensayos no es un factor crítico, pero es recomendable que las lecturas se realicen siempre estacionando la rueda en una misma posición, para lo cual se pone una señal o marca llamativa sobre la llanta (con gutapercha fosforescente, por ejemplo), la que debe quedar siempre en contacto con el piso. Ello facilita la labor del operador quien, una vez hecha la lectura, levanta el equipo y controla que la llanta gire una vuelta haciendo coincidir nuevamente la marca sobre el piso. (Aguila Rodriguez, 1998)

2.2.2.4.4. Relación de la rugosidad de Merlín con el IRI.

Para determinar el IRI a partir de las mediciones con el rugosímetro de Merlín, se utiliza las siguientes expresiones:

- a) Cuando $2.4 < IRI < 15.9$, entonces $IRI = 0.593 + 0.0471 D$
- b) Cuando $IRI < 2.4$, entonces $IRI = 0.0485 D$
- c) $IRI = 1.913 + 0.0490 D$

Donde: IRI: Índice de rugosidad internacional y D: Rugosidad del pavimento en unidades MERLIN.

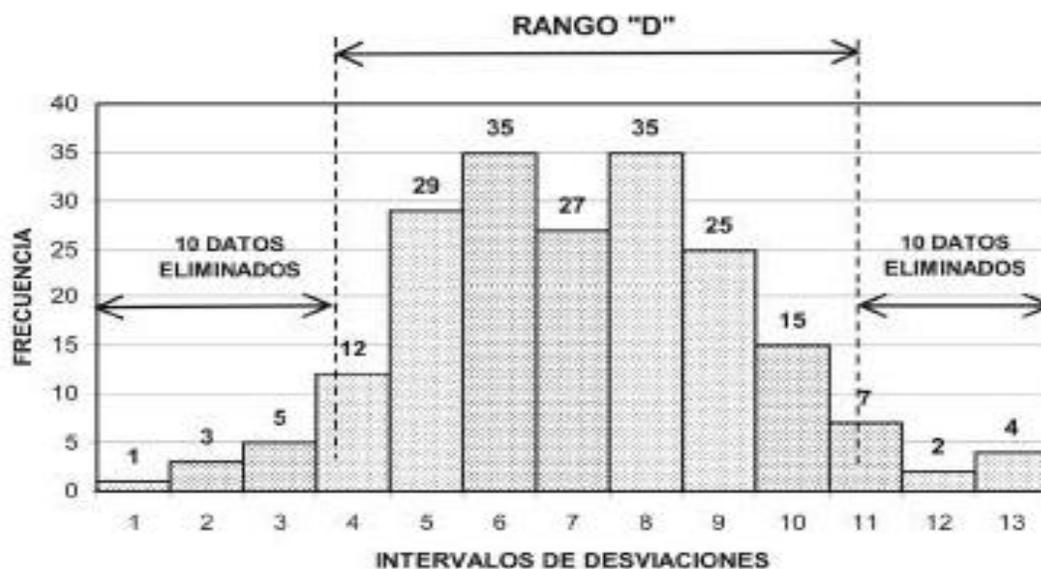


Figura 12. Histograma de la distribución de frecuencias.

La primera expresión fue establecida por el TRRL mediante simulaciones computarizadas, utilizada para la evaluación de pavimentos en servicio, con superficie de rodadura asfáltica, granular o de tierra, siempre y cuando su rugosidad se encuentre comprendida en el intervalo indicado.

La segunda expresión es la ecuación de correlación establecida y comprobada en Perú, utilizada para evaluar pavimentos recién construidos.

La tercera expresión utilizada para superficies con macadam de penetración de extendido manual. (Aguila Rodriguez, 1998)

2.2.2.4.5. Control de calidad de pavimentos mediante el IRI.

La rugosidad o regularidad superficial se deberá controlar calculando el parámetro denominado IRI característico, el cual es definido por la siguiente expresión:

$$IRI_c = IRI_p + 1,645 \times \sigma$$

Donde:

IRI_c : IRI característico

IRI_p : IRI promedio

σ : Desviación estándar

De acuerdo al factor de correlación empleado ($K=1.645$), se cumplirá que el 95% del pavimento experimentará una rugosidad igual o menor al IRI característico.

2.3. Definición de términos básicos

Las siguientes definiciones son recopilaciones de “Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial”, versión actualizada junio 2013, aprobada por Resolución Directoral N°18-2013-MTC/14.

- **Afirmado:** es la capa superior de la estructura del pavimento en caminos no pavimentados, estará compactada con material granular natural o procesado y tendrá una gradación específica.
- **Agregado:** es aquel material que se puede obtener de una cantera o por trituración, pueden estar compuesto por arena, grava y escoria usadas. Tiene diferentes tamaños y de acuerdo al uso, se seleccionará el agregado adecuado.
- **Agregado fino:** es aquel material que pasa la malla N° 4 (4,75 mm) y contiene finos.
- **Agregado grueso:** es aquel material que es retenida en la malla N°4 (4,75 mm).

- Arcillas: son aquellas partículas con tamaño menor a $2\ \mu\text{m}$ (0,002 mm).
- Arena: son aquellas partículas de roca que pasan la malla N° 4 (4,75 mm) y son retenidas por la malla N° 200.
- Calicata: es la excavación que se realiza en un terreno para determinar sus características geotécnicas del suelo recabado y también para determinar los estratos que componen el suelo.
- Caliza: roca sedimentaria compuesta de carbonato de calcio (calcita).
- Cantera: banco natural donde se encuentra material apropiado para ser utilizado en la construcción, rehabilitación, mejoramiento y/o mantenimiento de las carreteras proveniente de depósito natural.
- Carretera afirmada: carretera cuya superficie de rodadura constituye una o más capas de afirmado.
- Clasificador de rutas: documento oficial del Sistema Nacional de Carreteras (SINAC), clasificadas en red vial nacional, departamental y vecinal, incluye también las carreteras existentes y en proyecto.
- Código de ruta: es la denominación sintética de una vía del Sistema Nacional de Carreteras (SINAC).
- Cohesión: es la unión de partículas, debido a la atracción molecular.

- Compactación: es aquel proceso manual o mecánico que busca reducir los vacíos del suelo.
- Granulometría: es la representación de la distribución de los tamaños que posee el agregado mediante el tamizado según especificaciones técnicas.
- Mantenimiento vial: es el conjunto de actividades que tienen el objeto de conservar en buen estado la infraestructura vial, garantizando un servicio óptimo al usuario, el mantenimiento puede ser rutinario o periódico.
- Pavimento: es la estructura que se encuentra sobre la subrasante de la vía, tiene la finalidad de resistir y distribuir las cargas de los vehículos, está conformado por subbase, base y rodadura.
- Ph: mide el estado de acidez o alcalinidad de una sustancia. Los valores extremos del pH son 0 y 14; y el valor medio 7 indica que la solución es neutra.
- Plataforma: es la superficie superior de una vía, se encuentran incluidas la calzada o superficie de rodadura, bermas, veredas, separadores centrales y cunetas.
- Rehabilitación: es la actividad que se realiza para regresar a la infraestructura vial sus características iniciales.
- Subbase: es la capa que se encuentra debajo de la base y forma parte de la estructura de un pavimento.

- Subrasante: es la superficie final de la partida de movimiento de tierras (corte o relleno) ejecutado en una obra, por encima se instala la estructura del pavimento o afirmado.
- Tamiz: es un utensilio de laboratorio, utilizado para clasificar de acuerdo al tamaño del suelo.
- Tránsito: es aquella actividad que realizan las personas y vehículos por una vía.
- Usuario: es aquella persona que usa la vía pública caminando o utilizando un vehículo.
- Variante: es la bifurcación de una vía, para dar inicio a otra vía, que puede llamarse ramal.
- Vehículo liviano de uso privado (ligero): es aquel vehículo automotor de peso bruto hasta 1.50 ton.
- Vehículo liviano: es aquel vehículo automotor de peso bruto mayor a 1.50 ton hasta 3.50 ton.
- Vehículo pesado: es aquel vehículo automotor de peso bruto mayor a 3.50 ton.
- Vida útil: es el tiempo en el cual una obra vial debe servir en condiciones adecuadas, con una conservación adecuada.

2.4. Formulación de la hipótesis

2.4.1. Hipótesis general.

El tratamiento con estabilizadores mejorará el desempeño del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000), distrito de Circa, Apurímac-2017.

2.4.2. Hipótesis específicas.

- a) La incorporación de suelo CL y CaO¹ optimará la clasificación granulométrica del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).
- b) La incorporación de suelo CL y CaO incrementará el índice plástico del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).
- c) La incorporación de suelo CL y CaO aumentará el CBR del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).
- d) La incorporación de suelo CL y CaO conservará el índice de rugosidad internacional del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).

2.5. Operacionalización de variables e indicadores

2.5.1. Variable independiente.

Tratamiento con estabilizadores.

2.5.2. Variable dependiente.

Desempeño del afirmado.

¹ CaO: Óxido de calcio (Cal).

2.5.3. Operacionalización de las variables.

Tabla 9
Operacionalización de las variables

Variables	Definición	Dimensiones	Indicadores (medición)	Ítem (rango de variabilidad)
(X) Variable Independiente	Es el proceso mediante el cual se incorpora estabilizadores a un suelo para mejorar algunas de sus características geotécnicas.	X1: Incorporación de suelo CL y CaO	% Peso seco de la muestra	1. 10% de CL + 0% de CaO 2. 10% de CL + 1.5% de CaO
Tratamiento con estabilizadores		Y1: Clasificación Granulométrica	Clasificación AASTHO	1. Excelente (A-1) 2. Bueno (A-2) 3. Regular (A-4, A-5) 4. Malo (A-6, A-7)
(Y) Variable Dependiente	Es el comportamiento funcional y estructural estimado a lo largo del periodo.	Y2: Índice Plástico	% Límites de Atterberg	1. Aceptable ($4 < IP < 12$) 2. No aceptable ($4 > IP, IP > 12$)
Desempeño del afirmado		Y3: CBR	% (0.1" al 100% MDS)	1. Aceptable (CBR > 40) 2. No aceptable (CBR < 40)
		Y4: Índice de Rugosidad Internacional.	m/km	1. Muy mal estado (IRI > 18) 2. Mal estado ($14 < IRI < 18$) 3. Regular estado ($10 < IRI < 14$) 4. Buen estado ($6 < IRI < 10$) 5. Muy buen estado ($4 < IRI < 6$)

Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Tipo y nivel de la investigación

Es de tipo explicativo; porque se da a conocer las características que resulta de la manipulación de la variable independiente, es decir, mide la variable dependiente o es lo mismo decir que mide los resultados de la aplicación del experimento de la muestra sin estabilizador y de la muestra con estabilizador.

Los estudios explicativos pretenden establecer las causas de los sucesos o fenómenos que se estudian. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010)

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de investigación es experimental puro, porque manipula intencionalmente la variable (independiente), mide la variable (dependiente) que controla y valida.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población.

La población o universo es la ruta AP-830 (km 0+000 al km 12+000).

3.3.2. Muestra.

La muestra corresponde al tramo de 400 metros ubicado entre las progresivas ubicadas desde el km 03+900 al km 04+300, este tipo de muestra es no probabilística o dirigida, porque la selección de la muestra obedece a criterios de selección que se detalla en el acápite (4.1.1.2).

- Incorporación de suelo 10 % CL + 0% CaO: km 03+900 al km 04+100
- Incorporación de suelo 10% CL y 1.5% CaO: km 04+100 al km 04+300

“En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra. Aquí el procedimiento no es mecánico ni con base en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador o de un grupo de investigadores y, desde luego, las muestras seleccionadas obedecen a otros criterios de investigación”. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2010)

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas.

La técnica utilizada en esta investigación es la Observación Sistemática.

Sierra y Bravo (1984), define la observación como la inspección de los hechos, mediante los propios sentidos de investigador, utilizando o no instrumentos.

3.4.2. Instrumentos.

Se utiliza los instrumentos propios de la disciplina, es decir, los formatos establecidos en la normativa vigente del área de ingeniería.

A continuación, se describen los ensayos que se realizaron y las normativas que mencionan los instrumentos empleados:

Tabla 10

Determinación de las características físicas, mecánicas y químicas.

Descripción	Instrumento empleado	Norma técnica empleada
Análisis Granulométrico	Ábaco de curva granulométrica (Abertura mm Vs % Que pasa).	MTC E 107, ASTM D 422, AASHTO T 88
Índice Plástico	Ábaco de Limite de Consistencia (N° golpes Vs % Contenido de humedad).	MTC E 110 - MTC E 111, ASTM D 4318, AASHTO T 89 T90
CBR	Ábaco (CBR Vs % Densidad Seca gr/cm ³).	MTC E 132, ASTM D 1883, AASHTO T 193
Índice de Rugosidad Internacional	Histograma de frecuencias.	

Fuente: Elaboración propia.

Validación de instrumentos. Los instrumentos usados son los formatos establecidos por AASHTO.

3.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

3.5.1. Técnicas de procesamiento.

Se utilizo el software Excel para el procesamiento de los datos, mediante la estadística inferencial, por el análisis no paramétrico.

3.5.2. Análisis de datos.

Tabla 11
Análisis de datos

Indicador	Medida	Ítem
Incorporación de suelo CL y CaO	Nominal	1. 10% de suelo CL + 0% CaO 2. 10% de suelo CL 1.5% de cal
Análisis Granulométrico AASTHO	Ordinal	1. Excelente (A-1) 2. Bueno (A-2) 3. Regular (A-4, A-5) 4. Malo (A-6, A-7)
Índice Plástico	Ordinal	1. Aceptable ($4 < IP < 12$) 2. No aceptable ($4 > IP, IP > 12$)
CBR	Ordinal	1. Aceptable ($CBR > 40$) 2. No aceptable ($CBR < 40$)
IRI	Ordinal	1. Muy mal estado ($IRI > 18$) 2. Mal estado ($14 < IRI < 18$) 3. Regular estado ($10 < IRI < 14$) 4. Buen estado ($6 < IRI < 10$) 5. Muy buen estado ($4 < IRI < 6$)

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4

Presentación y análisis de los resultados

4.1. Procesamiento de datos: resultados

En este capítulo se realizó el procesamiento de los resultados de la investigación, las fotografías de los estudios del tráfico, estudio de suelos, aplicación del experimento en laboratorio y campo se incluyen en este capítulo de manera resumida, para mayor detalle se adjunta el Anexo 04.

4.1.1. Evaluación y diagnóstico de la situación actual.

4.1.1.1. Ubicación de la vía Yaca –Circa (km 0+000 – km 12+000)

La zona de estudio se encuentra en la carretera vecinal Ruta AP-830 (Yaca – Circa), Trayectoria EMP. PE-30A (Yaca) – Circa perteneciente al distrito de Circa, provincia de Abancay, región de Apurímac – Perú.



Figura 13. Mapas políticos de Perú, Apurímac y mapa vial de Abancay.

4.1.1.2. Sectorización del tramo.

Se realizó el recorrido del camino vecinal Yaca – Circa (km 0+000 al km 25+260) y los sectores cercanos a la vía, con la finalidad de identificar canteras y fuentes de agua, se estableció el punto de estación para cuantificar el tráfico y los tramos que serán objeto de aplicación y evaluación de la presente tesis, adicionalmente, se toma en cuenta la ubicación de los centros poblados y otros puntos de referencia.

Tabla 12
Ubicación de los puntos de referencia

N°	Descripción	Este	Norte	Altitud (m.s.n.m.)
1	km 0+000 (Yaca) inicio del tramo	718503.1973	8467940.6010	2013.00
2	Puente Yaca fuente de agua N° 1	718384.9680	8467598.0070	1999.00
3	km 1+200 E-1 (Estación Yaca)	719114.0819	8466973.4829	2046.00
4	km 2+080 fuente de agua N° 2	719698.4361	8466399.5614	2072.00
5	km 2+840 cantera A	720179.5306	8466085.3975	2155.00
6	km 4+000 (Tramo suelo + CaO + CL)	720990.0769	8465485.0148	2189.00
7	km 4+200 (Tramo suelo + CL)	721186.6808	8465487.0439	2188.00
8	km 5+200 Fuente de agua N° 3	722123.9480	8465478.5533	2196.00
9	km 7+450 (Ocobamba)	723400.0006	8464717.0525	2260.00
10	km 8+140 Cantera B	723532.2365	8464108.8498	2320.00
11	km 9+000 fuente de agua N° 4	724280.2150	8463659.2530	2297.00
12	Km 12+000 (Soccos) Final del tramo de evaluación	726694.3533	8462919.7241	2460.00
13	Km 14+380 Cantera C	727064.6143	8463010.7670	2660.00
14	Km 25+260 (Circa) final del tramo	729649.5232	8464209.6716	3204.00

Fuente: Elaboración propia, realizado en: Sistema de Coordenada: Datum WGS84, 18 Sur.

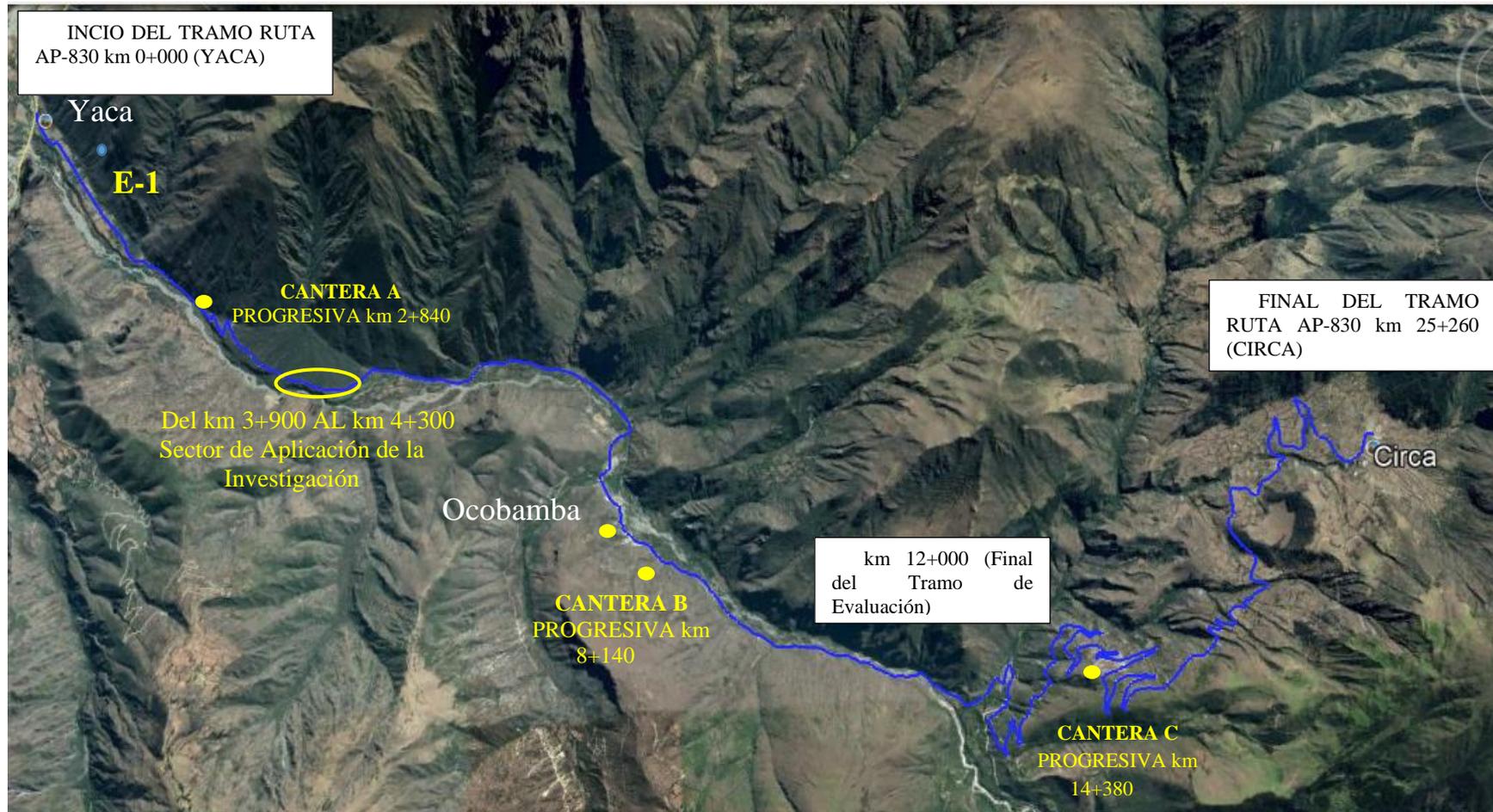


Figura 14. Imagen satelital de la red vial vecinal de Ruta N°AP-830.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.3. Inventario de condición vial del tramo Yaca-Circa (km 0+000 al km 12+000).

Se realizó el inventario de condición vial del tramo Yaca-Circa (km 0+000 - km 12+000), con el objetivo de identificar las fallas y deterioros que presenta el camino.

Para dicha evaluación, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones por medio de Provias Descentralizado como unidad ejecutora y responsable de la conservación vial de caminos departamentales y vecinales, emplea las siguientes fichas y formatos.

- Ficha 1-A.: Ficha técnica del camino vecinal.
- Ficha 1-B.: Ficha del itinerario del camino vecinal.
- Ficha 1-C.: Ficha técnica de puentes.
- Ficha 1-D.: Ficha técnica de daños en camino vecinal.
- Ficha 1-E: Ficha técnica de calificación para cada tipo de deterioro.
- Ficha 1-F: Ficha de ubicación y panel fotográfico.
- Ficha 1-G: Ficha de ubicación y panel fotográfico.

Las fichas y formatos se encuentran en el Anexo 05.

A continuación, se presenta la lista de deterioros y fallas, clasificado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 13
Deterioros o fallas de las carreteras no pavimentadas

Código del daño	Tipo de daño	Nivel de gravedad
1	Deformación	1. Huellas/Hundimientos sensibles al usuario, pero < 5 cm 2. Huellas/Hundimientos entre 5 y 10 cm 3. Huellas/Hundimientos >= 10 cm
2	Erosión	1. Sensible al usuario, pero profundidad < 5 cm 2. Profundidad entre 5 y 10 cm. 3. Profundidad >= 10 cm
3	Baches (Huecos)	1. Puede repararse por conservación rutinaria 2. Se necesita una capa de material adicional 3. Se Necesita una reconstrucción
4	Encalaminado	1. Sensible al usuario, pero profundidad < 5 cm 2. Profundidad entre 5 y 10 cm 3. Profundidad >= 10 cm
5	Lodazal	1. Transitabilidad baja o intransitabilidad en época de lluvia
6	Cruce de Agua	1. Transitabilidad baja o intransitabilidad en época de lluvia

Fuente: (Manual de Carreteras Mantenimiento o Conservación Vial, pág. 74)

Posteriormente, se llevó a cabo la calificación de la condición superficial del tramo Yaca - Circa (km 0+000 al km 12+000) cada 500 m de carpeta de rodadura, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 14
Calificación del tramo Yaca – Circa (km 0+000 al km 12+000)

Calificación del camino vecinal, L = 12.00 km (tramos de 500 m)						
Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
388.40	382.20	384.41	383.37	369.41	367.72	367.99
Tramo 8	Tramo 9	Tramo 10	Tramo 11	Tramo 12	Tramo 13	Tramo 14
365.39	363.05	368.11	366.34	369.38	370.47	370.39
Tramo 15	Tramo 16	Tramo 17	Tramo 18	Tramo 19	Tramo 20	Tramo 21
365.66	368.60	369.89	371.04	371.91	373.39	369.35
Tramo 22	Tramo 23	Tramo 24				
366.92	367.53	366.08				

Fuente: Elaboración propia.

Para calificar la condición de la vía se toma en cuenta la tabla siguiente:

Tabla 15
Tipos de condición según calificación de condición

Condición	Puntaje
Condición bueno	> 400
Condición regular	>150 y ≤400
Condición mala	≤150

Fuente: (Manual de Carreteras Mantenimiento o Conservación Vial, pág. 84)

Como resultado de la Tabla 14, la calificación promedio es de 371.13, el cual según la Tabla 15, se encuentra en condición regular.

Tabla 16
Tipos de conservación según calificación de condición

Reconstrucción - Rehabilitación			Conservación periódica				Conservación rutinaria			
50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	

Fuente: (Manual de Carreteras Mantenimiento o Conservación Vial, pág. 84)

Dada la calificación promedio de **371.13**, el tipo de conservación que debe realizarse es la conservación periódica.

4.1.1.4. Estudio de tráfico.

Se realizó la cuantificación y clasificación de los vehículos que se movilizan por el tramo Yaca-Circa (km 0+000 al km 12+000) con la finalidad de conocer los volúmenes de tráfico existente, cuantificándose los vehículos pesados, livianos y vehículos menores. (Anexo 06).

4.1.1.4.1. Recopilación de la información.

Para recopilar información del tráfico, primero se estableció la estación de control, se realizó el diagnóstico de la vía Yaca – Circa (km 0+000 al km 12+000) con el objeto de determinar los tramos homogéneos que consiste en una observación pormenorizada del comportamiento del tráfico, del cual se tiene como resultado que el mayor desplazamiento vehicular se encuentra en el tramo del km 0+000 al km 12+000, por lo cual se considera como único tramo homogéneo.

En consecuencia, se establece la Estación de Control (E-1) en el km 01+200.

Tabla 17
Ubicación de la estación de conteo de volumen de tránsito

Código	Estación	Ubicación
E-1	Estación Yaca	(Progresiva km 1+200)

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, se estableció los peajes que proporcionarían los factores de corrección estacionaria, por lo que se indagó si los peajes más cercanos contaban con dicha información.

En ese sentido, para la obtención de factores de corrección de vehículos pesados se utilizó la información proporcionada por el Peaje “Casinchihua”, ubicado a la altura del km 411+800 de la RN-026 Chalhuanca - Abancay provincia de Abancay – Apurímac y para la obtención de factores de corrección de vehículos ligeros al Peaje “Pampa Galera” ubicado en la RN-026 Nasca - Puquio a la altura del km 106+000 provincia de Lucanas – Ayacucho.

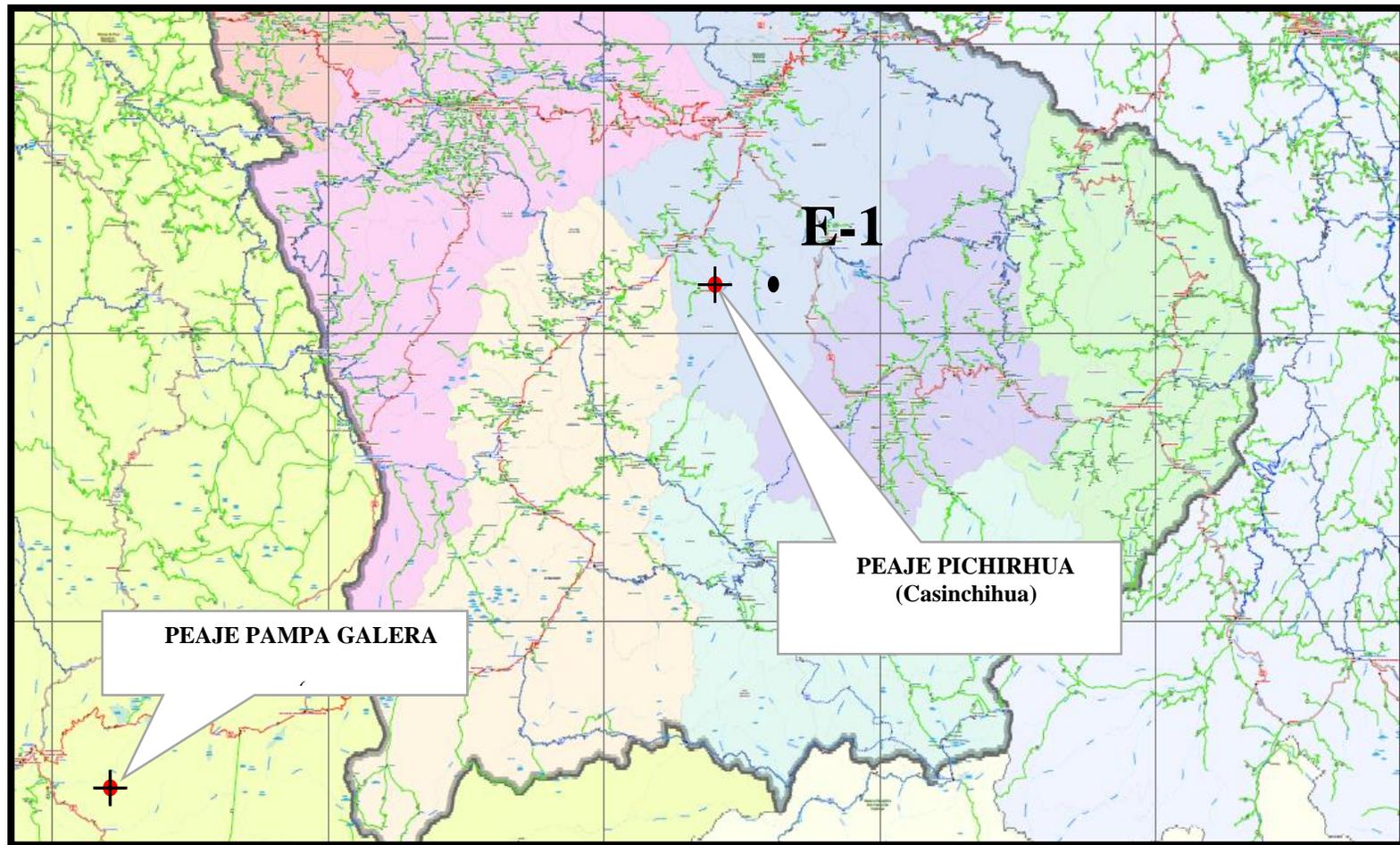


Figura 15. Ubicación de los peajes y estación (E-1) de conteo de volumen de tránsito.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.4.2. Conteo de tráfico en la estación de control E-I.

Se realizó la cuantificación durante 7 días por 24 horas, diferenciando composición vehicular, direccionalidad y periodos de conteo diario.

Para ello, se usó el formato de clasificación vehicular (Formato N°01), proporcionada por la Oficina de Planeamiento y Presupuesto del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

La información que se registra en este formato es la siguiente:

- Nombre de la carretera.
- Ubicación de la estación de control (código, progresiva y denominación del lugar).
- Fecha y hora del conteo.
- El sentido de circulación.
- La hora del conteo.
- La cantidad de vehículos por tipos de vehículos y por cada hora.
- La sumatoria diaria por tipo de vehículos y por hora.

La cuantificación de los vehículos comienza el día lunes 08 hasta el día domingo 14 de enero del 2018.



Figura 16. Estación E-1: progresiva km 1+200 de la Ruta AP-830 (Yaca – Circa)



Figura 17. Estación E-1: progresiva km 1+200 de la Ruta AP-830 (Yaca – Circa)

Circa - Yaca	2	7	8	1	19	0	0	0	40	3	0	0	0	0	0	0	0	0	80
ambos	5	16	12	4	38	0	0	0	88	8	0	0	0	0	0	0	0	0	171
Viernes																			
12/1/18																			
Yaca - Circa	2	12	5	0	21	0	0	0	43	4	0	0	0	0	0	0	0	0	87
Circa - Yaca	5	13	4	1	19	0	0	0	39	2	0	0	0	0	0	0	0	0	83
ambos	7	25	9	1	40	0	0	0	82	6	0	0	0	0	0	0	0	0	170
Sábado																			
13/1/18																			
Yaca - Circa	5	8	3	3	18	0	0	0	44	2	0	0	0	0	0	0	0	0	83
Circa - Yaca	3	6	4	4	18	0	0	0	33	2	0	0	0	0	0	0	0	0	70
ambos	8	14	7	7	36	0	0	0	77	4	0	0	0	0	0	0	0	0	153
Domingo																			
14/1/18																			
Yaca - Circa	5	11	7	4	18	0	0	0	27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	73
Circa - Yaca	5	6	6	4	18	0	0	0	27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	67
ambos	10	17	13	8	36	0	0	0	54	2	0	0	0	0	0	0	0	0	140

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del Índice Medio Diario (IMD)

Cálculo del promedio de tráfico vehicular de la semana de conteo.

$$\text{IMDs} = \sum \frac{V_i}{7} \text{ Conteo 7 días}$$

Donde: IMDs es Índice Medio Diario Semanal de la muestra semanal y V_i es

Volumen vehicular diario de los 7 días de conteo.

Tabla 19

Cálculo de índice medio diario semanal

Tipo de Vehículos	Lun.	Mar.	Miér.	Jue.	Vier.	Sáb.	Dom.	Total, Semanal	IMDs = $\sum V_i/7$
Autos	10	9	6	5	7	8	10	55	8
Station Wagon	24	18	23	16	25	14	17	137	20
Camioneta Pick Up	14	10	9	12	9	7	13	74	11
Panel	4	2	3	4	1	7	8	29	4
Rural (Combi)	33	36	36	38	40	36	36	255	36
Micro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ómnibus 2E y 3E	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Camión 2E	72	80	80	88	82	77	54	533	76
Camión 3E	4	5	6	8	6	4	2	35	5
Camión 4E	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Semi tráiler	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tráiler	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total, IMD	161	160	163	171	170	153	140	1118	160

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del Índice Medio Diario Anual: $\text{IMDa} = \text{IMDs} \times \text{FC}$

Donde: IMDs: Índice Medio Diario Semanal de la muestra semanal, IMDa: Índice Medio Diario Anual y FC: Factor de corrección estacional.

4.1.1.4.4. Factores de corrección estacional.

Para vehículos ligeros se utilizó el factor de corrección del mes de enero correspondiente al Peaje “Casinchihua”, y para vehículos pesados se consideró el factor de corrección del mes de enero correspondiente al Peaje “Pampa Galera”, tal como se señala en las tablas siguientes.

Tabla 20
Factores de corrección del peaje Pampa Galera y peaje Casinchihua

Mes	Vehículos ligeros (Peaje Pampa Galera)	Vehículos pesados (Peaje Casinchihua)
Enero	1.04944936757326	1.22808383474158

Fuente: Unidades de peaje PVN OGPP, Elaboración: OGPP

Tabla 21
Cálculo de índice medio diario anual

Total, Semanal	IMDs $\Sigma Vi/7$	FC	IMDa = IMDs x FC
55	8	1.04944937	8
137	20	1.04944937	21
74	11	1.04944937	12
29	4	1.04944937	4
255	36	1.22808383	44
0	0	1.22808383	0
0	0	1.22808383	0
533	76	1.22808383	93
35	5	1.22808383	6
0	0	1.22808383	0
0	0	1.22808383	0

0	0	1.22808383	0
1118	160		188

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.4.5. Análisis de la información y resultados obtenidos.

Con el estudio de tráfico se analizó la información de, variación de la clasificación diaria por sentido, factores de corrección diario, promedio vehicular de la semana de conteo, cálculo del IMDA, clasificación vehicular promedio de la semana, variación promedio horaria y variación diaria, a continuación, se muestra los resultados:

Tabla 22
Distribución vehicular

Tipo de Vehículos	IMDa	Distrib%
Autos	8	4.3%
Station Wagon	21	11.2%
Camioneta Pick Up	12	6.4%
Panel	4	2.1%
Rural (Combi)	44	23.4%
Micro	0	0.0%
Ómnibus 2E y 3E	0	0.0%
Camión 2E	93	49.5%
Camión 3E	6	3.2%
Camión 4E	0	0.0%
Semi tráiler	0	0.0%
Tráiler	0	0.0%
Total, IMD	188	100.0%

Fuente: Elaboración propia.

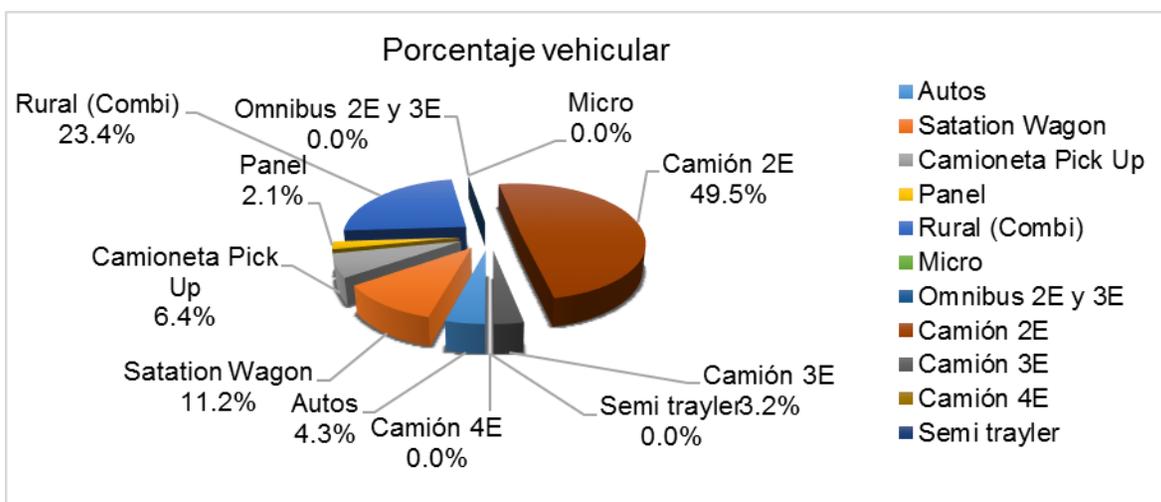


Figura 18. Porcentaje vehicular por tipo de vehículo.
Fuente: Elaboración propia.

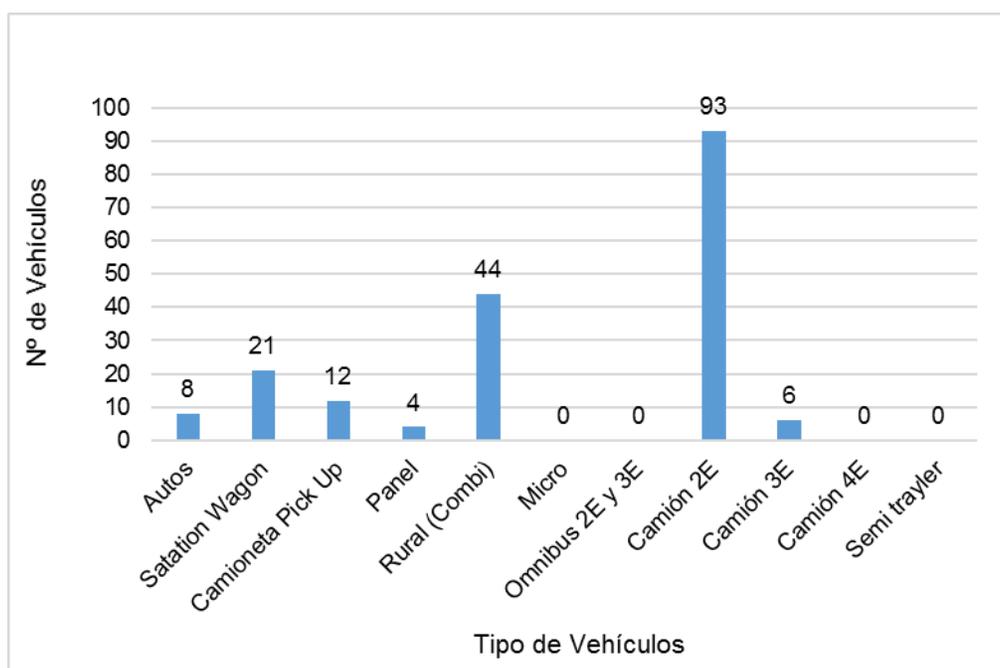


Figura 19. Clasificación vehicular del índice medio diario.
Fuente: Elaboración propia.

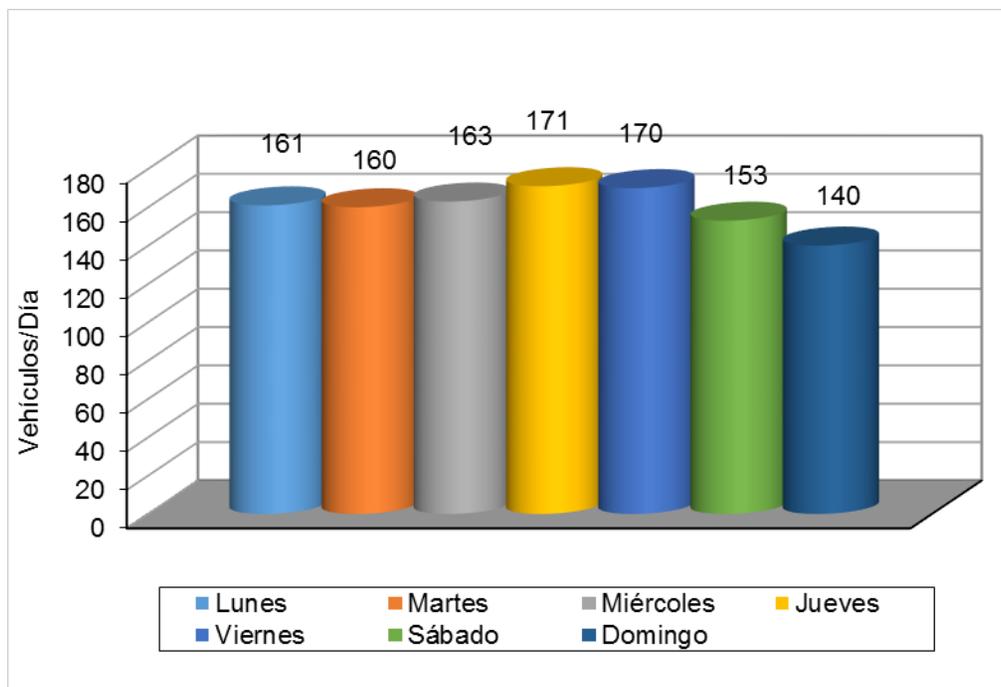


Figura 20. Variación diaria de vehículos.
Fuente: Elaboración propia.

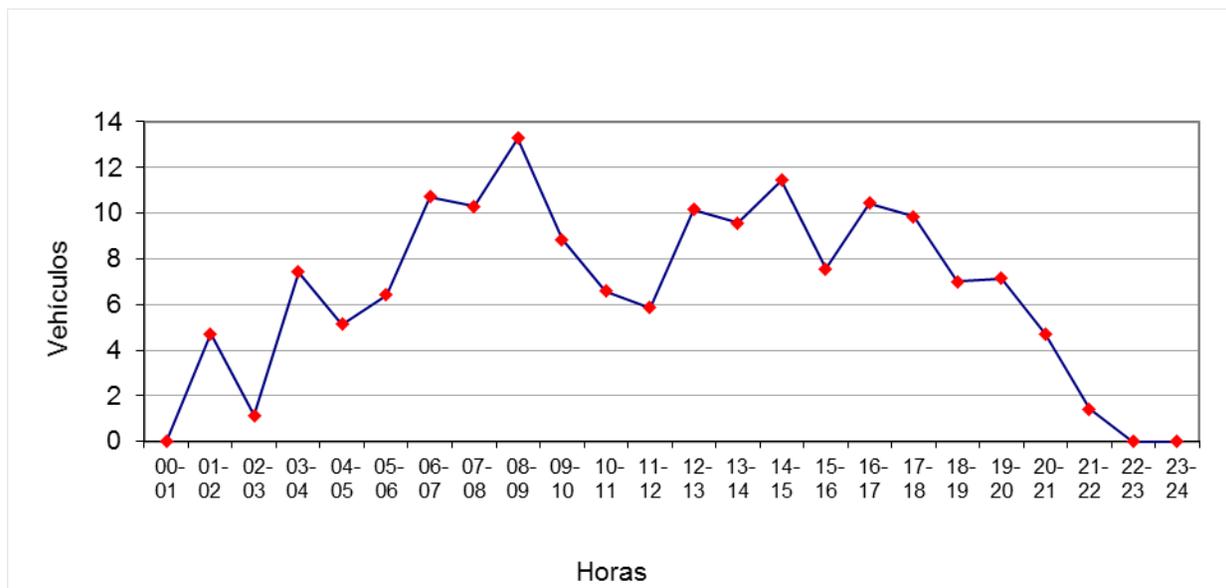


Figura 21. Variación horaria del tráfico.
Fuente: Elaboración propia.

El volumen horario se empezó a incrementar desde las 1 horas y disminuyó desde las 19 horas, la hora punta se presentó de 8 a 9.

4.1.1.4.6. *Proyección del tráfico.*

Para la proyección del tráfico normal, se ha tomado la tasa de crecimiento en base a las variables socioeconómicas representadas por las tasas de crecimiento del PBI y de la población.

Tabla 23
Tasa de crecimiento del departamento de Apurímac.

Departamento	PBI de la Región Apurímac	Tasa de Crecimiento de la Población
Apurímac	7.30%	1.25%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática.

4.1.1.4.7. *Proyección del tráfico normal.*

El tráfico normal o actual es el que se ha hallado en los conteos de tráfico en campo en cada tramo y se calcula con la siguiente fórmula.

$$T_n = T_0(1 + r)^{(n-1)}$$

Donde:

T_n : Tránsito proyectado al año en vehículo por día.

T_0 : Tránsito actual (año base) en vehículo por día.

n : Año futuro de proyección.

r : Tasa anual de crecimiento de tránsito.

Además: $r_1 = E1 * r_{Pob}$. y $r_2 = E2 * r_{PBI}$

donde:

r_1 : Tasa de crecimiento anual de vehículos de pasajeros.

r_2 : Tasa de crecimiento anual de vehículos de carga.

r_{Pob} : Tasa de crecimiento anual de la población

r_{PBI} : Tasa de crecimiento anual del PBI de la región.

$E1, E2$: Elasticidades del tráfico respecto a las variables explicativas.

Para nuestra investigación se consideró las elasticidades como uno (1) ya que esta se acerca más a la realidad, por lo que obtenemos lo siguiente:

$r_1 = r_{Pob} = 1.25$: Tasa de crecimiento anual (vehículos de pasajeros).

$r_1 = r_{PBI} = 7.30$: Tasa de crecimiento anual (vehículos de carga).

4.1.1.4.8. Tráfico desviado.

Se considera como tráfico atraído aquel que se desvía de las rutas actuales, debido a las mejores condiciones (tiempo de viaje) que brinda el proyecto, considerándose este para viajes cuyo origen y destino no se vean alterados.

La determinación de este tráfico se logra mediante la asignación que resulte de la encuesta de origen – destino.

Para nuestra investigación el tráfico desviado es parte del tráfico normal.

4.1.1.4.9. Tráfico generado y desarrollado.

No se han identificado proyectos que pudieran afectar el crecimiento económico de la zona, más allá de lo que se ha descrito en el presente informe. Por lo tanto, el tráfico generado estará sujeto al crecimiento del PIB que se está analizando en este estudio.

El tráfico generado son aquellos viajes que se crean por el hecho de rehabilitarse, mejorarse o ampliarse la carretera. Generalmente este tráfico, en la mayoría de proyectos de carretera, está entre el 5% y el 25% del tránsito normal.

En este caso tratándose de mejoramiento de la vía, se tomará el 15%.

Ómnibus 2E y 3E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Camión 2E	0	15	16	17	18	20	21	23	24	26	28
Camión 3E	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
Camión 4E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Semi tráiler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tráiler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	188	225	236	246	258	271	284	298	313	327	347

Trabajo de campo conteo y clasificación vehicular.

Fuente: Elaboración propia.

Se concluye que el tránsito proyectado resulta 347 Veh/día en un horizonte de 10 años, según y se clasifica como tipo de tráfico T4.

4.1.1.5. Fuentes de agua.

Para la selección de las fuentes de agua, se toma en cuenta la accesibilidad y disponibilidad de las mismas.

Los tramos de prueba ubicados entre las progresivas km 03+900 y km 04+300, se encuentra cercano a la fuente de agua ubicada en la progresiva km 2+080 al lado derecho de la vía. De este, se extrajo agua a la cisterna para la aplicación del experimento, a continuación, se muestra la ubicación de las fuentes de agua.

Tabla 25
Ubicación de las fuentes de agua

N°	Descripción	Progresiva	Este.	Norte	Altitud (m.s.n.m.)
1	Fuente de agua 01	Puente Yaca	718384.9680	8467598.0070	1999.00
2	Fuente de agua 02	km 2+080	719698.4361	8466399.5614	2072.00
3	Fuente de agua 03	km 5+200	722123.9480	8465478.5533	2199.00
4	Fuente de agua 04	km 9+000	724280.2150	8463659.2530	2297.00

Fuente: Elaboración propia.

Fuente de agua N°01: Puente Yaca



Figura 22. Imagen satelital de la fuente de agua N°01



Figura 23. Fuente de agua N°01

Fuente de agua N°02: Progresiva km 2+080



Figura 24. Imagen satelital de la fuente de agua N°02



Figura 25. Fuente de agua N°02

Fuente de agua N°03: Progresiva km 5+200

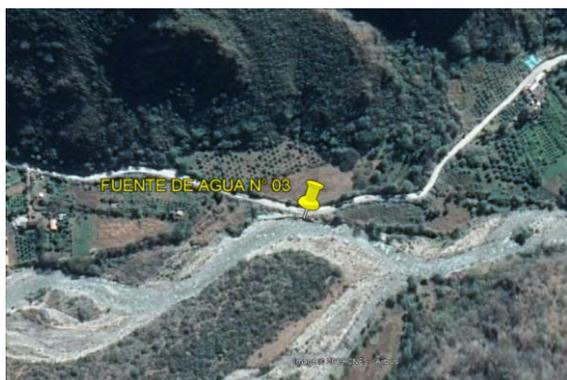


Figura 26. Imagen satelital de la fuente de agua N°03



Figura 27. Fuente de agua N°03

Fuente de agua N°04: Progresiva km 09 + 000



Figura 28. Imagen satelital de la fuente de agua N°04



Figura 29. Fuente de agua N°04

4.1.1.6. Condiciones climáticas.

4.1.1.6.1. Temperatura.

El comportamiento anual de la temperatura en la Región Apurímac está determinado por la topografía, la ubicación geográfica y los patrones de circulación regional y local de la atmósfera. (Loayza, 2008)

La distribución temporal de las temperaturas máximas, mínimas y medias del de las provincias del departamento de Apurímac se muestran en los siguientes cuadros:

Tabla 26
Temperaturas máximas, mínimas y medias de Abancay

Mes	Temp. máxima (°C)	Temp. media (°C)	Temp. mínima (°C)
Enero	18.3	11.68	5.1
Febrero	17.9	11.55	5.2
Marzo	17.8	11.41	5.0
Abril	18.6	11.21	3.8
Mayo	18.8	10.14	1.4

Junio	18.5	9.07	-0.3
Julio	18.3	8.71	-0.8
Agosto	19.4	9.81	0.2
Septiembre	19.6	10.97	2.3
Octubre	20.6	11.96	3.3
Noviembre	20.6	12.1	3.6
Diciembre	19.7	12.18	4.7
Máximo	20.6	12.2	5.2
Mínimo	17.8	8.7	-0.8

Fuente: Estudio climático del proceso de meso zonificación ecológica y económica de la región Apurímac. (Loayza, 2008)

4.1.1.6.2. Precipitación

La distribución de la precipitación mensual promedio de las provincias nota claramente un periodo de estiaje más marcado entre los meses de junio a agosto frente al periodo lluvioso en el resto del año y más acrecentado en el verano (diciembre a marzo) especialmente en las provincias de Antabamba (de 193.8 mm a 244.6 mm) y Aymaraes (de 183.27 mm a 225.54 mm). (Loayza, 2008)

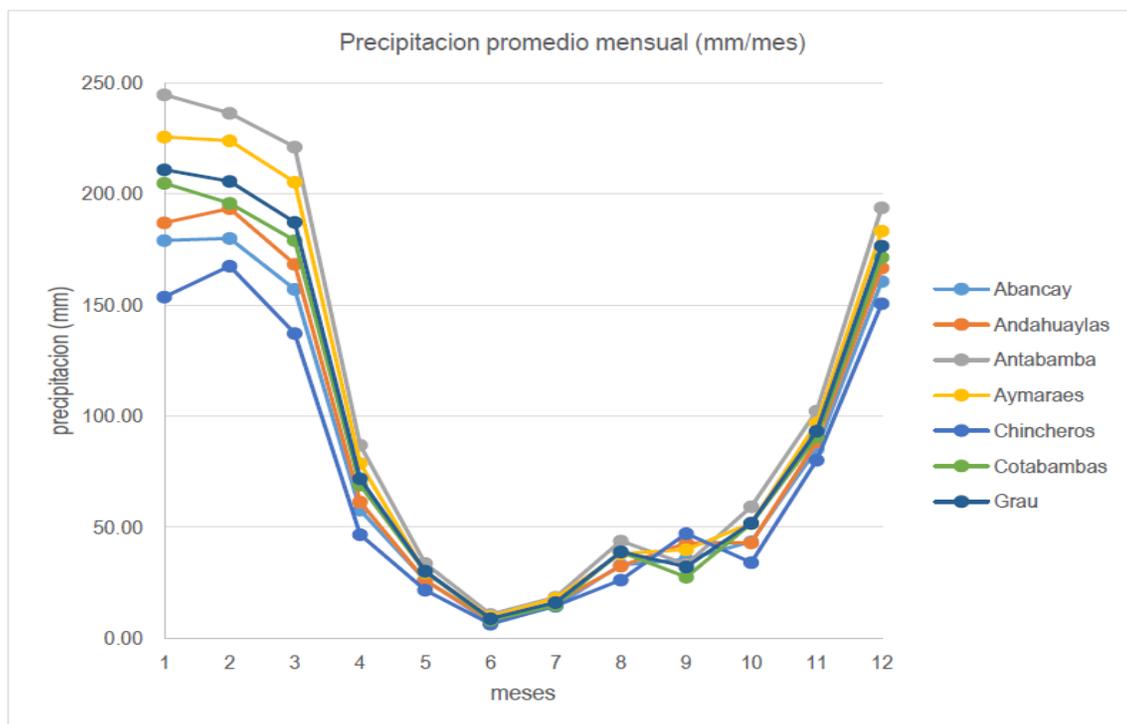


Figura 30. Precipitación promedio mensual de las provincias de Apurímac.
Fuente: Estudio climático del proceso de meso zonificación ecológica y económica de la región Apurímac. (Loayza, 2008)

Tabla 27
Precipitación promedio mensual en mm/mes para las provincias de Apurímac

Mes/prov.	Abancay
Enero	179.02
Febrero	179.91
Marzo	157.06
Abril	57.70
Mayo	26.24
Junio	7.27
Julio	14.51
Agosto	33.09
Septiembre	35.48

Octubre	43.50
Noviembre	85.15
Diciembre	160.59
Máximo	179.9
Mínimo	7.3
Total	979.5

Fuente: Estudio climático del proceso de meso zonificación ecológica y económica de la región Apurímac. (Loayza, 2008)

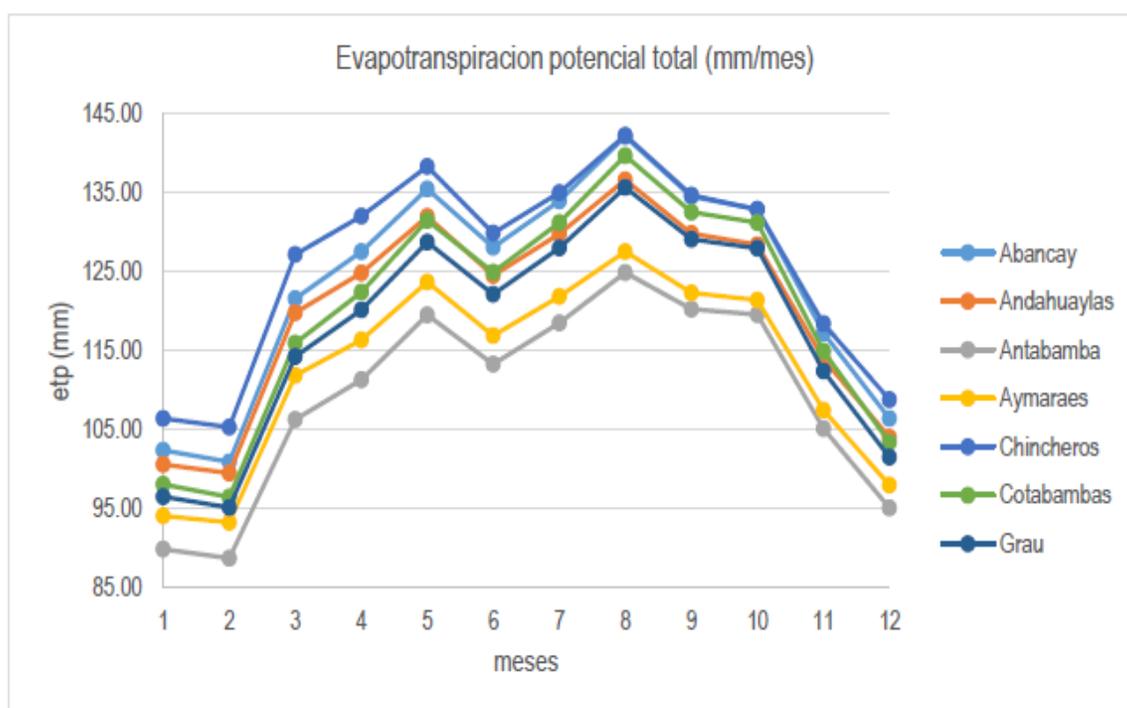


Figura 31. Evapotranspiración potencial total de las provincias de Apurímac.

Fuente: Estudio climático del proceso de meso zonificación ecológica y económica de la región Apurímac. (Loayza, 2008)

Tabla 28
Precipitación promedio mensual expresadas en mm/mes de Apurímac

Mes/prov.	Abancay
Enero	102.32
Febrero	100.88
Marzo	121.58
Abril	127.52
Mayo	135.47
Junio	128.08
Julio	133.95
Agosto	142.15
Septiembre	134.51
Octubre	132.89
Noviembre	117.23
Diciembre	103.38
Máximo	142.1
Mínimo	100.9

Fuente: Estudio climático del proceso de meso zonificación ecológica y económica de la región Apurímac. (Loayza, 2008)

4.1.1.7. Características físicas y mecánicas de la subrasante.

Para determinar las características físicas y mecánicas se dispuso del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Pavimento y Asfalto GEOMAT y para el ensayo de densidad de campo se contó con el apoyo del técnico de suelos del “Laboratorio de Suelos y Concreto GEOLEF”, quienes tienen experiencia reconocida en la ciudad de Abancay.

Por otra parte, para conocer las características químicas del material de cantera se dispuso del laboratorio de suelos de la Universidad Agraria la Molina y para el análisis químico de la cal, se dispuso del laboratorio SGS-Sede Perú, ubicado ambos en la ciudad de Lima.

Para analizar el CBR de la subrasante se extrajo material de la vía Yaca – Circa de una profundidad de 0.45 m. (Anexo 07).



Figura 32. Subrasante del tramo Yaca – Soccos.



Figura 33. Extracción del material de subrasante del tramo Yaca – Soccos

Resultados del análisis de laboratorio del material de subrasante.

a) Análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 29

Análisis granulométrico por tamizado del material de subrasante

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
2"	50.800				100.00%
1 1/2"	38.100	528.22	4.18%	4.18%	95.82%
1"	25.400	1087.14	8.61%	12.79%	87.21%
3/4"	19.000	827.22	6.55%	19.34%	80.66%
1/2"	12.500	1267.35	10.04%	29.38%	70.62%
3/8"	9.500	941.14	7.45%	36.83%	63.17%
N°4	4.750	1925.22	15.25%	52.08%	47.92%
N°10	2.000	1534.55	12.15%	64.23%	35.77%
N°20	0.840	976.95	7.74%	71.97%	28.03%
N°40	0.425	525.82	4.16%	76.13%	23.87%

N°50	0.300	471.25	3.73%	79.86%	20.14%
N°80	0.177	327.75	2.60%	82.46%	17.54%
N°100	0.150	217.82	1.73%	84.18%	15.82%
N°200	0.075	318.05	2.52%	86.70%	13.30%
<N°200	Fondo	1679.52	13.30%	100.00%	0.00%
Total		12628.00	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

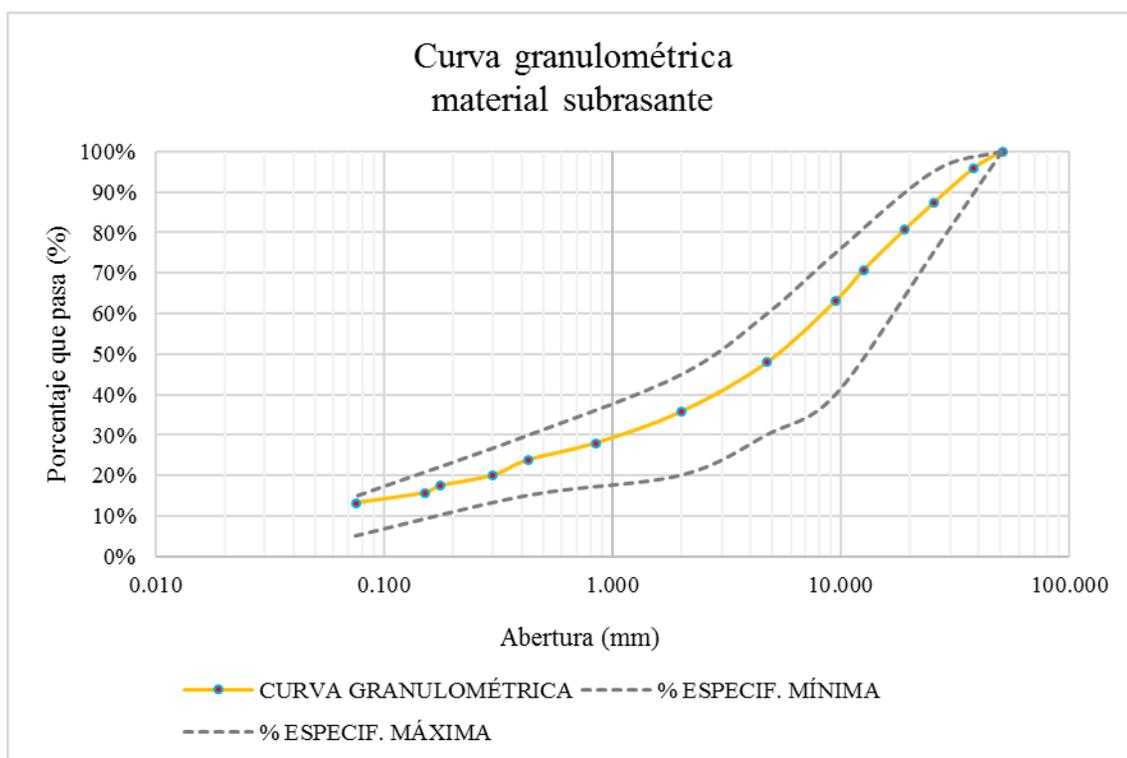


Figura 34. Curva granulométrica del material de subrasante.

b) Determinación de humedad natural.

Tabla 30

Contenido de humedad del material de subrasante

Ensayo N°		1	2	3
N° de tara		T - 03	T - 04	T - 05
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	1495.15	1591.26	1436.50
Peso de tara + suelo seco	(gr)	1456.40	1569.68	1405.60
Peso de la tara	(gr)	122.50	123.45	119.98
Peso del agua	(gr)	38.75	21.58	30.90
Peso del suelo seco	(gr)	1333.90	1446.23	1285.62
Contenido de humedad	(%)	2.91	1.49	2.40
Humedad natural promedio	(%)		2.3	

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

c) Límites de consistencia.

Tabla 31

Límite líquido del material de subrasante

Límite líquido (MTC E 110, AASHTO T89)				
N° de tara		T - 06	T - 07	T - 08
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	51.01	47.68	51.26
Peso de tara + suelo seco	(gr)	49.02	45.73	47.98
Peso del agua	(gr)	1.99	1.95	3.28
Peso de la tara	(gr)	37.91	36.49	38.54
Peso del suelo seco	(gr)	11.11	9.24	9.44
Contenido de humedad	(%)	17.91	21.10	34.75
Numero de golpes		31.00	26.00	15.00

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32
Limite plástico del material de subrasante

Límite plástico (MTC E 111, AASHTO T90)				
N° de tara		T - 10	T - 11	T - 12
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	23.65	26.42	27.01
Peso de tara + suelo seco	(gr)	22.45	24.76	25.15
Peso de la tara	(gr)	14.86	14.57	14.02
Peso del agua	(gr)	1.20	1.66	1.86
Peso del suelo seco	(gr)	7.59	10.19	11.13
Contenido de humedad	(%)	15.81	16.29	16.71

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

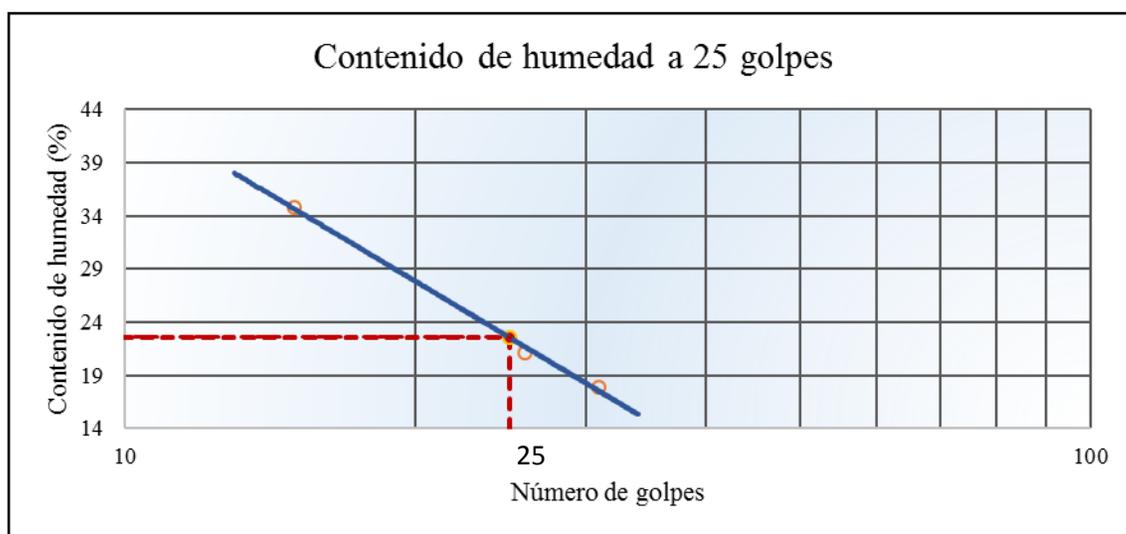


Figura 35. Relación del contenido de humedad (%) y N° de golpes de la subrasante.

Fuente: Resultados de laboratorio.

Tabla 33
Obtención del índice de plasticidad del material de subrasante

Constantes físicas de la muestra		
Limite líquido	(%)	22.6

Limite plástico	(%)	16.3
Índice de plasticidad	(%)	6.3

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

d) Abrasión Los Ángeles.

Tabla 34
Porcentaje de desgaste del material de subrasante

Muestra	1
Gradación	"A"
N° de esferas	12
Tamiz (N°)	Peso ret. (grs.)
1"	1,252
3/4"	1,265
1/2"	1,320
3/8"	1,450
Peso total	5,287
Material retenido tamiz N° 12	4,102
Material pasante tamiz N° 12	1,185
Porcentaje de desgaste	22.4

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

e) Proctor modificado.

Tabla 35

Ensayo de proctor modificado del material de subrasante

Ensayo N°	1	2	3	4	
Número de capas	5	5	5	5	
Golpes de pisón por capa	56	56	56	56	
Peso suelo húmedo + molde (gr)	12342	12645	12774	12548	
Peso molde +base (gr)	7491	7491	7491	7491	
Peso suelo húmedo compactado (gr)	4851	5154	5283	5057	
Volumen de molde (cm ³)	2118	2118	2118	2118	
Peso volumétrico húmedo (gr/cm ³)	2.290	2.433	2.494	2.388	
Tara N°	T-01	T-02	T-03	T-04	
Peso del suelo húmedo + tara (gr)	1264.3	1122.3	926.2	1052.6	
Peso del suelo seco + tara (gr)	1252.1	1089.6	886.2	996.5	
Peso de tara (gr)	122.4	113	103.5	124.2	
Peso de agua (gr)	12.2	32.7	40	56.1	
Peso del suelo seco (gr)	1129.7	976.6	782.7	872.3	
Contenido de agua (%)	1.1	3.3	5.11	6.4	
Peso volumétrico seco (gr/cm ³)	2.266	2.355	2.373	2.243	
			Densidad máxima:	(gr/cm ³)	2.384
			Humedad óptima:	(%)	4.5

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

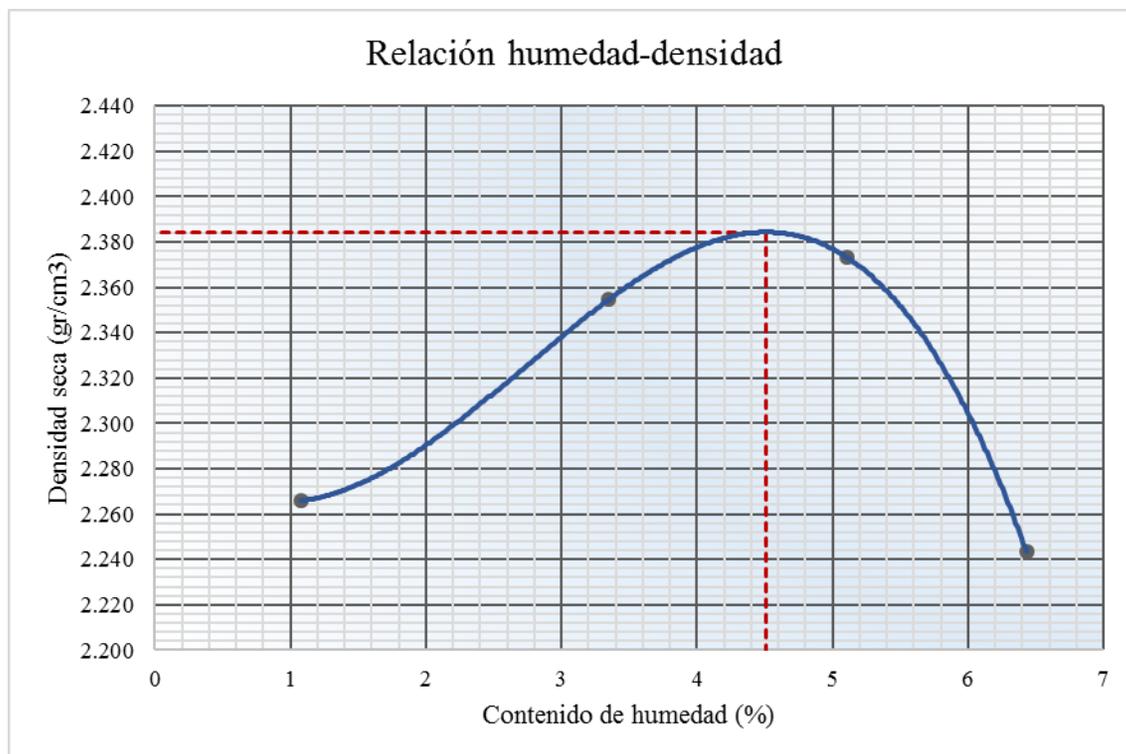


Figura 36. Relación: contenido de humedad – densidad de la subrasante.
Fuente: Elaboración propia.

f) Relación de soporte california.

Tabla 36
CBR de la subrasante ubicada en el km 01+000

	C.B.R. al 95% de MDS (%)	C.B.R. al 100% de MDS (%)
0.1"	39.5	53.0
0.2"	52.5	65.7

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

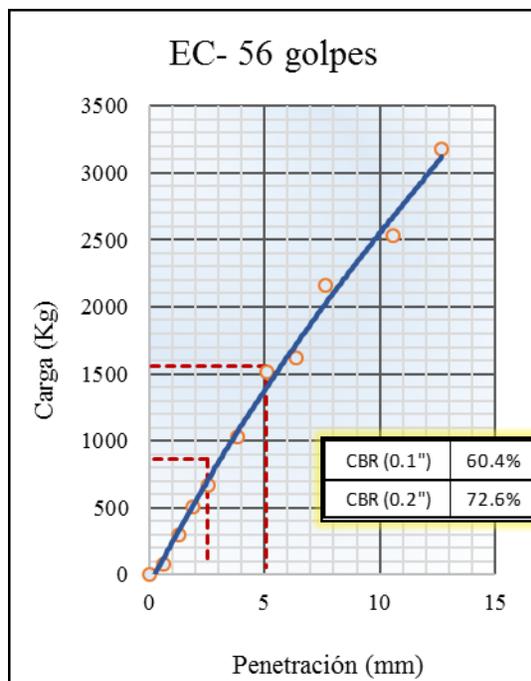


Figura 37. EC 56 golpes de la subrasante.
Fuente: Elaboración propia.

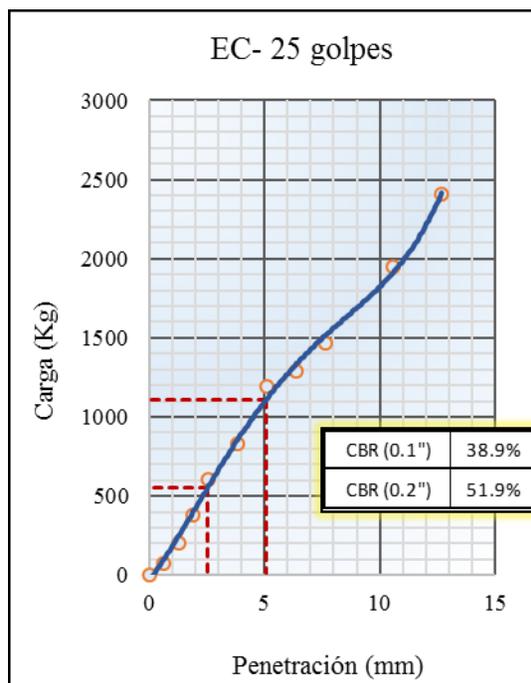


Figura 38. EC 25 golpes de la subrasante.
Fuente: Elaboración propia.

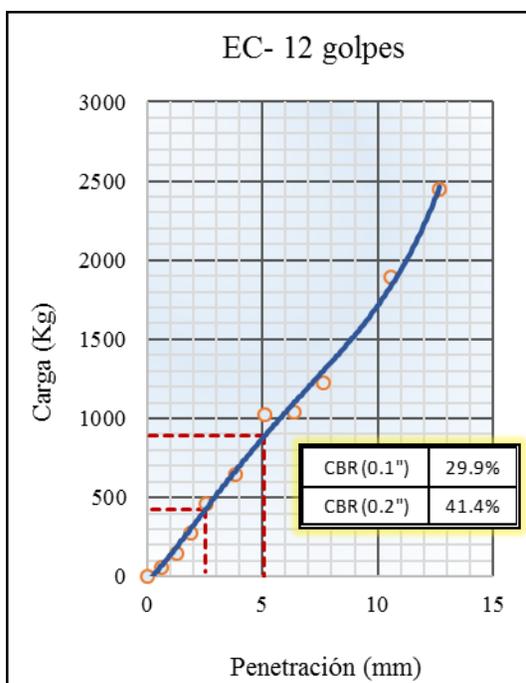


Figura 39. EC 12 golpes de la subrasante.
Fuente: Elaboración propia.

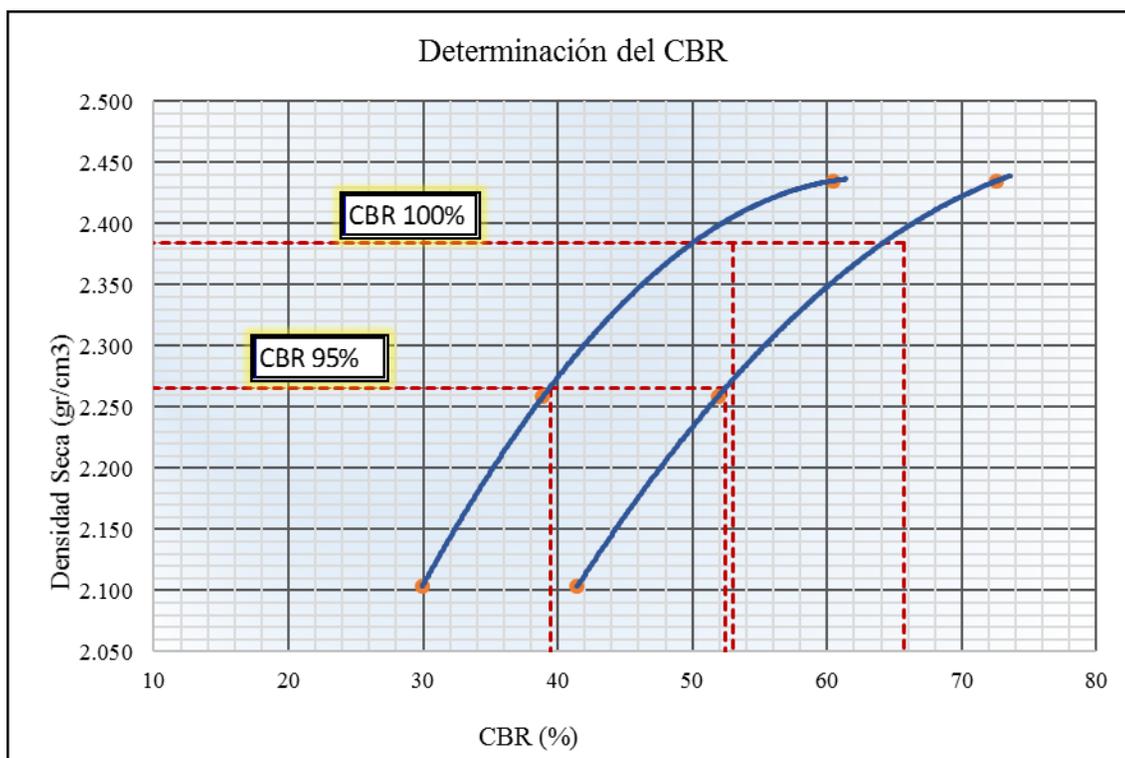


Figura 40. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la subrasante.

Tabla 37
Resumen de los ensayos del material de subrasante

Peso de la muestra		
Peso total de la muestra	(gr):	12628.00
Material fino < N°4	(gr):	6051.71
Material grueso > N°4	(gr):	6576.29
Límites de consistencia		
Límite líquido	(%) :	22.6
Límite plástico	(%) :	16.3
Índice plástico	(%) :	6.3
Clasificación de suelos		
Clasificación SUCS	(gr):	GC-GM
Clasificación AASTHO	(gr):	A-1-a (0)
Características físicas y mecánicas		
Humedad natural	(%) :	2.3
Porcentaje de desgaste	(%) :	22.4
Máxima dens. seca	(gr/cm ³):	2.384
Óptimo cont. de humedad	(%) :	4.51
CBR 0.1 " al 95% MDS	(%) :	39.47
CBR 0.1 " al 100% MDS	(%) :	52.99

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.8. Características físicas y mecánicas de las canteras.

La selección de las canteras comienza por determinar la ubicación y evaluación de la potencia de las canteras, posteriormente se realizó los ensayos de laboratorio del suelo de las canteras para determinar si cumplen las especificaciones técnicas requeridas para conformar una carpeta de rodadura. (Anexo 08).

Tabla 38
Ubicación de las canteras A, B y C

N°	Descripción	Progresiva	Este.	Norte	Altitud (m.s.n.m.)
1	Cantera A	km 2+840	720179.5306	8466085.3975	2155.00
2	Cantera B	km 8+140	723532.2365	8464108.8498	2320.00
3	Cantera C	km 14+380	727064.6143	8463010.7670	2660.00

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Cantera A: Progresiva km 02 +840



Figura 41. Imagen satelital de la cantera A.



Figura 42. Material granular de la cantera A.

Cantera B: Progresiva km 08 + 140



Figura 43. Imagen satelital de la cantera B.



Figura 44. Material granular de la cantera B.

Cantera C: Progresiva km 14 + 380



Figura 45. Imagen satelital de la cantera C.



Figura 46. Material granular de la cantera C.

4.1.1.8.1. Cálculo de potencia y rendimiento.

Tabla 39

Cálculo de potencias de las canteras

Cálculo de potencia				
Datos / cantera		C- A	C- B	C-C
Área de la cantera (m ²)		1719.38 m ²	2346.89 m ²	952.64 m ²
Área de la cantera (ha)		0.17 ha	0.23 ha	0.10 ha
Profundidad promedio aprovechable		4.20 m	7.50 m	6.00 m
Top soil (suelo superficial orgánico)		0.20 m	0.30 m	0.30 m
Over en cantera (>3", material mayor de 3" después del desbroce)		0.10 m	0.10 m	0.10 m
Esponjamiento		10%	10%	10%
Potencia bruta en banco		7221 m ³	17602 m ³	5716 m ³
Desbroce	0.20 m	344 m ³	469 m ³	191 m ³
Potencia neta en banco bruta-desbroce		6878 m ³	17132 m ³	5525 m ³
Over de la potencia neta	2%	137.55	342.65	110.51
Potencia neta en banco p. Bruta-desbroce		6740 m ³	16790 m ³	5415 m ³

Potencia neta aprovechable en cantera:	6740 m ³	16790 m ³	5415 m ³
--	---------------------	----------------------	---------------------

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40
Cálculo del rendimiento de las canteras

Cálculo de rendimiento			
Datos de la curva granulométrica			
Porcentaje retenido en el tamiz 3/4"	19.50 %	28.40 %	4.30 %
Porcentaje aprovechable	80.50 %	71.60 %	95.70 %
Potencia aprovechable después del zarandeo -over	5426 m ³	12021 m ³	5182 m ³
Rendimiento de la cantera:	61.00 %	43.20 %	91.40 %

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.8.2. Resultados del análisis de laboratorio del material de la cantera A.

a) Análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 41
Análisis granulométrico por tamizado del material de la cantera A

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
2 1/2"	60.350				
2"	50.800				100.00%
1 1/2"	38.100	228.82	4.27%	4.27%	95.74%
1"	25.400	461.28	8.60%	12.86%	87.14%
3/4"	19.000	508.97	9.49%	22.35%	77.65%
1/2"	12.500	505.97	9.43%	31.78%	68.22%
3/8"	9.500	327.37	6.10%	37.88%	62.12%
N°4	4.750	746.48	13.91%	51.80%	48.20%

N°10	2.000	706.14	13.16%	64.96%	35.04%
N°20	0.840	438.16	8.17%	73.13%	26.87%
N°40	0.425	225.17	4.20%	77.32%	22.68%
N°50	0.300	95.60	1.78%	79.11%	20.90%
N°80	0.177	202.36	3.77%	82.88%	17.12%
N°100	0.150	80.36	1.50%	84.38%	15.63%
N°200	0.075	321.00	5.98%	90.36%	9.64%
<N°200	Fondo	517.18	9.64%	100.00%	0.00%
Total		5364.85	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

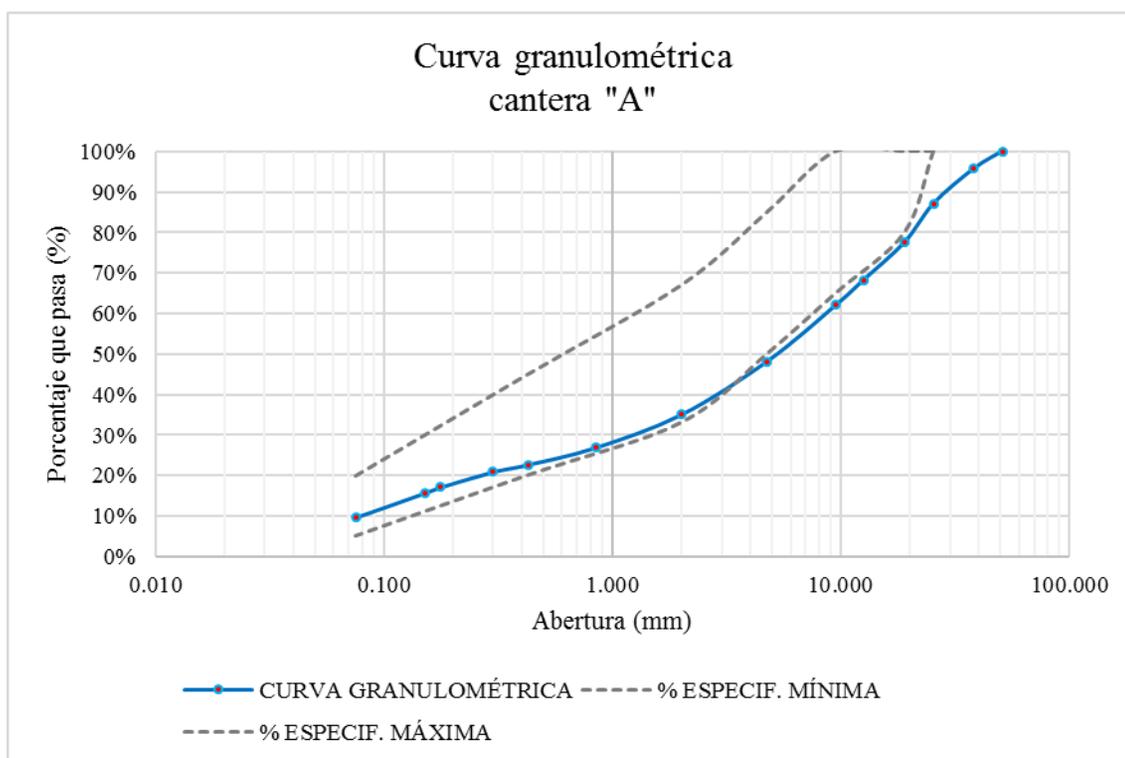


Figura 47. Curva granulométrica del material de cantera A.

b) Determinación de humedad natural.

Tabla 42

Contenido de humedad del material de la cantera A

Ensayo N°		1	2	3
N° de tara		T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	1080.80	1075.26	1083.54
Peso de tara + suelo seco	(gr)	1058.50	1047.35	1064.25
Peso de la tara	(gr)	102.90	103.80	110.56
Peso del agua	(gr)	22.30	27.91	19.29
Peso del suelo seco	(gr)	955.60	943.55	953.69
Contenido de humedad	(%)	2.33	2.96	2.02
Humedad natural promedio	(%)		2.4	

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

c) Límites de consistencia.

Tabla 43

Límite líquido del material de la cantera A

Límite líquido (MTC E 110, AASHTO T89)				
N° de tara		T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	61.00	65.05	60.54
Peso de tara + suelo seco	(gr)	57.01	60.49	56.69
Peso del agua	(gr)	3.99	4.56	3.85
Peso de la tara	(gr)	39.14	40.56	40.33
Peso del suelo seco	(gr)	17.87	19.93	16.36
Contenido de humedad	(%)	22.33	22.88	23.53
Número de golpes		33.00	25.00	18.00

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 44
Limite plástico del material de la cantera A

Limite plástico (MTC E 111, AASHTO T90)				
N° de tara		T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	23.05	24.37	28.20
Peso de tara + suelo seco	(gr)	21.60	22.75	26.16
Peso de la tara	(gr)	13.54	13.78	14.83
Peso del agua	(gr)	1.45	1.62	2.04
Peso del suelo seco	(gr)	8.06	8.97	11.33
Contenido de humedad	(%)	17.99	18.06	18.01

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

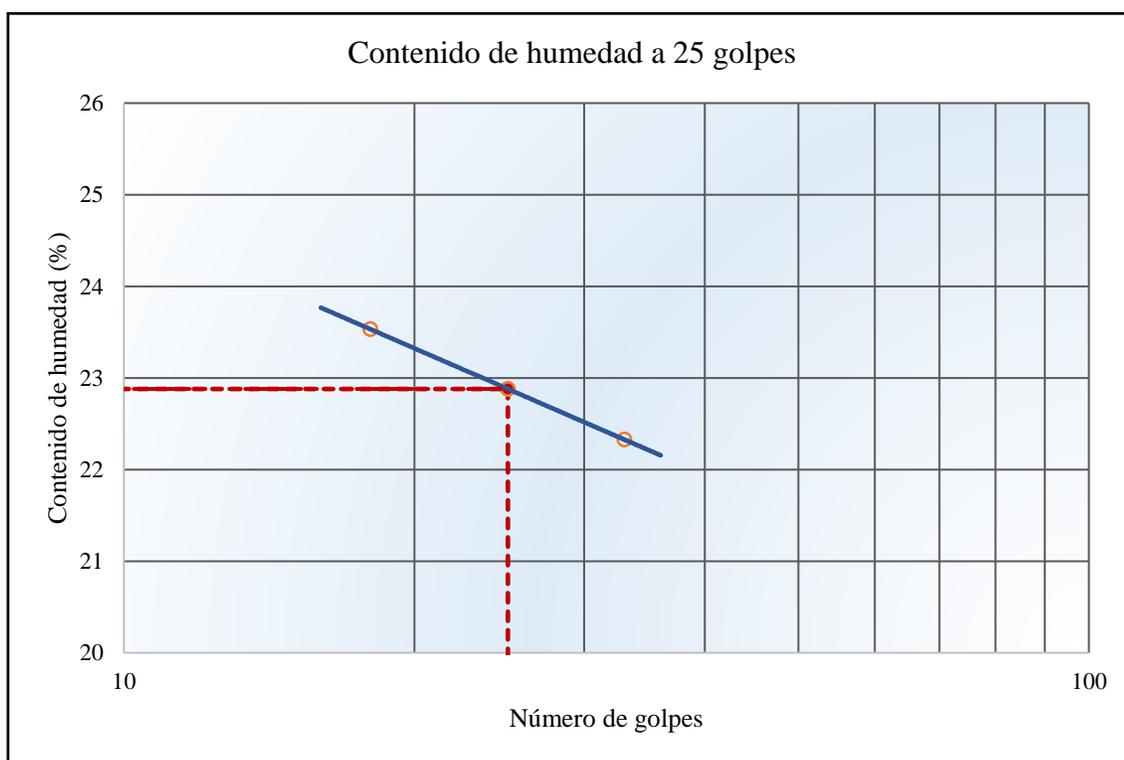


Figura 48. Relación del contenido de humedad (%) y N° de golpes de la cantera A.

Tabla 45
Obtención del índice de plasticidad del material de la cantera A

Constantes físicas de la muestra.		
Límite líquido	(%)	22.9
Límite plástico	(%)	18.0
Índice de plasticidad	(%)	4.9

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

d) Abrasión los ángeles.

Tabla 46
Porcentaje de desgaste del material de la cantera A

Muestra	1
Gradación	"A"
N° de esferas	12
Tamiz (N°)	Peso Ret. (grs.)
1"	1,230
3/4"	1,225
1/2"	1,150
3/8"	1,251
Peso total	4,856
Material retenido tamiz N° 12	3,982
Material pasante tamiz N° 12	874
Porcentaje de desgaste	18.0

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

e) Proctor modificado.

Tabla 47

Ensayo de proctor modificado del material de la cantera A

Ensayo N°		1	2	3	4	
Número de capas		5	5	5	5	
Golpes de pisón por capa		56	56	56	56	
Peso suelo húmedo + molde	(gr)	12371	12582	12648	12564	
Peso molde +base	(gr)	7491	7491	7491	7491	
Peso suelo húmedo compactado	(gr)	4880	5091	5157	5073	
Volumen de molde	(cm ³)	2118	2118	2118	2118	
Peso volumétrico húmedo	(gr/cm ³)	2.304	2.404	2.435	2.395	
Tara N°		T-01	T-02	T-03	T-04	
Peso del suelo húmedo + tara	(gr)	986.6	911.0	976.2	989.6	
Peso del suelo seco + tara	(gr)	966.2	875.7	924.4	921.3	
Peso de tara	(gr)	119.4	102.9	112.0	124.9	
Peso de agua	(gr)	20.4	35.3	51.8	68.3	
Peso del suelo seco	(gr)	846.8	772.8	812.4	796.4	
Contenido de agua	(%)	2.4	4.6	6.38	8.6	
Peso volumétrico seco	(gr/cm ³)	2.250	2.299	2.289	2.206	
				Densidad máxima:	(gr/cm ³)	2.301
				Humedad óptima:	(%)	5.1

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

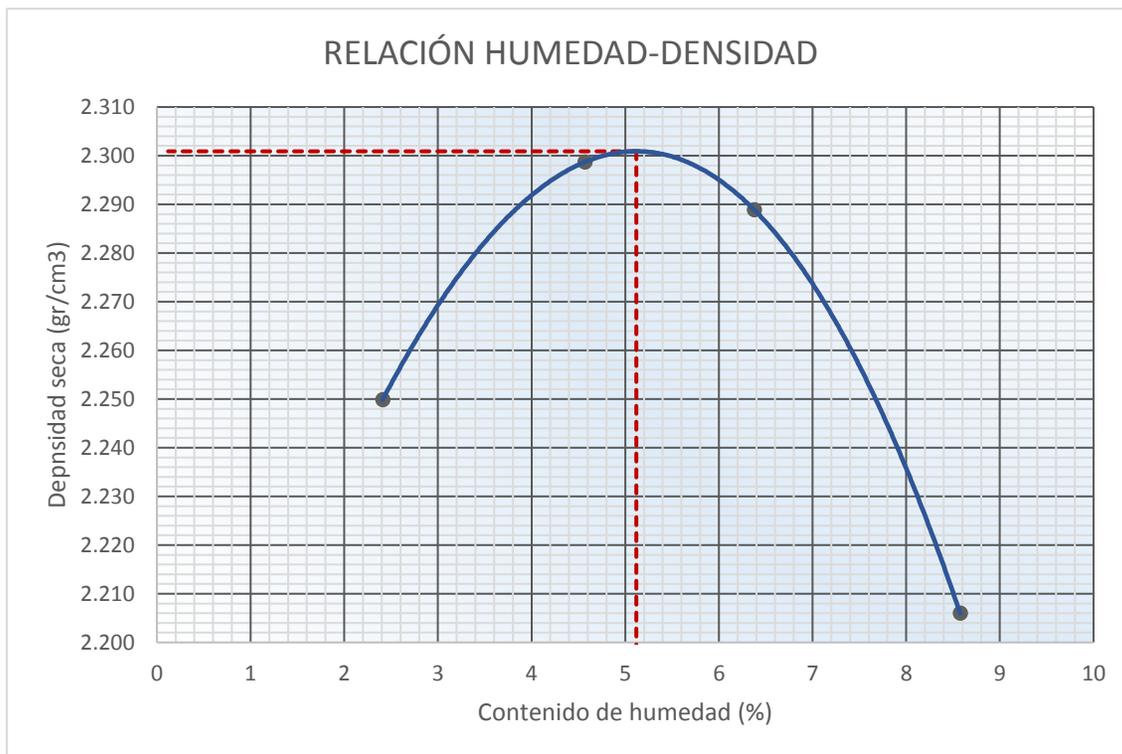


Figura 49. Relación: contenido de humedad – densidad de la cantera A.

f) Relación de soporte california.

Tabla 48
Porcentaje de CBR de la cantera A

	C.B.R. al 95% de MDS (%)	C.B.R. al 100% de MDS (%)
0.1"	28.8	45.2
0.2"	57.4	78.1

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

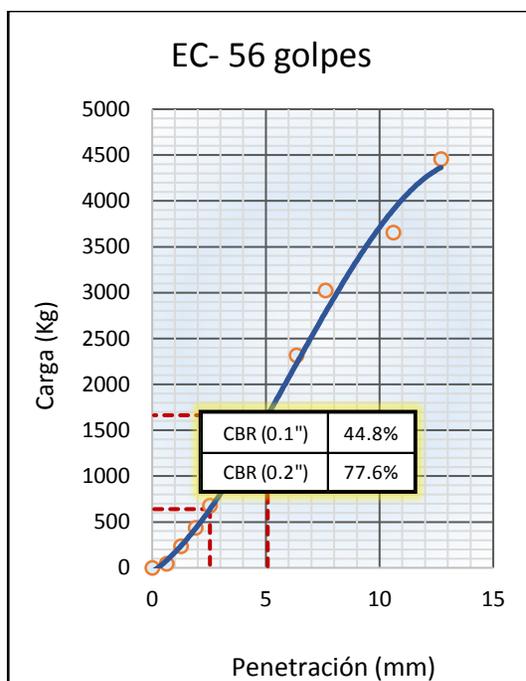


Figura 50. EC 56 golpes de la cantera A.

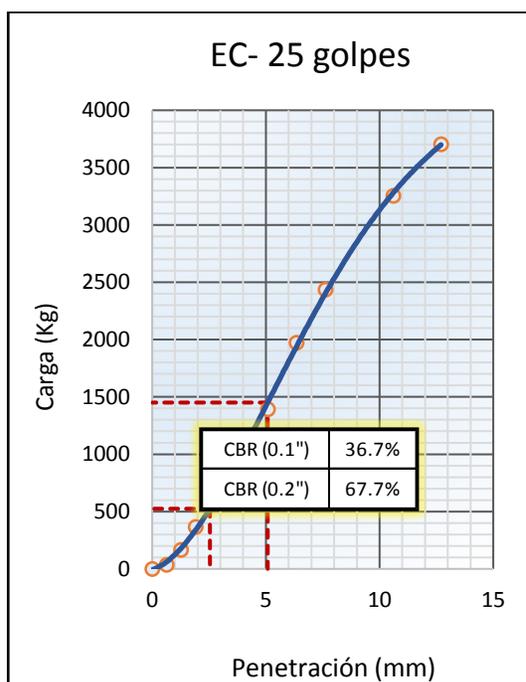


Figura 51. EC 25 golpes de la cantera A.

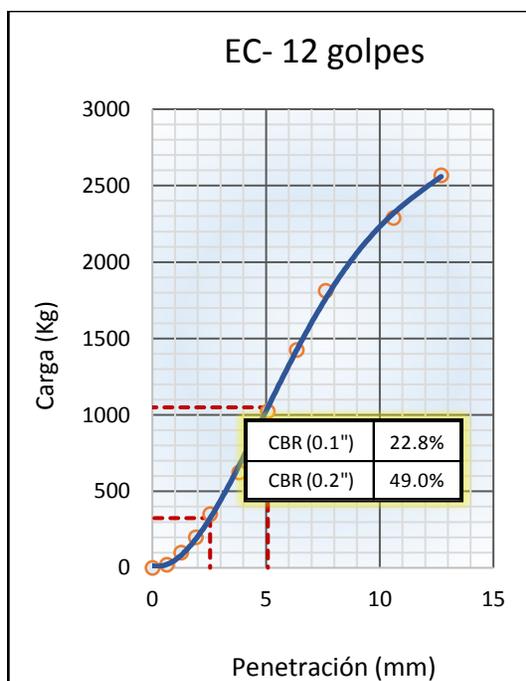


Figura 52. EC 12 golpes de la cantera A.

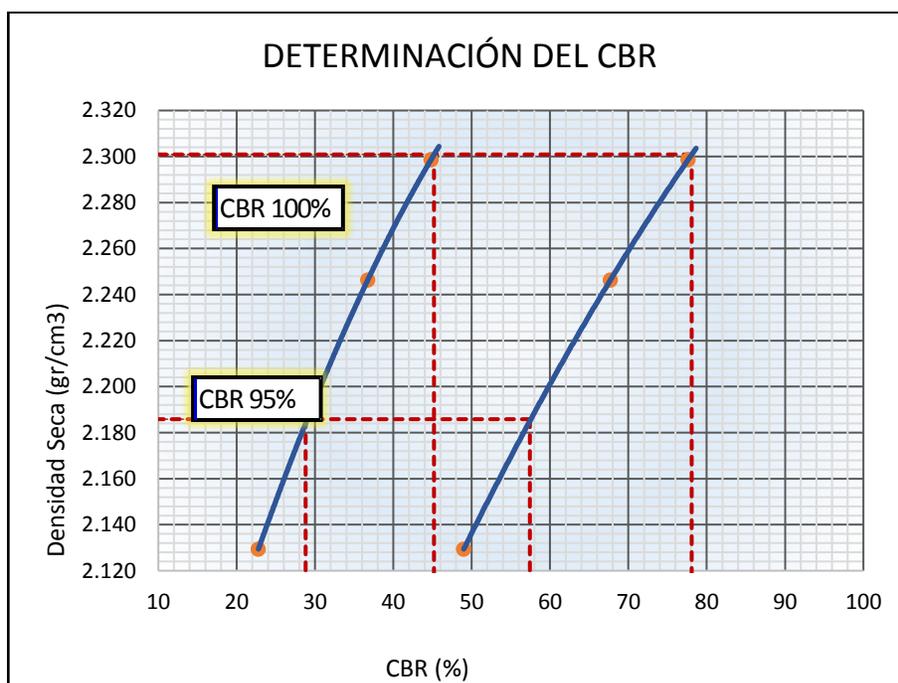


Figura 53. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la cantera A.

Tabla 49
Resumen de los ensayos realizados al material de la cantera A

Peso de la muestra		
Peso total de la muestra	(gr):	5370.00
Material fino < N°4	(gr):	2307.40
Material grueso > N°4	(gr):	3062.60
Límites de consistencia		
Límite líquido	(%) :	22.9
Límite plástico	(%) :	18.0
Índice plástico	(%) :	4.9
Clasificación de Suelos		
Clasificación SUCS	(gr):	GC-GM
Clasificación AASTHO	(gr):	A-1-b (0)
Características Físicas y Mecánicas		
Humedad natural	(%):	2.4
Porcentaje de desgaste	(%)	18.0
Máxima dens. seca	(gr/cm ³):	2.301
Óptimo cont. de humedad	(%)	5.12
CBR 0.1" al 95% MDS	(%)	28.80
CBR 0.1 " al 100% MDS	(%)	45.19

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.8.3. Resultados del análisis de laboratorio del material de la cantera B.

a) Análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 50
Análisis granulométrico por tamizado del material de la cantera B

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
3"	76.200				
2 1/2"	60.350				100.00%
2"	50.800	300.22	5.60%	5.60%	94.40%
1 1/2"	38.100	225.22	4.20%	9.79%	90.21%
1"	25.400	534.78	9.97%	19.76%	80.24%
3/4"	19.000	465.95	8.69%	28.45%	71.55%
1/2"	12.500	505.97	9.43%	37.88%	62.12%
3/8"	9.500	327.37	6.10%	43.98%	56.02%
N°4	4.750	746.48	13.91%	57.89%	42.11%
N°10	2.000	706.14	13.16%	71.06%	28.94%
N°20	0.840	438.16	8.17%	79.22%	20.78%
N°40	0.425	225.17	4.20%	83.42%	16.58%
N°50	0.300	95.60	1.78%	85.20%	14.80%
N°80	0.177	191.21	3.56%	88.77%	11.23%
N°100	0.150	43.03	0.80%	89.57%	10.43%
N°200	0.075	172.22	3.21%	92.78%	7.22%
<N°200	Fondo	387.46	7.22%	100.00%	0.00%
	Total	5364.96	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

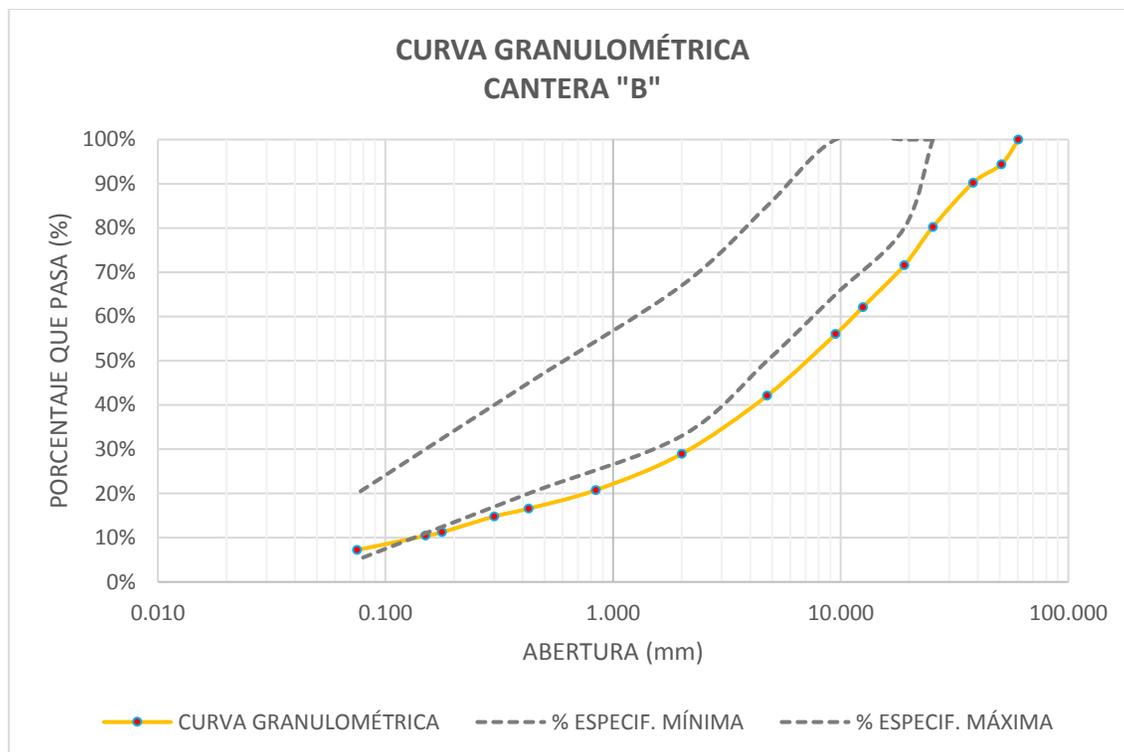


Figura 54. Curva granulométrica del material de cantera B.

b) Determinación de humedad natural.

Tabla 51

Contenido de humedad del material de la cantera B

Ensayo N°	1	2	3
N° de tara	T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo (gr)	1594.10	1692.50	1785.50
Peso de tara + suelo seco (gr)	1578.40	1678.30	1778.60
Peso de la tara (gr)	119.40	121.30	122.50
Peso del agua (gr)	15.70	14.20	6.90
Peso del suelo seco (gr)	1459.00	1557.00	1656.10
Contenido de humedad (%)	1.08	0.91	0.42
Humedad natural promedio (%)	0.8		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

c) Límites de consistencia.

Tabla 52

Límite líquido del material de la cantera B

Límite líquido (MTC E 110, AASHTO T89)				
N° de tara		T - 04	T - 05	T - 06
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	63.73	64.00	59.45
Peso de tara + suelo seco	(gr)	58.84	58.96	55.10
Peso del agua	(gr)	4.89	5.04	4.35
Peso de la tara	(gr)	39.33	39.49	38.91
Peso del suelo seco	(gr)	19.51	19.47	16.19
Contenido de humedad	(%)	25.06	25.89	26.87
Numero de golpes		34.00	27.00	18.00

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 53

Límite plástico del material de la cantera B

Limite plástico (MTC E 111, AASHTO T90)				
N° de tara		T - 07	T - 08	T - 09
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	23.40	23.62	25.20
Peso de tara + suelo seco	(gr)	21.94	22.15	23.48
Peso de la tara	(gr)	14.93	14.92	15.06
Peso del agua	(gr)	1.46	1.47	1.72
Peso del suelo seco	(gr)	7.01	7.23	8.42
Contenido de humedad	(%)	20.83	20.33	20.43

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

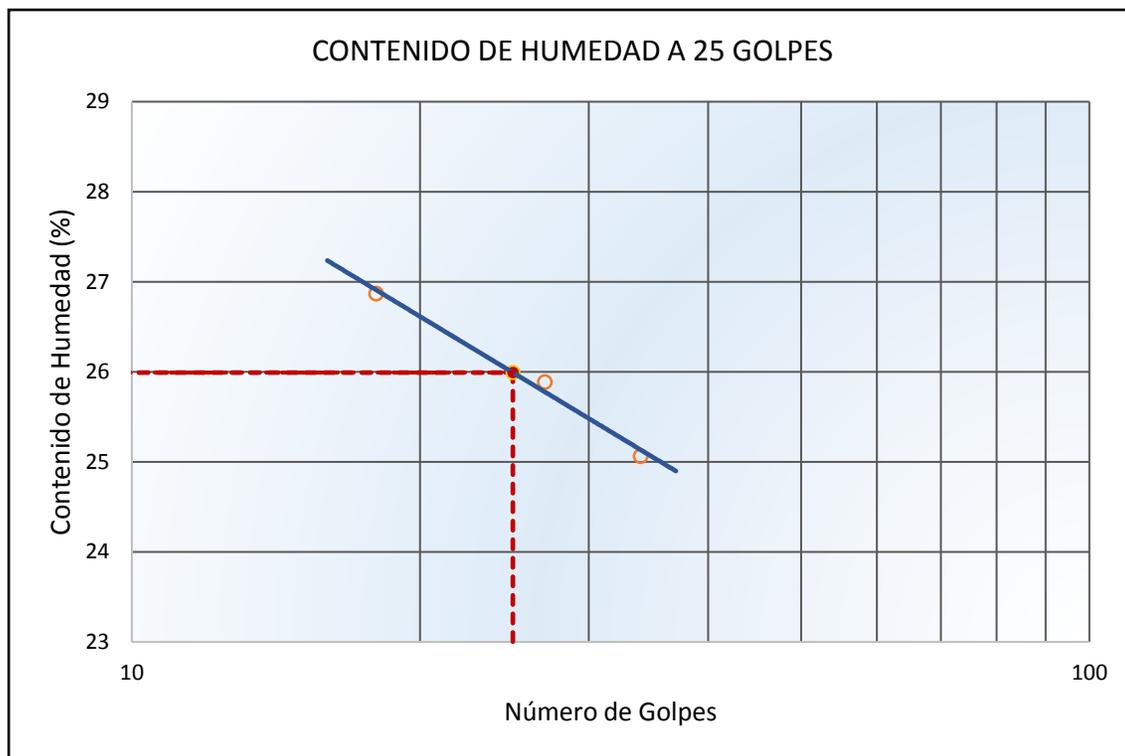


Figura 55. Relación del contenido de humedad (%) y N° de golpes de la cantera B.

Tabla 54

Obtención del índice de plasticidad del material de la cantera B

Constantes físicas de la muestra		
Límite líquido	(%)	26.0
Límite plástico	(%)	20.5
Índice de plasticidad	(%)	5.5

Extracción de resultados de laboratorio

Fuente: Elaboración propia.

d) Abrasión Los Ángeles.

Tabla 55
Porcentaje de desgaste del material de la cantera B

Muestra	1
Gradación	"A"
N° de esferas	12
Tamiz (N°)	Peso ret. (grs.)
1"	1,249
3/4"	1,251
1/2"	1,250
3/8"	1,250
Peso total	5,000
Material retenido tamiz N° 12	4,434
Material pasante tamiz N° 12	566
Porcentaje de desgaste	11.3

Extracción de resultados de laboratorio
 Fuente: Elaboración propia.

e) Próctor modificado.

Tabla 56

Ensayo de proctor modificado del material de la cantera B

Ensayo N°		1	2	3	4
Número de Capas		5	5	5	5
Golpes de Pisón por Capa		56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	(gr)	12360	12518	12672	12656
Peso molde +base	(gr)	7491	7491	7491	7491
Peso suelo húmedo compactado	(gr)	4869	5027	5181	5165
Volumen de molde	(cm ³)	2118	2118	2118	2118
Peso volumétrico húmedo	(gr/cm ³)	2.299	2.373	2.446	2.439
Tara N°		T-01	T-02	T-03	T-04
Peso del suelo húmedo + tara	(gr)	944.2	1136.4	908.8	839.9
Peso del suelo seco + tara	(gr)	936.8	1108.7	871.2	793.3
Peso de Tara	(gr)	124.9	119.4	102.9	112.0
Peso de agua	(gr)	7.4	27.7	37.6	46.6
Peso del suelo seco	(gr)	811.9	989.3	768.3	681.3
Contenido de agua	(%)	0.9	2.8	4.89	6.8
Peso volumétrico seco	(gr/cm ³)	2.278	2.309	2.332	2.283
				Densidad máxima:	(gr/cm ³) 2.332
				Humedad óptima:	(%) 4.8

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

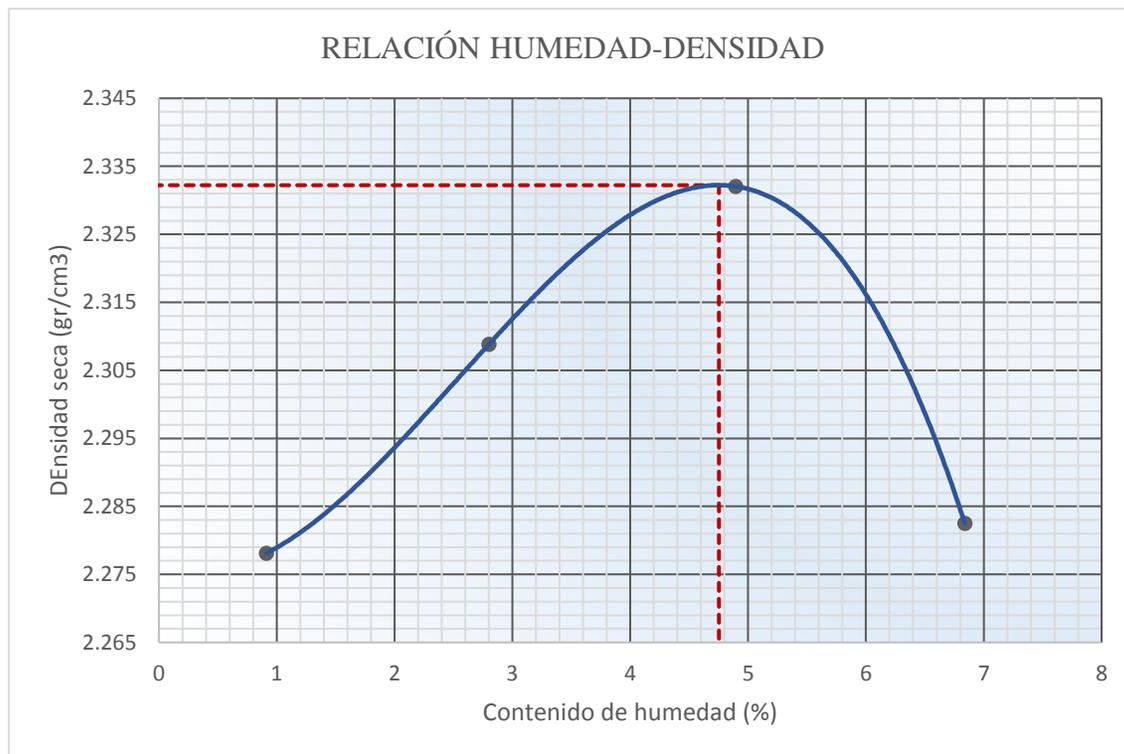


Figura 56. Relación: contenido de humedad – densidad de la cantera B.

f) Relación de Soporte California.

Tabla 57
CBR de la cantera B

	C.B.R. al 95% de MDS (%)	C.B.R. al 100% de MDS (%)
0.1"	30.5	43.0
0.2"	51.2	70.4

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

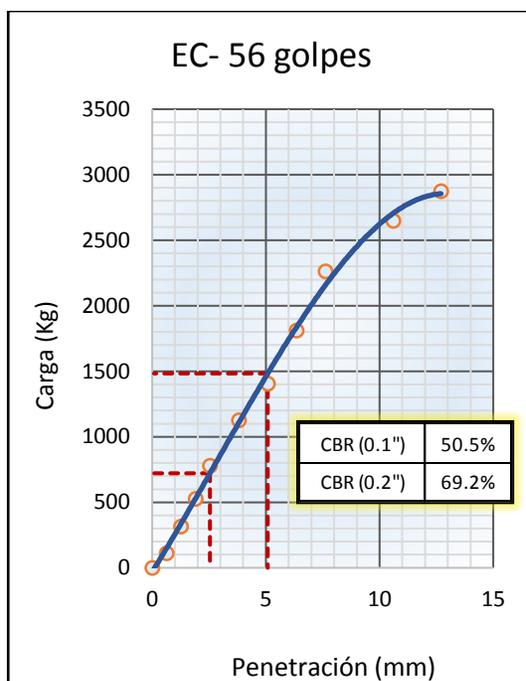


Figura 57. EC 56 golpes de la cantera B.

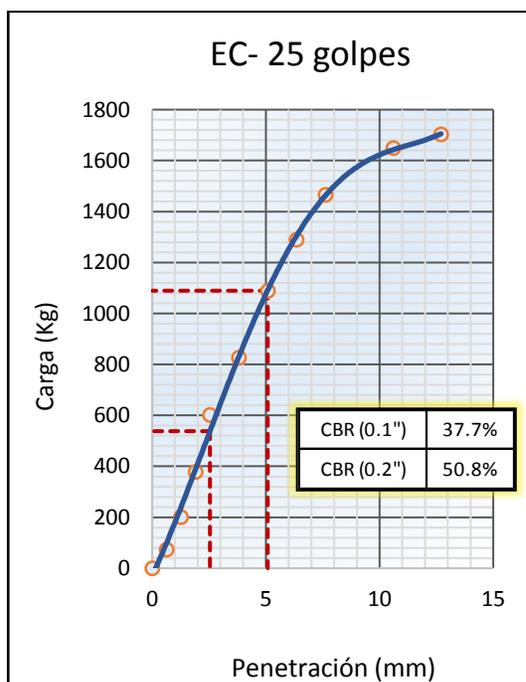


Figura 58. EC 25 golpes de la cantera B.

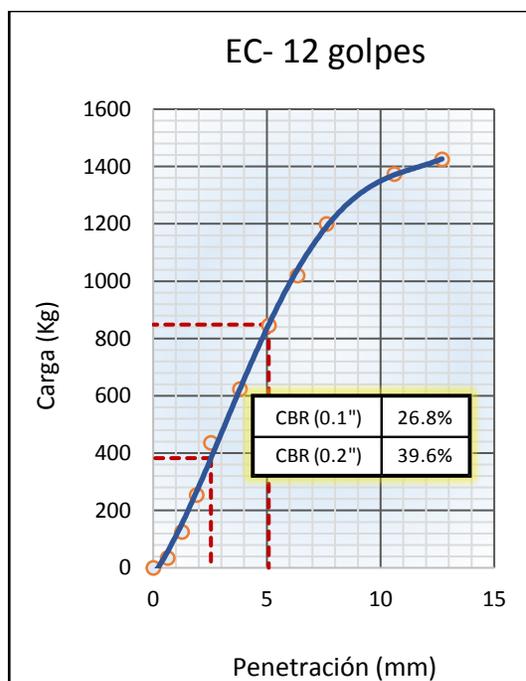


Figura 59. EC 12 golpes de la cantera B.

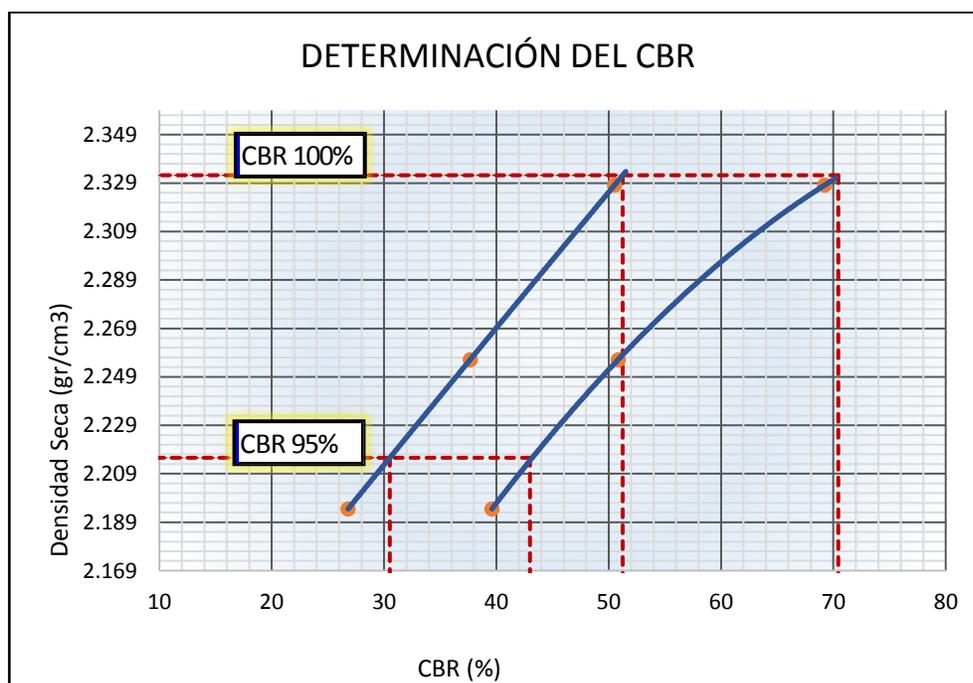


Figura 60. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la cantera B.

Tabla 58
Resumen de los ensayos realizados al material de la cantera B

Peso de la Muestra		
Peso total de la muestra	(gr):	5364.96
Material fino < N°4	(gr):	2258.97
Material grueso > N°4	(gr):	3105.99
Límites de consistencia		
Límite líquido	(%) :	26.0
Límite plástico	(%) :	20.5
Índice plástico	(%) :	5.5
Clasificación de Suelos		
Clasificación SUCS	(gr):	GW-GC
Clasificación AASTHO	(gr):	A-1-a (0)
Características Físicas y Mecánicas		
Humedad natural	(%):	0.8
Porcentaje de desgaste	(%)	11.3
Máxima dens. seca	(gr/cm ³):	2.332
Óptimo cont. de humedad	(%)	4.75
CBR 0.1" al 95% MDS	(%)	30.51
CBR 0.1 " al 100% MDS	(%)	51.24

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.8.4. Resultados del análisis de laboratorio del material de la cantera C.

- a) Análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 59
Análisis granulométrico por tamizado del material de la cantera C

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1 1/2"	38.100				100.00%

1"	25.400	120.40	3.21%	3.21%	96.79%
3/4"	19.000	41.10	1.09%	4.30%	95.70%
1/2"	12.500	168.80	4.49%	8.79%	91.21%
3/8"	9.500	114.60	3.05%	11.85%	88.16%
N°4	4.750	293.70	7.82%	19.66%	80.34%
N°10	2.000	274.70	7.31%	26.98%	73.02%
N°20	0.840	147.90	3.94%	30.92%	69.08%
N°40	0.425	123.80	3.30%	34.21%	65.79%
N°50	0.300	65.20	1.74%	35.95%	64.05%
N°80	0.177	102.20	2.72%	38.67%	61.33%
N°100	0.150	50.40	1.34%	40.01%	59.99%
N°200	0.075	257.70	6.86%	46.87%	53.13%
<N°200	Fondo	1995.50	53.13%	100.00%	0.00%
Total	3756.00	100.00%			

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

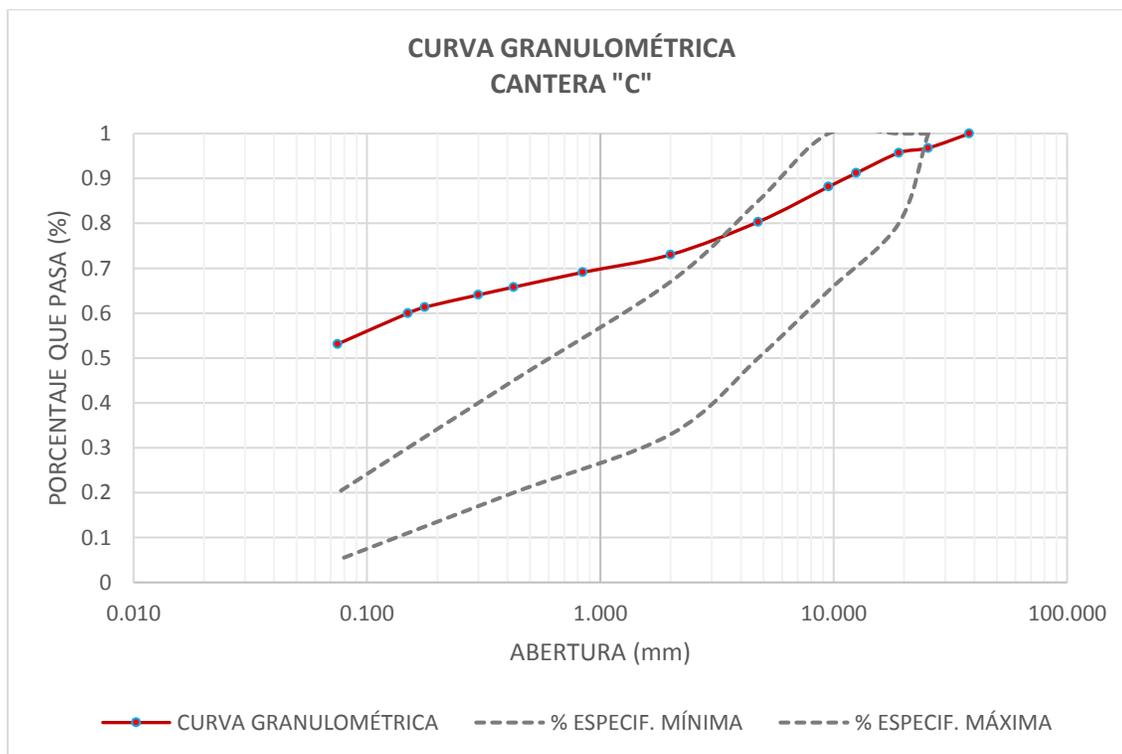


Figura 61. Curva granulométrica del material de cantera C.

b) Determinación de humedad natural.

Tabla 60

Contenido de humedad del material de la cantera C

Ensayo N°	1	2	3
N° de tara	T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo (gr)	1390.11	1398.25	1402.36
Peso de tara + suelo seco (gr)	1312.24	1316.48	1323.52
Peso de la tara (gr)	124.90	124.25	115.23
Peso del agua (gr)	77.87	81.77	78.84
Peso del suelo seco (gr)	1187.34	1192.23	1208.29
Contenido de humedad (%)	6.56	6.86	6.52
Humedad natural promedio (%)		6.6	

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

c) Límites de consistencia.

Tabla 61

Límite líquido del material de la cantera C

Límite líquido (MTC E 110, AASHTO T89)				
N° de tara		T - 07	T - 08	T - 09
Peso de tara + suelo húmedo (gr)		58.97	61.96	60.84
Peso de tara + suelo seco (gr)		53.48	56.52	55.58
Peso del agua (gr)		5.49	5.44	5.26
Peso de la tara (gr)		36.67	40.34	40.40
Peso del suelo seco (gr)		16.81	16.18	15.18
Contenido de humedad (%)		32.66	33.62	34.65
Numero de golpes		34.00	27.00	18.00

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 62

Límite plástico del material de la cantera C

Límite plástico (MTC E 111, AASHTO T90)				
N° de tara		T - 07	T - 08	T - 09
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	25.22	25.55	23.96
Peso de tara + suelo seco	(gr)	23.40	23.67	22.13
Peso de la tara	(gr)	15.03	15.03	13.61
Peso del agua	(gr)	1.82	1.88	1.83
Peso del suelo seco	(gr)	8.37	8.64	8.52
Contenido de humedad	(%)	21.74	21.76	21.48

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

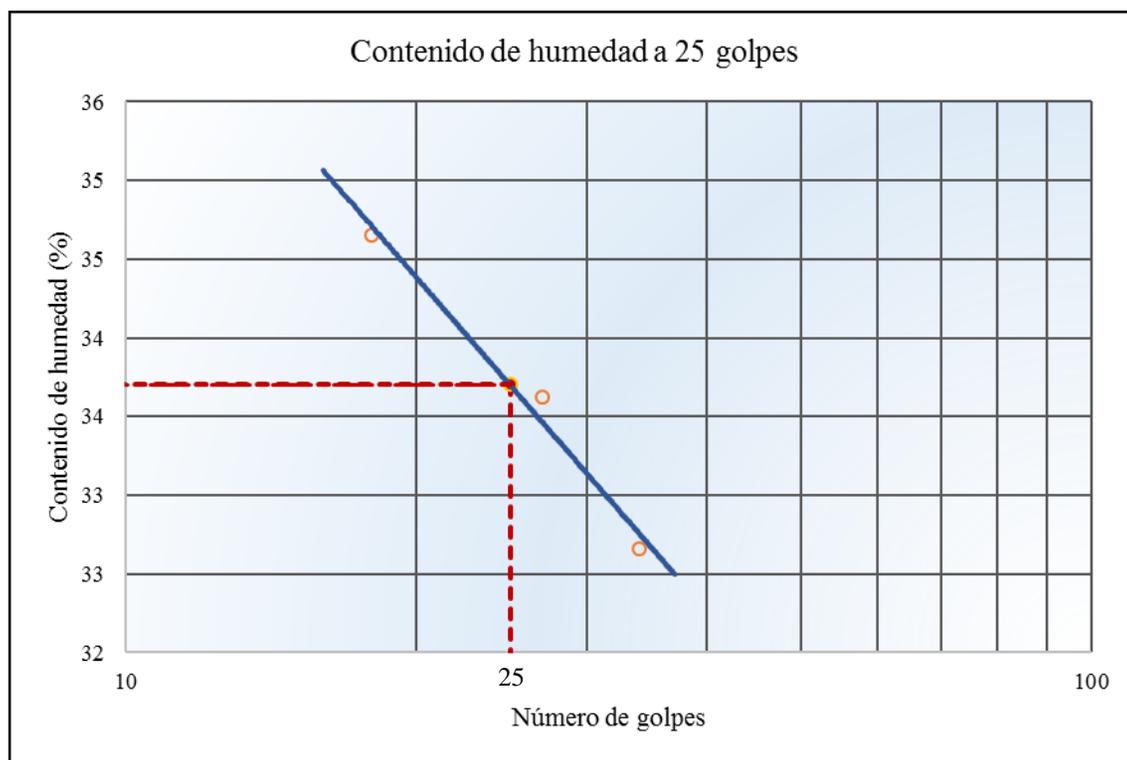


Figura 62. Relación del contenido de humedad (%) y el N° de golpes de la cantera C.

Tabla 63
Obtención del índice de plasticidad del material de la cantera C

Constantes físicas de la muestra		
Límite líquido	(%)	33.7
Límite plástico	(%)	21.7
Índice de plasticidad	(%)	12.0

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

d) Abrasión Los Ángeles.

Tabla 64
Porcentaje de desgaste del material de la cantera C

Muestra	1
Gradación	"A"
N° de esferas	12
Tamiz (N°)	Peso ret. (grs.)
1"	1,349
3/4"	1,350
1/2"	1,250
3/8"	1,251
Peso total	5,200
Material retenido tamiz N° 12	3,436
Material pasante tamiz N° 12	1,764
Porcentaje de desgaste	33.9

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

e) Próctor modificado.

Tabla 65

Ensayo de proctor modificado del material de la cantera C

Ensayo N°		1	2	3	4	
Número de capas		5	5	5	5	
Golpes de pisón por capa		56	56	56	56	
Peso suelo húmedo + molde	(gr)	11471	11682	11997	10654	
Peso molde +base	(gr)	7491	7491	7491	7491	
Peso suelo húmedo compactado	(gr)	3980	4191	4506	3163	
Volumen de molde	(cm ³)	2118	2118	2118	2118	
Peso volumétrico húmedo	(gr/cm ³)	1.879	1.979	2.127	1.493	
Tara N°		T-01	T-02	T-03	T-04	
Peso del suelo húmedo + tara	(gr)	1109.06	1213.6	1088.76	1112.16	
Peso del suelo seco + tara	(gr)	1045.2	1135.2	1012.4	1011.3	
Peso de tara	(gr)	119.4	102.9	112.0	123.2	
Peso de agua	(gr)	63.86	78.36	76.36	100.86	
Peso del suelo seco	(gr)	925.8	1032.3	900.4	888.1	
Contenido de agua	(%)	6.9	7.6	8.48	11.4	
Peso volumétrico seco	(gr/cm ³)	1.758	1.839	1.961	1.341	
				Densidad máxima:	(gr/cm ³)	2.011
				Humedad óptima:	(%)	9.3

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

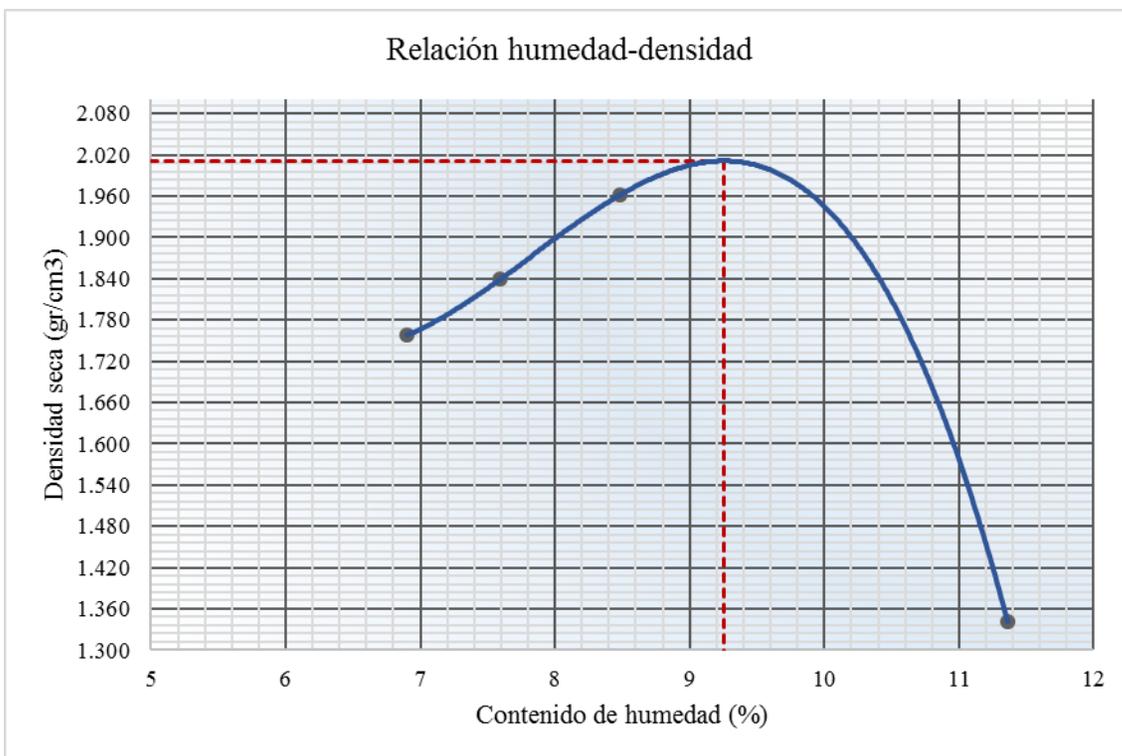


Figura 63. Relación: contenido de humedad – densidad de la cantera C.

f) Relación de soporte californiana.

Tabla 66

CBR de la cantera C

	C.B.R. al 95% de MDS (%)	C.B.R. al 100% de MDS (%)
0.1"	27.6	49.3
0.2"	30.0	55.2

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

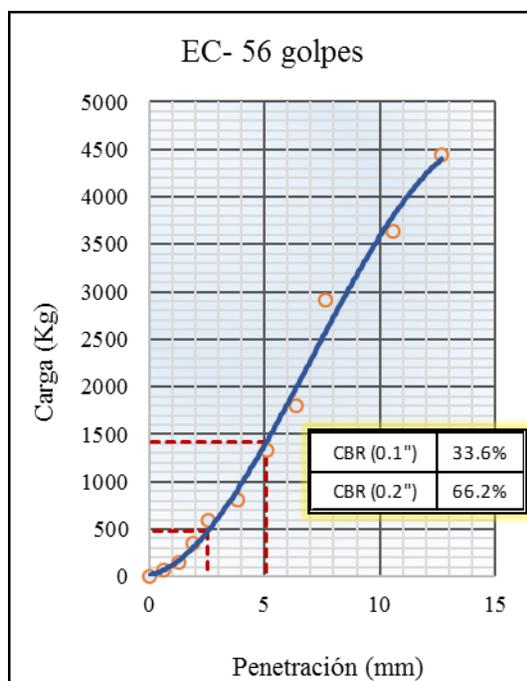


Figura 64. EC 56 golpes de la cantera C.

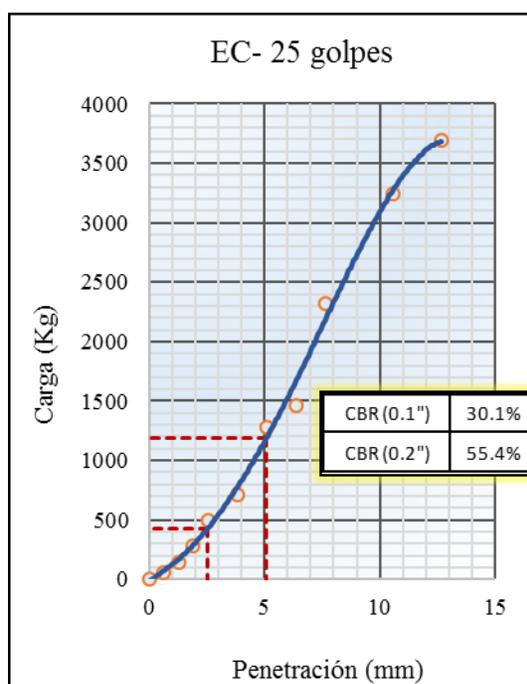


Figura 65. EC 25 golpes de la cantera C.

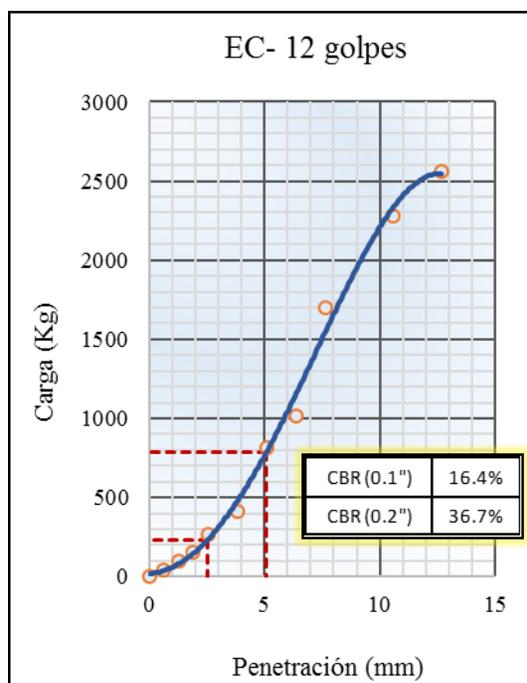


Figura 66. EC 12 golpes de la cantera C.

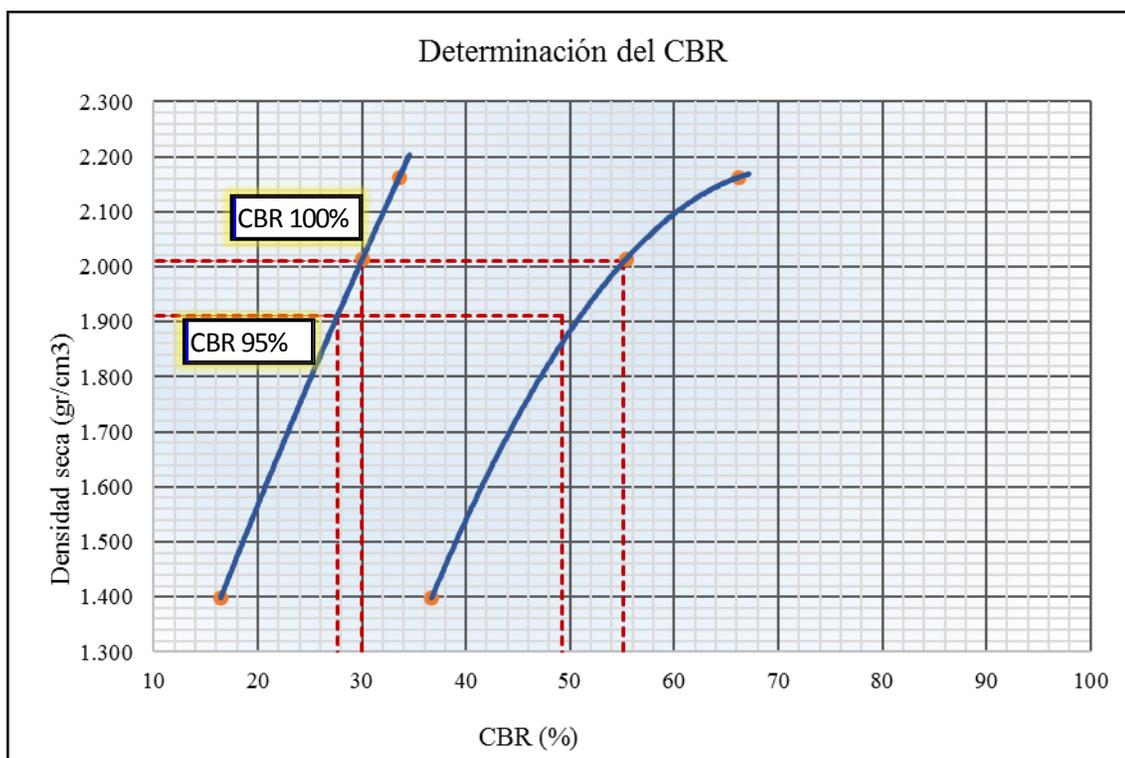


Figura 67. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la cantera C.

Tabla 67
Resumen de los ensayos realizados al material de la cantera C

Peso de la Muestra		
Peso total de la muestra	(gr):	3756.00
Material fino < N°4	(gr):	3018.20
Material grueso > N°4	(gr):	737.80
Límites de Consistencia		
Límite Líquido	(%) :	33.7
Límite Plástico	(%) :	21.7
Índice Plástico	(%) :	12.0
Clasificación de Suelos		
Clasificación SUCS	(gr):	CL
Clasificación AASTHO	(gr):	A-6 (4)
Características Físicas y Mecánicas		
Humedad natural	(%):	6.6
Porcentaje de desgaste	(%)	33.9
Máxima dens. seca	(gr/cm ³):	2.011
Óptimo cont. de humedad	(%)	9.26
CBR 0.1" al 95% MDS	(%)	27.63
CBR 0.1 " al 100% MDS	(%)	29.97

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.9. Características químicas.

4.1.1.9.1. Resultado del análisis químico del suelo.

El análisis químico de suelo se realizó en el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego de la Universidad Nacional Agraria la Molina. (Anexo 09).

A continuación, se da un resumen de los resultados:

Tabla 68
Resultado del análisis químico de suelo de la cantera A

N°	Unidad	Lab. 36986
N°		Cantera A
SST	(ppm)	216.58
CL	(ppm)	43.046147
SO=4	(ppm)	14.81922
pH		8.67
C.E.	(ds/m)	
M.O.	(%)	1.85
CO3Ca	(%)	14.4

Fuente: Resultado de Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertilización -UNALM

Donde: SST son sólidos disueltos totales.

Los métodos que se usaron fueron los siguientes:

- Sales solubles totales: Determ. de sales solubles en suelos y agua subterránea - NTP339.152 – 2002.
- Cloruro soluble: Determ. de cloruros solubles en suelos y agua subterránea - NTP339.177 – 2002.
- Sulfato soluble: Determ. de sulfatos solubles en suelos y agua subterránea - NTP339.178 – 2002.
- pH: Método potenciométrico.

4.1.1.9.2. Resultado del análisis químico de la cal.

El análisis químico de la cal se realizó en el Laboratorio SGS-Perú ubicado en Lima. (Anexo 10).

Tabla 69
Resultado del análisis químico realizado a la cal

Elemento	Óxido de calcio Cao	Mgo
Esquema	Cl80c	Cac41b
Unidad	%	%
Cal	61.87	1.85

Fuente: Resultado de Laboratorio-SGS.

Método aplicado según esquema:

CLA80C: ASTM C 25-11. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime. Calcium Oxide by Volumetric Method. Section 17.

CAC 41B: SGS-MN-ME-87/Setiembre 2009 Rev.03/CALIZA, CAL VIVA Y CAL HIDRATADA: IMPUREZAS – ABSORCIÓN ATÓMICA.

4.1.2. Metodología de la estabilización.

La estabilización fue concordante con el diagnóstico realizado, a continuación, se explica detalladamente el proceso que se hizo para escoger los estabilizadores y los métodos de estabilización apropiados:

Realizado el inventario de condición vial del tramo Yaca – Circa (km 0+000 al km 12+000), se tiene como resultado del Inventario de Condición Vial que la calificación promedio es de **371.13**, lo que indica que se encuentra en **condición regular** y que debe realizarse una

conservación periódica; el resultado ideal es que la calificación se encuentre en condición buena y que solicite realizarse una conservación rutinaria.

Según el estudio de tráfico, el tránsito del año 2018 es de 188 veh/día y el tránsito proyectado para el año 2028 es de 347 veh/ día, este se clasifica como tipo de Tráfico T4 según MTC.

Las condiciones climáticas de la zona de Yaca presentan una temperatura mínima de $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperatura máxima de $20.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, la precipitación promedio máximo mensual en las provincias de Apurímac es de 179.9 mm/mes y precipitación mínima es 7.3 mm/mes.

La evaluación de las características mecánicas de la subrasante, indica que tiene un CBR de 9.47%, resultado al 95 % de la máxima densidad seca, se encuentra en la categoría de subrasante muy buena, por lo cual, cumple con las especificaciones de resistencias mínima, el que exige que la categoría sea mejor a subrasante regular, o que su CBR sea mayor o igual a 6 %, dado ello, es posible intervenir a nivel de carpeta de rodadura.

Las características físicas y mecánicas de suelos de las canteras A, B y C; los suelos A y B están clasificados según AASTHO como GC-GM y GW-GC y según SUCS son A-1-b (0), A-1-a (0), el suelo C está clasificado según AASTHO GC-GM y SUCS como A-1-a (0), los suelos presentan índice plástico de 4.9%, 5.5% y 12.0%. Los resultados de laboratorio demuestran que cumplen con los parámetros establecidos por el MTC, excepto en la gradación que con una selección de grava a partir del zarandeo se solucionaría y el índice plástico del suelo A y B que apenas cumple con el rango ideal de $4 < IP < 12$.

Las características químicas de los suelos presentan: materia orgánica de 1.85 % y sulfatos de 14.81922 ppm.

La característica química de la cal presenta 61.87 de óxido de calcio y 1.85 de óxido magnesio, por lo cual, se delibera que la cal presente en la zona del proyecto está clasificada como cal cálcica.

Teniendo en cuenta lo mencionado en los párrafos superiores, se determinó que para mejorar el desempeño del afirmado se realizará dos métodos de estabilización, el primer método es la estabilización granular utilizando suelo CL (Arcilla fina gravosa con arena) y el segundo método será la estabilización química (CaO: Cal).

Procedimiento para la incorporación de estabilizadores y su evaluación.

El procedimiento, en primer lugar, fue la evaluación en laboratorio de la cantidad óptima que pertenecerá a cada suelo para realizar la combinación, posteriormente se agregó un porcentaje de cal.

En segundo lugar, se realizó la aplicación en campo, en dos tramos, el primer tramo estuvo conformado por la incorporación de suelo CL y CaO y el segundo tramo tuvo la incorporación de suelo CL.

Por último, se realizó la evaluación de la rugosidad de los dos tramos en diferentes monitoreos.

4.1.3. Resultados de la incorporación de suelo CL.

4.1.3.1. Selección de las canteras según su gradación.

Conocidas la granulometría del material granular de las canteras A, B y C, encontramos que no cumplen con las especificaciones mínimas recomendadas por el Manual de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, a continuación, se muestra la gradación recomendada según el tipo de tráfico de la vía Yaca –Circa.

El tipo de tráfico se ha desarrollado en el acápite 4.1.1.4.9

Tabla 70
Especificaciones mínimas y máximas para un tráfico tipo 4

Tipo y afirmado	
Porcentaje que pasa del tamiz	Tráfico T4: Tipo 4 201 – 400 veh.
50 mm (2")	
37.5 mm (1½")	
25 mm (1")	100
19 mm (¾")	80 – 100
12.5 mm (½")	
9.5 mm (3/8")	65 – 100
4.75 mm (nº 4)	50 – 85
2.36 mm (nº 8)	
2.0 mm (nº 10)	33 – 67
4.25 um (nº 40)	20 – 45
75 um (nº 200)	5 – 20
Índice de plasticidad	4 - 9

Fuente: (Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito, 2005, pág. 148)

Es común que el material procedente de las canteras no cumpla directamente con las especificaciones mínimas, son muy pocas las canteras que ofrecen una granulometría ideal,

por ese motivo será necesario zarandear el material, a continuación, se muestra la gradación del material seleccionado de las canteras A, B y C.

Tabla 71
Análisis granulométrico con gradación seleccionada de la Cantera A

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1"	25.400				100.00%
3/4"	19.000	508.97	10.89%	10.89%	89.11%
1/2"	12.500	505.97	10.82%	21.71%	78.29%
3/8"	9.500	327.37	7.00%	28.71%	71.29%
N°4	4.750	746.48	15.97%	44.68%	55.32%
N°10	2.000	706.14	15.11%	59.79%	40.21%
N°20	0.840	438.16	9.37%	69.16%	30.84%
N°40	0.425	225.17	4.82%	73.98%	26.02%
N°50	0.300	95.60	2.05%	76.02%	23.98%
N°80	0.177	202.36	4.33%	80.35%	19.65%
N°100	0.150	80.36	1.72%	82.07%	17.93%
N°200	0.075	321.00	6.87%	88.94%	11.06%
<N°200	Fondo	517.18	11.06%	100.00%	0.00%
Total		4674.76	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

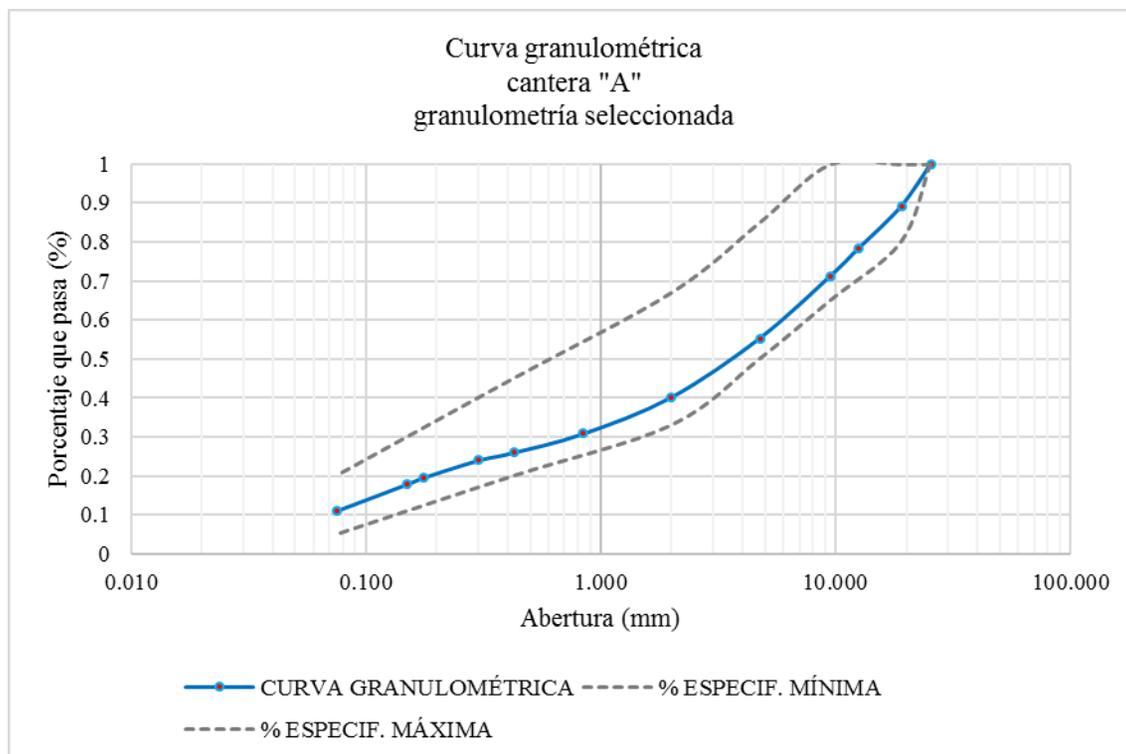


Figura 68. Curva granulométrica del material seleccionado de la Cantera A.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 72

Análisis granulométrico con gradación seleccionada de la cantera B

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1"	25.400				100.00%
3/4"	19.000	465.95	10.82%	10.82%	89.18%
1/2"	12.500	505.97	11.75%	22.58%	77.42%
3/8"	9.500	327.37	7.61%	30.18%	69.82%
Nº4	4.750	746.48	17.34%	47.52%	52.48%
Nº10	2.000	706.14	16.40%	63.93%	36.07%
Nº20	0.840	438.16	10.18%	74.11%	25.89%
Nº40	0.425	225.17	5.23%	79.34%	20.66%
Nº50	0.300	95.60	2.22%	81.56%	18.44%
Nº80	0.177	191.21	4.44%	86.00%	14.00%

N°100	0.150	43.03	1.00%	87.00%	13.00%
N°200	0.075	172.22	4.00%	91.00%	9.00%
<N°200	Fondo	387.5	9.00%	100.00%	0.00%
Total		4304.74	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

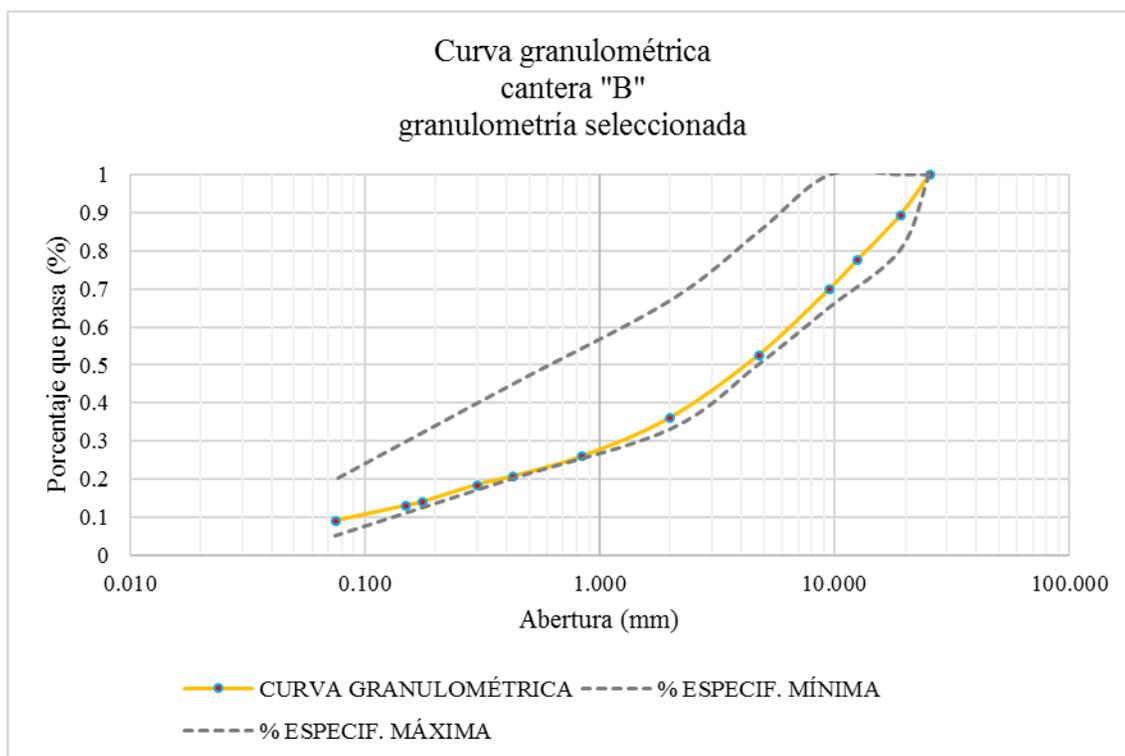


Figura 69. Curva granulométrica del material seleccionado de la Cantera B.

Tabla 73
Análisis granulométrico con gradación seleccionada de la Cantera C

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1"	25.400				100.00%
3/4"	19.000	41.10	1.13%	1.13%	98.87%
1/2"	12.500	168.80	4.64%	5.77%	94.23%
3/8"	9.500	114.60	3.15%	8.93%	91.08%
N°4	4.750	293.70	8.08%	17.00%	83.00%
N°10	2.000	274.70	7.56%	24.56%	75.44%
N°20	0.840	147.90	4.07%	28.63%	71.37%
N°40	0.425	123.80	3.41%	32.03%	67.97%
N°50	0.300	65.20	1.79%	33.83%	66.18%
N°80	0.177	102.20	2.81%	36.64%	63.36%
N°100	0.150	50.40	1.39%	38.02%	61.98%
N°200	0.075	257.70	7.09%	45.11%	54.89%
<N°200	Fondo	1995.50	54.89%	100.00%	0.00%
	Total	3635.60	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

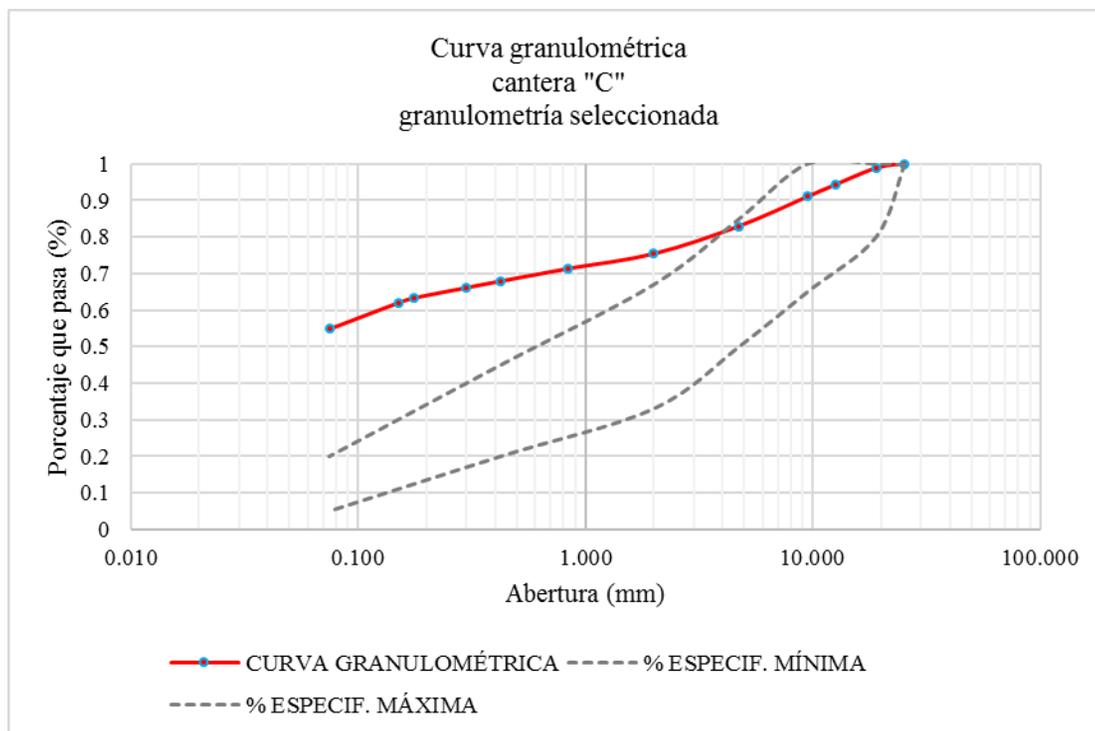


Figura 70. Curva granulométrica del material seleccionado de la Cantera C.

4.1.3.2. Combinación de los materiales de cantera.

4.1.3.2.1. Combinación de las canteras A y C.

Determinación del porcentaje que se multiplicará a la Cantera A y la Cantera C por la técnica de mínimos cuadrados explicada en el acápite 2.2.1.3.1

Tabla 74

Resumen del porcentaje que pasa de la cantera A y C

Tamiz	Abertura (mm)	% Que pasa Cantera "A"	% Que pasa Cantera "C"	%E _{prom}
1"	25.400	100	100	100
3/4"	19.000	89	99	90
3/8"	9.500	71	91	82.5
N°4	4.750	55	83	67.5

N°10	2.000	40	75	50
N°40	0.425	26	68	32.5
N°200	0.075	11	55	12.5

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Se define la matriz C de orden 9 x2 y la matriz E de orden (9x1)

$$C = \begin{pmatrix} 10 & 10 \\ 0 & 0 \\ 89 & 99 \\ 71 & 91 \\ 55 & 83 \\ 40 & 75 \\ 26 & 68 \\ 11 & 55 \end{pmatrix}$$

$$y, E_{\text{prom}} = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 90 \\ 83 \\ 68 \\ 50 \\ 33 \\ 13 \end{pmatrix}$$

Transpuesta de la matriz C será:

$$= \mathbf{C}^T \begin{vmatrix} 100 & 89.112 & 71.286 & 55.318 & 40.213 & 26.023 & 11.063 \\ 100 & 98.87 & 91.075 & 82.997 & 75.441 & 67.968 & 54.89 \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{C} = \begin{vmatrix} 28499.395 & 35303.792 \\ 35303.792 & 48282.34 \end{vmatrix}$$

$$[\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{C}]^{-1} = \begin{vmatrix} 0.0003724 & -0.0002723 \\ -0.0002723 & 0.0002198 \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{E}_{\text{prom}} = \begin{vmatrix} 30629. \\ 825 \\ 38681. \\ 42 \end{vmatrix}$$

$$[\mathbf{U}] = [\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{C}]^{-1} [\mathbf{C}^T \cdot \mathbf{E}_{\text{prom}}] = \begin{vmatrix} 0.8736621 \\ 0.1623334 \end{vmatrix}$$

Compensando, se obtiene los siguientes valores:

$$[\mathbf{U}] = \begin{vmatrix} 90.00\% \\ 10.00\% \end{vmatrix}$$

Por consiguiente:

- El porcentaje que se multiplicará a la Cantera A será de: **90.0%**.
- El porcentaje que se multiplicará a la Cantera C será de: **10.0%**.

Posteriormente se procede a dibujar la curva granulométrica del material combinado, con los resultados obtenidos 90.0% por el porcentaje que pasa de la Cantera A y 10.0% por el porcentaje que pasa de la Cantera C.

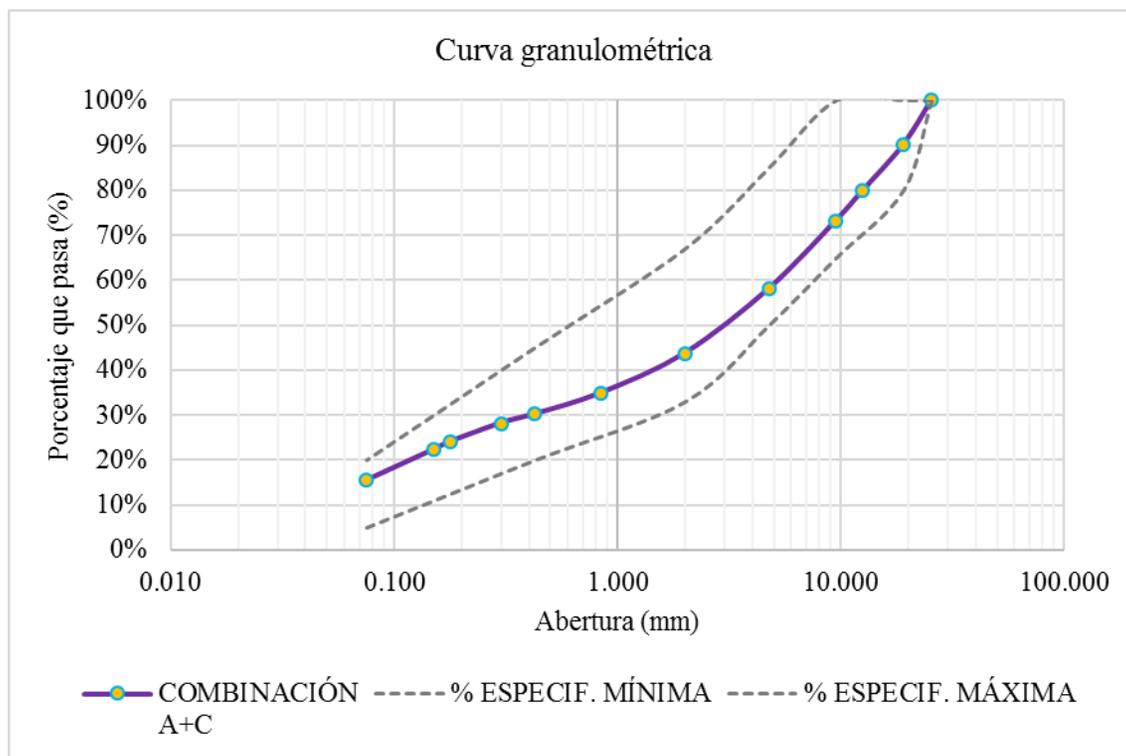


Figura 71. Curva granulométrica de la combinación de las canteras A y C.

4.1.3.2.2. Combinación de las canteras B y C.

Determinación del porcentaje que se multiplicará a la Cantera B y la Cantera C, por la técnica de mínimos cuadrados explicada en el acápite 2.2.1.3.1

Tabla 75
Resumen del porcentaje que pasa de las canteras B y C

Tamiz	Abertura (mm)	% Que pasa		%E _{prom}
		Cantera "B"	Cantera "C"	
1"	25.400	100	100	100

3/4"	19.000	89	99	90
3/8"	9.500	70	91	82.5
N°4	4.750	52	83	67.5
N°10	2.000	36	75	50
N°40	0.425	21	68	32.5
N°200	0.075	9	55	12.5

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Se define la matriz C de orden 9 x2 y la matriz E de orden (9x1).

$$C = \begin{pmatrix} 100 & 100 \\ 89 & 99 \\ 70 & 91 \\ 52 & 83 \\ 36 & 75 \\ 21 & 68 \\ 9 & 55 \end{pmatrix}$$

$$E_{prom} = \begin{pmatrix} 100 \\ 90 \\ 83 \\ 68 \\ 50 \\ 33 \\ 13 \end{pmatrix}$$

Transpuesta de la matriz C será:

$$C^T = \begin{pmatrix} 100 & 89.176 & 69.817 & 52.476 & 36.072 & 20.663 & 8.999 \\ 100 & 98.87 & 91.075 & 82.997 & 75.441 & 67.968 & 54.89 \end{pmatrix}$$

$$C^T \cdot C = \begin{pmatrix} 27389.634 & 34150.451 \\ 34150.451 & 48282.34 \end{pmatrix}$$

$$[C^T.C]^{-1} = \begin{vmatrix} 0.0003091 & -0.0002187 \\ -0.0002187 & 0.0001754 \end{vmatrix}$$

$$C^T.E_{\text{prom}} = \begin{vmatrix} 29915.508 \\ 38681.42 \end{vmatrix}$$

$$[U] = [C^T.C]^{-1}[C^T.E_{\text{prom}}] = \begin{vmatrix} 0.79012 \\ 0.2422929 \end{vmatrix}$$

Compensando, se obtiene los siguientes valores:

$$[U] = \begin{vmatrix} 85.00\% \\ 15.00\% \end{vmatrix}$$

Por consiguiente:

- El porcentaje que se multiplicará a la Cantera A será de: 85.0%.
- El porcentaje que se multiplicará a la Cantera C será de: 15.0%.

Posteriormente, se procede a dibujar la curva granulométrica del material combinado, con los resultados obtenidos 85.0% por el porcentaje que pasa de la Cantera B y 15.0% por el porcentaje que pasa de la Cantera C.

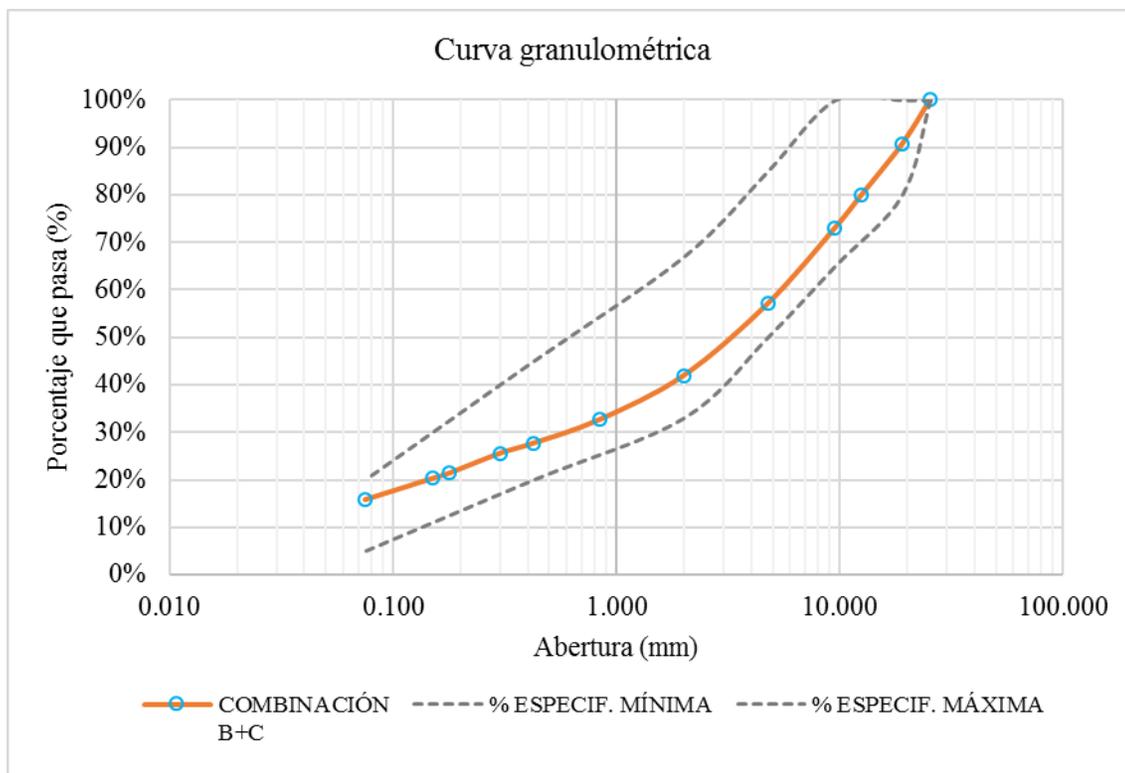


Figura 72. Curva granulométrica de la combinación de las canteras B y C.

4.1.3.3. Resultados del análisis de laboratorio de la combinación A y C.

A continuación, se presentan los resultados de análisis físico y mecánico del suelo “D” la combinación del suelo A y B. (Anexo 11).

a) Análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 76

Análisis granulométrico de la combinación A y C

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1"	25.400				100.0 %
3/4"	19.000	1315.2	9.9 %	9.9 %	90.1 %
1/2"	12.500	1354.0	10.2 %	20.1 %	79.9 %

3/8"	9.500	878.1	6.6 %	26.7 %	73.3 %
N°4	4.750	2013.9	15.2 %	41.9 %	58.1 %
N°10	2.000	1904.0	14.4 %	56.3 %	43.7 %
N°20	0.840	1173.2	8.8 %	65.1 %	34.9 %
N°40	0.425	620.4	4.7 %	69.8 %	30.2 %
N°50	0.300	268.0	2.0 %	71.8%	28.2 %
N°80	0.177	554.2	4.2 %	76.0 %	24.0 %
N°100	0.150	223.7	1.7 %	77.7 %	22.3 %
N°200	0.075	914.0	6.9 %	84.6 %	15.4 %
<N°200	Fondo	2049.34	15.4 %	100.00%	0.00%
Total		13268.00	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

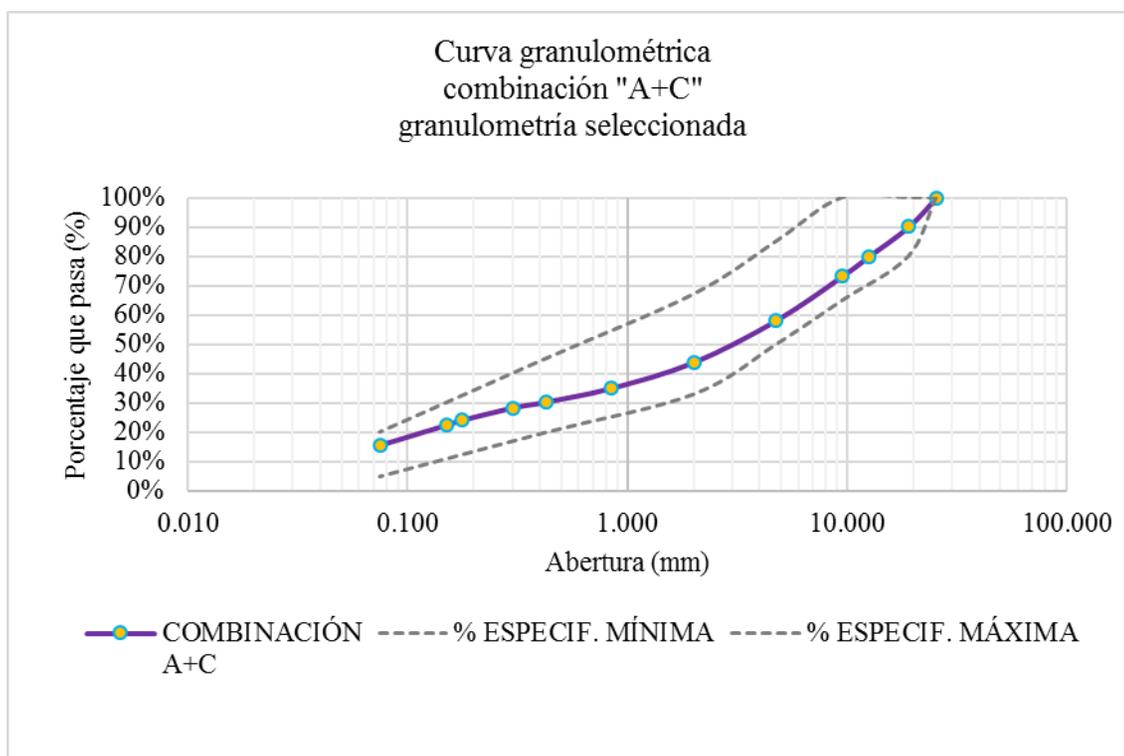


Figura 73. Curva granulométrica de la combinación A y C.

b) Determinación de humedad natural.

Tabla 77

Contenido de humedad del material de la combinación A y C

Ensayo N°		1	2	3
N° de tara		T - 03	T - 04	T - 05
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	1394.50	1405.60	1386.20
Peso de tara + suelo seco	(gr)	1369.20	1358.80	1349.45
Peso de la tara	(gr)	103.10	103.80	110.56
Peso del agua	(gr)	25.30	46.80	36.75
Peso del suelo seco	(gr)	1266.10	1255.00	1238.89
Contenido de humedad	(%)	2.00	3.73	2.97
Humedad natural promedio	(%)		2.9	

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

c) Límites de consistencia.

Tabla 78

Límite líquido de la combinación A y C

Límite líquido (MTC E 110, AASHTO T89)				
N° de tara		T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	65.44	69.20	64.67
Peso de tara + suelo seco	(gr)	60.62	63.66	59.65
Peso del agua	(gr)	4.82	5.54	5.02
Peso de la tara	(gr)	40.25	40.87	39.57
Peso del suelo seco	(gr)	20.37	22.79	20.08
Contenido de humedad	(%)	23.66	24.31	25.00
Número de golpes		34.00	26.00	20.00

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 79
Límite plástico de la combinación A y C

Límite plástico (MTC E 111, AASHTO T90)				
N° de tara		T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	23.05	24.37	28.20
Peso de tara + suelo seco	(gr)	21.60	22.75	26.16
Peso de la tara	(gr)	13.54	13.78	14.83
Peso del agua	(gr)	1.45	1.62	2.04
Peso del suelo seco	(gr)	8.06	8.97	11.33
Contenido de humedad	(%)	17.99	18.06	18.01

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

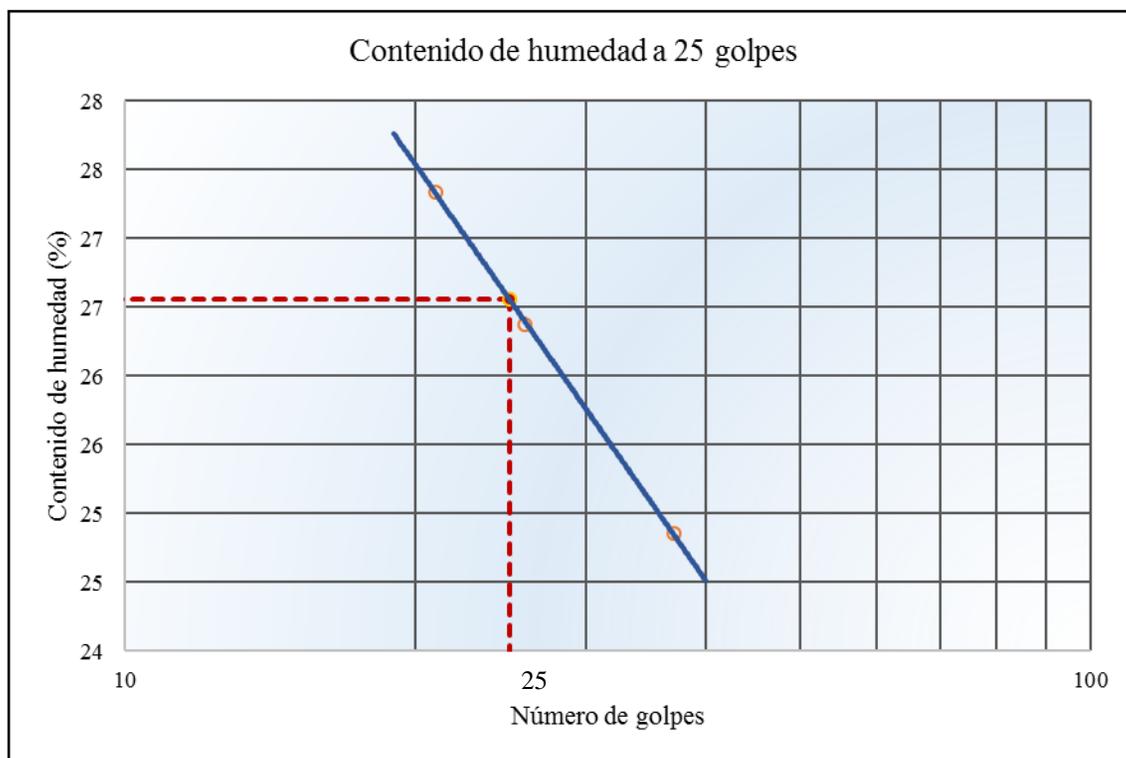


Figura 74. Relación: cont. de humedad (%) y N° de golpes de la combinación A y C.

Tabla 80
Obtención del índice de plasticidad de la combinación A y C

Constantes físicas de la muestra.		
Límite líquido	(%)	24.4
Límite plástico	(%)	18.0
Índice de plasticidad	(%)	6.4

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

d) Peso unitario del agregado.

Tabla 81
Peso unitario suelo seco de la combinación A y C

Material integral	Peso unitario suelo seco			
	N° de ensayo	1	2	3
Peso de material + molde (gr)		34402.00	34210.00	34264.00
Peso de molde (gr)		8150.00	8151.00	8152.00
Peso neto de material (gr)		26252.00	26059.00	26112.00
Volumen de molde (cm ³)		14076.00	14076.00	14076.00
Peso unitario compactado (gr/cm ³)		1.865	1.851	1.855
Promedio de peso unitario (gr/cm ³)			1.857	

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 82
Peso unitario compactado seco de la combinación A y C

Material integral	Peso unitario compactado seco			
	N° de ensayo	1	2	3
Peso de material + molde (gr)		37110.00	37184.00	37020.00
Peso de molde (gr)		8150.00	8151.00	8152.00

Peso neto de material	(gr)	28960.00	29033.00	28868.00
Volumen de molde	(cm ³)	14076.00	14076.00	14076.00
Peso unitario compactado	(gr/cm ³)	2.057	2.063	2.051
Promedio de peso unitario	(gr/cm ³)		2.057	

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

e) Abrasión Los Ángeles.

Tabla 83
Porcentaje de desgaste de la combinación A y C

Muestra	1
Gradación	"A"
N° de esferas	12
Tamiz (N°)	Peso ret. (grs.)
1"	1,240
3/4"	1,235
1/2"	1,265
3/8"	1,250
Peso total	4,990
Material retenido tamiz N° 12	4,025
Material pasante tamiz N° 12	965
Porcentaje de desgaste	19.3

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

f) Próctor modificado.

Tabla 84

Ensayo de próctor modificado de la combinación A y C

Ensayo N°		1	2	3	4		
Número de Capas		5	5	5	5		
Golpes de Pisón por Capa		56	56	56	56		
Peso suelo húmedo + molde	(gr)	12401	12600	12698	12649		
Peso molde +base	(gr)	7491	7491	7491	7491		
Peso suelo húmedo compactado	(gr)	4910	5109	5207	5158		
Volumen de molde	(cm ³)	2118	2118	2118	2118		
Peso volumétrico húmedo	(gr/cm ³)	2.318	2.412	2.458	2.435		
Tara N°		T-01	T-02	T-03	T-04		
Peso del suelo húmedo + tara	(gr)	1266.8	1124.1	925.1	1048.2		
Peso del suelo seco + tara	(gr)	1252.1	1091.8	885.5	985.6		
Peso de Tara	(gr)	124.9	112	103.1	123.1		
Peso de agua	(gr)	14.7	32.3	39.6	62.6		
Peso del suelo seco	(gr)	1127.2	979.8	782.4	862.5		
Contenido de agua	(%)	1.3	3.3	5.06	7.3		
Peso volumétrico seco	(gr/cm ³)	2.288	2.335	2.340	2.271		
				Densidad máxima:	(gr/cm ³)	2.343	
				Humedad óptima:	(%)	4.4	

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

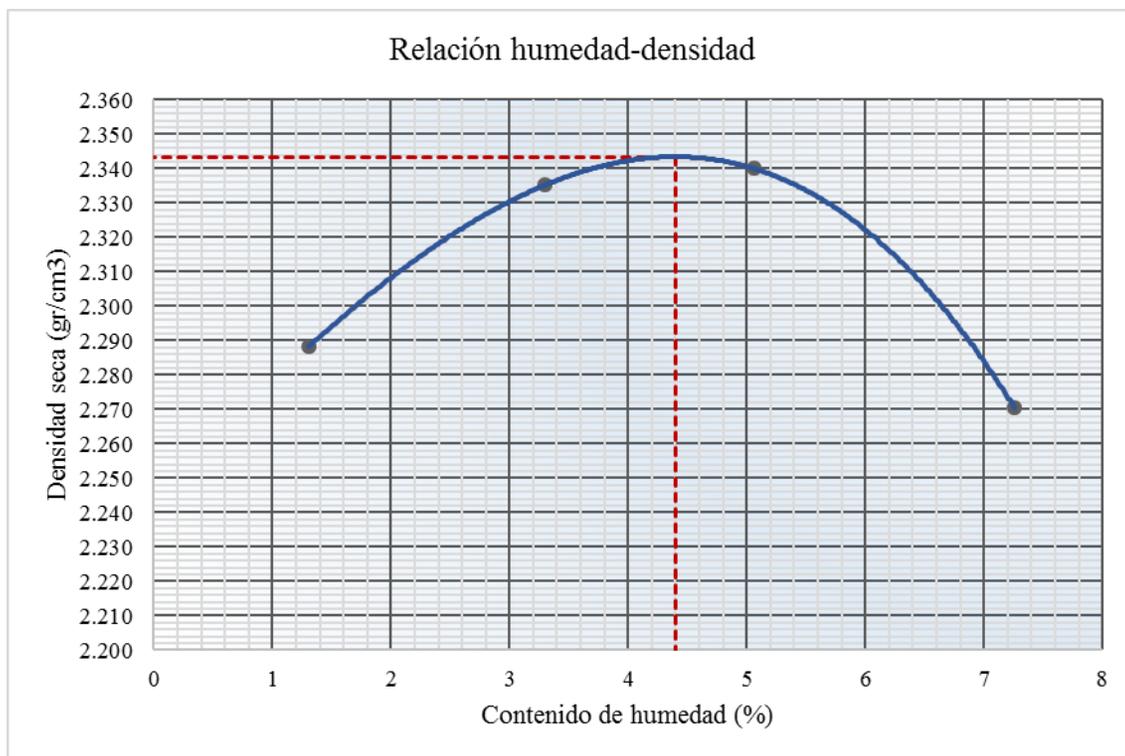


Figura 75. Relación: contenido de humedad – densidad de la combinación A y C.

g) Relación de soporte californiana.

Tabla 85
CBR de la combinación A y C

	C.B.R. al 95% de MDS (%)	C.B.R. al 100% de MDS (%)
0.1"	30.3	42.6
0.2"	59.0	74.8

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

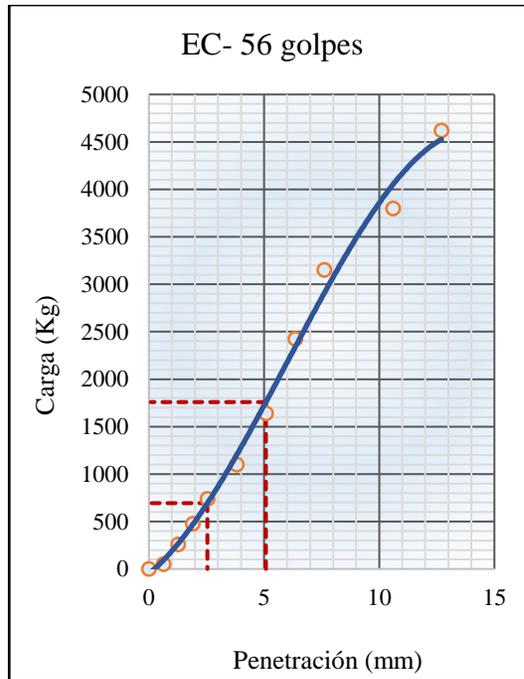


Figura 76. EC 56 golpes de la combinación A y C.

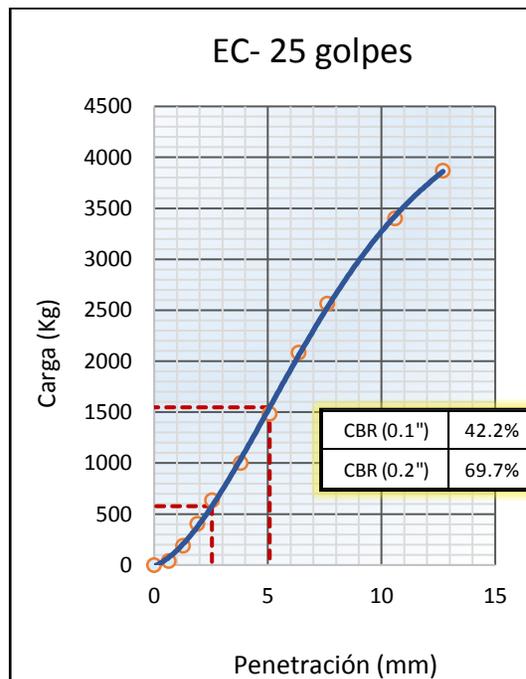


Figura 77. EC 25 golpes de la combinación A y C.

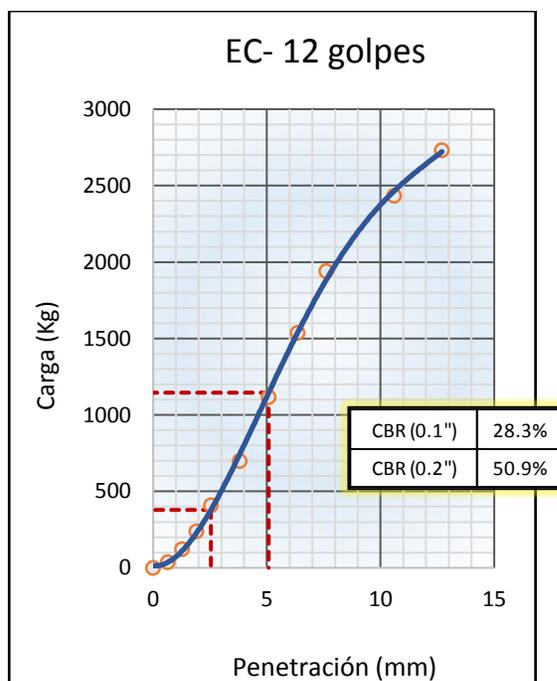


Figura 78. EC 56 golpes de la combinación A y C.

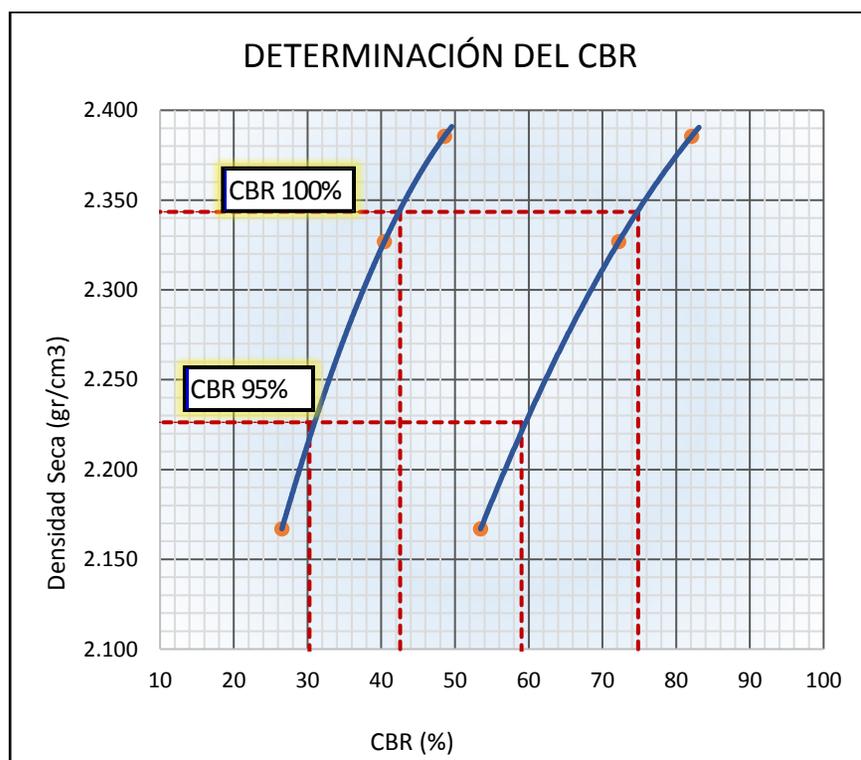


Figura 79. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) de la combinación A y C.

Tabla 86
Resumen de los ensayos realizados a la combinación A y C

Peso de la Muestra		
Peso total de la muestra	(gr):	13268.00
Material fino < N°4	(gr):	7706.84
Material grueso > N°4	(gr):	5561.16
Límites de consistencia		
Limite liquido	(%) :	24.4
Limite plástico	(%) :	18.0
Índice plástico	(%) :	6.4
Clasificación de suelos		
Clasificación SUCS	(gr):	SC-SM
Clasificación AASTHO	(gr):	A-2-4 (0)
Humedad natural	(%):	2.9
Porcentaje de desgaste	(%)	19.3
Máxima dens. seca	(gr/cm ³):	2.343
Óptimo cont. de humedad	(%)	4.40
CBR 0.1 " al 95% MDS	(%)	30.27
CBR 0.1 " al 100% MDS	(%)	42.56

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Resultados de la incorporación de suelo CL y CaO.

Realizado los análisis previos de las canteras y la elección del estabilizador se procede a evaluar qué porcentaje de cal será el adecuado para lograr que el afirmado tenga mejor desempeño, para ello, utilizaremos la combinación de las canteras A y C (suelo "D"), se escogió esta combinación debido a que el resultado se encuentra más cerca al promedio de gradación de las especificaciones técnicas que debe cumplir el agregado de la carpeta de rodadura. (Anexo 12).

En ese orden de ideas, se adicionará al material combinado cal en 1.5 %, 3.0 % y 4.5 % del peso seco de los sólidos del suelo y de cada una de las adiciones, se determinará las nuevas características físicas y mecánicas.

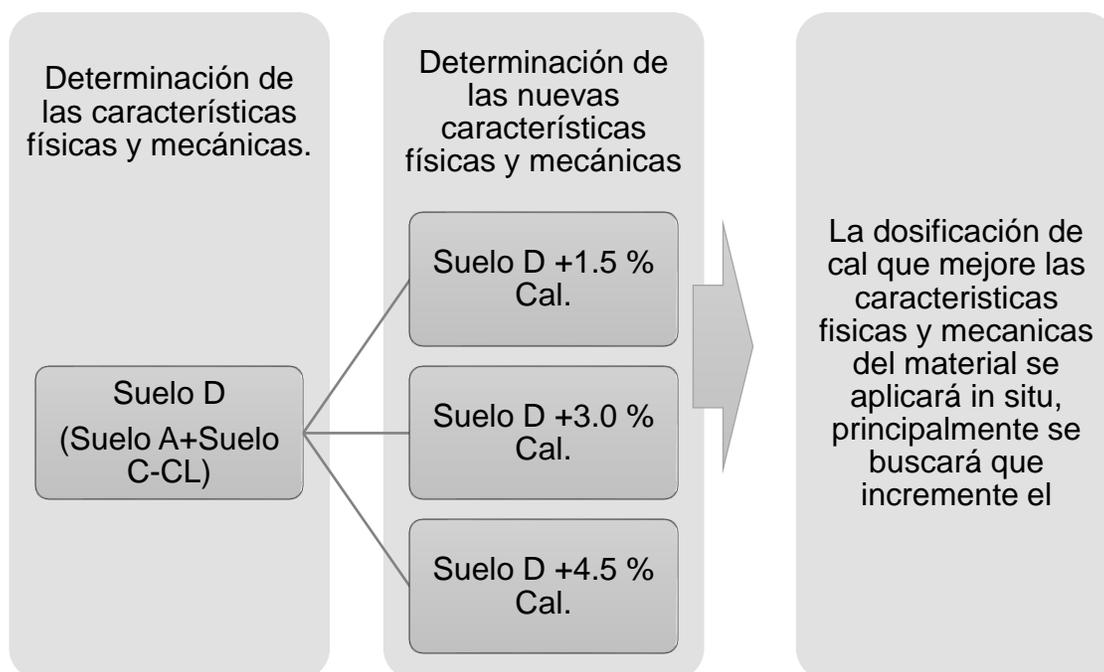


Figura 80. Proceso para determinar a cantidad de cal óptima.

4.1.4.1. Resultados del análisis de laboratorio del material más la adición de 1.5% de cal

a) Análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 87

Análisis granulométrico del suelo "D" más 1.5% cal

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% que pasa
1"	25.400				100.00%
3/4"	19.000	936.4	9.87%	9.87%	90.13%
1/2"	12.500	964.2	10.16%	20.03%	79.98%

3/8"	9.500	623.7	6.57%	26.60%	73.40%
N°4	4.750	1436.2	15.13%	41.73%	58.27%
N°10	2.000	1357.6	14.30%	56.03%	43.97%
N°20	0.840	834.8	8.80%	64.83%	35.17%
N°40	0.425	439.4	4.63%	69.46%	30.54%
N°50	0.300	187.3	1.97%	71.43%	28.57%
N°80	0.177	392.1	4.13%	75.56%	24.44%
N°100	0.150	155.6	1.64%	77.20%	22.80%
N°200	0.075	649.4	6.84%	84.05%	15.96%
<N°200	Fondo	1514.35	15.96%	100.00%	0.00%
Total	9491.00		100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

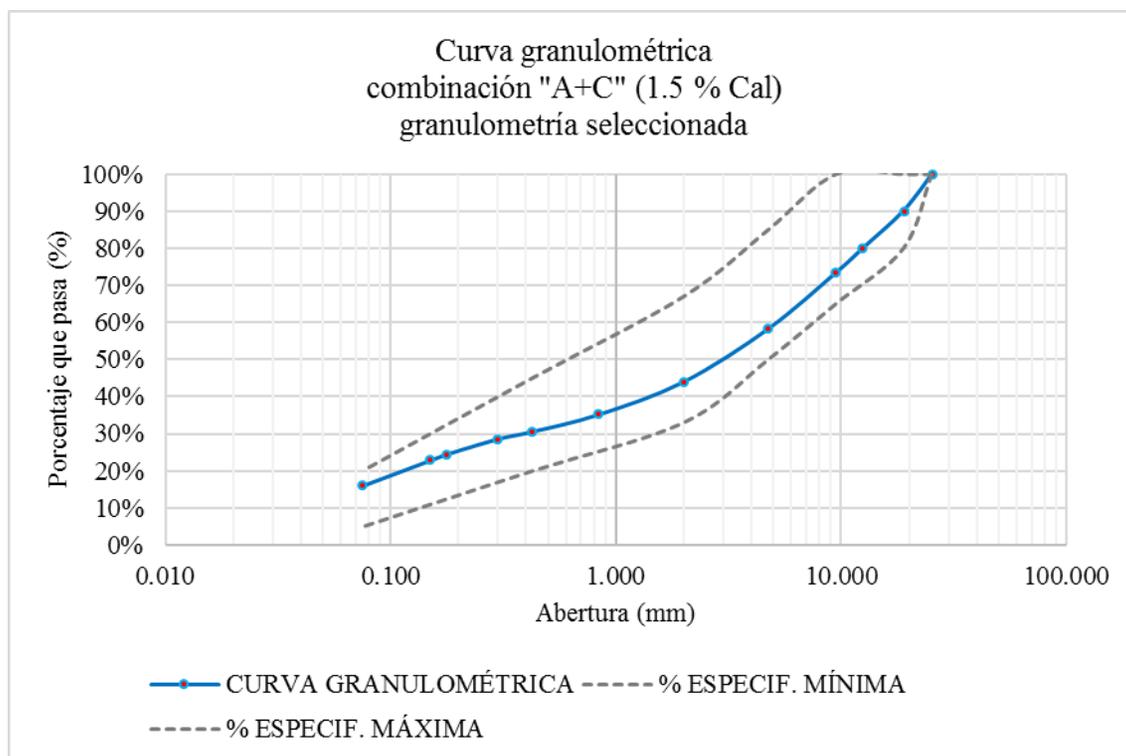


Figura 81. Curva granulométrica del suelo "D" más 1.5% cal.

b) Determinación de humedad natural.

Tabla 88

Contenido de humedad del suelo "D" más 1.5% cal

Ensayo N°		1	2	3
N° de tara		T - 03	T - 04	T - 05
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	1389.60	1395.00	1386.00
Peso de tara + suelo seco	(gr)	1357.50	1350.80	1350.60
Peso de la tara	(gr)	124.80	122.50	123.70
Peso del agua	(gr)	32.10	44.20	35.40
Peso del suelo seco	(gr)	1232.70	1228.30	1226.90
Contenido de humedad	(%)	2.60	3.60	2.89
Humedad natural promedio	(%)		3.0	

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

c) Límites de consistencia.

Tabla 89

Límite líquido del suelo "D" más 1.5% cal

Límite líquido (MTC E 110, AASHTO T89)				
N° de tara		T - 04	T - 05	T - 06
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	59.20	68.52	67.50
Peso de tara + suelo seco	(gr)	55.24	62.46	61.36
Peso del agua	(gr)	6.14	6.06	6.14
Peso de la tara	(gr)	38.90	39.48	38.90
Peso del suelo seco	(gr)	22.98	22.46	22.46
Contenido de humedad	(%)	24.86	26.37	27.34
Número de golpes		22.00	26.00	22.00

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 90
Límite plástico del suelo "D" más 1.5% cal

Límite plástico (MTC E 111, AASHTO T90)				
N° de tara		T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	26.20	25.02	28.20
Peso de tara + suelo seco	(gr)	24.58	23.29	26.16
Peso de la tara	(gr)	14.83	14.92	14.83
Peso del agua	(gr)	2.04	1.73	2.04
Peso del suelo seco	(gr)	8.37	11.33	11.33
Contenido de humedad	(%)	16.79	20.67	18.01

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

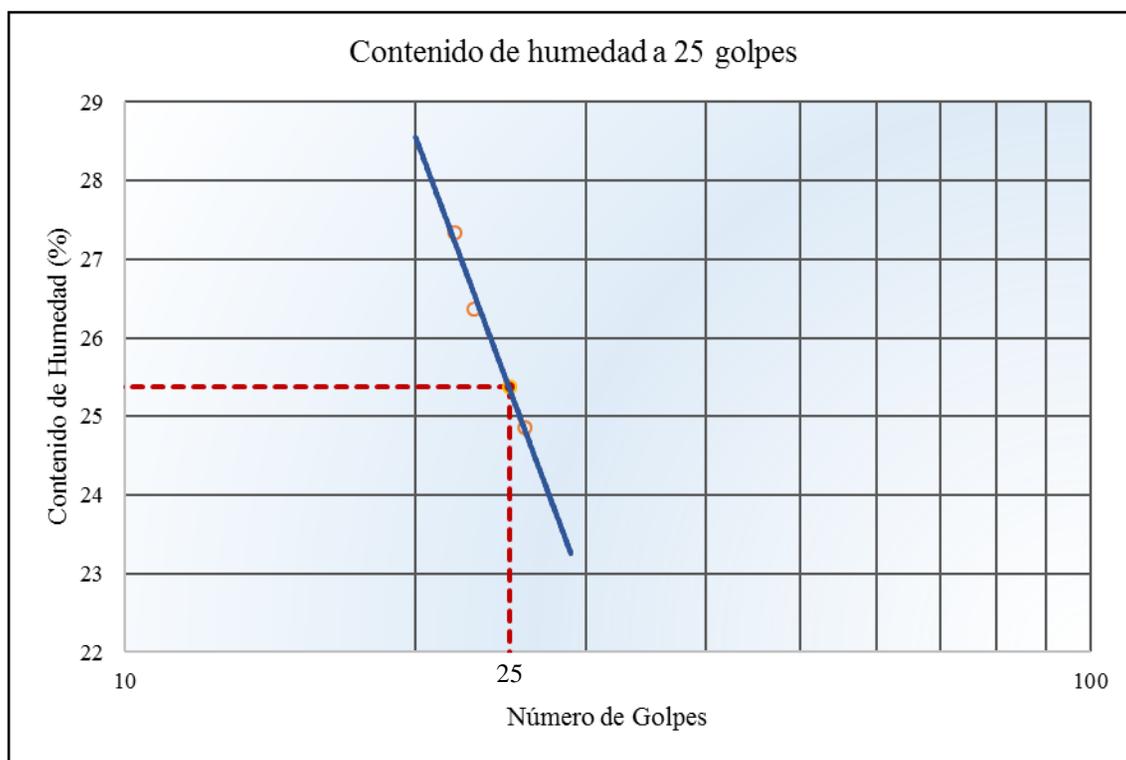


Figura 82. Relación: contenido de humedad (%) y N° de golpes del suelo D más 1.5% cal.

Tabla 91
Obtención del índice de plasticidad del suelo "D" más 1.5% cal

Constantes físicas de la muestra.		
Límite líquido	(%)	25.4
Límite plástico	(%)	18.5
Índice de plasticidad	(%)	6.9

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

d) Abrasión Los Ángeles.

Tabla 92
Porcentaje de desgaste del suelo "D" más 1.5% cal

Muestra	1
Gradación	"A"
N° de esferas	12
Tamiz (N°)	Peso ret. (grs.)
1"	1,245
3/4"	1,237
1/2"	1,256
3/8"	1,241
Peso total	4,979
Material retenido tamiz N° 12	4,013
Material pasante tamiz N° 12	966
Porcentaje de desgaste	19.4

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

e) Próctor modificado.

Tabla 93

Ensayo de próctor modificado del suelo "D" más 1.5% cal

Ensayo N°		1	2	3	4
Número de capas		5	5	5	5
Golpes de pisón por capa		56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	(gr)	12413	12612	12710	12661
Peso molde +base	(gr)	7491	7491	7491	7491
Peso suelo húmedo compactado	(gr)	4922	5121	5219	5170
Volumen de molde	(cm ³)	2118	2118	2118	2118
Peso volumétrico húmedo	(gr/cm ³)	2.324	2.418	2.464	2.441
Tara N°		T-01	T-02	T-03	T-04
Peso del suelo húmedo + tara	(gr)	1274.71	1132.0	933.01	1056.11
Peso del suelo seco + tara	(gr)	1261.75	1101.45	895.15	995.25
Peso de Tara	(gr)	126.1	113.2	104.3	124.3
Peso de agua	(gr)	12.96	30.56	37.86	60.86
Peso del suelo seco	(gr)	1135.65	988.25	790.85	870.95
Contenido de agua	(%)	1.1	3.1	4.79	7.0
Peso volumétrico seco	(gr/cm ³)	2.298	2.345	2.352	2.282
				Densidad máxima:	(gr/cm ³) 2.354
				Humedad óptima:	(%) 4.2

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

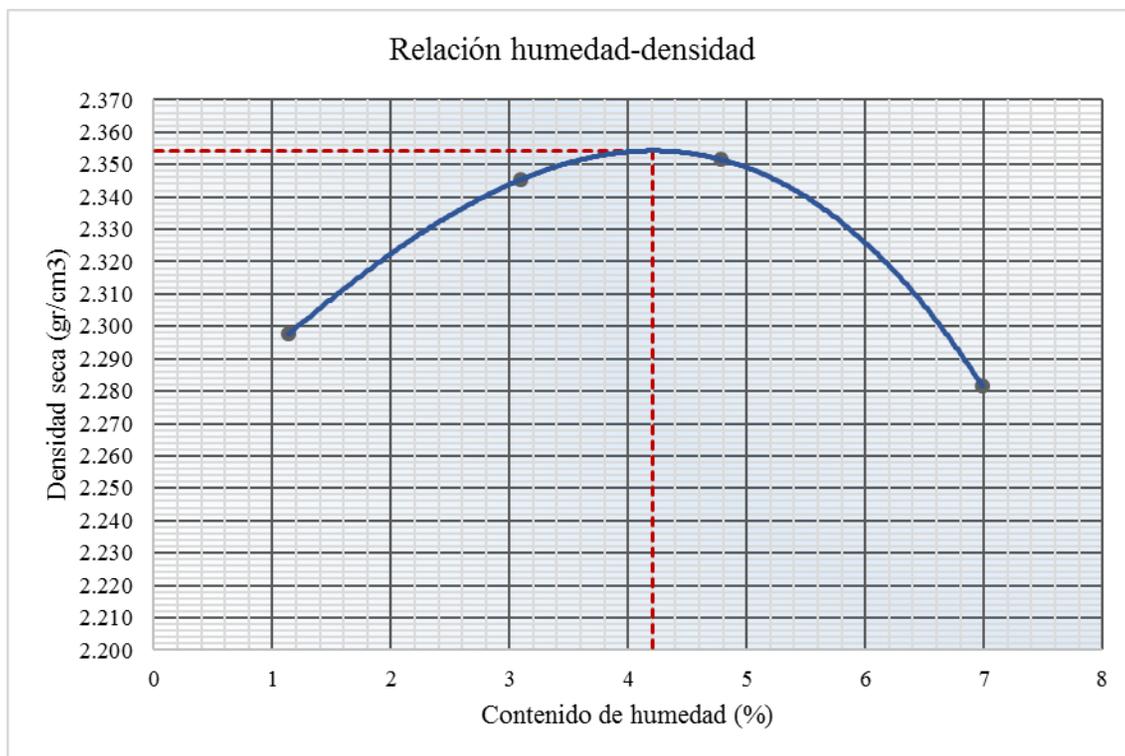


Figura 83. Relación: contenido de humedad – densidad del suelo D más 1.5% cal.

f) Relación de Soporte California.

Tabla 94
CBR del suelo D más 1.5% cal

	C.B.R. al 95% de MDS (%)	C.B.R. al 100% de MDS (%)
0.1"	32.9	43.3
0.2"	56.1	71.4

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

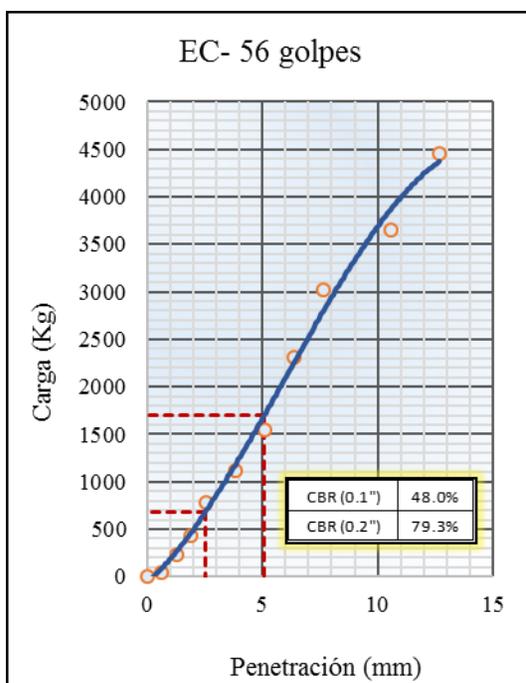


Figura 84. EC 56 golpes del suelo D más 1.5% cal.

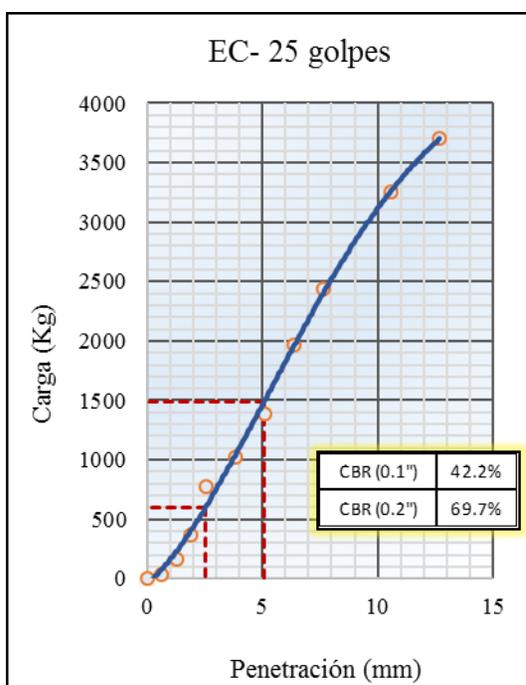


Figura 85. EC 25 golpes del suelo D más 1.5% cal.

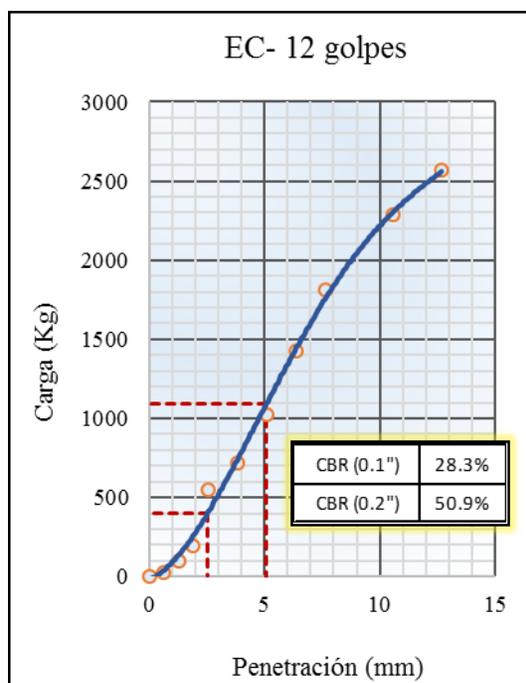


Figura 86. EC 56 golpes del suelo D más 1.5% cal.

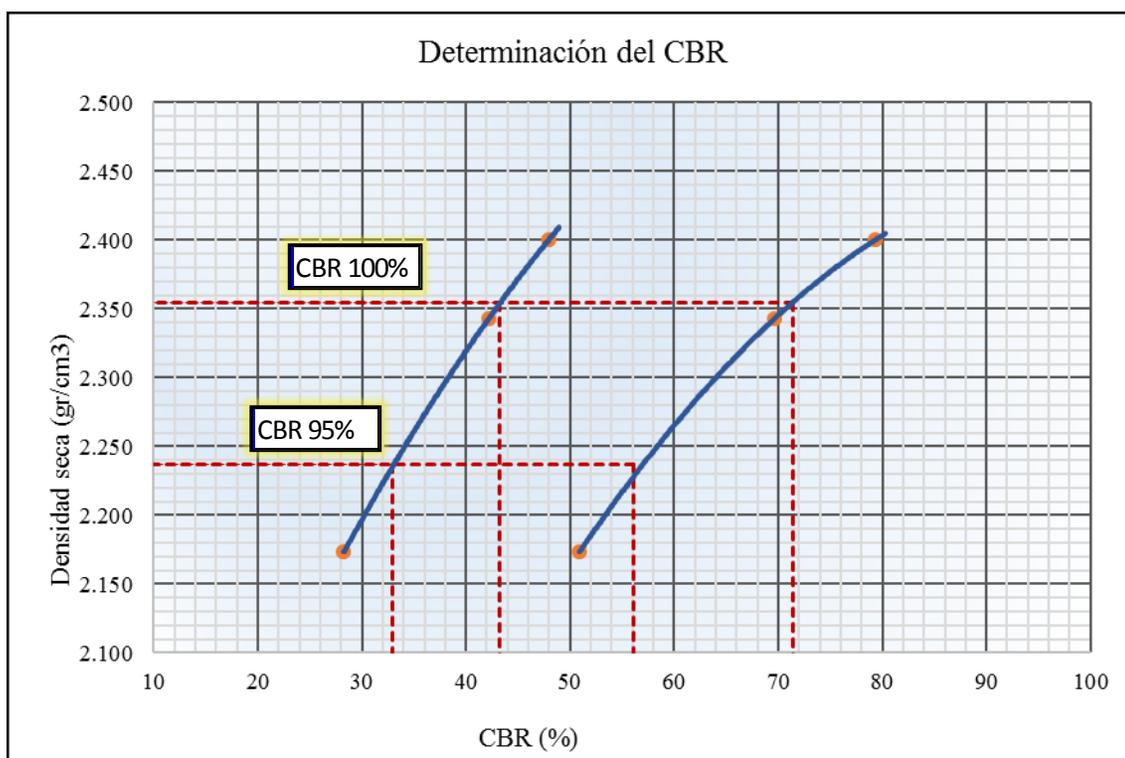


Figura 87. Relación: CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) del suelo D más 1.5% cal.

Tabla 95
Resumen de los ensayos realizados del suelo D más 1.5% cal

Peso de la muestra		
Peso total de la muestra	(gr):	9491.00
Material fino < N°4	(gr):	5530.53
Material grueso > N°4	(gr):	3960.47
Límites de Consistencia		
Límite líquido	(%) :	25.4
Límite plástico	(%) :	18.5
Índice plástico	(%) :	6.9
Clasificación de Suelos		
Clasificación SUCS	(gr):	SC-SM
Clasificación AASTHO	(gr):	A-2-4 (0)
Humedad natural	(%):	3.0
Porcentaje de desgaste	(%)	19.4
máxima dens. seca	(gr/cm ³):	2.354
Óptimo cont. de humedad	(%)	4.21
CBR 0.1" al 95% MDS	(%)	32.89
CBR 0.1 " al 100% MDS	(%)	43.27

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.2. Resultados del análisis de laboratorio del material más la adición de 3.0% de cal.

a) Análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 96

Análisis granulométrico del suelo D más 3.0% cal

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1"	25.400				100.00%
3/4"	19.000	983.8	9.53%	9.53%	90.47%
1/2"	12.500	1011.6	9.80%	19.33%	80.67%
3/8"	9.500	671.1	6.50%	25.83%	74.17%
N°4	4.750	1483.6	14.37%	40.20%	59.80%
N°10	2.000	1405.0	13.61%	53.81%	46.19%
N°20	0.840	882.2	8.55%	62.36%	37.64%
N°40	0.425	486.8	4.72%	67.07%	32.93%
N°50	0.300	234.7	2.27%	69.35%	30.65%
N°80	0.177	439.5	4.26%	73.60%	26.40%
N°100	0.150	203.0	1.97%	75.57%	24.43%
N°200	0.075	696.8	6.75%	82.32%	17.68%
<N°200	Fondo	1825.05	17.68%	100.00%	0.00%
	Total	10323.10	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

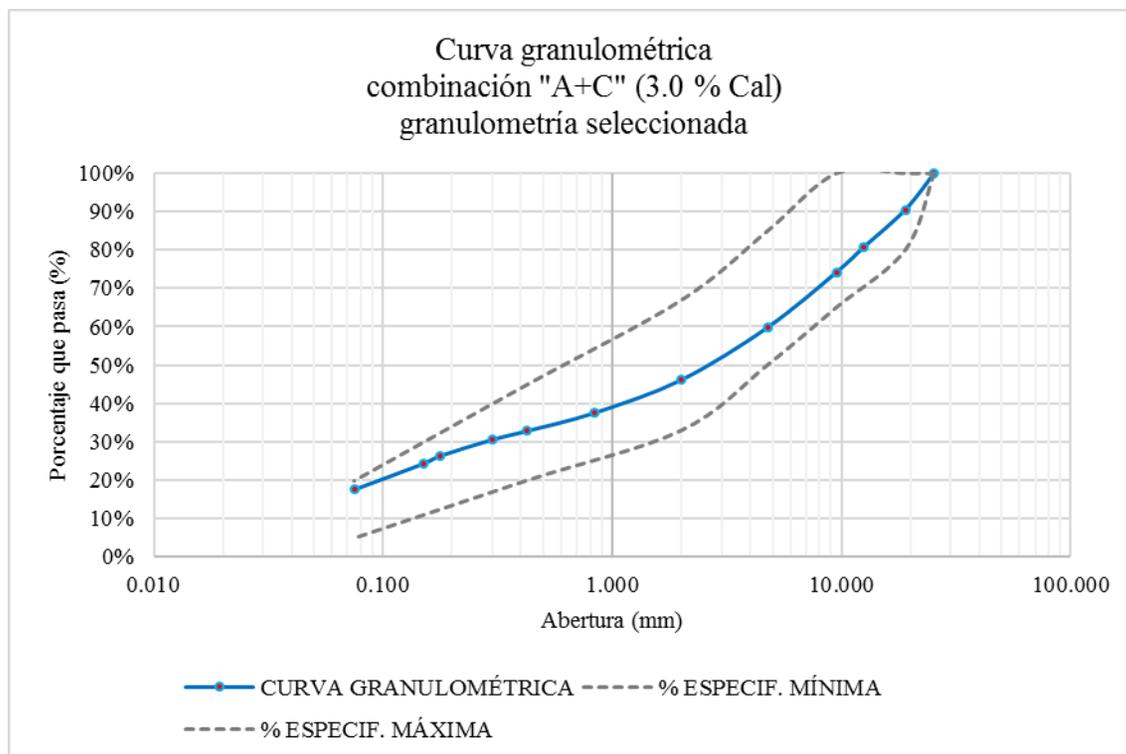


Figura 88. Curva granulométrica del suelo D más 3.0% cal.

b) Determinación de humedad natural.

Tabla 97

Contenido de humedad del suelo D más 3.0% cal

Ensayo N°	1	2	3
N° de tara	T - 02	T - 03	T - 04
Peso de tara + suelo húmedo (gr)	1245.90	1266.30	1236.20
Peso de tara + suelo seco (gr)	1203.80	1229.40	1201.60
Peso de la tara (gr)	103.00	102.30	103.50
Peso del agua (gr)	42.10	36.90	34.60
Peso del suelo seco (gr)	1100.80	1127.10	1098.10
Contenido de humedad (%)	3.82	3.27	3.15
Humedad natural promedio (%)	3.4		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

c) Límites de consistencia.

Tabla 98
Límite líquido del suelo D más 3.0% cal

Límite líquido (MTC E 110, AASHTO T89)				
N° de tara		T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	62.06	62.47	64.25
Peso de tara + suelo seco	(gr)	57.39	57.88	59.13
Peso del agua	(gr)	4.67	4.59	5.12
Peso de la tara	(gr)	39.15	40.57	40.34
Peso del suelo seco	(gr)	18.24	17.31	18.79
Contenido de humedad	(%)	25.60	26.52	27.25
Número de golpes		32.00	23.00	15.00

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 99
Límite plástico del suelo D más 3.0% cal

Límite plástico (MTC E 111, AASHTO T90)				
N° de tara		T - 01	T - 02	T - 03
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	24.71	23.85	25.03
Peso de tara + suelo seco	(gr)	22.92	22.21	23.22
Peso de la tara	(gr)	13.54	13.77	13.67
Peso del agua	(gr)	1.79	1.64	1.81
Peso del suelo seco	(gr)	9.38	8.44	9.55
Contenido de humedad	(%)	19.08	19.43	18.95

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

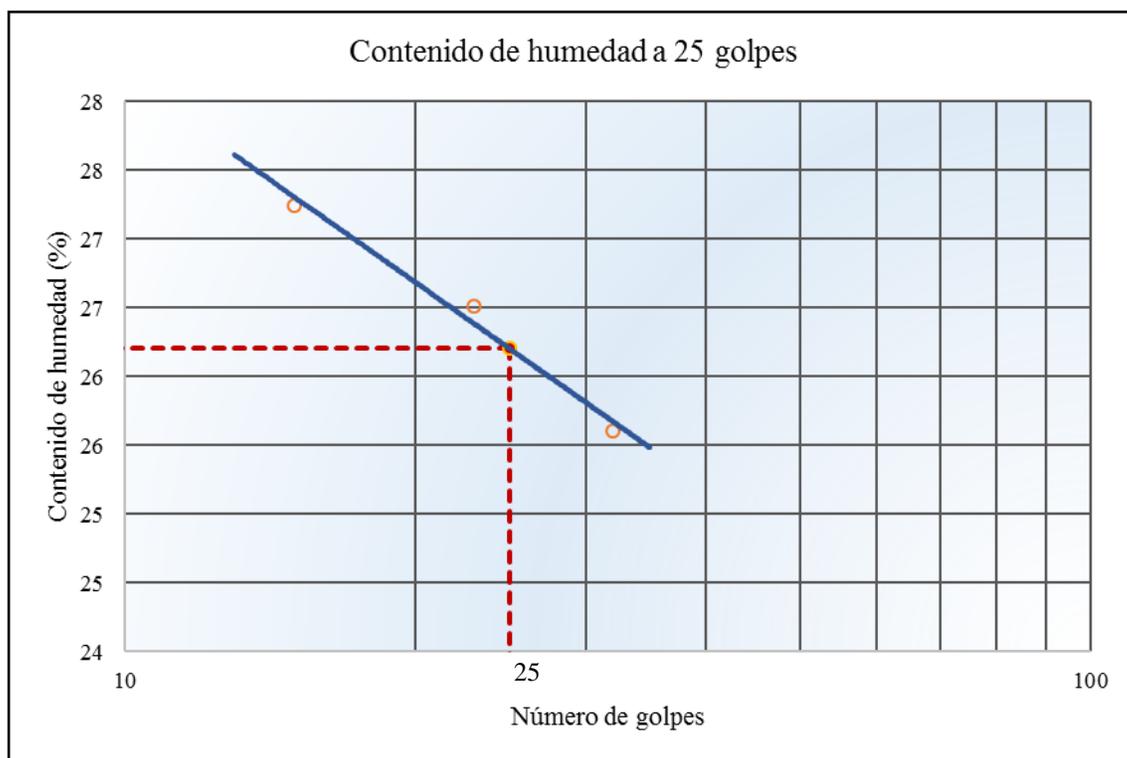


Figura 89. Relación: contenido de humedad (%) y N° de golpes del suelo D más 3.0% cal.

Tabla 100

Obtención del índice de plasticidad del suelo D más 3.0% cal

Constantes físicas de la muestra		
Límite líquido	(%)	26.2
Límite plástico	(%)	19.2
Índice de plasticidad	(%)	7.1

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

d) Abrasión Los Ángeles.

Tabla 101
Porcentaje de desgaste del suelo D más 3.0% cal

Muestra	1
Gradación	"A"
N° de esferas	12
Tamiz (N°)	Peso ret. (grs.)
1"	1,238
3/4"	1,242
1/2"	1,252
3/8"	1,242
Peso total	4,974
Material retenido tamiz N° 12	4,009
Material pasante tamiz N° 12	965
Porcentaje de desgaste	19.4

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

e) Próctor modificado.

Tabla 102

Ensayo de próctor modificado del suelo D más 3.0% cal

Ensayo N°		1	2	3	4		
Número de capas		5	5	5	5		
Golpes de pisón por capa		56	56	56	56		
Peso suelo húmedo + molde	(gr)	12418.26	12617.26	12715.26	12666.26		
Peso molde +base	(gr)	7491	7491	7491	7491		
Peso suelo húmedo compactado	(gr)	4927.26	5126.26	5224.26	5175.26		
Volumen de molde	(cm ³)	2118	2118	2118	2118		
Peso volumétrico húmedo	(gr/cm ³)	2.326	2.420	2.467	2.443		
Tara N°		T-01	T-02	T-03	T-04		
Peso del suelo húmedo + tara	(gr)	1279.97	1137.3	938.27	1061.37		
Peso del suelo seco + tara	(gr)	1255.01	1106.71	900.41	1000.51		
Peso de tara	(gr)	123.74	110.84	116.9	121.9		
Peso de agua	(gr)	24.96	30.56	37.86	60.86		
Peso del suelo seco	(gr)	1131.27	995.87	783.47	878.57		
Contenido de agua	(%)	2.2	3.1	4.83	6.9		
Peso volumétrico seco	(gr/cm ³)	2.276	2.348	2.353	2.285		
				Densidad máxima:	(gr/cm ³)	2.368	
				Humedad óptima:	(%)	3.9	

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

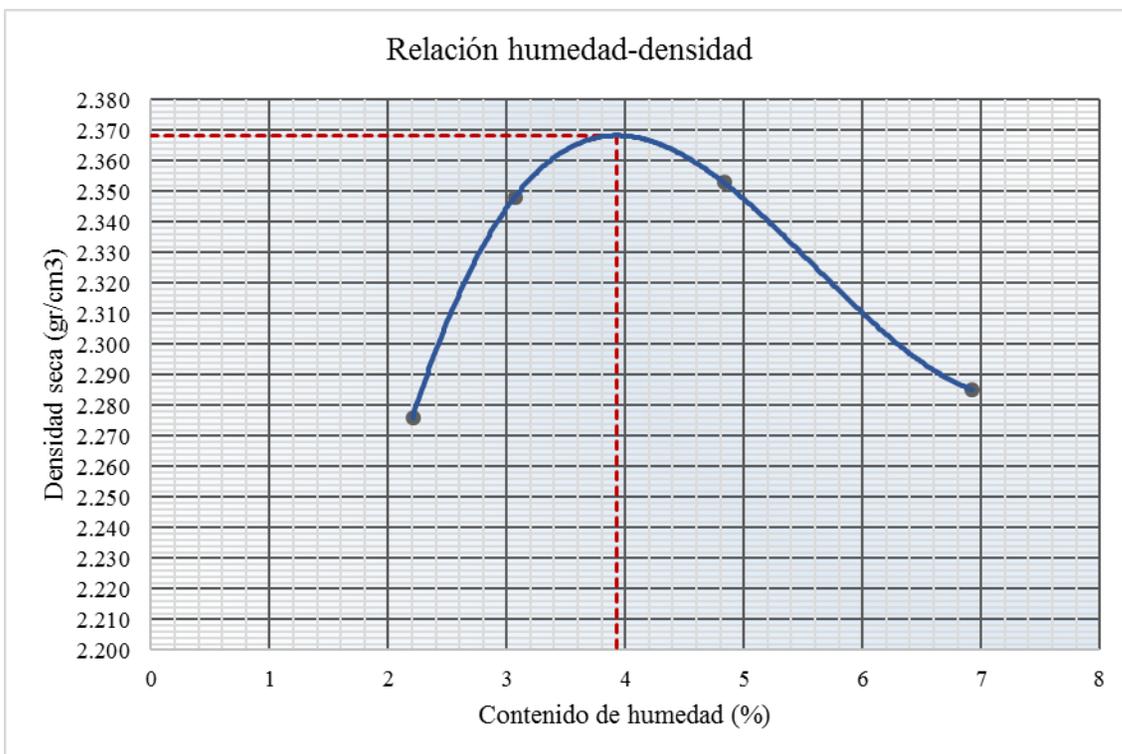


Figura 90. Relación: contenido de humedad – densidad del suelo D más 3.0% cal.

f) Relación de Soporte California.

Tabla 103

CBR del suelo D más 3.0% cal

	C.B.R. al 95% de MDS (%)	C.B.R. al 100% de MDS (%)
0.1"	36.1	45.3
0.2"	57.2	71.2

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

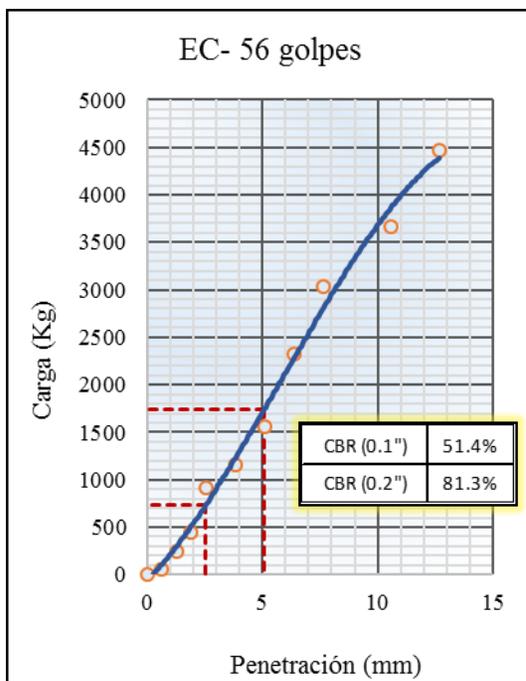


Figura 91. EC 56 golpes del suelo D más 3.0% cal.

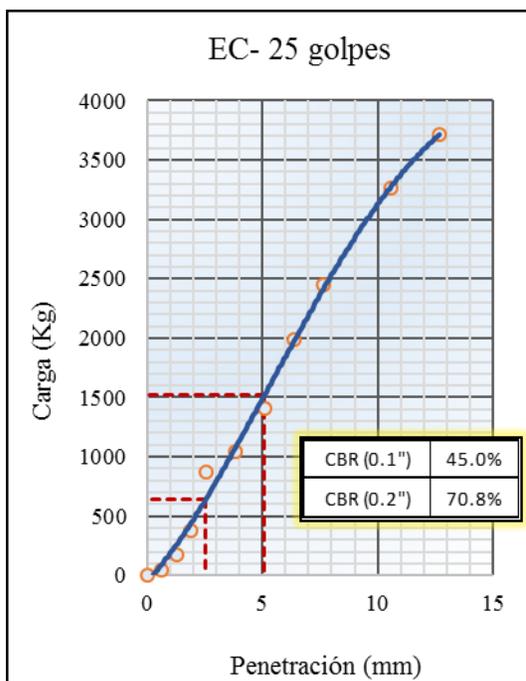


Figura 92. EC 25 golpes del suelo D más 3.0% cal.

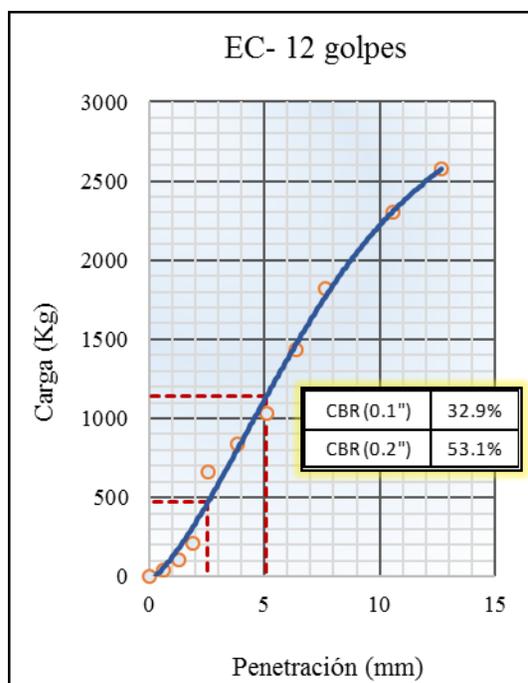


Figura 93. EC 56 golpes del suelo D más 3.0% cal.

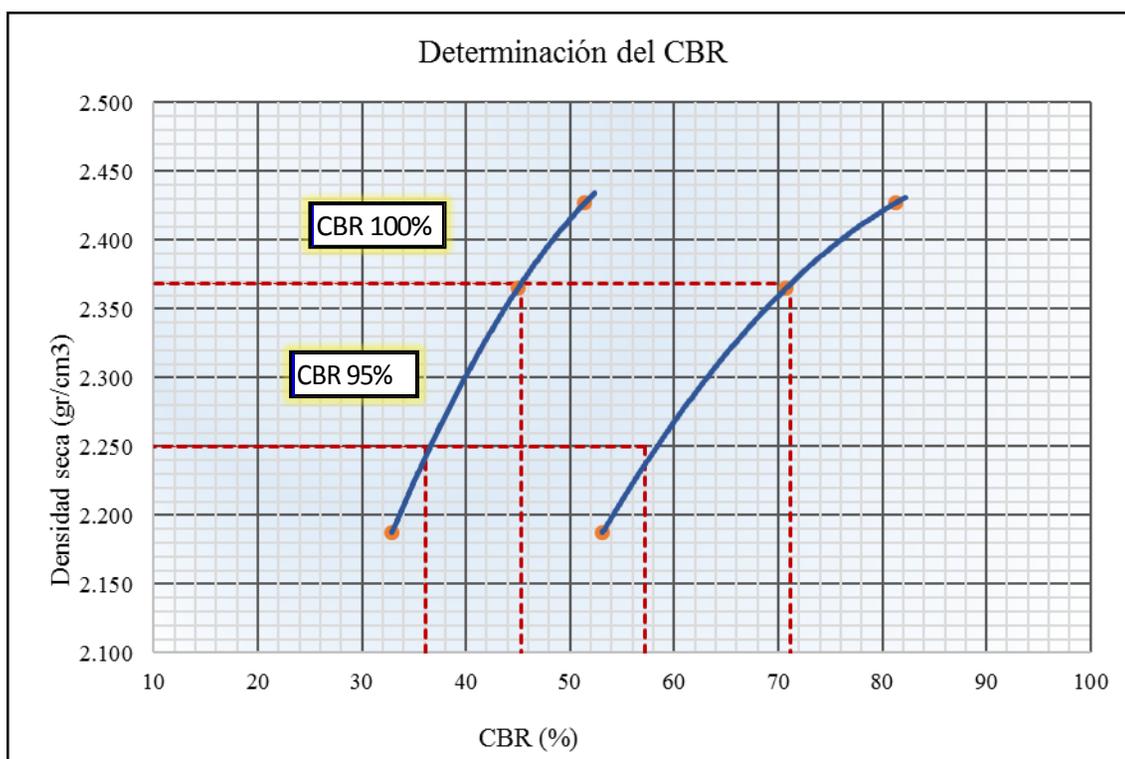


Figura 94. Relación: CBR (%) y densidad seca (gr/cm) del suelo D más 3.0% cal.

Tabla 104

Resumen de los ensayos realizados del suelo D más 1.5% cal

Peso de la muestra		
Peso total de la muestra	(gr):	10323.10
Material fino < N°4	(gr):	6173.03
Material grueso > N°4	(gr):	4150.07
Límites de consistencia		
Límite líquido	(%) :	26.2
Límite plástico	(%) :	19.2
Índice plástico	(%) :	7.1
Clasificación de suelos		
Clasificación SUCS	(gr):	SC-SM
Clasificación AASTHO	(gr):	A-2-4 (0)
Humedad natural	(%):	3.4
Porcentaje de desgaste	(%)	19.4
Máxima dens. seca	(gr/cm ³):	2.368
Óptimo cont. de humedad	(%)	3.93
CBR 0.1" al 95% MDS	(%)	36.07
CBR 0.1 " al 100% MDS	(%)	45.29

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.3. Resultados del análisis de laboratorio del material más la adición de 4.5% de cal.

a) Análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 105

Análisis granulométrico del suelo D más 4.5% cal

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1"	25.400				100.00%
3/4"	19.000	946.2	8.83%	8.83%	91.17%
1/2"	12.500	974.0	9.09%	17.91%	82.09%
3/8"	9.500	633.6	5.91%	23.83%	76.18%
N°4	4.750	1446.1	13.49%	37.32%	62.68%
N°10	2.000	1367.4	12.76%	50.07%	49.93%
N°20	0.840	944.7	8.81%	58.89%	41.11%
N°40	0.425	649.2	6.06%	64.94%	35.06%
N°50	0.300	397.2	3.71%	68.65%	31.35%
N°80	0.177	501.9	4.68%	73.33%	26.67%
N°100	0.150	265.4	2.48%	75.81%	24.19%
N°200	0.075	659.3	6.15%	81.96%	18.04%
<N°200	Fondo	1933.99	18.04%	100.00%	0.00%
	Total	10719.10	100.00%		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

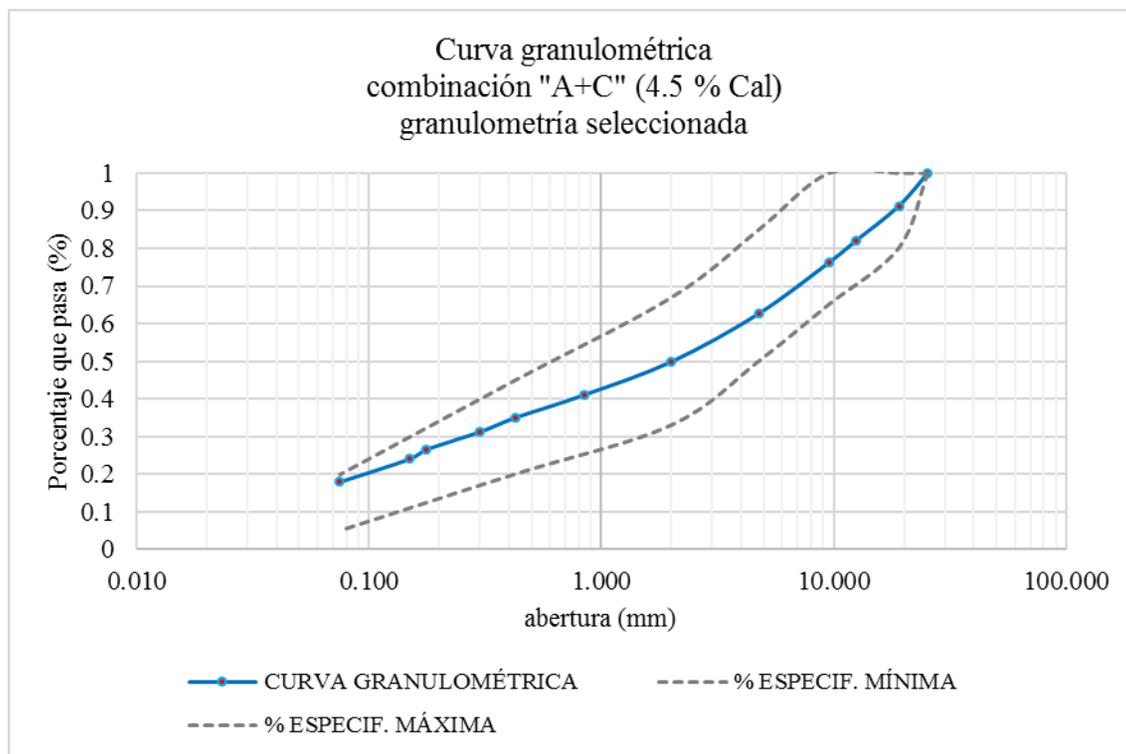


Figura 95. Curva granulométrica del suelo D más 4.5% cal.

b) Determinación de humedad natural.

Tabla 106

Contenido de humedad del suelo D más 4.5% cal

Ensayo N°	1	2	3
N° de tara	T - 02	T - 03	T - 04
Peso de tara + suelo húmedo (gr)	1246.80	1235.80	1256.00
Peso de tara + suelo seco (gr)	1195.60	1206.01	1191.50
Peso de la tara (gr)	102.50	101.56	104.30
Peso del agua (gr)	51.20	29.79	64.50
Peso del suelo seco (gr)	1093.10	1104.45	1087.20
Contenido de humedad (%)	4.68	2.70	5.93
Humedad natural promedio (%)	4.4		

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

c) Límites de consistencia.

Tabla 107
Límite líquido del suelo D más 4.5% cal

Límite líquido (MTC E 110, AASHTO T89)				
N° de tara		T - 09	T - 10	T - 11
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	63.13	62.27	62.84
Peso de tara + suelo seco	(gr)	58.26	57.60	57.71
Peso del agua	(gr)	4.87	4.67	5.13
Peso de la tara	(gr)	40.39	41.08	40.53
Peso del suelo seco	(gr)	17.87	16.52	17.18
Contenido de humedad	(%)	27.25	28.27	29.86
Número de golpes		32.00	24.00	14.00

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 108
Límite plástico del suelo D más 4.5% cal

Límite plástico (MTC E 111, AASHTO T90)				
N° de tara		T - 09	T - 10	T - 11
Peso de tara + suelo húmedo	(gr)	23.44	24.66	24.89
Peso de tara + suelo seco	(gr)	21.77	22.75	23.05
Peso de la tara	(gr)	13.61	13.44	13.67
Peso del agua	(gr)	1.67	1.91	1.84
Peso del suelo seco	(gr)	8.16	9.31	9.38
Contenido de humedad	(%)	20.47	20.52	19.62

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

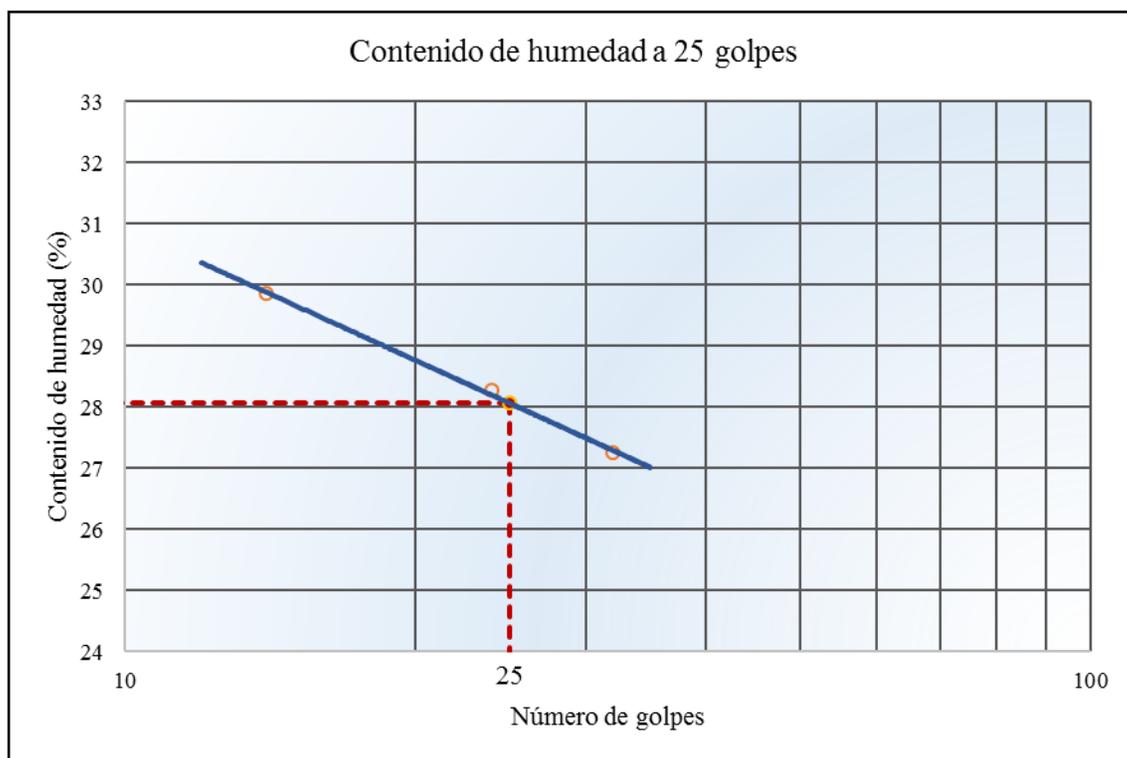


Figura 96. Relación: cont. de humedad (%) y el N° de golpes del suelo D más 4.5% cal.

Tabla 109

Obtención del índice de plasticidad del suelo D más 4.5% cal

Constantes físicas de la muestra		
Límite líquido	(%)	28.1
Límite plástico	(%)	20.2
Índice de plasticidad	(%)	7.9

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

d) Abrasión Los Ángeles.

Tabla 110
Porcentaje de desgaste del suelo D más 4.5% cal

Muestra	1
Gradación	"A"
Nº de esferas	12
Tamiz (Nº)	Peso ret. (grs.)
1"	1,222
3/4"	1,212
1/2"	1,229
3/8"	1,234
Peso total	4,897
Material retenido tamiz Nº 12	3,954
Material pasante tamiz Nº 12	943
Porcentaje de desgaste	19.3

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

e) Proctor modificado.

Tabla 111

Ensayo de proctor modificado del suelo D más 4.5% cal.

Ensayo N°		1	2	3	4	
Número de capas		5	5	5	5	
Golpes de pisón por capa		56	56	56	56	
Peso suelo húmedo + molde	(gr)	12423.52	12622.5 2	12720.52	12671.52	
Peso molde +base	(gr)	7491	7491	7491	7491	
Peso suelo húmedo compactado	(gr)	4932.52	5131.52	5229.52	5180.52	
Volumen de molde	(cm ³)	2118	2118	2118	2118	
Peso volumétrico húmedo	(gr/cm ³)	2.329	2.423	2.469	2.446	
Tara N°		T-01	T-02	T-03	T-04	
Peso del suelo húmedo + tara	(gr)	1282.23	1139.5	940.53	1063.63	
Peso del suelo seco + tara	(gr)	1260.27	1111.97	905.67	1005.77	
Peso de tara	(gr)	121.38	108.48	114.6	119.6	
Peso de agua	(gr)	21.96	27.56	34.86	57.86	
Peso del suelo seco	(gr)	1138.89	1003.49	791.09	886.19	
Contenido de agua	(%)	1.9	2.7	4.41	6.5	
Peso volumétrico seco	(gr/cm ³)	2.285	2.358	2.365	2.296	
				Densidad máxima:	(gr/cm ³)	2.379
				Humedad óptima:	(%)	3.6

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

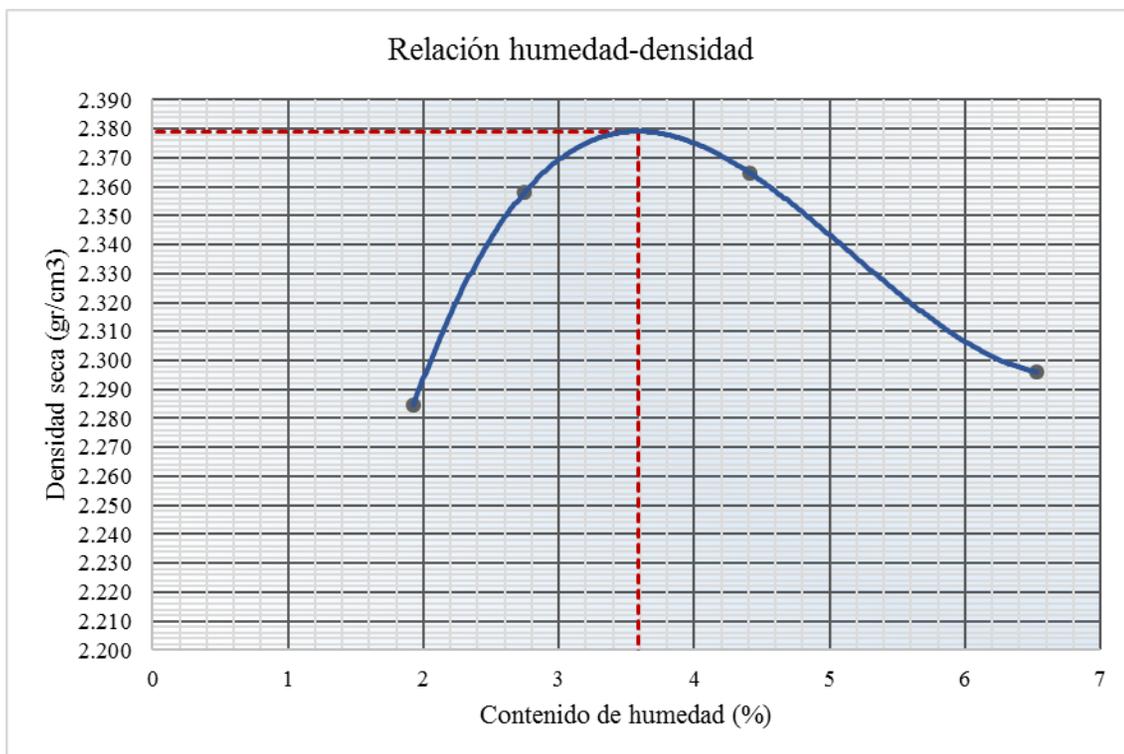


Figura 97. Relación: contenido de humedad – densidad del suelo D más 4.5% cal.

f) Relación de soporte californiana.

Tabla 112
CBR del suelo D más 4.5% cal

	C.B.R. al 95% de MDS (%)	C.B.R. al 100% de MDS (%)
0.1"	38.9	50.1
0.2"	60.7	78.6

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

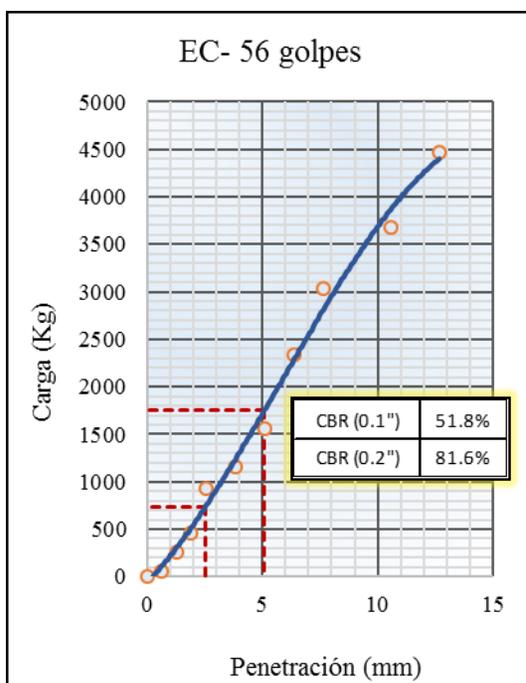


Figura 98. EC 56 golpes del suelo D más 4.5% cal.

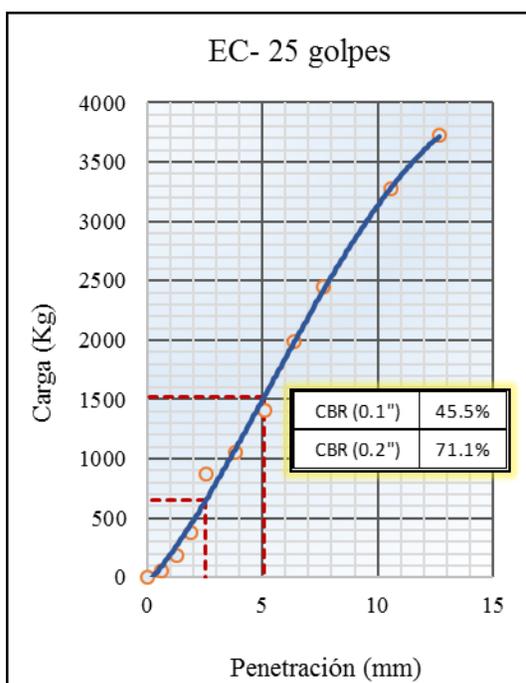


Figura 99. EC 25 golpes del suelo D más 4.5% cal.

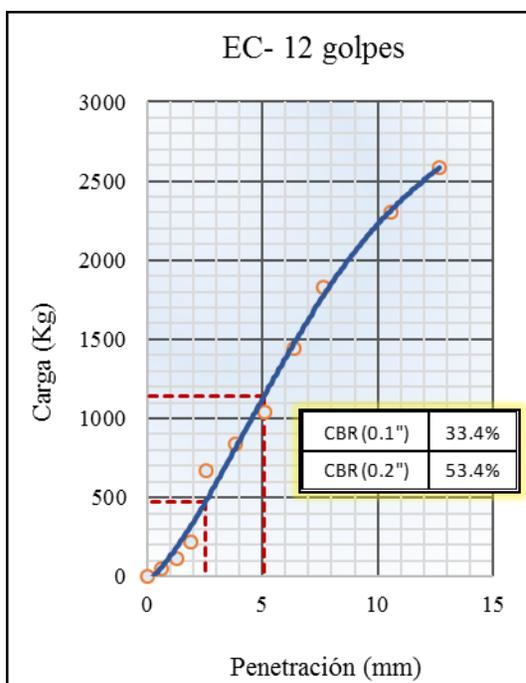


Figura 100. EC 56 golpes del suelo D más 4.5% cal.

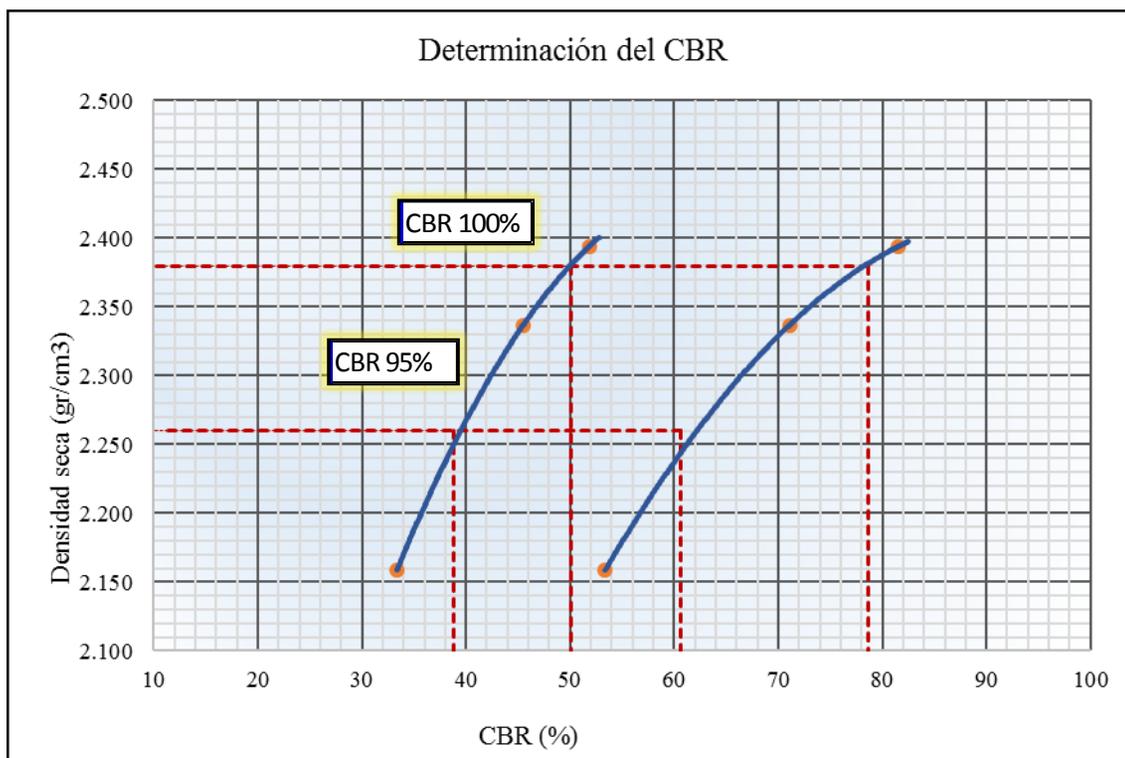


Figura 101. Relación del CBR (%) y la densidad seca (gr/cm) del suelo D más 4.5% cal.

Tabla 113

Resumen de los ensayos realizados del suelo D más 4.5% cal

Peso de la Muestra		
Peso total de la muestra	(gr):	10719.10
Material fino < N°4	(gr):	6719.19
Material grueso > N°4	(gr):	3999.91
Límites de consistencia		
Límite líquido	(%) :	28.1
Límite plástico	(%) :	20.2
Índice plástico	(%) :	7.9
Clasificación de Suelos		
Clasificación SUCS	(gr):	SC-SM
Clasificación AASTHO	(gr):	A-2-4 (0)
Humedad natural	(%):	4.4
Porcentaje de desgaste	(%)	19.3
Máxima dens. seca	(gr/cm ³):	2.379
Óptimo cont. de humedad	(%)	3.58
CBR 0.1" al 95% MDS	(%)	38.86
CBR 0.1 " al 100% MDS	(%)	50.05

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Aplicación del experimento en campo.

Culminada la evaluación, comparación y análisis de las características físicas y mecánicas en laboratorio, se procede a realizar la aplicación del experimento en campo.

En ese sentido, el 09 de agosto del 2018, la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil solicita mediante el Oficio N°0587-2018-UTEA-FI-EPIC la autorización para el desarrollo de la investigación en el tramo Yaca – Circa. El Instituto Vial Provincial de Abancay,

con Carta N°010-2018-G.G.IVP/AB del 10 de agosto del mismo año, nos autoriza para proceder con la investigación.

El 11 de agosto del 2018, se ejecuta el tratamiento en dos tramos, detallándose de la siguiente forma:

Tramo I: Progresivas del km 03+900 al km 04+100 (Método de estabilización granular y química suelo D + CaO).

Tramo II: Progresivas del km 04+100 al km 04+300 (Método de estabilización granular - suelo D).

A continuación, se detalla el procedimiento de la conformación de los tramos en investigación:

1er. paso: Obtención de los suelos.

Se realizó la combinación del suelo A + C, según los resultados de laboratorio para obtener el suelo D, se utilizó 90% de suelo A y 10% de suelo C, antes de la combinación se realizó el zarandeo por la malla de 1 pulgada.

Por ello se requirió los siguientes volúmenes:

Volumen total del afirmado= $400 \times 3.50 \times 0.16 = 224.0 \text{ m}^3$

Volumen del suelo A= 201.6 m^3

Volumen del suelo C= 22.4 m^3



Figura 102. Extracción de suelo de la Cantera C. Figura 103. Extracción de suelo de la Cantera A.

2do. paso: Escarificado y extendido del afirmado.

Se extendió el afirmado utilizando el suelo D en los dos tramos que inicia en el km 03+900 al km 04+100.



Figura 104. Escarificado del afirmado.



Figura 105. Extendido del afirmado.

3er. paso: Distribución de la cal.

Se distribuyó la cal de manera homogénea en el Tramo I, según el resultado de laboratorio se incorporó 1.5 % de cal del peso seco del suelo D, equivalente a:

Volumen total del suelo D (Tramo I) = 112.0 m³

Si el peso unitario seco es $\gamma_d = 1.857 \text{ gr/cm}^3 = 1857.0 \text{ Kg/m}^3$

Para determinar el peso seco se utiliza la siguiente fórmula:

$w_s = V \cdot \gamma_d$, entonces $W_s = 112.0 \text{ m}^3 \times 1857.0 \text{ Kg/m}^3 = 207984.0 \text{ Kg}$.

Luego determinamos la cantidad de cal: $1.5\% \cdot 207984.0 = 3119.96 \text{ Kg} = 3120 \text{ Kg}$.

La cal se compró por saco, cada saca equivale a 30 Kg, de acuerdo a eso, se requirió de 104 sacos de cal.

Se distribuyó un saco de cal cada 2 metros lineales, se procuró distribuir de manera homogénea.



Figura 106. Tesistas y personal de apoyo.



Figura 107. Distribución de la cal.



Figura 108. Distribución de la cal.



Figura 109. Distribución de la cal.

4to. paso: Batido y homogenización el afirmado

Se realiza el batido de los suelos en ambos tramos:



Figura 110. Batido del afirmado con cal.



Figura 111. Homogenización del afirmado con cal.

5to. paso: Riego del afirmado.

Luego, se procedió al riego del material de afirmado, para lo cual, se utilizó camión cisterna garantizando el riego uniforme lo más cercano a la humedad óptima definida por el ensayo de compactación proctor modificado.



Figura 112. Riego del afirmado del tramo I.



Figura 113. Riego del afirmado del tramo II.

6to. paso: Compactación

Posteriormente, se realizó la compactación con rodillo liso vibratorio hasta llegar al grado de compactación exigido del 95 % de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado (AASHTO T-180).



Figura 114. Compactación del afirmado
tramo I - Del km 03+900 al km 04+100.



Figura 115. Compactación del afirmado
tramo II - Del km 04+100 al km 04+300.

7mo. paso: Culminación.



Figura 116. Tramo I - del km 03+900 al km
04+100.



Figura 117. Tramo II - del km 04+100 al km
04+300.

4.1.6. Resultados de la evaluación del IRI.

Posterior a la aplicación del experimento en el tramo del km 3+900 al km 4+100 (afirmado conformado por el suelo D+ Cao) y del km 4+100 al km 4+300 (afirmado conformado por el suelo D), se procedió a realizar el ensayo en campo para evaluar la rugosidad del afirmado (Anexo 13).

Para dicha evaluación, se realizó el Ensayo de Merlín durante un periodo de (10 meses) de agosto del 2018 a mayo del 2019.



Figura 118. Evaluación del índice de rugosidad del tramo I.

Figura 119. Evaluación del índice de rugosidad del tramo II.

Los resultados de la medición de la rugosidad se presentan a continuación:

Tabla 114
Rugosidad 1er. Monitoreo.

Progresiva	Descripción	Huella izquierda	Huella derecha
		IRI (m/km)	IRI (m/km)
	IRI promedio por huella	4.55	4.57
km 3+900 al	IRI promedio		4.56
km 4+100	IRI característico por huella	4.57	4.60
	IRI característico		4.58
	IRI promedio por huella	4.58	4.55
km 4+100 al	IRI promedio		4.57
km 4+300	IRI característico por huella	4.58	4.58
	IRI característico		4.58

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 115
Rugosidad 2do. monitoreo

Progresiva	Descripción	Huella izquierda IRI (m/km)	Huella derecha IRI (m/km)
	IRI promedio por huella	5.21	5.21
km 3+900 al	IRI promedio		5.21
km 4+100	IRI característico por huella	5.23	5.24
	IRI característico		5.24
	IRI promedio por huella	5.45	5.45
km 4+100 al	IRI promedio		5.45
km 4+300	IRI característico por huella	5.47	5.52
	IRI característico		5.49

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 116
Rugosidad 3er. monitoreo

Progresiva	Descripción	Huella izquierda IRI (m/km)	Huella derecha IRI (m/km)
	IRI promedio por huella	5.67	5.68
km 3+900 al	IRI promedio		5.68
km 4+100	IRI característico por huella	5.69	5.76
	IRI característico		5.72
	IRI promedio por huella	6.11	6.11
km 4+100 al	IRI promedio		6.11
km 4+300	IRI característico por huella	6.13	6.16
	IRI característico		6.14

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 117
Rugosidad 4to. monitoreo

Progresiva	Descripción	Huella izquierda	Huella derecha
		IRI (m/km)	IRI (m/km)
	IRI promedio por huella	5.93	5.92
km 3+900 al	IRI promedio		5.92
km 4+100	IRI característico por huella	5.97	5.97
	IRI característico		5.97
	IRI promedio por huella	6.52	6.54
km 4+100 al	IRI promedio		6.53
km 4+300	IRI característico por huella	6.54	6.58
	IRI característico		6.56

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 118
Rugosidad 5to. monitoreo

Progresiva	Descripción	Huella izquierda	Huella derecha
		IRI (m/km)	IRI (m/km)
	IRI promedio por huella	6.14	6.12
km 3+900 al	IRI promedio		6.13
km 4+100	IRI característico por huella	6.16	6.16
	IRI característico		6.16
	IRI promedio por huella	7.96	8.00
km 4+100 al	IRI promedio		7.98
km 4+300	IRI característico por huella	8.09	8.12
	IRI característico		8.11

Extracción de resultados de laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 119
Evolución de la rugosidad durante agosto 2018 – mayo 2019

Periodo de evaluación		Tiempo		IRIc (m/km)	
Año	Mes	Meses	Meses acumulados	Tramo I (suelo D + CaO)	Tramo II (suelo D)
2018	Agosto	0	0	4.58	4.58
	Octubre	2	2	5.24	5.49
	Diciembre	2	4	5.72	6.14
2019	Febrero	2	6	5.97	6.56
	Mayo	3	9	6.16	8.11

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

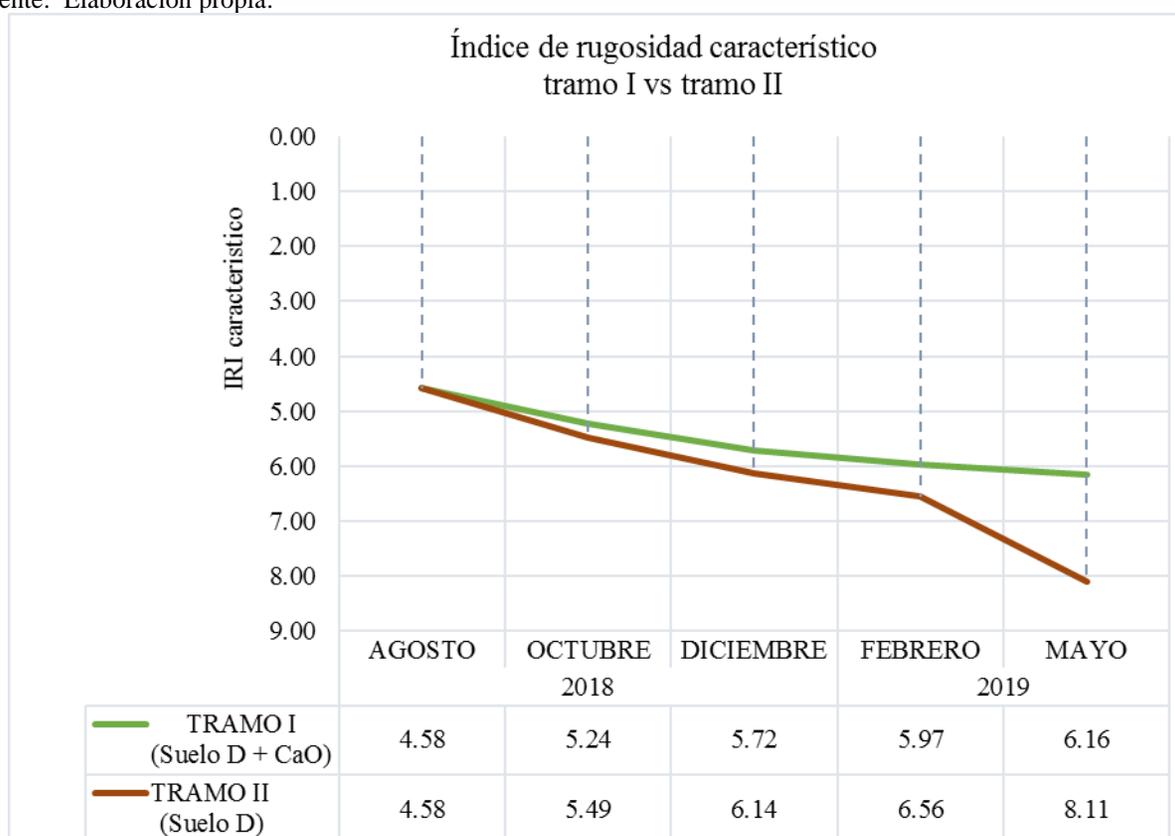


Figura 120. Índice de rugosidad característico del tramo I versus tramo II.

4.1.7. Evaluación económica de la estabilización.

Tabla 120

Presupuesto de la estabilización granular - incorporación de suelo CL

Partida	01.01.01	Afirmado granular e=0.16m			Costo unitario directo por: m3		
Rendimiento	m3/día	340.0000	EQ.	340.00		37.20	
Código	Descripción recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
		Mano de obra					
0101010002	Capataz		hh	0.1000	0.0024	21.01	0.05
0101010005	Peón		hh	4.0000	0.0941	15.34	1.44
							1.49
		Materiales					
0207040002	Material de afirmado		m3		1.1800	20.66	24.38
0290130023	Agua para la obra		m3		0.1200	24.46	2.94
							27.32
		Equipos					
0301010006	Herramientas manuales		%MO		5.0000	1.49	0.07
0301100007	Rodillo liso vibratorio autopropulsado 101-135hp 10 -12 ton.		hm	1.0000	0.0235	146.08	3.43
03012000010004	Motoniveladora 145 - 150 HP		hm	1.0000	0.0235	207.93	4.89
							8.39

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 121
Presupuesto de la estabilización química - incorporación de 1.5 % de cal

Partida	01.02.01	Afirmado granular e=0.16M con estabilizadores, cal 1.5%					
Rendimiento	m3/día	338.0000	EQ.	338.00	Costo unitario directo por: m3		51.21
Código	Descripción	Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
		Mano de obra					
0101010002	Capataz		hh	0.1000	0.0024	21.01	0.05
0101010005	Peón		hh	4.0000	0.0947	15.34	1.45
							1.50
		Materiales					
0207040002	Material de afirmado		m3		1.1500	20.66	23.76
0213020004	Cal viva		kg		27.8500	0.45	12.53
0290130023	Agua para la obra		m3		0.1200	24.46	2.94
							39.23
		Equipos					
0301010006	Herramientas manuales		%MO		5.0000	1.50	0.08
0301100007	Rodillo liso vibratorio autopropulsado 101-135HP 10 -12 TON.		hm	1.0000	0.0237	146.08	3.46
03012000010004	Motoniveladora 145 - 150 hp		hm	1.0000	0.0237	207.93	4.93
0301220011	camión distribuidor de cal		hm	1.0000	0.0237	84.76	2.01
							10.48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 122

Presupuesto de la estabilización química - incorporación de 3.0 % de cal.

Partida	01.02.02		Afirmado granular E=0.16m con estabilizadores, cal 3.0%				
Rendimiento	m3/día	338.0000	EQ.	338.00	Costo unitario directo por: m3	63.75	
Código	Descripción Recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de obra						
0101010002	Capataz		hh	0.1000	0.0024	21.01	0.05
0101010005	Peón		hh	4.0000	0.0947	15.34	1.45
							1.50
	Materiales						
0207040002	Material de afirmado		m3		1.1500	20.66	23.76
0213020004	Cal viva		kg		55.7100	0.45	25.07
0290130023	Agua para la obra		m3		0.1200	24.46	2.94
							51.77
	Equipos						
0301010006	Herramientas manuales		%MO		5.0000	1.50	0.08
0301100007	Rodillo liso vibratorio autopropulsado 101-135hp 10 -12 ton.		hm	1.0000	0.0237	146.08	3.46
03012000010004	Motoniveladora 145 - 150 hp		hm	1.0000	0.0237	207.93	4.93
0301220011	camión distribuidor de cal		hm	1.0000	0.0237	84.76	2.01
							10.48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 123

Presupuesto de la estabilización química - incorporación de 4.5 % de cal.

Partida	01.02.03	Afirmado granular E=0.16M con estabilizadores, cal 4.5%				
Rendimiento	m3/día	338.0000	EQ.	338.00	Costo unitario directo por: m3	76.29
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de obra					
0101010002	Capataz	hh	0.1000	0.0024	21.01	0.05
0101010005	Peón	hh	4.0000	0.0947	15.34	1.45
						1.50
	Materiales					
0207040002	Material de afirmado	m3		1.1500	20.66	23.76
0213020004	Cal viva	kg		83.5700	0.45	37.61
0290130023	Agua para la obra	m3		0.1200	24.46	2.94
						64.31
	Equipos					
0301010006	Herramientas manuales	%MO		5.0000	1.50	0.08
0301100007	Rodillo liso vibratorio autopropulsado 101-135hp 10 -12 ton.	hm	1.0000	0.0237	146.08	3.46
03012000010004	Motoniveladora 145 - 150 hp	hm	1.0000	0.0237	207.93	4.93
0301220011	camión distribuidor de cal	hm	1.0000	0.0237	84.76	2.01
						10.48

Fuente: Elaboración propia.

4.1.8. Resumen de los resultados.

Tabla 124

Resumen de laboratorio del suelo A, B, C y las adiciones de cal

N°	Descripción	Características físicas				Características mecánicas					
		Clasificación de suelos		Límites de consistencia		Humedad natural	Proctor modificado		CBR	Desgaste los ángeles	
AASHTO	SUCS	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Óptimo de cont. de humedad		Máxima densidad seca				
1	Subrasante	A-1-a (0)	GC-GM	22.6	16.3	6.3	2.3	4.51	2.38	39.5	22.4
2	Suelo A	A-1-b (0)	GC-GM	22.9	18	4.9	2.4	5.12	2.3	45.19	18
3	Suelo B	A-1-a (0)	GW-GC	26	20.5	5.5	0.8	4.89	2.33	51.21	11.3
4	Suelo C	A-6 (4)	CL	33.7	21.7	12	6.6	9.26	2.01	29.97	33.9
5	Suelo D (A+C)	A-2-4 (0)	SC-SM	24.4	18	6.4	2.9	4.4	2.34	42.6	19.3
6	Suelo D (A+C) + cal (1.5%)	A-2-4 (0)	SC-SM	25.4	18.5	6.9	3	4.21	2.35	43.27	19.4
7	Suelo D (A+C) + cal (3.0%)	A-2-4 (0)	SC-SM	26.2	19.2	7.1	3.4	3.93	2.37	45.29	19.4
8	Suelo D (A+C) + cal (4.5%)	A-2-4 (0)	SC-SM	28.1	20.2	7.9	4.4	3.58	2.38	50.05	19.3

Extracción de resultados de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 125
Resumen del rugosímetro de Merlín de los tramos I y II

N°	Fecha de evaluación	IRI característico (m/km)	
		Tramo I (estabilización química con 1.5% de cal)	Tramo II (estabilización granular – 10% suelo CL)
1	Ago. 2018	4.58	4.58
2	Oct. 2018	5.24	5.49
3	Dic. 2018	5.72	6.14
4	Feb. 2019	5.97	6.56
5	May. 2019	6.16	8.11

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 126
Resumen de la evaluación económica

N°	Descripción	Costo (s/. por m3)
1	Estabilización granular (10% suelo CL)	37.20
2	Estabilización química (1.5 % cal)	51.21
3	Estabilización química (3.0 % cal)	63.75
4	Estabilización química (4.5 % cal)	76.29

Extracción de resultados de laboratorio.
 Fuente: Elaboración propia.

4.2. Prueba de hipótesis

En esta sección, se validará cada una de las hipótesis planteadas cuando los resultados lo respalden y si por el contrario resultan diferentes, estas se rechazarán y se validarán las hipótesis nulas.

Es preciso mencionar que el material empleado en el afirmado objeto del experimento en campo fue en dos tramos: en el primer tramo la combinación del suelo A (90 %) y suelo C (10%) denominado suelo D y en el segundo tramo la combinación del suelo D (98.5%) y CaO (1.5%).

4.2.1. Prueba de hipótesis específica 01.

La incorporación de suelo CL¹ y CaO² mejorará la clasificación granulométrica del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).

El análisis granulométrico por tamizado (MTC E 107) indica que según AASTHO, incorporando 1.5%, 3.0% y 4.5 % de CaO (cal) y suelo CL al suelo A (A-1-b- 0), su clasificación resulta A-2-4 (0). Por otra parte, según SUCS incorporando 1.5%, 3.0% y 4.5% de CaO (cal) y suelo CL al suelo A (GC-GM), resulta SC-SM. (ver: Tabla 124).

Adicionalmente, se ha verificado que al incorporar 1.5%, 3.0% y 4.5% de CaO (cal) y suelo CL al suelo A, la granulometría del afirmado se mantiene dentro de las especificaciones mínimas y máximas para un tráfico T4 (Tipo 4); sin embargo, la incorporación de suelo CL y CaO en 1.5%, 3.0% y 4.5% no mejoró la clasificación granulométrica.

¹ Suelo C=CL: Arcilla fina gravosa con arena.

² CaO: Óxido de calcio (Cal).

Por consiguiente, se rechaza la hipótesis específica 01 y se acepta la hipótesis nula 01 que indica: La incorporación de suelo CL y CaO no mejorará la clasificación granulométrica del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).

4.2.2. Prueba de hipótesis específica 02.

La incorporación de suelo CL y CaO incrementará el índice plástico del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).

Los resultados del ensayo de límites de consistencia (MTC E110 - MTC E 111), demuestran que al incorporar 1.5%, 3.0% y 4.5% de CaO y suelo CL al suelo A, el IP resulta 6.9%, 7.1%, 7.9% en el mismo orden; esto quiere decir, que el índice plástico incrementó en 2.0%, 2.2% y 3.0%, respectivamente (ver: Tabla 124); es de precisar, que los resultados finales se encuentran dentro de los parámetros que se recomienda. Por lo que, se acepta la hipótesis específica 02 y se rechaza la hipótesis nula 02.

4.2.3. Prueba de hipótesis específica 03.

La incorporación de suelo CL y CaO aumentará el CBR del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).

Los resultados del ensayo de Relación Soporte de California - CBR 0.1” al 100% (MTC E 132) demuestran que al incorporar 1.5%, 3.0% y 4.5% de CaO y suelo CL al suelo A, el CBR resulta 43.27%, 45.29%, 50.05% en el mismo orden; esto quiere decir, que el CBR disminuyó al incorporar 1.5% de cal y suelo CL en 1.92% y al incorporar 3.0% y 4.5% de CaO y suelo CL, el CBR incrementó en 0.10% y 4.86%, respectivamente (ver: Tabla 124); es de precisar, que los resultados finales se encuentran dentro de los parámetros que se recomienda.

Se ha visto que la incorporación inicial del suelo CL disminuye el CBR del suelo A; sin embargo, al incrementar el porcentaje de CaO, el CBR aumenta; es necesario precisar, que la adición de cal siempre incrementará la resistencia del suelo en el transcurso del tiempo.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis específica 03 y se rechaza la hipótesis nula 03.

4.2.4. Prueba de hipótesis específica 04.

La incorporación de suelo CL y CaO conservará el Índice de Rugosidad Internacional del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).

Los resultados de la evaluación de rugosidad con el rugosímetro de Merlín, demuestran que al incorporar CaO y suelo CL al suelo A, resulta el índice de rugosidad característico de 4.58, 5.24, 5.72, 5.97 y 6.16 para los meses de agosto, octubre y diciembre del 2018 y los meses de febrero y mayo del 2019. (ver: Tabla 125).

El índice de rugosidad característica inicial normado por el MTC es de 5.0 m/km y durante el periodo de servicio es de 8 m/km; asimismo, indica los siguientes estados del camino: muy buen estado $4 < IRI < 6$, buen estado $6 < IRI < 10$ y regular estado $10 < IRI < 14$. (ver: Tabla 7 y Tabla 8).

Según lo mencionado, el IRI inicial de los meses de agosto a febrero se conservó en muy buen estado; para los meses siguientes, se conservó en buen estado y en el periodo de evaluación el IRI, se ha conservado de acuerdo a los especificado por el MTC.

Por las razones expuestas, la hipótesis específica 04 se acepta y se rechaza la hipótesis nula 04.

4.2.5. Prueba de la hipótesis general.

El tratamiento con estabilizadores mejorará el desempeño del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).

En términos generales, los resultados en laboratorio de mecánica de suelos demuestran que al incorporar los estabilizadores (suelo CL y CaO), la clasificación granulométrica no ha mejorado; sin embargo, se encuentran dentro de las especificaciones mínimas y máximas para un tráfico T4 (Tipo 4), establecidas por el Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito (MTC - 2005, p. 148). Se logró incrementar el Índice Plástico y aumentar el CBR.

Los resultados de la evaluación en campo demuestran que el IRI en el tramo con adición de CaO y suelo CL se ha conservado mejor que el tramo con incorporación solamente de suelo CL, ambos tramos muestran valores de IRI dentro de los parámetros de deterioro para el periodo de evaluación.

En consecuencia, se acepta la hipótesis general y se rechaza la hipótesis nula.

4.3. Discusión de resultados

La presente tesis tuvo el objetivo de mejorar por medio del tratamiento con estabilizadores el desempeño del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000); de manera que para la elección de los estabilizadores, se tomó en consideración las características físicas, mecánicas y químicas del material de las canteras A, B y C; las condiciones climáticas y el costo que son necesarios para el tratamiento (ver: Capítulo 4) de modo que se utilizó suelo CL (arcilla fina gravosa con arena) y CaO (Óxido de calcio-Cal).

La investigación presenta como limitación, la falta de laboratorios que realicen análisis químicos de los suelos y maquinarias esparcidoras de cal, dentro de la ciudad de Abancay; para contrarrestar estas limitaciones, se realizaron las pruebas químicas de suelo en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Agraria la Molina y el Laboratorio SGS-Perú, ambos ubicados en la ciudad de Lima, y se tuvo el cuidado necesario en la distribución de la cal sobre el afirmado.

Para determinar las características físicas y mecánicas de los suelos, se realizó los ensayos en el “Laboratorio de Suelos GEOMAT”, ubicado en la ciudad de Abancay, el cual cuenta con el respaldo de un técnico especialista y para el ensayo de densidad de campo, se contó con el apoyo del técnico de suelos del “Laboratorio de Suelos y Concreto GEOLEF” quienes tienen experiencia reconocida en la ciudad.

Dado el preludeo al presente ítem para lograr el objetivo de mejorar el desempeño del afirmado de la ruta ya mencionada, se usó como estabilizadores al suelo CL (arcilla fina gravosa con arena) que vendría a ser el suelo de la Cantera C y CaO (Óxido de calcio-cal). Para su utilización en la conformación del afirmado, se tomó en cuenta los criterios establecidos en el Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito; en este contexto, se utilizó solo el material pasante por el tamiz de 1 pulgada.

Los resultados de la combinación de suelos, utilizando la técnica de mínimos cuadrados con matrices nos brinda las siguientes proporciones: la primera combinación denominada suelo D fue de 90% del suelo A y 10% del suelo C y la segunda combinación denominado suelo E fue de 85% del suelo B y 15% del suelo C, ambas combinaciones cumplen con las especificaciones mínimas; sin embargo, existe una pequeña diferencia entre ambas, ya que la combinación A más C se encuentra más cerca al promedio de las especificaciones mínimas y

máximas que se exige para el afirmado de tráfico T4 (Tipo 4), debido a ello es que la combinación que se seleccionó fue la de 90% de suelo A y 10 % de suelo C.

Por otra parte, para la estabilización química con CaO (cal), se realizó los procedimientos que establece el Manual de ensayos de materiales de MTC E 1109 -Estabilización química de suelos – caracterización de estabilizador y evaluación de las propiedades de comportamiento del suelo mejorado.

En ese orden de ideas, se realiza la discusión de los resultados en bases a los antecedentes, a continuación, se menciona:

- Según AASTHO, incorporando 1.5%, 3.0% y 4.5 % de CaO (cal) y suelo CL al suelo A (A-1-b- 0), su clasificación resulta A-2-4 (0) y según SUCS incorporando 1.5%, 3.0% y 4.5% de CaO (cal) y suelo CL al Suelo A (GC-GM), resulta SC-SM.

Revisado los antecedentes, según Huezco, H y Orellana, A. (2009), la adición de 4 % de cal cambia la granulometría de suelo arcillo (CL) a ser suelo limoso (ML)

Estos resultados demostrarían que el incremento de cal en suelos de granos finos cambia la granulometría, empezando a disminuir la arcilla y en suelos de grano grueso. La granulometría empieza aumentar los suelos finos.

- Los resultados del ensayo de límites de consistencia demuestran que al incorporar 1.5%, 3.0% y 4.5% de CaO y suelo CL al suelo A, el IP resulta 6.9%, 7.1%,7.9% en el mismo orden; esto quiere decir, que el índice plástico incrementó en 2.0%, 2.2% y 3.0%, respectivamente.

Esto demuestra que el incremento del índice plástico es directamente proporcional al incremento de CaO en el afirmado. Así lo afirma el Ministerio de Transporte y comunicaciones (MTC,2005), que uno de los efectos más importantes de la cal en el suelo, es el de cambiar apreciablemente su plasticidad. Con suelos de baja plasticidad ($IP < 15$), aumentan tanto el LL como el LP y también muy ligeramente su IP; en cambio, en los suelos de plasticidad media y elevada ($IP > 15$) disminuye el IP” ...

Huezo, H y Orellana, A. (2009), afirma que al aplicar 4% de cal, el índice de plasticidad disminuye a 0. De manera similar, Sánchez Albán (2014) indica que con la adición de 7% de cal a un suelo clasificado según SUCS como arcillas de alta plasticidad, se ha logrado disminuir en 11.5% el índice de plasticidad. Beltrán, M y Copado, J. (2011) afirman que con la incorporación de 2.5 % de cal a un suelo clasificado como arcilla de baja comprensibilidad (CL), se reduce el índice de plasticidad de 21% a 6%. Jara Anyaypoma (2014) presenta que el IP disminuye como máximo hasta 9.26 para una adición de 4 % de cal. Cuadros Surichaqui (2017), en su investigación concluye que la adición de 3% el óxido de calcio es el óptimo, logrando que se reduzca el índice de plasticidad de un suelo natural con un IP de 19.08% a un IP de 4.17%. García Huaranca (2015), en su investigación, presenta los efectos de la cal en las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso, concluyendo que la adición de cal disminuye el índice de plasticidad del suelo arcilloso, sus resultados demuestran que: para un tipo de suelo A-4 (2), A-6 (5), A-6 (7), A-6 (9), A-6 (13), A-7-6 (17), A-7-6 (12), A-7-6 (11) y A-7-6 (7) al aplicar cal en 3.5%, 5.0%, 4.5%, 4.5%, 7.0%, 7.0%, 5.0%, 5.0% y 4.5%, respectivamente, el

índice plástico disminuye en 0.6%, 4.5%, 4.2%, 4.2%, 6.6%, 12.6%, 2.6%, 8.6% y 11.5%.

En todos los antecedentes mencionados anteriormente, el IP disminuye debido a que la muestra a la que adicionan cal, es un suelo arcilloso con un IP >15, por lo que no sería contrario al resultado que se tiene en la presente investigación, y reafirmaría el párrafo que indica el MTC.

Por otro lado, López Sumarriva y Ortiz Pinares (2018), en su investigación, aplica cal en dos tipos de muestras: la primera muestra C-01 empieza a disminuir de un IP de 13.80 con adición de 2% de cal, hasta llegar a un IP de 7.32 con adición de 8% de cal, y la segunda muestra C-02 empieza a incrementar de un IP de 1.29 con adición de 2 % de cal, hasta llegar a un IP de 4.35 con adición de 8% de cal.

Esto demostraría, una vez más que, al adicionar cal en suelos con índice de plasticidad baja, este empieza a incrementar y pasaría lo contrario en suelos con alto índice de plasticidad, en los cuales disminuye el índice de plasticidad.

- Del análisis en base a los resultados del ensayo de Relación Soporte de California, demuestran que al incorporar CaO y suelo CL al suelo A, el CBR aumentó hasta en un 4.86 %.

Rodríguez, M y Hidalgo, C. (2005) mencionan que para la adición de 9% de cal, tiene un CBR sin inundar de 105% e inundado de 219%, para el mismo, con la adición de 6% de cal se obtuvo el 126% y 257%, respectivamente. Castillo Parra (2017) planteo estabilizar con cal viva un suelo con límite líquido mayor a 100% y CBR menor a 5%, sus resultados demuestran que el valor de CBR aumenta linealmente en función al porcentaje de cal añadida, incrementando 15.8% por cada

porcentaje de cal, a porcentajes superiores al 30% de cal los valores de CBR, son mayores a 100%. Beltrán, M y Copado, J. (2011), en su investigación, concluye que al añadir 2.5% de cal en peso al suelo en su estado natural logra aumentar su CBR de 2.20% a 22%. Jara Anyaypoma (2014), el CBR al 95 % máximo es de 11.48% con la adición de 4% de cal y sin adición de cal el CBR es de 2.55 %. Cuadros Surichaqui (2017), en su investigación, concluye que la adición de 3% el óxido de calcio es el óptimo, con el cual aumentó significativamente el valor de C.B.R. de un 4.85% para suelo natural a un valor de C.B.R de 15.64%, categorizándolo como un material de subrasante buena. García Gonzales (2015) afirma que el CBR aumenta progresivamente, teniendo así el CBR al 0.1” del suelo natural igual a 5.20%, incorporando 2% de cal aumenta a un CBR de 5.30%; incorporando 4% de cal aumenta a un CBR de 6.30%; agregando 6% de cal aumenta a un CBR de 7.20% e incorporando 8% de cal aumenta a un CBR de 8.05. Para el CBR al 0.2, de un suelo natural con CBR de 5.40%, incorporando 2% de cal aumenta a un CBR de 5.70%; agregando 4% de cal aumenta un CBR de 6.60%; incorporando 6% de cal resulta un CBR de 7.50% e incorporando 8% de cal resulta un CBR de 8.30%. Vásquez Cabrera (2018), en sus resultados finales para las tres calicatas obtuvieron los valores de CBR patrón al 100%: calicata N° 01 se tuvo un CBR de 16.2%, adicionando 7% de carbón y 4% de cal incrementando el CBR a 29.0 %, en la calicata N° 02 se obtuvieron un CBR inicial de 15.4% adicionando 7% de carbón y 4% de cal aumenta el CBR en 35.3% y en la calicata N° 03 se obtuvieron un CBR inicial de 14.0% al incorporar 7% de carbón y 4% de cal incrementa a 32.2%.

Esto demostraría que el incremento del CBR depende del porcentaje de agua que contiene el suelo que se va mejorar, y de la proporción de cal, en el caso de la investigación el CBR aumenta muy poco respecto a los antecedentes mencionados.

- Los resultados de la evaluación de rugosidad, demuestran que al incorporar CaO y suelo CL al suelo A, el índice de rugosidad característico es de: 4.58, 5.24, 5.72, 5.97 y 6.16 para los meses de evaluación.

En este caso, se toma en cuenta el índice característico que debería presentar el afirmado en estado de servicio que es igual a 8m/km establecido por el MTC. (2014, p. 271)

Estamos demostrando que, en caso del incremento de cal, el afirmado ha tenido mejor comportamiento ante las solicitudes de cargas de tráfico.

Conclusiones

1. Como conclusión general, los resultados en laboratorio de mecánica de suelos demuestran que al incorporar los estabilizadores (suelo CL y CaO) no ha mejorado la clasificación granulométrica; sin embargo, se encuentran dentro de las especificaciones mínimas y máximas para un tráfico T4 (Tipo 4); en cambio, los resultados en campo demuestran que el IRI en el tramo con adición de CaO y suelo CL se ha conservado mejor que el tramo con incorporación de suelo CL, ambos tramos muestran valores de IRI dentro de los parámetros de deterioro para el periodo de evaluación.
2. La incorporación de suelo CL¹ y CaO² tiene como resultado según AASTHO, incorporando 1.5%, 3.0% y 4.5 % de CaO (cal) y suelo CL al suelo A (A-1-b- 0), su clasificación resulta A-2-4 (0). Por otro lado, según SUCS incorporando 1.5%, 3.0% y 4.5% de CaO (cal) y suelo CL al suelo A (GC-GM), resulta SC-SM (ver: Tabla 124). La incorporación de suelo CL y CaO no mejoró la clasificación granulométrica del afirmado de la Ruta AP-830 (km 0+000-km 12+000).
3. La incorporación de 1.5%, 3.0% y 4.5% de CaO y suelo CL al suelo A, el índice plástico incrementó en 2.0%, 2.2% y 3.0%, respectivamente; por la tanto, al incorporar CaO el índice plástico aumenta.
4. La incorporación de 1.5% de cal y 10 % de suelo CL el CBR disminuyó en 1.92%, y al incorporar 3.0% y 4.5% de CaO y suelo CL, el CBR incrementó en 0.10% y 4.86%, respectivamente; por tanto, al incrementar CaO, el CBR aumenta.
5. La evaluación de rugosidad con el Rugosímetro de Merlín demuestra que al incorporar CaO y suelo CL al suelo A, resulta el índice de rugosidad característico de: 4.58, 5.24,

¹ Suelo C=CL: Arcilla fina gravosa con arena.

² CaO: Óxido de Calcio (Cal).

5.72, 5.97 y 6.16 para los meses de agosto, octubre y diciembre del 2018 y los meses de febrero y mayo del 2019 (ver: Tabla 125), el IRI inicial de los meses de agosto a febrero se conservó en muy buen estado y para los meses siguientes se conservó en buen estado. En el periodo de evaluación el IRI, se ha conservado de acuerdo a los especificado por el MTC.

6. Según la evaluación económica la estabilización granular cuesta 37.20 S/. por m³ y la estabilización química tiene un costo de 51.21 S/. por m³.

Recomendaciones

1. Para futuras aplicaciones de CaO en vías, se recomienda utilizar maquinarias que ofrezcan mayor homogeneidad en la distribución.
2. Evaluar las características mineralógicas de los suelos, además de las características físicas, mecánicas y químicas de los materiales de construcción.
3. Realizar la evaluación del IRI en los tramos de aplicación, tomando en cuenta los factores de clima, para ello, se tendrá que realizar in situ mediciones diarias de las precipitaciones y de la temperatura a la que está sometida el afirmado estabilizado.
4. Utilizar aparatos que midan la polución en los tramos estabilizados, para ello, se tendrá que aplicar el experimento en tramos con longitud mayores a un kilómetro.

Referencias bibliográficas

- Aguila Rodriguez, P. (1998). *Metodología para la determinación de la rugosidad de los pavimentos*. Lima: Camineros S.A.C.
- ASTM E867. (2016). Terminology Relating to Traveled Surface Characteristics. En J. E. Sechún Quispe, *Estudio del índice de rugosidad internacional de la Panamericana Norte - Zona Trujillo, para su mantenimiento* (pág. 17). Trujillo: Universidad Privada Antenor Obregón.
- Beltrán Parra, M. A., & Copado Beltrán, J. A. (2011). *Estabilización de un suelo arcilloso con cal hidratada, para ser utilizada como capa subrasante de pavimentos en la colonia San Juan Capistrano de ciudad de Obregón, Son.* (tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Sonora. Sonora, México: Ninguna Editorial.
- Castillo Parra, B. F. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos de Macas con valores de CBR menores al 5% y límites líquidos superiores al 100%, para utilizarlos como subrasantes en carreteras.* (tesis de maestría). Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador : Ninguna Editorial.
- Condori Ñahuinlla, V., & Huamaní Gamarra, Z. (2018). *Aplicación del estabilizador Z con polímero en el incremento del valor del CBR del material utilizado como afirmado en la carretera departamental AP-103, tramo puente Ullpuhuaycco – Karkatera (L= 14.050 kms) Abancay-Apurímac 2018.* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de los Andes. Abancay- Apurímac: Niguna Editorial.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa.
- Cuadros Surichaqui, C. M. (2017). *Mejoramiento de las propiedades físico - mecánicas de la subrasante en una vía afirmada de la red vial departamental de la región Junín mediante*

- la estabilización química con óxido de calcio – 2016.* (tesis de pregrado). Universidad Peruana los Andes. Huancayo-Junín: Niguna Editorial.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2006). *Manual técnico de mantenimiento periódico para la red vial departamental no pavimentada.* Lima: Resolución Directoral N°015-2006-MTC/14.
- Eggestad, A. (1983). Improvement of cohesive soils Proceedings of VIII ECSMFE. En H. F. Winterkon, *Foundation Engineering Handbook* (págs. 991-1007). Helsinki, Finland: Van Nostrand Reinhold.
- Fernández Loaiza, C. (1982). *Mejoramiento y estabilización de suelos.* México: LIMUSA S.A.
- García Gonzales, A. (2015). *Determinación de la resistencia de la subrasante incorporando cal estructural en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca, 2015.* (tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte. Cajamarca: Niguna Editorial.
- García Huaranca, J. (2015). *Estabilización de suelos arcillosos con cal aplicación a la carretera Tingo Maria-Pucallpa Sector III: Neshuya-Pucallpa.* (Informe de suficiencia). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima: Nigun Editorial.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2010). *Metodología de la Investigación* (Quinta Edición ed.). México: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES,S.A.DE C.V.
- Huezo Maldonado, H. M., & Orellana Martínez, A. C. (2009). *Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador.* (tesis de pregrado).Universidad de El Salvador. San Salvador- El Salvador: Niguna Editorial.

- Jara Anyaypoma , R. (2014). *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca: Ninguna Editorial.
- Jessberger, H. L. (1983). Soil Grouting General Report. *Specialty Session No. 2, Proceedings of the 8th ECSMFE*, 1069-1088.
- Loayza, J. A. (2008). *Estudio climático del proceso de zonificación ecológica y económica de la región Apurímac*. Abancay: Gobierno Regional de Apurímac.
- López Sumarriva, J. J., & Ortiz Pinares, G. (2018). *Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay*. (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de los Andes. Abancay, Apurímac: Ninguna Editorial.
- Menéndez Acurio, J. R. (2016). *Ingeniería de pavimentos*. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Menéndez, J. R. (2003). *Manual técnico de mantenimiento rutinario de caminos con microempresas*. Lima: Organización Internacional del Trabajo 2003.
- Menéndez, J. R. (2003). *Manual técnico: mantenimiento rutinario de caminos con microempresas*. Lima.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones . (2018). *Manual de carreteras mantenimiento o conservación vial*. Lima: MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones . (2018-2021). Plan estratégico sectorial del Sector Transportes y Comunicaciones .
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2005). *Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito*. Lima: DGCF.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos*. Lima: R.D. N° 10-2014-MTC/14.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2015). *Documento técnico soluciones básicas en carreteras no pavimentadas*. Lima: MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de ensayos de materiales*. Lima: MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (21 de diciembre de 2018). Plan estratégico sectorial multianual del Sector de Transportes y Comunicaciones . Lima, Lima, Perú.
- Paterson, W. D. (1987). *Road Deterioration and Maintenance Effects*. USA.
- Rico Rodríguez, A., & Del Castillo , H. (1984). *La Ingeniería de suelos en las vías terrestres*. Mexico: Segunda Edición.
- Rodríguez Moreno, M. A., & Hidalgo Montoya, C. A. (2005). Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4(6), 111-122.
- Sachún Quispe, J. E. (2016). *Estudio del índice de rugosidad internacional de la Panamericana Norte - Zona Trujillo, para su mantenimiento*. Trujillo: Universidad Privada Antenor Orrego.
- Sampedro Rodríguez, Á. (2005). *Tratamientos de suelos con cal. Planteamiento general, diseño y control de calidad* . Madrid: Asociación nacional de fabricantes de cales y derivados de España - ANCADE.
- Sánchez Albán , M. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical de Cantón Tosagua provincia de Manabí*. (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador: Niguna Editorial.

- Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Paterson, W. D. (1986). *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. Washington,: The International Bank for Reconstruction and development.
- Schuster, J. A. (1972). Controlled freezing for temporary ground support and Tunneling Conference. *Proceedings of the 1st North American Rapid Excavation*, 863-894.
- Segall, B. A., O'Bannon, C. E., & Matthias, J. A. (1980). Electrosmosis chemistry and water quality,. *Technical Note, Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 106, No. GT10*, 1148-1152.
- Thenoux Zeballos, G. (2018). Estabilización de bases para caminos de bajo volumen de tránsito. *Congreso Nacional de Pavimentos* (págs. 1-145). Lima: Universidad Católica de Chile.
- Timmermann, C. L. (1984). Stabilization of contaminated soils by in-situ vitrification. *Proceedings, U.S. Department of Energy, Annual Environmental Systems Symposium* (págs. Conf-8403105-1). Bethesda, Maryland: DOE.
- Vásquez Cabrera, A. (2018). *Capacidad de soporte al estabilizar el suelo de la vía cascajal con adición de carbón y cal a nivel de subrasante*. (tesis de pregrado). Universidad San Pedro. Chimbote, Ancash: Niguna Editorial.
- Winterkorn, H. F. (1947). Fundamental similarities between electroosmosis and thermoosmosis. *Proceedings of the Highway Research Board*, 27, 443-455.
- Winterkorn, H. F. (1955). *The Science of Soil Stabilization*. New York: Universidad de Princeton
- Winterkorn, H., & Pamukcu, S. (1991). *Foundation Engineering Handbook*. New York: Van Nostrand Reinbold.
- World Economic Forum. (2017). *The Global Competitiveness Report*. Ginebra: WEF.

Yurdanov, A. P. (1978). Special function of deep thermal treatment of soils and its development.

En H. F. Winterkon, & S. Pamukcu, *Foundation Engineering Handbook* (pág. 338).

Rusia: Van Nostrand Reinhold.

Glosario

A

AASHTO

American Association of State Highway
and Transportation Officials, 16

ASTM

American Society for Testing and
Materials, 22

C

CaO

Óxido de calcio, 6

CBR

California Bearing Ratio, ensayo de
Relación de Soporte de California, 7

CL

Arcilla finagravosa con arena, 6

D

Dv

División, 5

E

Emp

Empalme, 5

G

GC

Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-
arcilla, 139

GM

Gravas limosas, mezclas grava-arena-
limo, 139

GW

Gravas, bien graduadas, mezclas grava-
arena, pocos finos o sin finos, 139

I

IMD

Índice medio diario, 41

IP

Índice plástico, 13

IRI

Índice de rugosidad internacional, 44

	LI		MTC
LL			Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 4
Límite líquido, 13			
	M		P
MDS			PIB
Máxima densidad seca, 114			Producto Interno Bruto, 86
MgO			S
Óxido de magnesio, 32			S.U.C.S
MH			Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, 12
Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos., 10			SCT
			Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 11
ML			SINAC
Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limo arcillosos con ligera plasticidad., 11			Sistema Nacional de Carreteras, 56
			U
mm			um
milímetro, 43			micrómetro, 43