



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño y aplicación de base estabilizada con cemento,  
producida en planta de suelos para el tramo 2 de la  
carretera departamental costanera II**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Civil

**Favio Cesar Morocho Adrianzen  
Gabriela Fernanda Casaverde Farfan**

**Asesor(es):  
Mgtr. Ing. Francisco Benjamín Chávez More**

**Piura, setiembre de 2022**



A Dios y mi familia, por permitirme llegar a esta etapa tan importante de mi vida.

Favio Morocho.

A Dios y a mis padres, quienes con amor guían cada uno de mis pasos.

Gabriela Casaverde.





## Resumen

El presente trabajo de investigación realiza un diseño en laboratorio para bases estabilizadas con cemento, siguiendo las directrices indicadas en el “Manual de Especificaciones Técnicas y Generales” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2013) y en el manual “Soil - Cement Laboratory Handbook” de la Portland Cement Association (PCA, 1992).

Como trabajo previo e imprescindible para garantizar la representatividad de los resultados y disminución de variables que puedan afectar a los mismos, se evaluaron las propiedades de la vía existente, la subrasante y los materiales utilizados en la conformación de la misma. También se analizó una fuente de agua cercana, la cual cumplió con los parámetros exigidos por la normativa vigente.

Para el diseño en laboratorio se analizaron 2 tipos de suelos, A-1-a(0) con índice de plasticidad igual a 5 y A-1-b(0) sin plasticidad, ambos provenientes de canteras locales. Estos fueron sometidos a los ensayos de densidad-humedad. (MTC E 1102), resistencia a la compresión no confinada (MTC E 1103) y módulo de elasticidad estático. (ASTM C 409), con los cuales se determinaron como porcentajes óptimos de cemento 2.5 y 4.6% respectivamente para cada tipo de suelo.

Se determinó en laboratorio que, el Diseño 1, conformado por el tipo de suelo gravoso A-1-a(0) con 2.5% de contenido de cemento en peso, sería el producido con una planta mezcladora de suelos y colocada con pavimentadora a lo largo de los 37 kilómetros que comprende el tramo en estudio. La aplicación del diseño en la base estabilizada se realizó de acuerdo a manuales de procedimientos propuestos por la PCA, la American Concrete Institute (ACI) y recomendaciones recopiladas por distintas entidades sudamericanas con más de 50 años de experiencia en estabilización con suelo – cemento, tales como el Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC), el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA), etc. Además, se explicó a detalle el procedimiento elegido y se aportaron experiencias de las diversas situaciones encontradas durante la construcción de la base estabilizada.

Finalmente se realizaron distintos controles exigidos tanto por normativa peruana como internacional para analizar el comportamiento físico y mecánico de la base estabilizada con cemento y se compararon los resultados de laboratorio y de campo. Además, se realizó un análisis de una patología muy común en los suelos estabilizados con cemento: el fisuramiento reflectivo.

Se concluyó que los manuales de diseño y construcción de la PCA y la ACI son muy eficientes ya que con ellos se lograron variaciones mínimas entre los resultados de laboratorio y de campo. También se encontró que, a pesar de usar un porcentaje de cemento relativamente

bajo (2.5%), la aparición de fisuras es inevitable después de al menos 1 mes de colocado el suelo cemento. Los procedimientos constructivos para la estabilización de suelos con cemento deben tener especial cuidado en climas calurosos como el de la región de Piura y se requieren de altos niveles de control de calidad tanto en planta de suelos como en campo para evitar la aparición de grietas y fisuras.



## **Abstract**

The following research carries out a laboratory design for soil-cement stabilized base courses, according to the guidelines set in the “Technical and General Specifications Handbook” by the Peruvian Transportation and Communication Ministry (MTC, 2013), also, in the “Soil - Cement Laboratory Handbook” by Portland Cement Association (PCA, 1992).

As a previous and essential work to ensure the representativeness of the results and in order to decrease the variables that may affect them, the existing road, the subgrade and the materials used in its conformation were properly evaluated. A nearby water source was also analyzed, which met the parameters required by current regulations.

As for the laboratory design, 2 types of soils were analyzed, A-1-a (0) gravel with a plasticity index equal to 5 and A-1-b (0) non plastic sand, both obtained from local soil quarries. These soils were subjected to Moisture-Density (MTC E 1102), Compressive-Strength (MTC E 1103), Static Elasticity Modulus (ASTM C 409) laboratory tests, with which 2.5 and 4.6%, respectively, were determined as optimal percentages of cement for each type of soil.

It was determined in laboratory, that Design 1, composed by A-1-a (0) gravel soil with 2.5% cement content by weight, would be the one produced with a soil mixing plant and placed with a paver along the 37 kilometers that comprise the road under research. The design application in the stabilized base course was carried out in accordance with the procedure manuals proposed by the PCA, the American Concrete Institute (ACI) and recommendations compiled by different South American entities with more than 50 years of experience in soil – cement construction, such as the Salvadorian Institute of Cement and Concrete (ISCYC), the Argentine Portland Cement Institute (ICPA), etc. In addition, the chosen procedure was explained in detail and experiences of the various situations encountered during the construction of the stabilized base course were provided.

Finally, different controls required by both, Peruvian and international regulations, were carried out to analyze the physical and mechanical behavior of the cement-stabilized base and the laboratory and field results were compared. In addition, an analysis of a very common pathology in cement-stabilized soils was carried out: reflective cracking.

It was concluded that the design and construction manuals of the PCA and the ACI are very efficient since with them, minimal variations between the laboratory and field results were achieved. It was also found that, despite using a relatively low percentage of cement (2.5%), the development of cracks is inevitable after at least 1 month of laying the soil cement floor. The construction procedures for the soil- cement stabilization must take special care in warm

climates such as the one from the Piura region and high levels of quality control are required both in the soil plant and in field to avoid the appearance of cracks and fissures.



## Tabla de Contenido

<b>Introducción.....</b>	<b>19</b>
<b>Capítulo 1 Generalidades.....</b>	<b>21</b>
1.1 Antecedentes. ....	21
1.2 Objetivos. ....	21
1.3 Marco Teórico: .....	23
1.3.1 Suelos. ....	23
1.3.2 Cemento Portland.....	23
1.3.3 Propiedades fundamentales del suelo:.....	24
1.3.4 Clasificación de los suelos:.....	26
1.3.4.1 Sistema de clasificación AASHTO:.....	26
1.3.4.2 Sistema de clasificación SUCS:.....	27
1.3.5 Humedad óptima y máxima densidad seca.....	28
1.3.6 Capacidad soporte en suelos (CBR).....	28
1.3.7 Explanaciones de tierras.....	30
1.3.8 Carreteras y Pavimentos.....	30
1.3.9 Estabilización de suelos. ....	31
1.3.9.1 Suelos estabilizados con cal. ....	31
1.3.9.2 Suelos estabilizados con productos asfálticos.....	32
1.3.9.3 Suelos estabilizados con cemento. ....	32
1.3.10 Ensayos de laboratorio en suelo cemento: .....	34
1.3.10.1 Relación Humedad-Densidad. ....	34
1.3.10.2 Congelamiento – Descongelamiento y Humedecimiento – Secado.....	35
1.3.10.3 Resistencia a la compresión no confinada. ....	35

1.3.10.4 Módulo de elasticidad estático. ....	37
1.3.11 Curado del suelo cemento. ....	37
1.3.12 Contracción en suelo cemento. ....	38
<b>Capítulo 2 Estudio del tramo a intervenir .....</b>	<b>41</b>
2.1 Ubicación temporal y geográfica. ....	41
2.2. Situación del tramo a intervenir. ....	42
2.2.1 Propiedades físicas y químicas de la vía existente. ....	42
2.3 Tramo II a nivel de subrasante. ....	45
2.3.1 Evaluación de la subrasante. ....	45
2.4 Canteras de extracción de material granular. ....	46
2.4.1 Cantera Pariñas. ....	47
2.4.2 Cantera San Pancho. ....	47
2.4.3 Cantera Portachuelos 2. ....	48
2.5 Elección del método de estabilización de suelos. ....	53
2.6 Fuentes de agua. ....	56
<b>Capítulo 3 Diseño del suelo cemento. ....</b>	<b>59</b>
3.1 Cemento Vial Forte Pacasmayo. ....	61
3.2 Material granular proveniente de cantera. ....	62
3.2.1 Diseño 1: 100% Portachuelos 2. ....	62
3.2.2 Diseño 2: 100% San Pancho. ....	62
3.3 Ensayo de densidad-humedad (suelo-cemento). ....	63
3.3.1 Humedad - densidad Diseño 1: 100% Portachuelos 2. ....	63
3.3.2 Humedad – densidad Diseño 2: 100% San Pancho B. ....	64
3.4 Resistencia a compresión no confinada. ....	65
3.4.1 Resistencia a la compresión no confinada – Diseño 1: ....	68
3.4.2 Resistencia a la compresión no confinada – Diseño 2: ....	70
3.5 Módulo de elasticidad estático. ....	72
3.5.1 Módulo de elasticidad – Diseño 01: ....	73
3.5.2 Módulo de elasticidad – Diseño 02: ....	73
3.6 Análisis de resultados y diseño final. ....	74
3.6.1 Porcentaje óptimo de cemento – Diseño 1: ....	74

3.6.2 Porcentaje óptimo de cemento – Diseño 2:.....	74
3.6.3 Selección de diseño final: .....	75
3.6.3.1 Humedad Densidad – Diseño 01 con 2.0% de cemento. ....	76
3.6.3.2 Resistencia a la compresión – Diseño 01 con 2.0% de cemento.....	77
3.6.3.3 Módulo de elasticidad – Diseño 01 con 2.0% de cemento.....	79
<b>Capítulo 4 Aplicación en campo.....</b>	<b>81</b>
4.1.Actividades preliminares.....	81
4.2.Producción de suelo-cemento. ....	81
4.2.1 Planta mezcladora de suelos.....	82
4.2.1.1 Calibración del suministro de material granular:.....	84
4.2.1.2 Calibración de suministro de cemento:.....	85
4.2.1.3 Calibración de suministro de agua: .....	87
4.3. Procedimiento constructivo.....	88
4.4. Curado con emulsión asfáltica.....	93
4.5. Controles en campo: .....	94
4.5.1 Según ACI-230.....	95
4.5.1.1 Contenido de cemento.....	95
4.5.1.2 Contenido de humedad.....	97
4.5.1.3 Verificación visual de mezclado uniforme.....	100
4.5.1.4 Verificación de espesores. ....	101
4.5.1.5 Control de compactación. ....	102
4.5.2 Según el MTC: .....	104
4.5.2.1 Resistencia a la compresión no confinada cada 2000 m3. ....	104
4.5.2.2 Evaluación deflectométrica. ....	106
4.6.Fisuramiento reflectivo.....	108
<b>Conclusiones.....</b>	<b>111</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>113</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>115</b>
<b>Anexo 1. Propiedades del material de cantera Portachuelos 1.....</b>	<b>117</b>
<b>Anexo 2. Propiedades del material de cantera San Pancho.....</b>	<b>122</b>
<b>Anexo 3. Ensayos de laboratorio para la fuente de agua del río Chira .....</b>	<b>124</b>

**Anexo 4. Ficha técnica del producto Cemento Viaforte .....127**  
**Anexo 5. Diagramas de flujo para la calibración de la planta de suelos ..... 129**  
**Anexo 6. Ficha técnica del producto PRIMETEC .....132**



## Lista de tablas

Tabla 1. Composición química típica de propiedades del cemento portland ASTM .....	24
Tabla 2. Clasificación de los suelos según su IP .....	25
Tabla 3. Clasificación de suelos según el sistema AASHTO. ....	26
Tabla 4 Grupos de clasificación de suelos del sistema SUCS .....	27
Tabla 6. Categorías de subrasante según su CBR.....	29
Tabla 7. Requisitos granulométricos y de plasticidad según normas internacionales .....	33
Tabla 8. Ensayos y frecuencias en ensayos en suelo cemento .....	34
Tabla 9. Requerimientos de durabilidad en ensayo de Humedecimiento - Secado.....	35
Tabla 10. Resistencia a la compresión no confinada mínima para suelos estabilizados con cemento, limo, y limo cemento combinado con cenizas volantes .....	36
Tabla 11. Rangos Típicos de resistencia a la compresión simple .....	36
Tabla 12. Información general del Tramo II del proyecto Costanera 2.....	42
Tabla 13. IMDA por tramos en el proyecto Costanera II (PI-101) .....	42
Tabla 14. Metrado ejecutado de Movimiento de Tierras en el tramo II del proyecto. ....	45
Tabla 15. Resumen de resultados de densidad en campo en Tramo II. ....	46
Tabla 16. Registro de excavación: Cantera Pariñas. ....	47
Tabla 17. Guía para la selección de aditivo estabilizador de suelos. ....	54
Tabla 18. Resumen de propiedades de suelos extraídos de canteras locales.....	55
Tabla 19. Rango de cemento requerido en Estabilización Suelo Cemento .....	56
Tabla 20. Requerimientos técnicos y resultados del agua del Río Chira para su uso en suelo-cemento. ....	57
Tabla 21. Contenidos iniciales de cementos exigidos por varias entidades. ....	61
Tabla 22. Resumen de propiedades de mezclas de suelo cemento .....	63
Tabla 23. Resultados de ensayo humedad-densidad en Mezcla 1. ....	63

Tabla 24. Resultados de ensayo humedad-densidad en Mezcla 2.....	64
Tabla 25. Requerimientos mínimos para la evaluación de la resistencia a la compresión simple exigidas en varios países (curado húmedo). .....	66
Tabla 26. Resumen de ensayos de resistencia a la compresión no confinada - Diseño 1 ..	69
Tabla 27. Resumen de ensayos de resistencia a la compresión no confinada - Diseño 2 (Parte1).....	70
Tabla 28. Resumen de ensayos de resistencia a la compresión no confinada - Diseño 2 (Parte2).....	71
Tabla 29. Resumen de ensayo de Módulo de elasticidad estático - Diseño 1 .....	73
Tabla 30. Resumen de ensayo de Módulo de elasticidad estático - Diseño 2 .....	73
Tabla 31. Resumen de ensayos - Mezcla 1.....	74
Tabla 32. Resumen de ensayos - Mezcla 2.....	74
Tabla 33. Resumen de resultados - Diseños 1 y 2. ....	75
Tabla 34. Resultados ensayo humedad densidad - Diseño 1.....	77
Tabla 35. Resumen de ensayo de resistencia a la compresión no confinada con 2.0% de cemento - Diseño 1 .....	78
Tabla 36. Resumen de ensayo de Módulo de elasticidad estático con 2.0% de cemento - Diseño 1.....	79
Tabla 37. Resultados de calibración en planta de suelos. ....	88
Tabla 38. Datos estadísticos contenido de cemento diario producido en planta. ....	97
Tabla 39. Resumen estadístico de % compactación en campo.....	104
Tabla 40. Resumen estadístico de la resistencia a la compresión no confinada a 7 días de curado.....	105
Tabla 41. Resumen estadístico de deflectometría del tramo en estudio.....	108
Tabla 42. Estimación de la severidad de agrietamiento en suelo cemento en función a la resistencia a la compresión no confinada (Rc) a 7 días de curado.....	110

## Lista de figuras

Figura 1. Curvas humedad-densidad de diferentes tipos de suelos compactados según el ensayo Proctor estándar. ....	28
Figura 2. Curado de suelo cemento con emulsión asfáltica (arriba) y mediante aspersión de agua (abajo). ....	38
Figura 3. Ubicación y Tramos de la carretera Costanera 2. ....	42
Figura 4. Ubicación de estaciones de conteo vehicular en el proyecto. ....	43
Figura 5. CBR al 95% a lo largo del Tramo II del proyecto. ....	44
Figura 6. Índice de plasticidad a lo largo del Tramo II del proyecto. ....	44
Figura 7. Ubicación de las 3 canteras de material granular en estudio. ....	46
Figura 8. Mapa de ubicación de Cantera Portachuelos 1 y 2. ....	48
Figura 9. Área seleccionada para exploración de cantera Portachuelos 2. ....	49
Figura 10. Distribución de calicatas realizadas en cantera Portachuelos 2. ....	49
Figura 11. Resultados de calicatas en Sector I de Cantera Portachuelos 2. ....	50
Figura 12. Resultados de calicatas en Sector 2 de Cantera Portachuelos 2. ....	51
Figura 13. Resultados de calicatas en Sector 3 de Cantera Portachuelos 2. ....	52
Figura 14. Estratos en Calicata 2 Sector 1. ....	53
Figura 15. Paquete estructural propuesto para el tramo II. ....	55
Figura 16. Toma de agua en Río Chira, centro poblado San Lucas. ....	57
Figura 17. Métodos de diseño en laboratorio para Suelo-Cemento. ....	59
Figura 18. Tiempo y Clima en la región de Talara, Piura. ....	60
Figura 19. Material granular usado en los Diseños 1 y 2. ....	62
Figura 20. Relación densidad - humedad para distintos porcentajes de cemento - Diseño 164	
Figura 21. Relación densidad - humedad para distintos porcentajes de cemento - Diseño 2. ....	65

Figura 22. Esquema de distribución de probetas para ensayo de resistencia a la compresión.....	67
Figura 23. Formato de codificación de probetas para ensayo de resistencia a la compresión.....	68
Figura 24. Probeta desmoldada después de 24 horas de reposo. ....	68
Figura 25. Evolución de la resistencia a la compresión a través del tiempo - Diseño 1.....	70
Figura 26. Evolución de la resistencia a la compresión a través del tiempo - Diseño 2.....	72
Figura 27. Probeta de suelo cemento de 6x12" con diales de deformación. ....	72
Figura 28 Evolución de la resistencia a la compresión con el porcentaje de cemento – Diseño 2. ....	75
Figura 29. Verificación visual de probetas de 4x8" para diseños 1 y 2.....	76
Figura 30. Relación densidad - humedad para contenidos de cemento de 2 a 5% peso – Diseño 1.....	77
Figura 31. Evolución de la resistencia a la compresión a través del tiempo para contenidos de cemento de 2 a 5% - Diseño 1. ....	78
Figura 32. Evolución de la resistencia a la compresión con el porcentaje de cemento – Diseño 2. ....	79
Figura 33. Equipos usados durante el procedimiento completo de producción de suelo cemento. ....	58
Figura 34. Componentes principales de planta de suelos.....	83
Figura 35. Planta de suelos de tambor rotatorio, usada en el presente trabajo de investigación. ....	83
Figura 36. Diagrama de calibración de suministro de agregados.....	85
Figura 37. Tolva y tornillo transportador sin fin para abastecimiento de cemento. ....	86
Figura 38. Abastecimiento de agua en tanques estacionarios de 10,000 litros de capacidad.....	87
Figura 39. Equipos usados durante el procedimiento completo de producción de suelo cemento .....	89
Figura 40. Colocación de la segunda capa de suelo cemento con esparcidora, km 45+600.	90
Figura 41. Conformación de la base estabilizada (suelo cemento) con motoniveladora, km 39+500. ....	90
Figura 42. Rodillo liso en compactación inicial de suelo cemento recién colocado .....	91
Figura 43. Perfilado de bombeos con motoniveladora en suelo cemento pre compactado. ..	92
Figura 44. Rodillo liso y rodillo neumático utilizados para compactación de suelo cemento .	93

Figura 45. Curado del carril izquierdo a nivel de base estabilizada con cemento, km 23+600.....	93
Figura 46. Superficie curada con emulsión y arena esparcida en la superficie antes de permitir el paso del tráfico. ....	94
Figura 47. Control diario de contenido de cemento en faja transportadora con cuadrante metálico.....	96
Figura 48. Desarrollo del porcentaje de cemento a lo largo del periodo de ejecución del tramo II. ....	96
Figura 49. Medición de contenido de humedad en suelos método del carburo de calcio – MTC E 126.....	98
Figura 50. Control de humedades en campo desde el km 10+880 hasta el 29+000. ....	99
Figura 51. Control de humedades de campo desde el km 29+000 hasta el 47+605.....	99
Figura 52. Superficie de suelo cemento de color homogéneo. ....	101
Figura 53. Control de espesores con escantillón previa compactación del material colocado.....	102
Figura 54. Porcentaje de compactación medido en campo, km 10+880 a 29+981 .....	103
Figura 55. Porcentaje de compactación medido en campo, km 29+981 a 47+640 .....	103
Figura 56. Determinación de densidad in situ con método nuclear .....	104
Figura 57. Determinación de densidad in situ con método nuclear.....	105
Figura 58. Deflectograma de carril derecho, km 10+880 a 29+500.....	106
Figura 59. Deflectograma de carril derecho, km 29+500 a 46+500.....	106
Figura 60. Deflectograma de carril izquierdo, km 10+880 a 29+500.....	107
Figura 61. Deflectograma de carril izquierdo, km 29+500 a 46+500 .....	107
Figura 62. Medición deflectométrica con Viga Benkelman, km 13+200. ....	108
Figura 63. Agrietamiento debido a falla de la base (A) y Agrietamiento reflectivo (B). ....	109



## **Introducción**

El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), después del intenso periodo de lluvias debido al fenómeno del Niño Costero, entre los años 2017 y 2018, emitió el “Resumen ejecutivo histórico final N°018 temporada de lluvias 2017-2018”. En el documento mencionado, se reportaron aproximadamente mil cuatrocientos cincuenta y seis (1456) kilómetros (km) de carreteras afectadas y cuatrocientos dieciocho (418) km de carreteras destruidas. Así como también setecientos treinta (730) km de caminos rurales afectados y ochenta y cinco (85) km de caminos rurales destruidos a nivel nacional.

Se evidencia la importancia de contar con vías durables, resistentes a la exposición a agentes climáticos atípicos y en general, que sean de buena calidad. En ese sentido, es necesaria la investigación de distintos métodos de construcción que no solo garanticen buena calidad, sino que también disminuyan costos, sean de rápido desarrollo y amigables con el medio ambiente.

La estabilización de suelos con cemento es una alternativa que posibilita la reducción de espesores de capas que conforman el paquete estructural de pavimentos sin comprometer la capacidad estructural del mismo. Además, puede ser usada básicamente en cualquier tipo de suelo, exceptuando aquellos con alto contenido de materia orgánica o sales.

Frente a la situación mencionada anteriormente, el presente trabajo de investigación pretende analizar el comportamiento físico y mecánico de materiales granulares pobremente graduados y con alto contenido de grava frente a la mencionada metodología de estabilización de suelos. Esto con la intención de ampliar el conocimiento en cuanto al diseño y aplicación de métodos constructivos relacionados con el suelo-cemento en el país y acelerar la recuperación de infraestructura vial de la región Piura. Además, se pretende proporcionar un aporte en cuanto a la experiencia en el uso y acondicionamiento de una planta de suelos para la producción de la mezcla en cuestión.

En Europa y en países latinoamericanos como Argentina, Colombia y El Salvador, se cuenta con más de 60 años de experiencia en la construcción de caminos de este tipo. Por lo tanto, la tesis propuesta busca promover el uso de esta técnica de estabilización de suelos en el Perú.



## Capítulo 1

### Generalidades

#### 1.1 Antecedentes

La ISCYC (2006) expone que se conoce históricamente el uso que el hombre le ha dado a ciertos tipos de conglomerantes puzolánicos en la estabilización de suelos desde hace más de 5000 años, en las pirámides de Shaanxi en China. También hace 2500 años, en los caminos del imperio romano y en los famosos caminos blancos de los Mayas. Además, en el siglo XIX se desarrollan grandes avances en la producción de aglomerantes, de equipos de construcción, técnicas constructivas, la producción en serie del vehículo automotor, modernización vial de los Estados Unidos de América y algunas vías de Europa. Por tanto, se crearon las condiciones óptimas para la realización de muchos experimentos relacionados a la estabilización de suelos.

En general, se considera que la aplicación del suelo cemento empezó a estudiarse en forma metódica y científica en la década entre 1910 y 1920. En Inglaterra en el año de 1917, el Ingeniero H.E. Brooke Bradley obtuvo excelentes resultados al estabilizar suelos arcillosos en las carreteras del condado de Wiltshire. En los Estados Unidos de América en el mismo año, el ingeniero Joseph Hay Amies creó la patente "Soilamies", una mezcla de suelo y cemento a partir de la cual se incrementó el uso de este método como alternativa de estabilización de suelos en este país. Además, es reconocible el esfuerzo conjunto de la *Portland Cement Association*, *Bureau of Public Roads* y el Departamento de Vialidad del Estado de Carolina del Sur, quienes contribuyeron en gran medida con el desarrollo de esta tecnología al experimentar con la estabilización de varios tramos de carreteras entre 1930 y 1940.

Luego de la segunda guerra mundial, en España y países latinoamericanos como Argentina, Colombia y El Salvador se recopilaron las primeras experiencias con la estabilización de suelos para carreteras, los cuales llevan actualmente más de 50 años construyendo este tipo de caminos. Por su parte, Alemania, Francia y Australia lograron un continuo crecimiento en el uso del suelo cemento a partir de 1950.

Desde 1980 a la fecha, el uso del suelo cemento se ha generalizado alrededor del mundo, en la actualidad se cuenta con modernos equipos de gran potencia y rendimiento que facilitan el trabajo en campo y garantizan la calidad de mezclado y colocación. Sin embargo, todavía existen algunas dificultades por superar referente al conocimiento de este material, por lo que es de esperar que este siga incrementándose a través del tiempo.

La estabilización de bases suelo- cemento supone un avance en comparación con las bases granulares debido al aumento en la durabilidad del paquete estructural que se genera al adicionar cemento en las proporciones adecuadas a la base, el cual contribuye a mejorar la capacidad de soporte y resistencia de la misma. Además, permite reducir el espesor de las capas y el uso de material local debido a que esta técnica puede aplicarse en cualquier tipo de suelo, siempre y cuando cumpla con las propiedades descritas en la Sección 301.A.02 del “Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG 2013”.

Entre las tesis que fueron consultadas para el presente trabajo de investigación, destaca la siguiente:

- SERIGOS, Pedro Antonio (2009) en su publicación “Rigidez a baja deformación de mezclas de suelo de la formación pampeano y cemento portland”, evaluaron las propiedades en la estabilización de suelos limosos de baja plasticidad con contenidos de cemento de 4, 6, 8 y 10% en la localidad de Ranelagh, Buenos Aires, Argentina. Se logró superar los requerimientos de resistencia a la compresión con porcentajes entre 4 y 6% de cemento con el hallazgo de que la dispersión entre los resultados aumentaba con un mayor contenido de cemento. El diseño no superó los requerimientos mínimos del ensayo de humedecimiento y secado. Por lo tanto, recomiendan realizar un estudio con porcentajes de cemento mayores a 10%.
- RAMOS GUZMAN, Betzabe y TORRES SUELDO, Jose Antonio (2012) en su tesis “Mejoramiento del material afirmado de las canteras adyacentes para el terraplén de la carretera Lircay – Ccochaccasa” estudiaron el comportamiento de mezclas de suelo cemento con material afirmado con contenidos de cemento de 1, 2 y 3%. El material fue obtenido de las canteras de Uhcupampa y Ccochaccasa, en la provincia de Angaraes, Huancavelica. Este suelo, con clasificación A-1-a(0) según el sistema AASHTO, fue estabilizado con 1% de cemento incrementando la densidad seca de 2.16 gr/cm<sup>3</sup> a 2.22 gr/cm<sup>3</sup> y el índice CBR de 48% a 48.5%. Solo se usó el ensayo CBR como parámetro para evaluar la calidad de la base estabilizada.
- CALLE RENTERÍA, Edixon Jesús Antonio y OLIVERA VELÁSQUEZ, Julio César (2019): “Uso de la técnica base suelo cemento en el pavimento flexible de la Av. Los Algarrobos entre Av. R y Av. Las amapolas - 26 de octubre - Piura”. Determinaron que la estabilización de suelos de tipo A-2-4 se logró con un contenido de cemento de 2.4% en peso. Proponiendo un paquete estructural de base y carpeta asfáltica de 8” y 4” respectivamente, como alternativa al paquete propuesto inicialmente, compuesto por base, subbase y carpeta asfáltica de 7”, 11” y 4” respectivamente sin estabilización de suelos con cemento. Sin embargo, en este trabajo de investigación también se utiliza el CBR como la única variable para determinar el porcentaje óptimo de la mezcla.
- GARCÍA TORO, Jonatan Rodrigo (2019): “Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de caolín”, en donde se realiza un estudio del comportamiento mecánico de una mezcla de suelo-cemento con el uso de caolín, un tipo de arcilla, en laboratorio. Se encontró que son necesarios contenidos de cemento mayores a 12% para el cumplimiento de la resistencia mínima requerida. Además de que este tipo de arcillas, mezcladas con porcentajes menores a 4% en estado de saturación se disuelven en un lapso menor a 24 horas.
- VELÁSQUEZ PEREYRA, César (2018) presenta en su tesis “Influencia del cemento portland tipo i en la estabilización del suelo arcilloso de la subrasante de la avenida

Dinamarca, sector La Molina” en la región de Cajamarca, la evaluación de la estabilización de arcillas orgánicas de tipo como A-7-6 para subrasantes, con contenidos de cemento de 5%. En el estudio se logró disminuir el índice de plasticidad de 44 a 15%, el índice de contracción de 27 a 19% y mejorar el CBR de 1.30 a 13.75% resultando en una subrasante regular a buena.

## **1.2 Objetivos:**

El objetivo general del trabajo de investigación será diseñar una base estabilizada con cemento Portland según normativa nacional e internacional y analizar el comportamiento físico-mecánico a través de su aplicación en el tramo 2 de la carretera departamental Costanera II (PI-101), C.P. Negritos-C.P. Miramar, distritos de La Brea y Vichayal, provincias de Talara y Paita en la región de Piura.

En cuanto a los objetivos específicos que contribuirán al desarrollo de la investigación, son los siguientes:

- Ejecutar ensayos de laboratorio para la caracterización de los agregados que se usarán en el diseño.
- Determinar el porcentaje de cemento óptimo para la mezcla suelo – cemento con el uso de material granular local.
- Verificar las propiedades físicas de las mezclas resultantes del diseño en laboratorio.
- Aplicar las instrucciones y recomendaciones de manuales internacionales en cuanto a los procedimientos constructivos relacionados al suelo cemento.
- Evaluar y comparar los resultados de los ensayos de control de calidad en campo de la base estabilizada colocada en obra con los resultados obtenidos en el diseño en laboratorio. Así como el desempeño del pavimento colocado y problemática referente a fisuramiento de bases estabilizadas con cemento.

## **1.3 Marco Teórico:**

### **1.3.1 Suelos.**

Sowers (1972) define la tierra o suelo, en ingeniería, como cualquier material no consolidado, compuesto por distintas partículas sólidas con gases o líquidos incluidos. Además, explica que el suelo contiene una amplia variedad de materiales tales como grava, arena, limo y arcilla que provienen de distintos orígenes y pueden haber atravesado distintos procesos físicos o químicos. Los suelos pueden ser mezclas bien definidas de unos cuantos materiales específicos o mezclas heterogéneas de cualquier cosa.

En cuanto a la ingeniería, Terzaghi y Peck (1962) consideran que el suelo es agregado natural de granos minerales que pueden ser separados por medios suaves, tales como la agitación en agua. Roca, al contrario, es un agregado de minerales ligados por fuertes fuerzas cohesivas y permanentes. Como los términos “fuertes” y “permanentes” están sujetos a diferentes interpretaciones, el límite entre suelo y roca es naturalmente arbitrario.

### **1.3.2 Cemento Portland.**

Es un material finamente pulverizado que no es en sí mismo conglomerante, sino que desarrolla esta propiedad como resultado de la hidratación cuando se efectúan las reacciones químicas entre los minerales del cemento y el agua.

Fue descubierto en 1756 por John Smeaton, durante el estudio de algunas calizas arcillosas en la reconstrucción del faro de Eddystone, Reino Unido. Sin embargo, el nombre de "cemento portland" fue otorgado por Joseph Aspdin con la patente y el desarrollo del material con el mismo nombre, en 1824. Hoy en día, El nombre Portland agrupa a una familia de cementos con propiedades similares. La mayor cantidad de concreto usado hoy día está hecho con cementos Pórtland.

El cemento Portland como un aglomerante hidrófilo, resultante de la calcinación de rocas calizas, areniscas y arcillas, de tal manera que se obtenga un polvo muy fino que en presencia de agua endurece, adquiriendo propiedades resistentes y adherente (Pasquel, 1998). Los tipos de cemento portland son clasificados por la ASTM según las proporciones de sus componentes, las cuales se detallan en el siguiente cuadro:

Tabla 1. Composición química típica de propiedades del cemento portland ASTM

Elemento Químico	Tipo de cemento				
	I	II	III	IV	V
Silicato tricálcico $C_3S$ (%)	50	45	60	25	40
Silicato dicálcico $C_2S$ (%)	25	30	15	50	40
Aluminato tricálcico $C_3A$ (%)	12	7	10	5	4
Aluminoferrito tetracálcico $C_4AF$ (%)	8	12	8	12	10
$CSH_2$ (%)	5	5	5	4	4
Fineza (superficie específica Blaine ( $m^2/kg$ ))	350	350	450	300	350
Resistencia a la compresión <sup>1</sup> (por 1 día, mPa)	7	6	14	3	6
Calor de hidratación (7 días, J/g)	330	250	500	210	250

<sup>1</sup> Medida en cubos de mortero de 2 pulgadas (ASTM C 109).

Además, existen cementos portland modificados los cuales se obtienen por la adición de estos materiales durante el quemado del clinker, en el proceso de fabricación del mismo, los cementos portland puzolánicos y con escoria con algunos ejemplos de ellos. Mientras que la ACI (2009) sugiere el uso de cementos portland tipo I o II de la ASTM C150, también Cementos tipo GU o MS de la ASTM C1157 para la estabilización de suelos.

### 1.3.3 Propiedades fundamentales del suelo

Houben y Guillar (1994) explican que las propiedades del suelo son diversas. Dependiendo del uso y aplicación, algunas de ellas serán más relevantes que otras. Por ello, se pueden definir cuatro como las propiedades fundamentales del suelo, mientras que las demás pueden considerarse como generales o complementarias para usos más específicos. Las propiedades son las siguientes:

- Textura del suelo: La textura refleja la granulometría del suelo. Ésta es la distribución del tamaño de partículas sólidas que componen el suelo. Según este tamaño de las partículas es que se tendrán propiedades diferentes y un comportamiento particular. La clasificación de los suelos según su textura es:

- a. Grava. – son rocas de entre 2 y 200 milímetros de diámetro. Las más jóvenes tienen forma angular, mientras que las que han sufrido alteraciones causadas por el entorno, suelen tener forma redondeada.
  - b. Arena. – cuyo diámetro varía entre 0.06 y 2 mm y está compuesta por partículas de sílice y cuarzo. Se distinguen por su gran fricción interna y la poca cohesión entre sus partículas. Tienen una estructura abierta y gran permeabilidad.
  - c. Limo. – las partículas que conforman este grupo varían entre 0.002 y 0.06 mm Son partículas más pequeñas que las arenas, pero tienen características similares en cuanto a la fricción y permeabilidad.
  - d. Arcilla. – tiene una granulometría menor a 0.002 mm cuya naturaleza química modifica sus propiedades físicas. Sus partículas son láminas alargadas con una superficie específica sumamente, lo cual lo hace sensible a los efectos del agua y le confiere propiedades de hinchazón, contracción, impermeabilidad, etc.
  - e. Materia orgánica. – comprende componentes vegetales de distintos tamaños y formas.
- Plasticidad: La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Crespo (2004). Según el MTC (2014), los límites de consistencia o límites de Atterberg, establecen cuan sensible es el comportamiento de un suelo en relación con su contenido de humedad. Los límites correspondientes a los tres estados de consistencia (líquido, plástico o sólido) según su humedad. Estos límites son:
    - a. Límite líquido (LL). Es el contenido de humedad del suelo cuando este pasa del estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse.
    - b. Límite plástico (LP). Es el contenido de humedad del suelo cuando este pasa de un estado plástico a un estado semisólido y empieza a romperse.
    - c. Límite de contracción (LC). Es el contenido de humedad del suelo cuando este pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad.

El Índice de Plasticidad (IP) se calcula como la diferencia entre el LL y el LP y es una medida de la sensibilidad de la tierra a las variaciones de humedad. La PCA (1995) sostiene que los suelos con un alto índice de plasticidad tienen cambios de volumen perjudiciales durante procesos de humedecimiento y secado, que pueden conducir posteriormente al deterioro del pavimento. El suelo también puede clasificarse según su índice de plasticidad:

Tabla 2. Clasificación de los suelos según su IP

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

Fuente: Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos (MTC, 2014). p. 34.

- **Compactibilidad:** Esta propiedad define su capacidad para ser comprimida al máximo y su correspondiente contenido de humedad óptima, relativos a los resultados obtenidos según métodos y energías de compactación estandarizadas. Este parámetro es importante por la estrecha relación que existe entre la densidad y la porosidad.
- **Cohesión:** La cohesión representa la capacidad de un suelo unidad de mantener sus partículas unidas frente a un esfuerzo de tensión. Esta cohesión depende de las características adhesivas o de cementación de las partículas finas. Es decir, que varía según el contenido de arcilla.

### 1.3.4 Clasificación de los suelos

**1.3.4.1 Sistema de clasificación AASHTO.** El sistema de clasificación de suelos AASHTO fue originalmente propuesto para el “*Highway Research Board’s Committee on Classification Materials for Subgrades and Granular Type Roads*” en 1945. Se desarrolló para propósitos de construcción de carreteras. Describe un procedimiento para la clasificación del suelo dentro de siete grupos, basados en la distribución del tamaño de partículas, límite líquido e índice de plasticidad. A continuación, se presenta un esquema para reconocer cada una de las clases de suelo según el sistema.

Tabla 3. Clasificación de suelos según el sistema AASHTO.

Clasificación general	Materiales granulares 35% o menos pasa el tamiz No. 200							Materiales limo arcillosos Más del 35% pasa el tamiz No. 200			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7*
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Análisis granulométrico, % que pasa											
No. 10	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	máx.										
No. 40	30	50	51	-	-	-	-	-	-	-	-
	máx.	máx.	máx.								
No. 200	15	25	10	35	35	35	35	36	36	36	36 mín.
	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	mín.	mín.	mín.	
Características de la fracción que pasa el tamiz No. 40											
LL	-	-	-	40	41	40	41	40	41	40	41 mín.
				máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	
IP	6	NP	10	10	10	10	10	10	10	11	11 mín.
	máx.		máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	mín.	
Constituyentes típicos significativos	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa				Suelo limoso		Suelo arcilloso	
Calificación general como subrasante	Excelente a bueno						Malo a pobre				

\*IP del grupo A-7-5 es menor e igual que LL menos 30; IP del grupo A-7-5 es mayor e igual que LL menos 30.

Fuente: AASHTO (2004) M 145 – 91. p. 2.

Dada la finalidad de pavimentación, este sistema valora los suelos con gravas porque éstos ofrecen gran capacidad resistente a las cargas de tráfico y con un contenido de finos mínimo con plasticidad, para facilitar las labores de compactación.

**1.3.4.2 Sistema de clasificación SUCS.** Fue propuesto inicialmente por Arthur Casagrande en 1942 y fue adoptado finalmente por la *US Army Corps of Engineers* (USACE). El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) se desarrolló para propósitos de uso en mecánica de suelos y construcción de edificaciones. En general clasifica los suelos en 4 grandes categorías, basados en su tamaño de partículas y sus características de plasticidad y cohesión: gravas, arenas, limos y arcillas.

Las gravas y arenas se especifican como bien o pobremente graduadas, mientras que los limos y arcillas como de alta o baja plasticidad. La ASTM D 2487 contiene tablas para la identificación de cada uno de los grupos de suelos en base a los resultados obtenidos en los ensayos de la granulometría por tamizado y límites de Atterberg. Los grupos en los que se clasifican los suelos son los siguientes:

Tabla 4 Grupos de clasificación de suelos del sistema SUCS

Tipo de suelo	Símbolo de grupo	Nombre de grupo
Suelos de grano grueso. (más de 50% retenido en el tamiz No. 200)	GW	Grava bien gradada
	GP	Grava mal gradada
	GM	Grava limosa
	GC	Grava arcillosa
	SW	Arena bien gradada
	SP	Arena mal gradada
	SM	Arena limosa
	SC	Arena arcillosa
Suelos de grano fino. (50% o más pasa el tamiz No. 200)	CL	Arcilla inorgánica de baja plasticidad
	CL	Limo inorgánico de baja plasticidad
	OL	Arcilla orgánica
		Limo orgánico
	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad
	MH	Limo inorgánico de alta plasticidad
Suelos altamente orgánicos	OH	Arcilla orgánica
		Limo orgánico
	Pt	Turba

Fuente: Adaptación de La ASTM D 2487 – 11. p. 2.

Tabla 5. Correlación de los tipos de suelos AASHTO - SUCS

Clasificación de suelos AASHTO AASHTO M-145	Clasificación de suelos SUCS ASTM D-2487
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SP, SP
A-2	GM, GC, SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

Fuente: MTC (2014). Sección suelos y pavimentos. p. 33

Para efectos prácticos, el MTC (2014) resume la correlación entre ambos sistemas de clasificación de suelos tal y como se muestra en la Tabla 5.

### 1.3.5 Humedad óptima y máxima densidad seca

Existe una estrecha relación entre la humedad y la densidad que se puede lograr en los distintos tipos de suelos. Durante el proceso de compactación, las partículas de suelo se mueven y se reorientan con una disposición cada vez más compacta, ocupando los espacios vacíos que existían en el estado suelto del suelo sin compactar, aumentando así su densidad.

Kraemer (2004), explica que el ingeniero R. R. Proctor en 1929, puso en evidencia la relación entre la humedad y la densidad usando condiciones de ensayo estandarizadas. Con las cuales se obtuvieron los gráficos que usamos hoy en día para encontrar el contenido de humedad necesario para alcanzar la máxima densidad seca para distintos tipos de suelos.

Además, afirma que la densidad seca depende fundamentalmente de la humedad del suelo durante la compactación, de la energía de compactación y el tipo de suelo. Sin embargo, si el contenido de agua es muy elevado, esta ocupa los vacíos entre las partículas del suelo, absorbiendo la energía de compactación y dificultando la compactación.

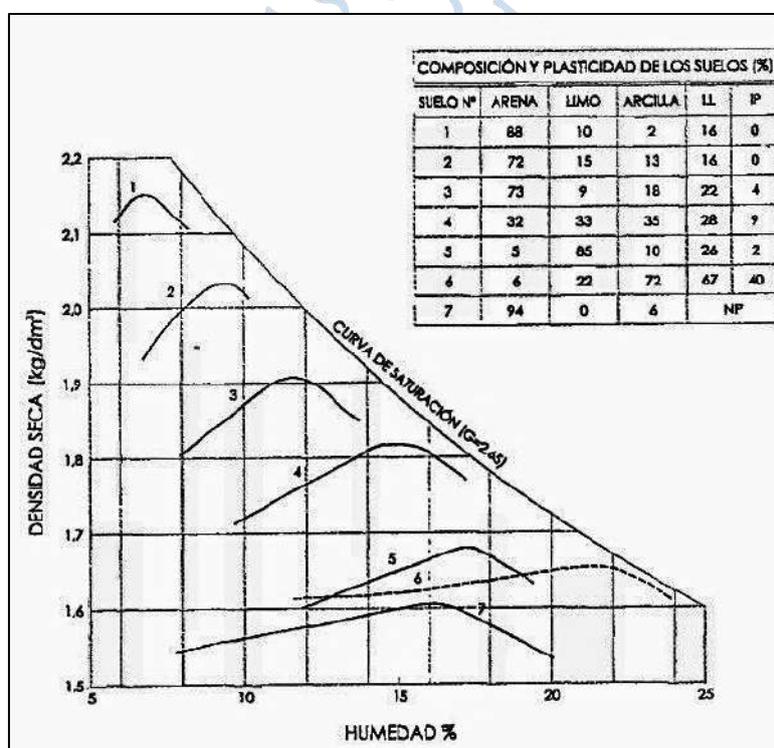


Figura 1. Curvas humedad-densidad de diferentes tipos de suelos compactados según el ensayo Proctor estándar.  
Fuente: Ingeniería de carreteras. (Kraemer et al., 2004).

Actualmente en nuestro país se utilizan dos ensayos. Proctor estándar y modificado. La principal diferencia entre el ensayo proctor estándar (MTC E 116) y el proctor modificado (MTC E 115) es que el primero es recomendado para suelos finos usados como subrasante o subbase y el segundo para suelos granulares usados como base. Además, la energía de compactación es distinta (diferente peso de martillo y altura de caída).

### 1.3.6 Capacidad soporte en suelos (CBR)

Kraemer et al. (2004) define el CBR o capacidad de soporte a la resistencia de los suelos a la deformación causada por cargas de tráfico. Los principales factores que influyen en la capacidad soporte de los suelos son:

- La resistencia al esfuerzo cortante de los materiales que los constituyen, que depende a su vez de la densidad alcanzada y de su humedad puesta en obra.
- La humedad de los suelos. En general, a mayor humedad en el suelo, este presentará una menor capacidad soporte.

El MTC (2014) a través del ensayo MTC E 132 se determinará el CBR, el cual estará referido al 95% de la máxima densidad seca y a una penetración de carga de 2.54 milímetros.

Existen distintos requisitos de CBR para los materiales utilizados según la capa del pavimento. Sin embargo, para la subrasante se debe tomar en cuenta la inevitable variabilidad en los suelos a lo largo del trazo de una carretera, su grado de compactación y contenido de humedad, lo cual causará también variaciones en los valores de CBR. Por lo tanto, sugiere sectorizar tramos con CBR similares y tomar siempre valores razonablemente desfavorables (realistas y conservadores) teniendo en cuenta que estos representan las máximas deformaciones que pueden ser resistidas por la capa de suelo compactado en cuestión.

Se consideran valores de CBR similares u homogéneos aquellos que se encuentran en un determinado rango, de acuerdo al siguiente cuadro.

Tabla 6. Categorías de subrasante según su CBR

Categorías de Sub rasante	CBR
$S_0$ : Subrasante inadecuada	CBR < 3%
$S_1$ : Subrasante insuficiente	$3\% \leq \text{CBR} < 6\%$
$S_2$ : Subrasante regular	$6\% \leq \text{CBR} < 10\%$
$S_3$ : Subrasante buena	$10\% \leq \text{CBR} < 20\%$
$S_4$ : Subrasante muy buena	$20\% \leq \text{CBR} < 30\%$
$S_5$ : Subrasante excelente	CBR $\geq 30\%$

Fuente: MTC (2014). p. 37.

Además, exige que los suelos a una profundidad menor a 0.60 metros por debajo del nivel de la subrasante, deben tener un CBR mayor a 6%; de lo contrario, debe ser evaluada la estabilización de suelos o el reemplazo del mismo.

Es importante mencionar que el MTC (2013) sugiere que los materiales cementados, cuyas propiedades varían con el tiempo, deben ser ensayados bajo especial cuidado y buscando la mayor representatividad posible de las condiciones de servicio a largo plazo. Por lo tanto, este ensayo no es considerado por ninguna fuente como criterio de evaluación durante el diseño de suelo cemento para estabilización de bases.

### 1.3.7 Explanaciones de tierras

Se denomina explanación, al movimiento de tierras, conformado por cortes y rellenos (terraplén), para obtener la plataforma de la carretera hasta el nivel de la subrasante del camino. (MTC, 2014).

- Terraplén. - También se conoce como relleno y es la parte de la explanación situada sobre el terreno preparado. La base y el cuerpo del terraplén será conformado en capas de hasta 0.30 metros y compactadas al 90% de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado. Mientras que la corona es la parte superior del terraplén, la cual tendrá un espesor mínimo de 0.30 metros y será conformada en capas de 0.15 metros cada una.
- Corte. - Es la parte de la explanación constituida por la excavación del terreno natural hasta alcanzar el nivel de subrasante del camino. El fondo de las zonas excavadas se preparará mediante escarificación en una profundidad de 0.15 metros, de acuerdo a diseño geométrico de la vía y se compactará al 95% de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado

### 1.3.8 Carreteras y Pavimentos

Según el MTC (2018) las carreteras son caminos para el tránsito de vehículos motorizados de por lo menos dos ejes. Las características geométricas, tales como: pendiente longitudinal, pendiente transversal, sección transversal, superficie de rodadura y demás elementos de la misma, deben cumplir las normas técnicas vigentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

El pavimento es la estructura principal que compone las carreteras sobre la cual transitan los vehículos. Usualmente está compuesto por 3 capas superpuestas: subbase, base y carpeta de rodadura las cuales se colocan de manera consecutiva sobre la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno). El MTC (2014) define las capas relacionadas al pavimento de la siguiente manera:

- Sub rasante: es el terreno de fundación del pavimento, sobre esta superficie se colocarán las demás capas. La subrasante deberá tener un CRB  $\geq 6\%$ , de lo contrario se clasificaría como una subrasante pobre o inadecuada, siendo necesario considerar un mejoramiento de suelos a través de suelos.
- Subbase: capa de materiales granulares provenientes de cantera u otras fuentes, que pueden ser obtenidos en forma natural o procesados. Estos materiales se colocan sobre la superficie preparada de la subrasante, hacia la cual transmiten las cargas de tránsito. Tiene un espesor de diseño y usualmente consiste en material granular de calidad media (CBR  $\geq 40\%$ ). Además, se utiliza como controlador de la capilaridad del agua y por lo tanto actúa como capa de drenaje.
- Base: capa de materiales granulares, que pueden ser obtenidos en forma natural o procesados, con inclusión o no de algún tipo de estabilizador o ligante. Se coloca encima de la subbase o sobre la subrasante. El material granular colocado en esta capa, cuyo espesor corresponde al diseño previo en laboratorio, debe tener un CBR  $\geq 80\%$ .
- Carpeta de rodadura: Es la capa superior del pavimento y, por lo tanto, recibe directamente las cargas de tránsito. El material que compone esta capa puede ser de tipo bituminoso (pavimento flexible), de concreto armado (pavimento rígido) o de adoquines (pavimento semirrígido).

El pavimento debe ser capaz de resistir tanto el peso propio como las tensiones procedentes de las cargas de tráfico vehicular sin desarrollar deformaciones diferidas considerables. De lo contrario, podrían afectar la regularidad superficial del pavimento y, en definitiva, sus condiciones funcionales. (Kraemer et al., 2004).

### **1.3.9 Estabilización de suelos**

Los tipos de suelos que se pueden encontrar en las carreteras y zonas aledañas son diversos en cuanto a sus propiedades físicas y químicas. Algunos tendrán un mejor o peor desempeño como pavimento. Para estos últimos se propone la estabilización de suelos.

La USACE (1984), define la estabilización de suelos como el proceso de mezclado de materiales con el suelo, con el objetivo de mejorar las propiedades que se determinen pertinentes en el mismo. Los propósitos con los cuales se realiza la estabilización para pavimentos, son el mejoramiento de la calidad (en cuanto a la resistencia y durabilidad), y la reducción de espesores de diseño en las capas de un pavimento.

Según Kraemer et al. (2004), la estabilización puede ser mecánica puede realizarse con mezcla de dos o más suelos de diferentes características, a fin de obtener un suelo de características suficientes en cuanto a granulometría, plasticidad, permeabilidad, etc. En otras ocasiones se incorporan aditivos que actúan física o químicamente sobre las propiedades del suelo.

La estabilización puede ser de dos tipos: Química y Mecánica.

- Mecánica. La unión se facilita aplicando medios físicos o mecánicos. Puede ser de dos tipos: la adición de fibras, tanto naturales (paja, pelos, hierbas, etc.) como artificiales (fibras de polímeros); y la compactación, que puede hacerse por prensado o por extrusión.
- Química. Se realiza adicionando una sustancia química que cambia las propiedades del suelo desde su composición química. Las adiciones más usadas son la cal apagada, cemento, polímeros, aceites, grasa, emulsiones asfálticas, ceras, asfalto, yeso, sal, entre otras.

**1.3.9.1 Suelos estabilizados con cal.** Kraemer et al. (2004) define la estabilización de suelos con cal es la mezcla de cal aérea (viva o apagada) y agua. Los suelos más apropiados para estabilizar con cal son los de granulometría fina, de plasticidad notable y alta humedad natural. Según el tipo de suelo, los porcentajes de cal que se suelen usar están entre de 2 a 7% del peso seco del suelo.

Al mezclar el suelo con la cal, se produce una reacción rápida de floculación e intercambio iónico seguida de otra lenta de tipo puzolánico, con formación de nuevos productos químicos. La sílice y la alumina de las partículas del suelo se combinan con la cal en presencia de agua para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles.

El MTC (2014) señala que los tipos de suelos a usar para estabilización de suelos pueden ser afirmados, provenientes de excavaciones o zonas de préstamo, agregados locales o la mezcla entre ellos.

Además, afirma que después de la estabilización de suelos con cal, se suelen apreciar los siguientes cambios en las propiedades de la mezcla.

- Reducción en el índice de plasticidad.
- Reducción considerable del ligante natural del suelo debido a la aglomeración de partículas.
- Obtención de un material más trabajable.
- Rapidez en el secado de suelos húmedos y por lo tanto, permite una adecuada compactación.
- Incremento de la resistencia a la compresión simple en función del tiempo y calidad del curado.
- Incremento de la capacidad soporte del suelo (CBR).
- Incremento de la resistencia a la tracción del suelo.
- Impermeabilización que impide la filtración de aguas de lluvia o la capilaridad para las aguas subterráneas.

**1.3.9.2 Suelos estabilizados con productos asfálticos.** Según la USACE (1984), Generalmente este tipo de estabilización de suelos se realiza con materiales bituminosos como cemento asfáltico o emulsiones asfálticas. El tipo de bitumen utilizado depende del tipo de suelo a estabilizar, los métodos constructivos y las condiciones climáticas.

En cuanto a los suelos a utilizar, El MTC (2014) sugiere ciertos tipos de suelos como los más propicios para la estabilización con materiales bituminosos. Estos son los granulares bien gradados con reducida plasticidad ( $LL < 30$  e  $IP > 10$ ) y con pocos finos, cual material pasante por la malla N°200 está por debajo del 20%.

Además, que la cantidad de asfalto utilizado varía entre 4 y 7% siendo los suelos finos y arcillosos los de mayor cantidad de bitumen exigido. El poder cementante del asfalto permite fijar los agregados en posiciones adecuadas para transmitir las cargas aplicadas a las capas inferiores. La mezcla entre el suelo y el producto asfáltico puede tener como finalidad lo siguiente:

- Un aumento en su estabilidad por las características aglomerantes del ligante que envuelve las partículas del suelo.
- Una impermeabilización del suelo, haciéndolo menos sensible a los cambios de humedad y por tanto más estable en condiciones adversas.

**1.3.9.3 Suelos estabilizados con cemento.** La PCA (2001) define el suelo cemento como una mezcla pulverizada de suelo y cantidades medidas de cemento portland y agua, compactadas hasta una alta densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se vuelve un material de pavimentación resistente y durable. Una mezcla bituminosa se debe colocar sobre la base completa para completar el pavimento.

El método de estabilización de suelos con cemento es usado en casi todos los tipos de suelos según diversas fuentes, permitiendo el uso de materiales obtenidos in situ o en canteras locales. Incluso la base granular de una vieja carretera puede ser reciclado para ser estabilizada, con o sin superficies bituminosas.

La ISCYC (2006), recomienda básicamente cualquier tipo de suelo a excepción de los suelos orgánicos y con altos contenidos de sales que puedan desempeñar el comportamiento del cemento. En la siguiente tabla, establece una comparación entre los requisitos para algunas propiedades del suelo, exigidos por distintas entidades.

Tabla 7. Requisitos granulométricos y de plasticidad según normas internacionales

Normas Internacionales	Requisitos granulométricos	Requisitos de plasticidad
El Salvador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasa malla N°4 50 - 100%</li> <li>• Pasa malla N°200 5 - 35%</li> <li>• Tamaño máximo 50mm (2")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LL &lt; 40%</li> <li>• IP &lt; 8%</li> </ul>
Colombia INVIAS (2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasa malla N°4 &lt; 40%</li> <li>• Pasa malla N°200 &lt; 50%</li> <li>• Tamaño máximo 63mm (2 1/2")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LL &lt; 35%</li> <li>• IP &lt; 15%</li> </ul>
Canada Saskatchewan Highways and Transportation (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasa malla N°200 &lt; 30%</li> <li>• Tamaño máximo 63mm (2 1/2")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IP &lt; 10%</li> </ul>
Estados Unidos PCA (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño máximo 50 mm (2")</li> </ul>	-
Organización de las Naciones Unidas ONU	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasa malla N°4 ≈ 70%</li> <li>• Pasa malla N°200 &lt; 10%</li> </ul>	-
ACI 230	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasa malla N°4 &lt; 55%</li> <li>• Pasa malla N°200 5 – 35%</li> <li>• Tamaño máximo 50 mm (2")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IP &lt; 8%</li> </ul>
Instituto Mexicano del Transporte IMT	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LL 45 - 55%</li> <li>• IP &lt; 15%</li> </ul>
Experiencias en Sudáfrica	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IP &lt; 8%</li> </ul>
España	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LL &lt; 30%</li> <li>• IP &lt; 15%</li> </ul>

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto, Revista del ISCYC (2006) p. 11.

Además, menciona que las principales ventajas que se obtienen al estabilizar un suelo con cemento, se ven reflejadas también en la estructura del pavimento. Las ventajas son las siguientes:

- Es un material durable.
- Permite el uso de materiales locales.
- Causa un menor impacto ambiental debido al que existe una menor dependencia de la explotación de bancos de materiales.
- Produce una mayor rigidez y distribución de carga aplicada al pavimento.
- Resistencia a los agentes atmosféricos.
- Aumento de resistencia y menores intervenciones de mantenimiento.

Sin embargo, sugiere tener en cuenta los inconvenientes más notables que presenta el uso de suelo cemento como material de estabilización:

- Si no se diseña ni se controla correctamente, podría ocurrir un exceso de esfuerzos internos por contracción del material y en consecuencia, un agrietamiento que se refleje en las capas bituminosas.
- El tiempo para ejecutar el mezclado, conformación y compactación está limitado por el tiempo de fraguado del cemento.

- Las capas de suelo cemento necesitan carpetas de rodadura de materiales bituminosos tales como asfalto, tratamientos superficiales, o capas de rodadura con concreto hidráulico, ya que tienen una limitada resistencia al desgaste.
- Se deben realizar las pruebas necesarias en los suelos para determinar el tipo de cemento y para elegir los mecanismos de mezclado.

### 1.3.10 Ensayos de laboratorio en suelo cemento

La PCA (1992) afirma que la forma en la que se determina el comportamiento de los suelos con el cemento es mediante ensayos de laboratorio realizados en probetas hechas con la mezcla de ambos materiales. La cantidad de ensayos de laboratorio requeridos depende de los requerimientos de la entidad constructora, el número de tipos de suelos encontrados y la magnitud del proyecto.

El MTC (2013), exige los siguientes ensayos como mecanismo de control, que se deben realizar en el suelo cemento y la frecuencia con la que se deben realizar se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 8. Ensayos y frecuencias en ensayos en suelo cemento

Material o producto	Propiedades y características	Método de ensayo	Frecuencia*	Lugar de Muestreo
Suelo estabilizado con cemento portland	Granulometría	MTC E 107	750 m <sup>2</sup>	Pista
	Índice plástico.	MTC E 111	750 m <sup>2</sup>	
	Relación Humedad – Densidad	MTC E 1102	750 m <sup>2</sup>	
	Compresión simple	MTC E 1101 MTC E 1103	2 muestras por días	
	Compactación	MTC E 117	Cada 250 m <sup>2</sup>	
		MTC E 124		
	Abrasión los Ángeles	MTC E 207	2000 m <sup>2</sup>	Cantera
	Durabilidad**	MTC E 209	2000 m <sup>2</sup>	
	Sulfatos	NTP 339.178	2000 m <sup>2</sup>	
	pH	NTP 339.073	2000 m <sup>2</sup>	Fuente de agua
Sulfatos	NTP 339.074	2000 m <sup>2</sup>		
Materia orgánica	NTP 339.072	2000 m <sup>2</sup>		

\* O antes si por su génesis existe variación estratigráfica horizontal y vertical que originen cambios en las propiedades físico-mecánicas de los agregados. En caso de que los metros del proyecto no alcancen las frecuencias mínimas especificadas, se exigirá como mínimo un ensayo de cada propiedad y/o característica.

\*\* Ensayo exigido para capas estructurales en zonas con altitud mayor a 3.000 msnm.

Fuente: MTC (2013), Manual EG-2013. p. 256.

**1.3.10.1 Relación Humedad-Densidad.** El objetivo principal de este ensayo es determinar la relación entre la humedad y la densidad de los tipos de suelos en evaluación,

obtenida con energía de compactación estandarizada. Este ensayo es el primero de todos ya que en base a los resultados obtenidos (humedad óptima y máxima densidad seca), se moldearán las probetas para el resto de los ensayos.

La PCA (1992) recomienda el uso de este ensayo durante el proceso de construcción pues el tipo de suelos a estabilizar puede tener ligeras variaciones en sus propiedades, por lo tanto, la humedad a agregar y la densidad a la cual deberá ser compactada no serán siempre las mismas.

Además, recomienda que este ensayo se ejecute en lo más rápidamente posible después de realizar un adecuado mezclado de los 3 materiales (suelo, cemento y agua). Esto debido a que parte de la hidratación del cemento ocurre durante el mezclado y el material se vuelve ligeramente coagulado, lo cual aumenta la fricción interna de las partículas. Estos efectos se verían reflejados con un aumento de la humedad óptima y una disminución en la máxima densidad, mientras más tiempo dure el mezclado húmedo de los materiales.

“Estudios realizados por West (1959) mostraron que una demora de más de 2 horas entre el mezclado y la compactación final resultaron en una significativa disminución en la densidad y la resistencia a la compresión.” (ACI, 2009).

En cuanto al MTC (2014), exige el uso del ensayo MTC E 1102 para la determinación de los factores anteriormente mencionados. cuando se compactan del modo especificado en la norma y antes de que ocurra la hidratación del cemento.

**1.3.10.2 Congelamiento – Descongelamiento y Humedecimiento – Secado.** Estos ensayos son recomendados por la PCA (1992) para determinar si el suelo cemento compactado permanecerá sólido o si la expansión y contracción alternadas debido a ciclos de congelamiento y descongelamiento o cambios en la humedad, volverán blanda la mezcla. Afirma que ha sido ampliamente demostrado que, al agregar cemento al suelo, aumenta la resistencia a cambios volumétricos o presiones hidráulicas las cuales podrían gradualmente romper los lazos establecidos por el aglomerante.

El MTC (2013) propone como ensayo de control, el ensayo de humedecimiento – secado bajo el procedimiento MTC E 1104. Pide que garantizar que la pérdida de peso de las probetas compactada sea de acuerdo al siguiente cuadro.

Tabla 9. Requerimientos de durabilidad en ensayo de Humedecimiento - Secado

Suelo a estabilizar (AASHTO)	Pérdida Máxima (%)
A-1, A-2-4, A-2-5, A3	14
A-2-6, A-2-7, A-4, A-5	10
A-6, A-7	7

Fuente: MTC (2013) Especificaciones técnicas generales. p. 250.

**1.3.10.3 Resistencia a la compresión no confinada.** La ACI (2009) afirma que la resistencia a la compresión no confinada es la propiedad más usada como referencia para evaluar suelos estabilizados con cemento. Indica el grado de reacción de la mezcla y su grado

de endurecimiento con respecto al tiempo. La resistencia a la compresión puede ser usada como criterio para la determinación del contenido de cemento óptimo durante la etapa de diseño del suelo cemento.

La resistencia del suelo cemento aumenta con el tiempo y con el contenido de cemento, entre otros factores. Este parámetro suele ser evaluado por distintas entidades internacionales, a los 7 y 28 días después de iniciado el curado de las probetas. En ese sentido, la USACE (1984) sugiere las siguientes resistencias mínimas para bases y subbases según distintos métodos de estabilización, entre ellos, el suelo cemento.

Tabla 10. Resistencia a la compresión no confinada mínima para suelos estabilizados con cemento, limo, y limo cemento combinado con cenizas volantes.

Tipos de suelos (SUCS)	Resistencia a la compresión no confinada mínima (psi)*	
	Pavimento flexible	Pavimento flexible
Bases	750	500
Subbases y subrasantes	250	200

\*Ensayos realizados a 7 días en las probetas de suelo cemento y a 7 o 28 días para estabilización de limo con cemento o con cenizas volantes.

Fuente: USACE (1984), *Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction*. p. 7

El MTC (2013) exige considerar el ensayo de resistencia a la compresión como parámetro de evaluación durante el diseño del suelo cemento. En el cual se debe garantizar una resistencia mínima de 1.8 MPa o 18  $kg/cm^2$  luego de 7 días de curado, de acuerdo a la norma MTC E 1103.

Es importante mencionar que, debido a que la resistencia está relacionada a la densidad, esta propiedad es afectada de la misma manera por el grado de compactación y el contenido de agua. A continuación, se muestran los valores típicos de resistencia a la compresión no confinada de testigos saturados en agua, según la American Concrete Institute.

Tabla 11. Rangos Típicos de resistencia a la compresión simple

Tipos de suelos (SUCS)	f'c a 7 días (psi)	f'c a 28 días (psi)
GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM.	300 - 600	400 - 1000
ML, CL	250 - 500	300 - 900
MH, CH	200 - 400	250 - 600

Fuente: ACI 230 (2009), *Report on Soil Cement*. p.11.

El ISCYC (2006), determina que los resultados obtenidos en campo y en laboratorio, en cuanto a la resistencia a la compresión, dependen de distintos factores. Entre ellos mencionan:

- El contenido y tipo de cemento
- La energía de compactación aplicada.
- La eficiencia lograda en el mezclado.
- El tipo y cantidad de materia orgánica, sales y materiales deletéreos en el suelo.
- Cantidad y calidad del agua.
- El tiempo transcurrido después de realizado el mezclado y compactación.
- La duración y forma de hacer el curado.
- Las medidas consideradas para disminuir el agrietamiento.
- Las características y efectividad de los aditivos o adiciones utilizadas.
- Tamaño y forma del espécimen de ensayo.

**1.3.10.4 Módulo de elasticidad estático.** La estabilización de suelos con cemento eleva considerablemente los módulos de elasticidad debido al endurecimiento que produce el aglomerante. Esta rigidez se traduce en una resistencia a la deformación, la cual puede ser aprovechada para una mejor distribución de carga y buen desempeño de la estructura del pavimento a través del tiempo.

Según el ISCYC (2006), los valores de módulo de elasticidad estático obtenidos en mezclas de suelo cemento elaborados con suelos granulares suelen estar entre 40,000 kg/cm<sup>2</sup> y 71,000 kg/cm<sup>2</sup> mientras que la PCA y la AASHTO sugieren valores entre 35,000 kg/cm<sup>2</sup> y 148,000 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de curado para la mayoría de mezclas.

Además, menciona que realizar el ensayo de módulo de elasticidad de manera periódica no es una práctica común durante los procesos de diseño y construcción del suelo cemento. Sin embargo, sostiene que es importante tener registros locales de este parámetro según el tipo de suelo a estabilizar, para evitar el uso de tablas y correlaciones para la obtención del mismo durante etapas de diseño estructural del pavimento.

#### **1.3.11 Curado del suelo cemento**

El curado es sumamente importante, ya que, al tratarse de una mezcla cementada, precisa de agua para completar su reacción química de hidratación del cemento. Este procedimiento se realiza sobre la superficie previamente compactada y sellada de la mezcla.

La ACI (2009) afirma que siempre se debe procurar realizar un curado apropiado ya que las propiedades de la mezcla de suelo con cemento desarrollan sus propiedades no solamente con el tiempo y la temperatura, sino también con la presencia de agua. Sugiere el uso de una capa de material bituminoso o la aspersión de agua como métodos de curado.



Figura 2. Curado de suelo cemento con emulsión asfáltica (arriba) y mediante aspersión de agua (abajo).

Fuente: ACI (2009), *Report on soil cement*. p.23

Por otro lado, la PCA (2001) sugiere el uso de material bituminoso, pero también menciona que materiales a prueba de agua tales como capas de plástico, textiles húmedos, paja o arena húmeda además de la aspersión de agua, funcionan satisfactoriamente para el mismo fin.

Generalmente de 3 a 7 días son necesarios como periodo de curado, durante el cual solo está permitido el tránsito de tráfico liviano siempre se garantice que no se dañe la capa protectora.

El ICPA (2015), al igual que las anteriores fuentes americana, coincide en que previo al procedimiento de curado del suelo cemento, se debe limpiar la superficie de polvo y materiales sueltos para posteriormente, aplicar ligeras aplicaciones de agua. Además, afirma que la finalidad de este procedimiento se realiza con la finalidad de corregir cualquier pérdida de humedad durante los procedimientos previos al curado y evitar que residuos asfálticos penetren en la capa compactada, debilitando su estructura.

### **1.3.12 Contracción en suelo cemento**

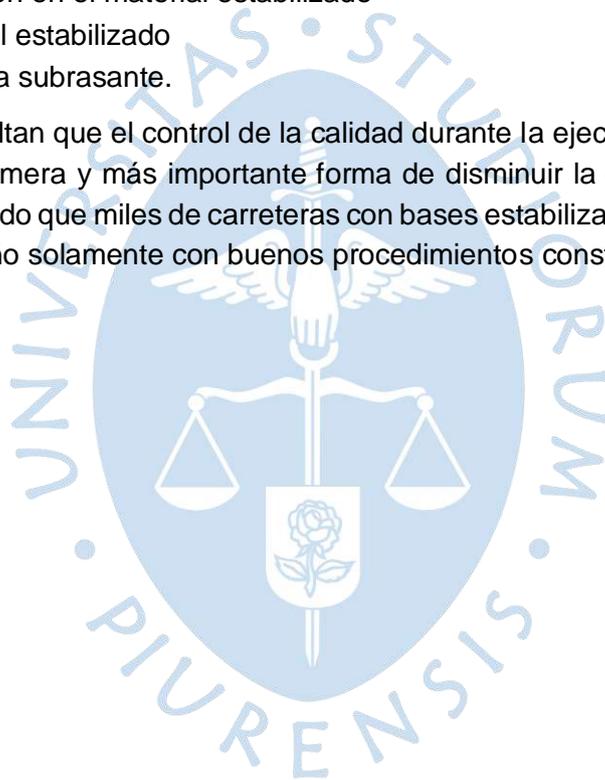
La ISCYC (2006) explica que las contracciones en el suelo cemento son el resultado de importantes pérdidas en la humedad de la mezcla, durante el periodo de hidratación del cemento.

La ACI (2009) afirma que los diferentes tipos de suelos causan diferentes tipos de fisuramiento. Los suelos con alto contenido de arcilla aumentan el número total de fisuras, pero con espesores menores e intervalos de entre de 2 a 10 pies de distancia. Mientras que los suelos granulares producen menos fisuramiento con intervalos mayores (10 a 20 pies o más).

El pavimento puede tener un buen desempeño siempre que las fisuras tengan espesores menores a 3 milímetros ya que las cargas aún pueden distribuirse. Sin embargo, si el espesor de las fisuras es mayor, se la transmisión de cargas se reduce y en caso de filtración de agua, se puede producir el bombeo de material de la subrasante, fallas en el pavimento, deterioro superficial y en general, una peor performance. Además, encontraron que las fisuras están estrechamente relacionadas a:

- Cambios volumétricos resultantes de cambios en la temperatura
- Esfuerzos de tensión en el material estabilizado
- Rigidez del material estabilizado
- Confinamiento de la subrasante.

Sin embargo, resaltan que el control de la calidad durante la ejecución de procedimientos constructivos es la primera y más importante forma de disminuir la gravedad de las fisuras. Afirma que se ha logrado que miles de carreteras con bases estabilizadas con cemento tengan un correcto desempeño solamente con buenos procedimientos constructivos.





## Capítulo 2

### Estudio del tramo a intervenir

El presente capítulo tiene como finalidad conocer el terreno sobre el cual será colocada la base estabilizada con cemento, caracterizar los suelos subyacentes, sectorizarlos y conocer sus propiedades físico químicas. Además, se identificarán y evaluarán el material granular y la fuente de agua con la cual se realizará el diseño del suelo-cemento.

#### 2.1 Ubicación temporal y geográfica

La carretera departamental Costanera II (PI-101), cuenta con una longitud de 109.4 kilómetros de los cuales solo 79.07 fueron intervenidos en el proyecto completo. Tal y como se puede observar en la Figura 3, la vía conecta las provincias de Talara, Paita y Sullana mejorando el tránsito interurbano en esta vía costera sin necesidad de recurrir a la carretera de la red nacional PE 1N.

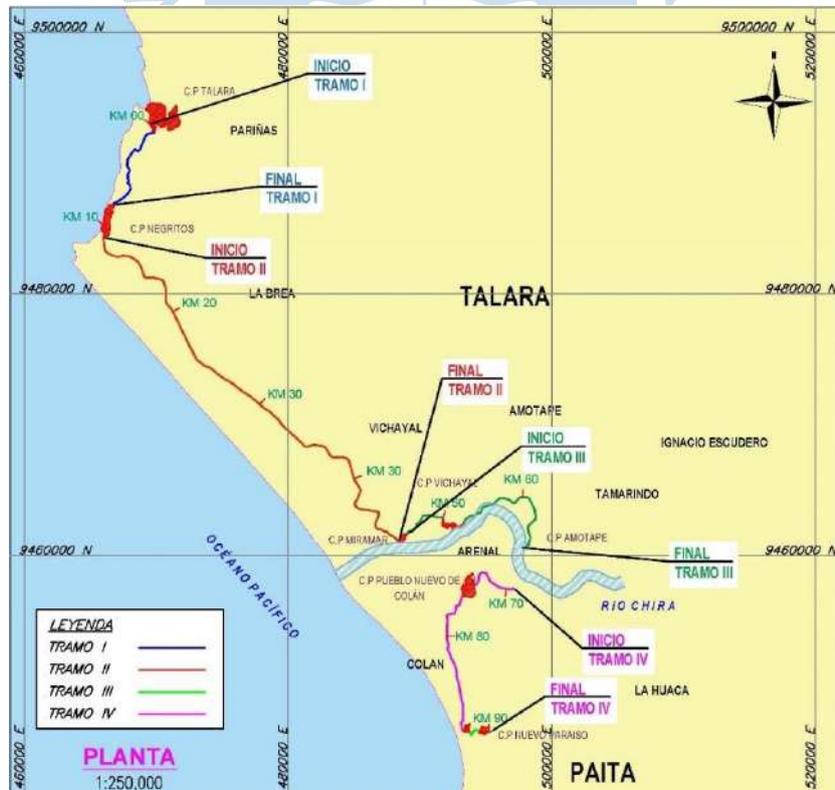


Figura 3. Ubicación y Tramos de la carretera Costanera 2  
Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

La construcción de esta vía favorece las actividades agrícolas, pesqueras turísticas y de explotación de hidrocarburos, las cuales concentran un gran flujo vehicular en la región (expediente técnico del proyecto, 2018).

El tramo II de la carretera anteriormente mencionada, es el objeto de estudio del presente trabajo de investigación. Cuenta con una longitud de 37,720 kilómetros que unirán los centros poblados de Negritos (distrito de La Brea, provincia de Talara) y Miramar (distrito de Vichayal, provincia de Paita). En la siguiente tabla se muestra la información relativa a la ubicación del tramo de aplicación.

Tabla 12. Información general del Tramo II del proyecto Costanera 2

<b>Dato geográfico</b>	<b>Descripción</b>
Progresiva inicial	km 10+880
Progresiva final	km 47+600
Departamento	Piura
Provincias	Talara, Paita.
Distritos	La Brea, Vichayal.
Centros Poblados.	C.P. Negritos – C.P. Miramar
Ruta nacional	PI-101

Fuente: Expediente técnico del proyecto. (2018)

Parte del alcance de la presente tesis es la aplicación de suelo-cemento en el tramo en cuestión hasta el nivel de base terminada, la cual fue colocada durante los meses de diciembre del año 2020 y en enero, febrero, marzo y abril del 2021 entre las progresivas señaladas.

## **2.2 Situación del tramo a intervenir**

La vía existente cuenta con una carpeta de rodadura en su mayoría de pavimento asfáltico, el cual se encontraba en pésimo estado antes de la intervención del proyecto.

### **2.2.1 Propiedades físicas y químicas de la vía existente**

Con el fin de poder realizar la caracterización de la subrasante y conocer tanto sus propiedades físicas como químicas, es necesario conocer el tipo de carretera según el Manual de Carreteras - Especificaciones Técnicas Generales para Construcción del 2013 (EG-2013). Para este fin, se encontró que el IMDA según el expediente técnico del proyecto al cual pertenece el tramo de estudio, es como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 13. IMDA por tramos en el proyecto Costanera II (PI-101)

<b>Código</b>	<b>Tramo</b>		<b>IMDA</b>
	<b>Inicio</b>	<b>Fin</b>	
E1	Talara	Negritos	4760
E2	Negritos	Dv. Lagunitas	64
E3	Dv. Lagunitas	Vichayal	815
E4	Vichayal	Pte. Simón Rodríguez	229
E5	Tamarindo	Emp. PI-101	789
E6	Emp. PE-1N	Tamarindo	1120
E7	Pte. Simón Rodríguez	Emp. PI-102	64
E8	Dv. PI-116	Dv. PI-100	2897

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

Las estaciones de conteo E1 y E2 están ubicadas dentro de las progresivas de estudio, por lo que se puede definir como una carretera de segunda clase (IMDA entre 4000 y 2001 veh/día) de acuerdo al “Manual de carreteras. Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos del Ministerio de transportes y comunicaciones” del año 2014.

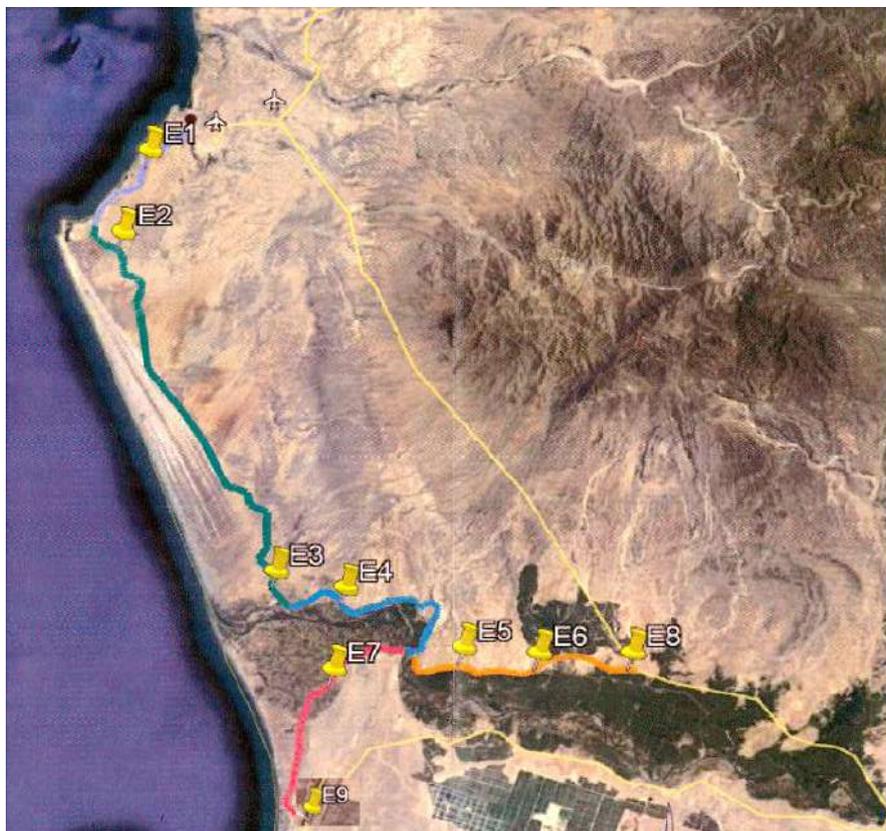


Figura 4. Ubicación de estaciones de conteo vehicular en el proyecto.

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

La metodología correspondiente a la caracterización de una carretera de segunda clase, es la ejecución de pozos exploratorios de 1.5 metros de profundidad mínima, ubicados a razón de 3 calcatas por kilómetro de manera alternada dentro del ancho proyectado de la vía según el manual anteriormente nombrado.

Los ensayos que se realizaron en el expediente técnico anteriormente mencionado, y sobre el cual se basará el análisis previo a la colocación del suelo-cemento, son los siguientes:

- Clasificación AASHTO y SUCS.
- Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad
- Proctor modificado (1 cada 1.5 kilómetros según norma)
- CBR (1 cada 1.5 kilómetros según norma)

En los siguientes cuadros, se muestran los resultados de relación soporte e índice de plasticidad resumidos.

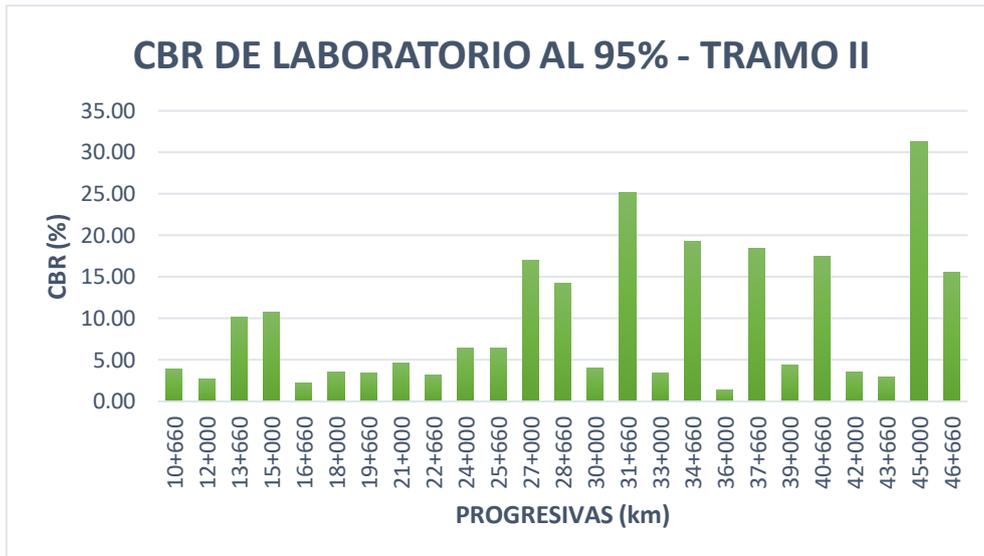


Figura 5. CBR al 95% a lo largo del Tramo II del proyecto.

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

Se evidencia la presencia de suelos de baja relación soporte. Un 48% de las muestras ensayadas, a una profundidad de entre 0.10 y 1.50 metros, cuentan con valores de CBR menores a 6% lo cual califica estos sectores como subrasantes pobres o inadecuadas (MTC, 2014). Entre las alternativas de solución se podrían considerar la estabilización de suelos, reemplazo de suelo de cimentación y elevación de la subrasante.

A continuación, se grafica el índice de plasticidad del Tramo II a lo largo de toda su extensión:

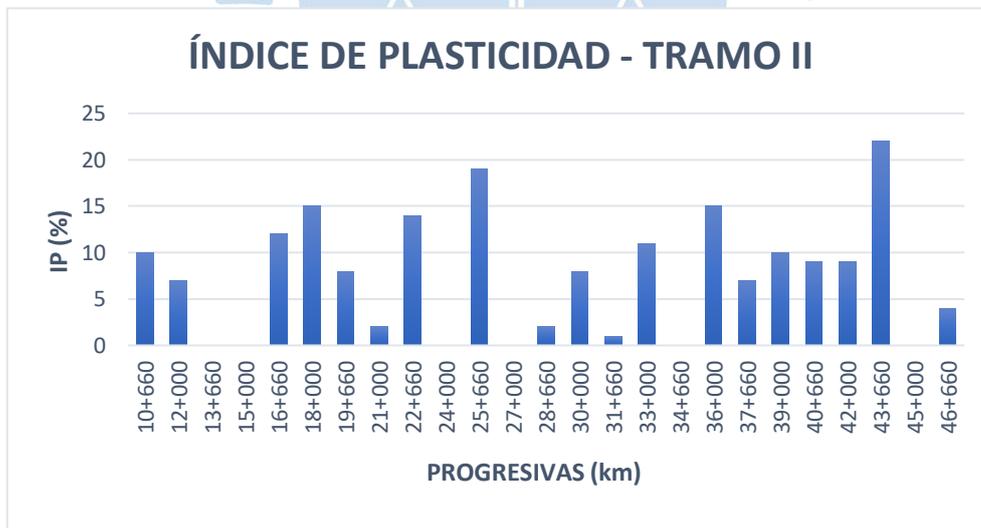


Figura 6. Índice de plasticidad a lo largo del Tramo II del proyecto.

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

Según el expediente técnico del proyecto (2018), el tramo II de la vía existente cuenta con un 19.6% de suelos no plásticos, 52.8% de suelos de baja plasticidad, 26.6% de media y 1% de alta plasticidad. La vía existente del tramo en estudio se caracteriza por estar compuesto por un paquete estructural existente con un espesor mínimo aproximado de 0.09

metros, compuesto por un 73% de suelo granular de tipo grava arcillosa/limosa, 15% de arena arcillosa/limosa con grava y 12% de suelos finos como limos y arcillas.

### 2.3 Tramo II a nivel de subrasante

El estudio de mecánica de suelos del proyecto clasificó la orografía del tramo II como Terreno Plano (Tipo 1), con pendientes transversales al eje de la vía menores o iguales a 10% y pendientes longitudinales por lo general menores a 3%, considerándola como terreno altamente vulnerable a posibles riesgos de inundaciones. Como regla general de diseño de trazado de la vía, para terrenos llanos se procedió a realizar una elevación del nivel de la subrasante existente en todo el tramo, a excepción de los sectores cercanos a centros poblados (MTC, 2018).

Para los rellenos de terraplén, de banquetas y mejoramiento de subrasante, se usó un material de cantera "Portachuelos 1". Las propiedades del material mencionado se presentan en el Anexo 1, las cuales se resumen a continuación:

• Clasificación ASSHTO	:	A-2-4 (0)
• Clasificación SUCS	:	SM
• % Grava	:	35.4%
• % Arena	:	64.6%
• Índice de plasticidad	:	1.59%
• Densidad Máxima Seca	:	2.150 gr/cc
• Humedad Óptima	:	9.20%
• CBR (95%)	:	27%

Según el (MTC, 2013), el material en cuestión cumple con las propiedades necesarias para ser usado en subrasante.

Se ejecutaron las siguientes partidas relacionadas al movimiento de tierras en el tramo de estudio:

Tabla 14. Metrado ejecutado de Movimiento de Tierras en el tramo II del proyecto.

Partida	Metrado (m3)
Corte con eliminación lateral	7,030.56
Relleno compactado con material de préstamo c/equipo	333,140.90
Relleno con material préstamo banquetas (m3)	17093.85
Mejoramiento de subrasante (m3)	34,028.29

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

#### 2.3.1 Evaluación de la subrasante

La evaluación de la estructura del pavimento, a nivel de subrasante se realizó mediante controles de densidades de compactación y deflectometría en los 24,847.49 metros cuadrados de material perfilado y compactado a nivel de subrasante. A continuación, se presenta un cuadro resumen de los ensayos de densidad en campo con densímetro nuclear.

Tabla 15. Resultados de densidad en campo en Tramo II.

	Proctor Modificado		Ensayos de campo		% Compactación
	Humedad Óptima (%)	Densidad Máxima Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Humedad de campo (%)	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	
Número de datos	1842	1842	1842	1842	1842
Valor Promedio	8.05	2.19	7.55	2.12	96.62
Valor Mínimo	6.30	2.00	5.50	0.06	95
Valor Máximo	9.80	2.29	10.20	2.57	100.00
Desv. Estándar	0.73	0.05	0.86	0.08	1
Varianza	0.54	0.01	0.74	0.01	1.01

Una vez analizadas las propiedades, se deja en evidencia que la subrasante es apta para recibir sobre sí misma, la capa de base estabilizada con cemento (objeto de investigación de la tesis). Por lo cual, al eliminar la calidad de la subrasante como variable, se aumenta la fiabilidad y representatividad de los resultados obtenidos en los capítulos posteriores.

## 2.4 Canteras de extracción de material granular

Se sabe que los 3 materiales con los que se construye el suelo-cemento, son: cemento, agua y el material granular base, siendo este último el más importante y sobre el cual dependerá el diseño. Por lo tanto, se analizaron las canteras disponibles y locales (la distancia de transporte aumenta considerablemente el costo). En la siguiente figura se puede visualizar la ubicación de las canteras que se encontraban disponibles para la elaboración de suelo-cemento.

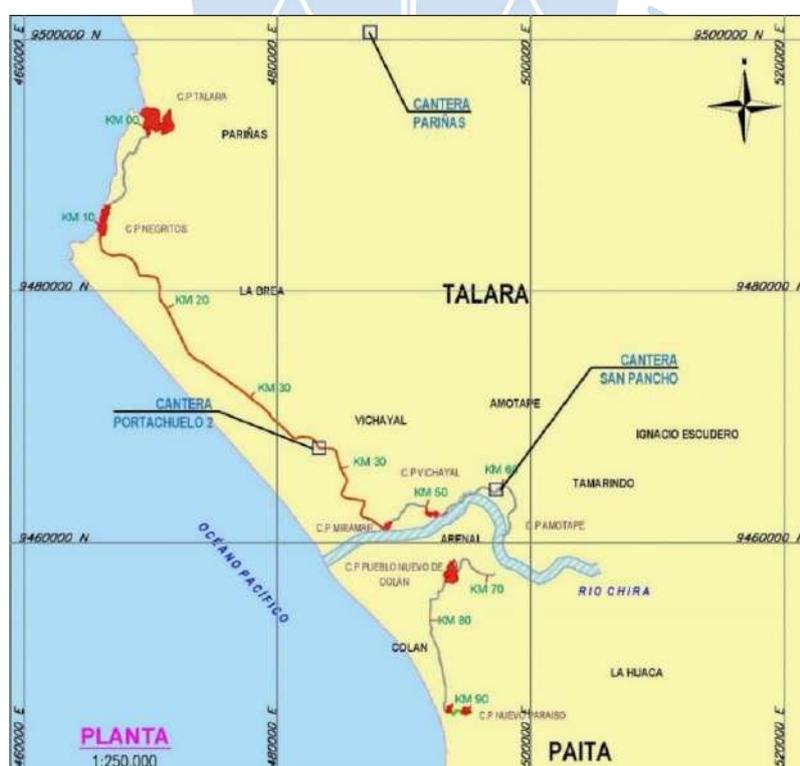


Figura 7. Ubicación de las 3 canteras de material granular en estudio.

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

Anteriormente a la exploración y estudio detallado de las canteras, se procedió a revisar los resultados obtenidos en estudios preliminares de canteras en el expediente técnico del proyecto. Posteriormente a ello, se recolectaron mejores criterios para realizar una evaluación actualizada de las mismas y una exploración detallada de las canteras con mayor potencial para suelo-cemento. Las evaluaciones realizadas y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

#### 2.4.1 Cantera Pariñas

La cantera Pariñas está ubicada a 22 kilómetros al noroeste de Talara, fuera del tramo a intervenir. En el estudio de mecánica de suelos del expediente técnico se realizaron 3 calicatas en las cuales se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 16. Registro de excavación: Cantera Pariñas.

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	MUESTRA	CLASIFICACIÓN		LÍMITES DE CONSISTENCIA			DESCRIPCIÓN
			AASHTO	SUCS	LL	LP	IP	
C-1	0.00 - 1.50	M-1	A-1-a (0)	GP	NP	NP	NP	Grava Arenosa con 73.7% de grava y 24.7% de finos. Color gris. T.M: 6"
C-2	0.00 - 1.50	M-1	A-1-a (0)	GP	NP	NP	NP	Grava Arenosa con 83.9% de grava y 16.1% de finos. Color gris. T.M: 6"
C-3	0.00 - 1.50	M-1	A-1-a (0)	GP	NP	NP	NP	Grava Arenosa con 75% de grava y 25% de finos. Color gris. T.M: 7"

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

Como se puede observar, el material encontrado es un suelo gravoso no plástico, el cual podría ser usado para la colocación de la base estabilizada en el tramo II. Sin embargo, la cantera a una distancia muy grande del tramo en estudio lo cual aumentaría el costo de transporte del material granular.

#### 2.4.2 Cantera San Pancho

La cantera San Pancho está ubicada en el km 59+400 al lado izquierdo de la vía en estudio. Se trata de un cauce de quebrada inactiva, aguas arriba, con alto contenido de arena. Esta cantera fue usada para la extracción de agregado fino en la producción de concreto para obras de arte del proyecto. En el Anexo 2 se adjunta la caracterización de agregados de la cantera San Pancho, cuya información se resume de la siguiente manera:

- Clasificación ASSHTO : A-1-b- (0)
- Clasificación SUCS : SP
- % Grava : 23.4%
- % Arena : 76.6%
- Límite Líquido y Límite Plástico : NP
- Tamaño máximo nominal : 2"

### 2.4.3 Cantera Portachuelos 2

La cantera portachuelos 2 está ubicada en el km 37+680 al lado derecho de la carretera en construcción, es decir, se tiene la ventaja de que el tramo en estudio atraviesa el lugar. Se trata de una explanación con material rocoso, principalmente conformado por gravas con tamaño máximo nominal de 3" hasta una profundidad de 1.5 metros con IP variable entre 0 y 5 en sus diferentes estratos según el estudio de mecánica de suelos del expediente técnico correspondiente al proyecto. Los estratos inferiores están compuestos por material arenoso ligeramente húmedo y sin plasticidad. En la siguiente figura se puede observar la ubicación de la cantera Portachuelos 2.



Figura 8. Mapa de ubicación de Cantera Portachuelos 1 y 2.

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

En base a la información anteriormente recolectada y la excelente ubicación de la cantera, se procedió a realizar excavaciones de calicatas con el objetivo de conocer la naturaleza y la distribución de los diferentes estratos de la cantera Portachuelos 2. Las calicatas fueron de 2 x 3 metros cuadrados y 2 de profundidad, siendo mostradas en las Figuras 8 y 9, el área de la cantera y la distribución de las calicatas respectivamente.



Figura 9. Área seleccionada para exploración de cantera Portachuelos 2.

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).



Figura 10. Distribución de calicatas realizadas en cantera Portachuelos 2.

Se extrajeron muestras de cada uno de los estratos presentes en las calicatas obtenidas en la exploración de campo, las cuales fueron analizadas según el siguiente programa de ensayos de laboratorio, empleando normativa ASTM vigente.

- Análisis granulométrico por tamizado                      ASTM D-422
- Límites de consistencia    ASTM D-423/424
- Contenido de humedad    ASTM D-2216
- Clasificación SUCS
- Clasificación AASTHO

Recopilando los resultados obtenidos en laboratorio, la siguiente tabla resume las estratigrafías de cada calicata según el sector al que corresponde.

C1-S1			C2-S1			C3-S1		
PROF. GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	CLASIF. IP	PROF. GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	CLASIF. IP	PROF. GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	CLASIF. IP
0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60	M-1 0.00 - 1.50 SUELO GRANULAR COMPACTADO SUBREDONDEADA DE CANTO RODADO CON GRAVA < 3" LIGERAMENTE HUMEDO, BAJA PLASTICIDAD, COLOR ROJISO,	GP - GC 5.1	0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60	0.00 - 2.50 SUELO GRANULAR COMPACTADO, SUBREDONDEADA DE CANTO RODADO CON GRAVA < 2 1/2" LIGERAMENTE HUMEDO, BAJA PLASTICIDAD, COLOR ROJISO	GM	0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70	0.00 - 0.50 SUELO LIMOSO SEMI COMPACTADO COLOR BEIGS CLARO LIGERAMENTE HUMEDO MEDIANAMENTE PLASTICO	SM-SC 5.6 A-2-4(0)
0.80 1.00 1.20 1.40			0.80 1.00 1.20 1.40			0.80 1.00 1.20 1.40		
1.60 1.80	1.50 - 1.90 SUELO GRANULAR COMPACTADO SUBREDONDEADA DE CANTO RODADO CON GRAVA < 3" LIGERAMENTE HUMEDO, BAJA PLASTICIDAD, COLOR BEIGS CLARO,	GP 2.8 A-1-a(0)	1.60 1.80	0.50 - 2.00 SUELO GRANULAR COMPACTADO LIGERAMENTE HUMEDO, MEDIANAMENTE PLASTICO, COLOR BEIGS CLARO.	GP-GC 8.4 A-1-a(0)	1.60 1.80		
2.00 2.20 2.40			2.00 2.20 2.40			2.00 2.20 2.40		
2.60 2.80 3.00	1.90 - 3.10 SUELO ARENOSO COMPACTADO, LIGERAMENTE HUMEDO, NO PLASTICO, COLOR BEIGS CLARO.	SP NP A-3(0)	2.60 2.80 3.00	2.50 - 3.00 ARENA FINA COMPACTADA, LIGERAMENTE HUMEDA, NO PLASTICO, COLOR BEIGS CLARO	SP NP A-3(0)	2.60 2.80 3.00		

Figura 11. Resultados de calicatas en Sector I de Cantera Portachuelos 2



C1-S3			C2-S3			C3-S3		
PROF. GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	CLASIF. IP	PROF. GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	CLASIF. IP	PROF. GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	CLASIF. IP
0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,80	0.00 - 0.80: SUELO GRANULAR COMPACTADO, LIGERAMENTE HÚMEDO, CON GRAVA CANTO RODADO < 3"BAJA PLASTICIDAD, COLOR ROUZO.	GM 3.8 A-1-b (0)	0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,80	0.00 - 1.00: SUELO GRANULAR COMPACTADO, LIGERAMENTE HÚMEDO, BAJA PLASTICIDAD, CON GRAVA CANTO RODADO < 3" COLOR BEIGS CLARO.	GP - GC 4.7 A-1-a (0)	0,10 0,20 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70 0,80	0.00 - 0.80: SUELO GRANULAR COMPACTADO, LIGERAMENTE HÚMEDO, DE BAJA PLASTICIDAD, CON GRAVA CANTO RODADO < 3"	GP - GC 4.6 A-1-a (0)
1,00 1,20 1,40 1,60 1,80 2,00 2,20	0.80 - 2.30 SUELO LIMO ARENOSO, SEMI COMPACTO, LIGERAMENTE HÚMEDO, NO PLÁSTICO, COLOR BEIGS CLARO.	SM NP A-2-4 (0)	1,00 1,20 1,40 1,60 1,80 2,00 2,20	1.00 - 2.30: SUELO LIMO ARENOSO, SEMI COMPACTO, LIGERAMENTE HÚMEDO, NO PLÁSTICO, COLOR BEIGS CLARO.	SM NP A-2-4 (0)	1,00 1,20 1,40 1,60 1,80 2,00 2,20	0.80 - 2.00: SUELO LIMO ARENOSO SEMI COMPACTO, LIGERAMENTE HÚMEDO NO PLÁSTICO, DE COLOR BEIGS CLARO.	SM NP A-2-4 (0)

Figura 13. Resultados de calicatas en Sector 3 de Cantera Portachuelos 2.

Como se puede observar en las tablas anteriores, se diferencian de manera general dos estratos principales: Un suelo granular gravoso pobremente graduado con clasificación AASHTO A-1-a (0) y un suelo limo arenoso A-2-4 (0). Ambos estratos son clasificados como no plásticos según los límites de consistencia de material pasante del tamiz #40. En la siguiente figura se pueden observar los estratos característicos de la cantera en estudio.



Figura 14. Estratos en Calicata 2 Sector 1.

## 2.5 Elección del método de estabilización de suelos

El expediente técnico del proyecto propuso una estructura de pavimento que utiliza una capa de suelo estabilizado para soportar la estructura convencional, mejorando su capacidad soporte, disminuyendo espesores de las capas que la conforman y las deformaciones en las mismas durante el periodo de diseño de 20.

La estructura del pavimento debe estar diseñada de tal manera que sea durable y de bajo mantenimiento, lo cual es una característica fundamental de la estabilización de suelos. Siempre y cuando se mantenga la calidad durante la ejecución de los procesos constructivos y los cuidados específicos para cada método de estabilización, el pavimento tendrá un correcto desempeño durante su vida útil y un deterioro controlado según el periodo de diseño.

Dependiendo del tipo de suelo, la USACE (1984) propone distintos aditivos para estabilización de suelos, los cuales se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 17. Guía para la selección de aditivo estabilizador de suelos.

Área	Clase de suelo	Tipo de aditivo estabilizador recomendado	Restricción en el LL e IP del suelo	Restricción en el porcentaje que pasa el tamiz No. 200	Observaciones
1A	SW o SP	Bituminoso			
		Cemento Portland			
1B	SW - SM o SP - SM o SW - SC o SP - SC	Cal - cemento-cenizas volantes	IP no debe exceder 25		
		Bituminoso	IP no debe exceder 10		
		Cemento Portland	IP no debe exceder 30		
		Cal	IP no menor que 12		
1C	SM o SC o SM - SC	Cal - cemento-cenizas volantes	IP no debe exceder 25		
		Bituminoso	IP no debe exceder 10	No debe exceder el 30% en peso	
		Cemento Portland	*		
		Cal	IP no menor que 12		
2A	GW o GP	Bituminoso			Solo material bien gradado
		Cemento Portland			Menos del 45% en peso del material pasa el tamiz No. 4
		Cal - cemento-cenizas volantes	IP no debe exceder 25		
2B	GW - GM o GP - GM o GW - GC o GP - GC	Bituminoso	IP no debe exceder 10		Solo material bien gradado
		Cemento Portland	IP no debe exceder 30		Menos del 45% en peso del material pasa el tamiz No. 4
		Cal	IP no menor que 12		
		Cal - cemento-cenizas volantes	IP no debe exceder 25		
		Bituminoso	IP no debe exceder 10	No debe exceder el 30% en peso	Solo material bien gradado
2C	GM o GC o GM - GC	Cemento Portland	*		Menos del 45% en peso del material pasa el tamiz No. 4
		Cal	IP no menor que 12		
		Cal - cemento-cenizas volantes	IP no debe exceder 25		
		Bituminoso	IP no debe exceder 10	No debe exceder el 30% en peso	Solo material bien gradado
3	CH o CL o MH o ML u OH o OL o ML - CL	Cemento Portland	LL menor que 40 e IP menor que 20		Este tipo de suelos no son susceptibles a la estabilización por medios ordinarios
		Cal	IP no menor que 12		

\*  $PI = 20 + (50 - \text{Porcentaje que pasa la malla No.200}) / 4$

Fuente: Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction. (USACE,1984). p.4

Como se mencionó en el apartado 2.2.1. El suelo a profundidades entre 0.00 y 1.50 metros bajo la vía está compuesto en un 75% por gravas arcillosas/limosas. En cuanto a la plasticidad de los mismos, se tiene aproximadamente 70% de suelos entre no plásticos o de baja plasticidad.

Además, las canteras previamente evaluadas, cuyas propiedades principales se resumen en la tabla 18, descartan el uso de material bituminoso como método de estabilización de suelos ya que este es limitado solamente para suelos bien graduados.

Tabla 18. Resumen de propiedades de suelos extraídos de canteras locales.

Cantera		Portachuelos 2	San Pancho	Pariñas
<b>Clasificación</b>	SUCS	GP-GC	SP	GP
	AASHTO	A-1-a (0)	A-1-b (0)	A-1-a(0)
<b>Límites de consistencia</b>	LL	20	-	-
	LP	15	-	-
	IP	5	NP	NP
<b>Distribución</b>	% Gravas	73.2	23.4	73.7
	% Finos	26.8	76.6	26.3

El uso de cal como aditivo para estabilización de suelos también se descartó debido a que su aplicación se limita a suelos con índice de plasticidad no menores a 12. Además, Arce (2011), gracias a la experiencia recopilada en Costa Rica, recomienda que los suelos de tipo A-4, A-5, A-6, y A-7 sean estabilizados con cal.

La tecnología de estabilización de suelos con cemento en nuestro país es más versátil ya que permite el uso de básicamente cualquier tipo de suelo, siempre y cuando cumpla con las propiedades exigidas por el MTC (2013).

La modelación realizada en el expediente técnico del proyecto se realizó a través del software WinDePAV, desarrollada en la universidad de Colombia en el año 2000. Para este fin, se han asumido parámetros de diseño conservadores según las características físicas de los materiales locales y experiencias recopiladas por el proyectista. La estructura propuesta por el expediente técnico para el tramo 2 es la siguiente:



Figura 15. Paquete estructural propuesto para el tramo II.

Fuente: Expediente técnico del proyecto (2018).

Posteriormente, se evaluó qué material granular se utilizaría para la estabilización de suelos con cemento. Según la siguiente tabla, el porcentaje de cemento requerido para este método de estabilización, es menor para el estrato compuesto por suelo gravoso.

Tabla 19. Rango de cemento requerido en Estabilización Suelo Cemento

Clasificación de suelos AASHTO.	Rango usual de cemento requerido. Porcentaje del peso de los suelos, % por peso	Contenido de cemento estimado para ensayo de densidad – humedad (ASTM D558), % por peso.	Contenido de cemento estimado para ensayo de humedecimiento y secado (ASTM D559 y D560), % por peso
A-1-a	3 – 5	5	3 – 4 – 5 – 7
A-1-b	5 – 8	6	4 – 6 – 8
A-2	5 – 9	7	5 – 7 – 9
A-3	7 – 11	9	7 – 9 – 11
A-4	7 – 12	10	8 – 10 – 12
A-5	8 – 13	10	8 – 10 – 12
A-6	9 – 15	12	10 – 12 – 14
A-7	10 – 16	13	11 – 13 – 15

Fuente: Soil Cement Laboratory Handbook, Portland Cement Association (1992).

Se decidió que las canteras Portachuelos 2 y San Pancho serían las fuentes del material granular, las cuales serán evaluadas en el diseño de laboratorio (Capítulo 3). La mejor alternativa entre ambas, será aplicada en campo en la vía de estudio.

Una vez definidos los suelos que serán materia de estudio en laboratorio, se debe definir la fuente de agua, necesaria para la hidratación del aglomerante y compactación del suelo cemento.

## 2.6 Fuentes de agua

El agua es necesaria en el suelo cemento para la obtención de la máxima densidad seca y para la hidratación del cemento. La ACI (2009) afirma que el contenido de humedad óptima para el suelo cemento suele estar entre el rango de 5 y 13% del peso seco de la mezcla. Por otro lado, la ISCYC señala que la humedad varía entre 10 y 20% para suelos plásticos y menos de 10% para suelos granulares.

“El agua deberá ser limpia y estar libre de materia álcalis y otras sustancias deletéreas... El agua potable se considera adecuada y ella se podrá emplear sin necesidad de realizar ensayos de calificación antes indicados.” MTC (2013).

Se usará como fuente de agua, el río Chira a la altura del centro poblado San Lucas. La vía de acceso de 2.00 kilómetros hasta la toma de agua, se encuentra ubicada en el km 47+200 hacia el lado derecho de la vía. Es decir, las distancias de transporte de agua con cisternas serán mínimas debido a que el acceso se encuentra dentro del tramo en estudio.

En el Anexo 3 se pueden observar los resultados de los ensayos realizados a la fuente de agua, los cuales serán comparados con los requerimientos especificados en la sección 301.A del manual EG-2013.

Tabla 20. Requerimientos técnicos y resultados del agua del Río Chira para su uso en suelo-cemento.

Ensayo	Norma	Requerimiento (ppm)		Resultado (ppm)
		Mínimo	Máximo	
pH	NTP 339.073	5.5	8	6.1
Contenido de sulfatos (SO <sub>4</sub> )	NTP 339.074	-	600	87
Contenido de materia orgánica en el agua	NTP 339.072	-	3.00	0.07

Fuente: MTC (2013). p. 248.

En la tabla anterior, se evidencia el cumplimiento de los requerimientos técnicos exigidos por la norma en cuestión. Por lo tanto, la fuente de agua analizada se considera como apta.



Figura 16. Toma de agua en Río Chira, centro poblado San Lucas.

Como conclusión final del capítulo 2, se determinó el cumplimiento de las especificaciones técnicas de la norma EG-2013 y la viabilidad de su uso en el proyecto, para los siguientes elementos de la geología local:

- Cantera: Portachuelos 2 y San Pancho.
- Fuente de agua: río Chira.

Estos serán usados para la elaboración del diseño en laboratorio del suelo-cemento, según la normativa anteriormente mencionada.



## Capítulo 3

### Diseño del suelo-cemento

Para realizar el diseño del suelo-cemento, se seguirán los procedimientos indicados en la sección 301. A de la norma “Manual de Carreteras: especificaciones técnicas generales EG-2013”. Ésta a su vez, se basa en el método de la Portland Cement Association (PCA).

“La cantidad de ensayos de laboratorio requerida para un proyecto dado depende de la urgencia con la cual se requiere la construcción, la cantidad de suelos por ensayar y el tamaño del proyecto.” (PCA, 1992). En el siguiente gráfico, se muestra la variedad de métodos de ensayo en función a los factores anteriormente mencionados.

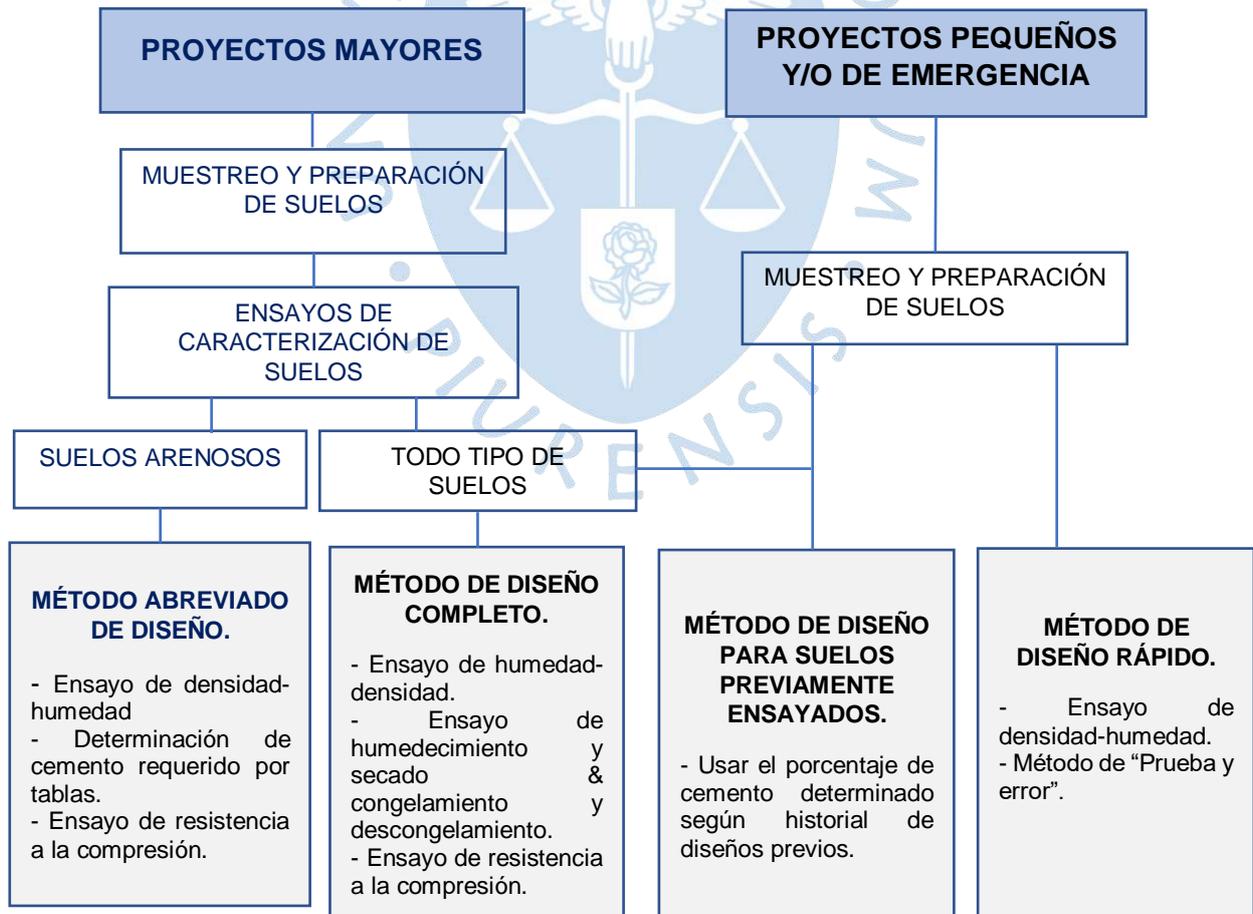


Figura 17. Métodos de diseño en laboratorio para Suelo-Cemento

Fuente: PCA (1992), Soil-cement Laboratory Handbook. p. 6.

En el presente estudio, se realizó la Metodología de diseño abreviada, debido a que se trata de un proyecto mayor y se trabajó con suelos arenosos, además de solo contar con los equipos de laboratorio necesarios para ejecutar estos ensayos.

No se realizó el ensayo de humedecimiento – secado ni el de congelamiento – descongelamiento. Es cierto que en muchas aplicaciones y según muchas fuentes, tanto la resistencia a la compresión y la durabilidad son necesarios para alcanzar una satisfactoria vida de servicio en el pavimento. Sin embargo, en la figura anterior se proponen distintos métodos en donde no es necesario realizar los ensayos correspondientes al control de la durabilidad, sino que se usan tablas locales basadas en experiencias previas, las cuales representan la correlación entre la resistencia y la durabilidad.

“A pesar de que estos métodos de diseño no siempre determinan en el porcentaje de cemento óptimo de la mezcla, generalmente resultan en valores cercanos a los realizados con los ensayos” (PCA, 1992).

Además, no se realizó del ensayo de humedecimiento – secado ni congelamiento - descongelamiento debido a que la zona en la que se encuentra ubicado el tramo de estudio cuenta con precipitaciones escasas en el mes de marzo (6.7 mm/mes), temperatura más alta en el mes de marzo con 30.8 °C y la más baja en el mes de setiembre con 15.5 °C según la siguiente figura. Por lo tanto, el suelo cemento no estará expuesto a cambios extremos de temperatura ni humedad.

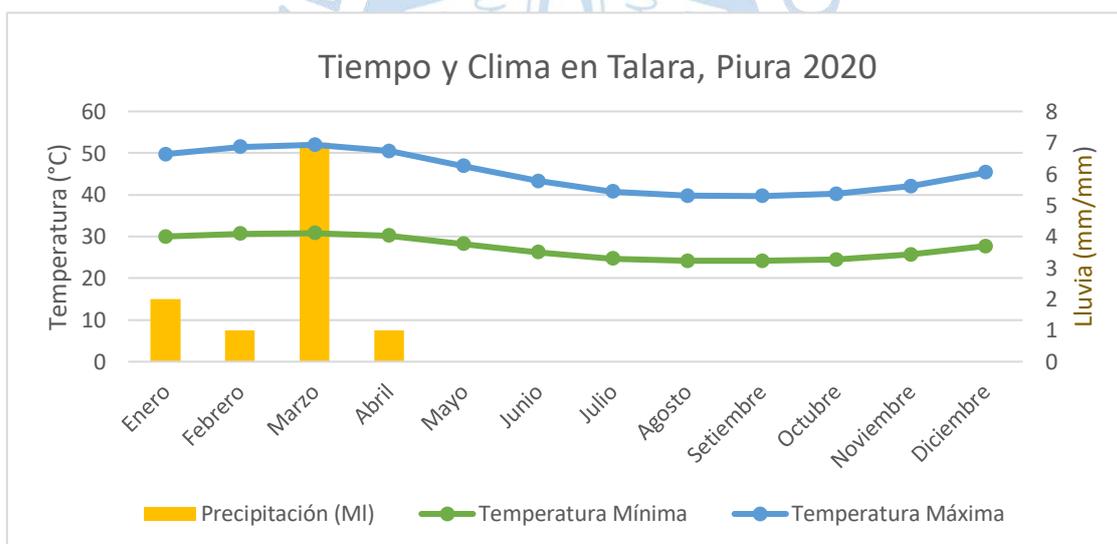


Figura 18. Tiempo y Clima en la región de Talara, Piura

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI. 2020.

En cambio, se realizará el ensayo de Módulo de elasticidad estático (ASTM C469), propiedad de suelo-cemento.

Cabe recalcar, que la determinación de los módulos de elasticidad dinámicos y estáticos no es una práctica habitual en el diseño y construcción de capas de Suelo-cemento en la mayoría de los países; por lo general, este tipo de ensayos se ha realizado en trabajos de investigación, según Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC).

Por lo tanto, Los ensayos de laboratorios que se realizarán para la determinación del diseño de suelo-cemento son los siguientes:

- Ensayo de densidad-humedad. (MTC E 1102)
- Resistencia a la compresión no confinada. (MTC E 1103)
- Módulo de elasticidad estático. (ASTM C 409)

De acuerdo con el Método Abreviado de Diseño de la PCA, se permite el uso de estos ensayos con el especial cuidado y el control de calidad adecuado. Para el presente trabajo de investigación, se realizará el ensayo de módulo de elasticidad estático como parámetro adicional de evaluación.

### 3.1 Cemento Vial Forte Pacasmayo

“Cementos Portland Tipo I o II de la ASTM C150, también Cementos tipo GU o MS de la ASTM C1157 son los más usados para la estabilización de suelos” (ACI, 2009). Para la presente investigación se usó el cemento de Pacasmayo VIAFORTE, el cual es tipo MH (de moderado calor de hidratación). En el Anexo 4 se adjunta la ficha técnica del producto. Además, tiene como principales beneficios los siguientes:

- Elevada capacidad de soporte.
- Su aplicación mejora la calidad de suelos deficientes.
- Tiene resistencia a la erosión y a todo tipo de clima.
- Aumenta la durabilidad de la vía.
- Moderado calor de hidratación que disminuye el riesgo de fisuras.
- Excelente trabajabilidad.
- Amigable con el medio ambiente ya que disminuye la huella de CO<sub>2</sub>

El diseño de suelo-cemento tiene como finalidad el encontrar el porcentaje de cemento óptimo para el material granular escogido. Para los cuáles podemos tomar como referencia un punto de partida de acuerdo a experiencias en otros países, tal y como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Contenidos iniciales de cementos exigidos por varias entidades.

Contenido de Cemento Inicial (% en peso)	El Salvador	Método PCA	USACE (U.S. Army Corps of Engineers)	Colombia (INVIAS)	España
5	No exige un contenido de cemento inicial. La práctica común considera un 2% como contenido de cemento inicial para todos los tipos de suelo	GW, GP, GM, SW, SP, SM	GW, SW	No sugiere un contenido de cemento inicial	Considera un 3% como contenido inicial, para todos los tipos de suelo.
6		GM, GP, SM, SP	GP, SW-SM, SW-SC, GW-GM, GW-GC		
7		GM, GC, SM, SC	GM, SM, GC, SC, SP-SM, SP-SM, SP-SC, GP-GC, SM-SC, GM-GC		
9		SP	--		
10		CL, ML, MH, CH	SP, CL, ML, ML-CL, CH		
11		--	MH-OH		
12		CL, CH	--		
13		MH, CH	--		

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC), Revista del ISCYC número 43.

Se puede observar en la tabla anterior, que el porcentaje de cemento mínimo para los dos tipos de suelo en estudio (GP y SP) está por debajo de 5%. Por lo tanto, se realizarán los ensayos especificados anteriormente en base a 3 porcentajes de cemento iniciales: 3.00%, 4.00% y 5.00% y se analizarán los resultados obtenidos en cada uno de ellos. Posteriormente se elegirán los porcentajes de cemento óptimo para cada mezcla y se definirá qué diseño se utilizará para la colocación de la base granular estabilizada con cemento.

### 3.2 Material granular proveniente de cantera

En el capítulo 2 se concluyó que las canteras Portachuelos 2 y San Pancho eran aptas para ser usadas como material granular para la mezcla de suelo-cemento. Por lo tanto, se decidió realizar 2 diseños en las siguientes proporciones:

#### 3.2.1 Diseño 1: 100% Portachuelos 2

Se trata del diseño en laboratorio, con material íntegro de la cantera Portachuelos 2, cuyas propiedades fueron explicadas en el capítulo 2.4.3 del presente trabajo de investigación.

#### 3.2.2 Diseño 2: 100% San Pancho

Se trata del diseño en laboratorio, con material íntegro de la cantera San Pancho, cuyas propiedades fueron explicadas en el capítulo 2.4.2 del presente trabajo de investigación.



Figura 19. Material granular usado en los Diseños 1 y 2

En la figura anterior se puede apreciar la diferencia visual entre ambos tipos de suelo provenientes de las canteras Portachuelos 2 y San Pancho. Sin embargo, es importante conocer las propiedades necesarias según el método explicado al inicio del capítulo.

A manera de resumen, se presenta una compilación de las propiedades de los suelos de cantera que serán motivo de evaluación en el presente trabajo de investigación.

Tabla 22. Resumen de propiedades de mezclas de suelo cemento

N° de Diseño		N° 1	N° 2
<b>Clasificación</b>	SUCS	GP-GC	SP
	AASHTO	A-1-a (0)	A-1-b (0)
<b>Límites de consistencia</b>	LL	20	-
	LP	15	-
	IP	5	NP
<b>Distribución</b>	% Gravas	73.2	23.4
	% Finos	26.8	76.6

### 3.3 Ensayo de densidad-humedad (suelo-cemento)

Como se mencionó al inicio del capítulo, se usarán cantidades de cemento en el orden de 3, 4 y 5 % del peso de la muestra, para su posterior evaluación en cada uno de los ensayos de laboratorio. En el ensayo de densidad-humedad para suelo- cemento (MTC E 1102) se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de los diseños analizados:

#### 3.3.1 Humedad - densidad Diseño 1: 100% Portachuelos 2

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los porcentajes de cemento evaluados con la mezcla 1.

Tabla 23. Resultados de ensayo humedad-densidad en Mezcla 1.

No. de Muestra		1	2	3	4
<b>3.0% Cemento</b>	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.271	2.307	2.234	2.164
	Contenido de humedad (%)	4.1	6.3	8.4	10.5
<b>4.0% Cemento</b>	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.228	2.271	2.218	2.167
	Contenido de humedad (%)	4.8	7.0	9.1	11.2
<b>5.0% Cemento</b>	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.223	2.287	2.238	2.142
	Contenido de humedad (%)	5.1	7.1	9.0	11.2

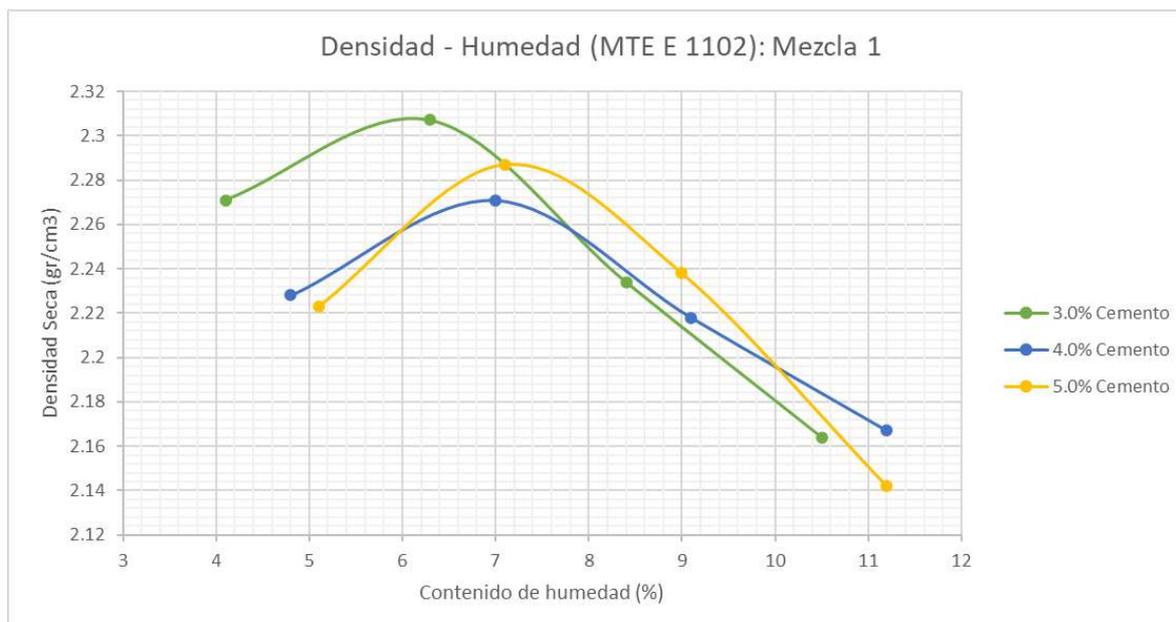


Figura 20. Relación densidad - humedad para distintos porcentajes de cemento - *Diseño 1*

Se tiene entonces, una máxima densidad seca y humedad óptima para cada porcentaje evaluado:

- 3.0% Cemento: MDS=2.315 gr/cm<sup>3</sup> Humedad óptima=5.80%
- 4.0% Cemento: MDS=2.275 gr/cm<sup>3</sup> Humedad óptima=6.60%
- 5.0% Cemento: MDS=2.287 gr/cm<sup>3</sup> Humedad óptima=7.00%

Los parámetros anteriormente mencionados serán considerados para la fabricación de probetas para los ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.

### 3.3.2 Humedad – densidad *Diseño 2: 100% San Pancho B*

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los porcentajes de cemento evaluados con la mezcla 2.

Tabla 24. Resultados de ensayo humedad-densidad en Mezcla 2

N° de Muestra		1	2	3	4
<b>3.0% Cemento</b>	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.037	2.074	2.123	2.107
	Contenido de humedad (%)	4.2	6	8	10.1
<b>4.0% Cemento</b>	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.074	2.115	2.137	2.111
	Contenido de humedad (%)	4.2	6.2	8.2	10.1
<b>5.0% Cemento</b>	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.055	2.102	2.158	2.146
	Contenido de humedad (%)	4.3	6.4	8.2	10.1

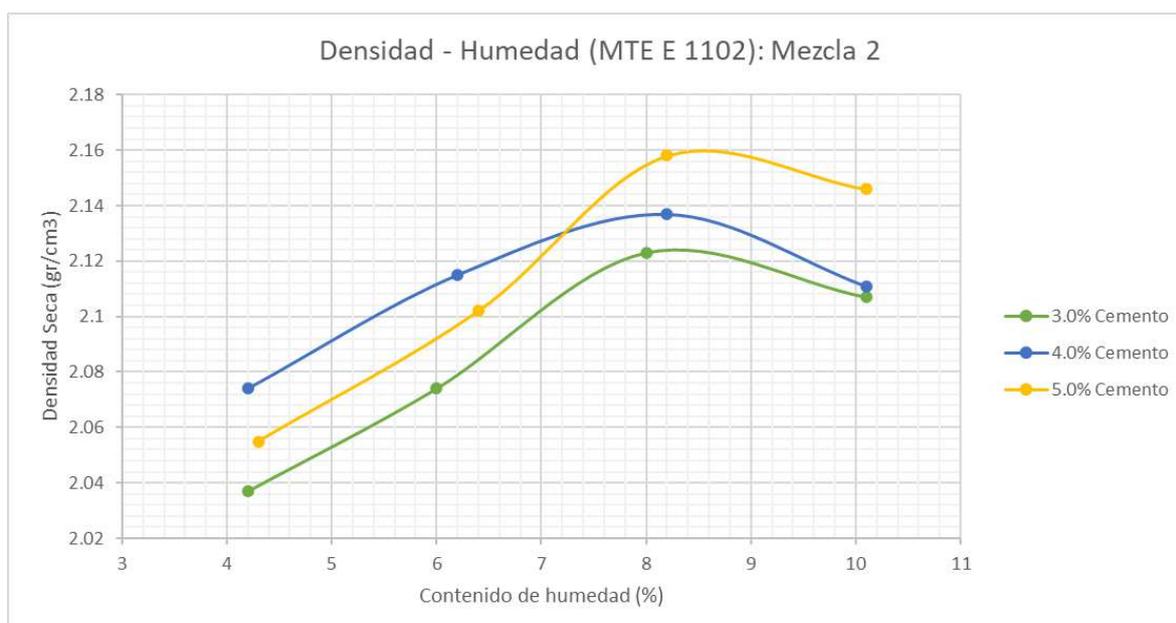


Figura 21. Relación densidad - humedad para distintos porcentajes de cemento - Diseño 2.

Se tiene entonces, una máxima densidad seca y humedad óptima para cada porcentaje evaluado:

- 3.0% Cemento: MDS=2.131 gr/cm<sup>3</sup> Humedad óptima=8.80%
- 4.0% Cemento: MDS=2.137 gr/cm<sup>3</sup> Humedad óptima=8.30%
- 5.0% Cemento: MDS=2.167 gr/cm<sup>3</sup> Humedad óptima=9.00%

De igual manera, para la fabricación de probetas para ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad se respetarán la máxima densidad seca y humedad óptima correspondiente a cada porcentaje de cemento a evaluar.

### 3.4 Resistencia a compresión no confinada

Para el ensayo de resistencia a la compresión no confinada, se usaron probetas de 4x8" según el método A de la MTC E 1103. El curado de las mismas no pudo realizarse en una cámara húmeda como sugiere la norma en cuestión. Sin embargo, se procedió retirar las probetas del molde después de 24 horas de haber sido elaboradas y posteriormente cubiertas completamente con membranas plásticas con el objetivo de prevenir la pérdida de humedad.

Las probetas se ensayaron a 3, 7, 14 y 28 días después de haber iniciado el proceso de curado de las mismas, por cada porcentaje de cemento a analizar. Es importante mencionar que tanto la Portland Cement Association en su "Soil-Cement Laboratory Handbok" y el American Concrete Institute en el "Report on Soil Cement – ACI 230" señalan que las probetas deben ser sumergidas en agua durante 4 horas y posteriormente capeadas antes de realizar el ensayo en cuestión.

Tabla 25. Requerimientos mínimos para la evaluación de la resistencia a la compresión simple exigidas en varios países (curado húmedo).

Fuente	Tipos de suelos	Resistencia mínima de compresión simple	
		f'c a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c a 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )
ISCYC (EL SALVADOR)	Todos los casos	20	28.1 - 70.3
	Suelos arenosos y gravas	21.1 - 42.2	28.1 - 70.3
PCA (EUA)	Suelos limosos	17.6 - 35.2	21.1 - 63.3
	Suelos arcillosos	14.0 - 28.1	17.6 - 42.2
INVIAS (COLOMBIA)	Bases estabilizadas	21	-
ESPAÑA	Todos los casos	15	-

Fuente: Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC), Revista del ISCYC número 43.

Es importante mencionar que los valores de resistencia mostrados en la tabla anterior, son obtenidos según procedimiento de elaboración de especímenes, energía de compactación aplicada, forma y tamaño del espécimen estipulado según la normativa de cada país.

Siguiendo el método de diseño de la PCA, se tomará 21.0 kg/cm<sup>2</sup> como valor mínimo de resistencia a la compresión no confinada para ambas mezclas (Suelos arenosos y gravas). Además, es uno de los valores más altos en comparación a los recopilados en experiencias de otros países como se puede observar en la tabla anterior. Tener en cuenta que la normativa peruana (EG-2013) propone como valor mínimo 18.0 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, se está considerando un factor de seguridad con el objetivo de mantener exigencia en las mezclas que serán evaluadas.

En la siguiente figura se muestra el esquema utilizado para la elaboración de probetas de resistencia a la compresión para cada diseño.

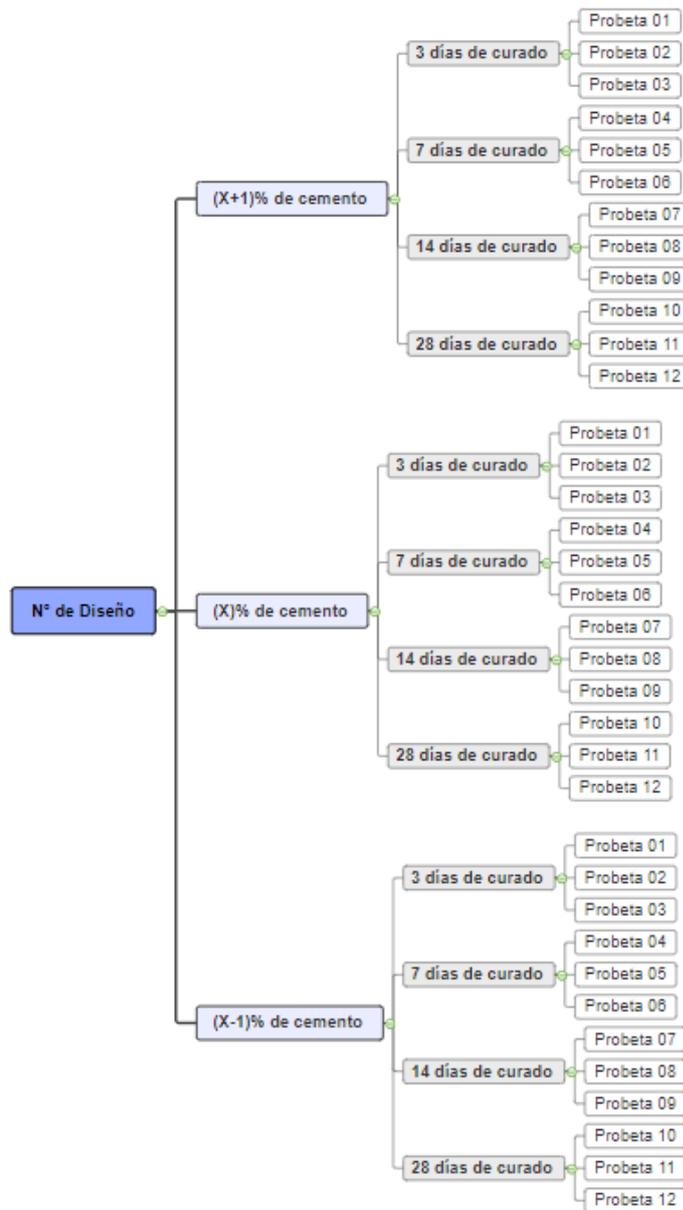


Figura 22. Esquema de distribución de probetas para ensayo de resistencia a la compresión

Debido al gran número de probetas que había que realizar, se decidió contar con una codificación que ayude a los tesistas y al lector, a identificar de manera rápida cada una de ellas. La codificación que se decidió usar fue la siguiente:

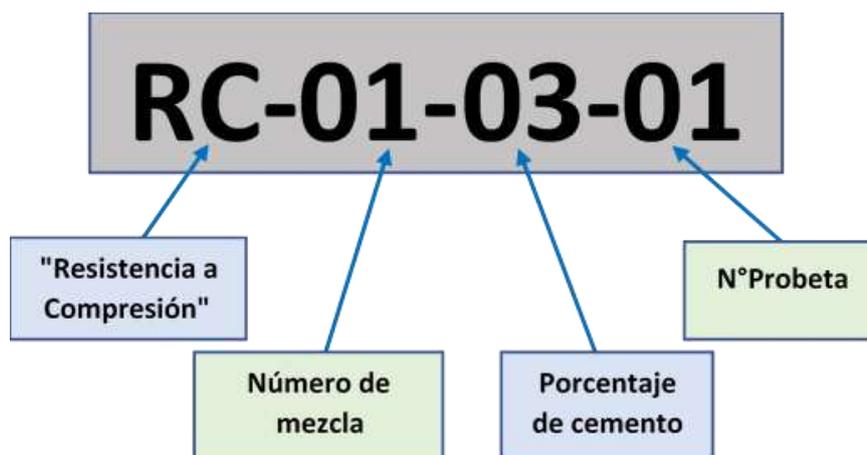


Figura 23. Formato de codificación de probetas para ensayo de resistencia a la compresión.

Para el ejemplo anterior, se trataría de la probeta de suelo-cemento de 4x8" que será ensayada mediante el ensayo de resistencia a la compresión (MTC E 1103), elaborada con la mezcla 01 (100% Portachuelos) con 3% de cemento, la cual se ensayará a 3 días de iniciado su curado ya que las probetas 1, 2 y 3 se ensayan a la edad mencionada.



Figura 24. Probeta desmoldada después de 24 horas de reposo.

En la figura anterior se puede apreciar una probeta de 4x8" desmoldada después de 24 horas, para luego ser curada envolviéndola en bolsas plásticas para evitar la pérdida de humedad y garantizar la hidratación del cemento. Después de un periodo de tiempo determinado (3, 7, 14 y 28 días), se retiran las bolsas plásticas y se sumergirán en agua 4 horas previas al ensayo de resistencia a la compresión, según el método A del ensayo MTC E 1103.

### 3.4.1 Resistencia a la compresión no confinada – Diseño 1:

Se moldearon un total de 36 probetas, con la humedad óptima obtenida del ensayo próctor para cada porcentaje de cemento, de manera que en cada una de ellas se alcance la Máxima Densidad Seca (M.D.S). La relación de probetas moldeadas se explica en el siguiente cuadro:

Tabla 26. Resumen de ensayos de resistencia a la compresión no confinada - Diseño 1

Código	Cantidad de cemento	Fecha de compactado	Fecha de inicio de curado	Edad de curado	Fecha de rotura	Resistencia a la compresión no confinada (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
RC-01-03-01						18.1	
RC-01-03-02				3 días	25/11/2020	23.7	20.9
RC-01-03-03						11.4*	
RC-01-03-04						28.6	
RC-01-03-05				7 días	29/11/2020	27.1	27.3
RC-01-03-06	3.0%	22/11/2020	23/11/2020			26.3	
RC-01-03-07						36.0	
RC-01-03-08				14 días	06/12/2020	29.6	32.4
RC-01-03-09						31.6	
RC-01-03-10						38.9	
RC-01-03-11				28 días	20/12/2020	40.5	38.9
RC-01-03-12						37.4	
RC-01-04-01						33.8	
RC-01-04-02				3 días	27/11/2020	30.3	32.5
RC-01-04-03						33.4	
RC-01-04-04						36.4*	
RC-01-04-05				7 días	01/12/2020	44.5	42.8
RC-01-04-06	4.0%	24/11/2020	25/11/2020			41.1	
RC-01-04-07						50.2	
RC-01-04-08				14 días	08/12/2020	46.9*	49.3
RC-01-04-09						48.3	
RC-01-04-10						52.1	
RC-01-04-11				28 días	22/12/2020	53.6	53.5
RC-01-04-12						54.7	
RC-01-05-01						27.4*	
RC-01-05-02				3 días	28/11/2020	39.9	38.9
RC-01-05-03						37.8	
RC-01-05-04						52.0	
RC-01-05-05				7 días	02/12/2020	53.7	52.3
RC-01-05-06	5.0%	25/11/2020	25/11/2020			51.1	
RC-01-05-07						39.8*	
RC-01-05-08				14 días	09/12/2020	66.8	65.9
RC-01-05-09						64.5	
RC-01-05-10						73.0	
RC-01-05-11				28 días	23/12/2020	70.9	72.0
RC-01-05-12						72.2	

\*Datos atípicos que no se consideraron en el cálculo de los promedios.

De manera que se obtiene el siguiente gráfico:

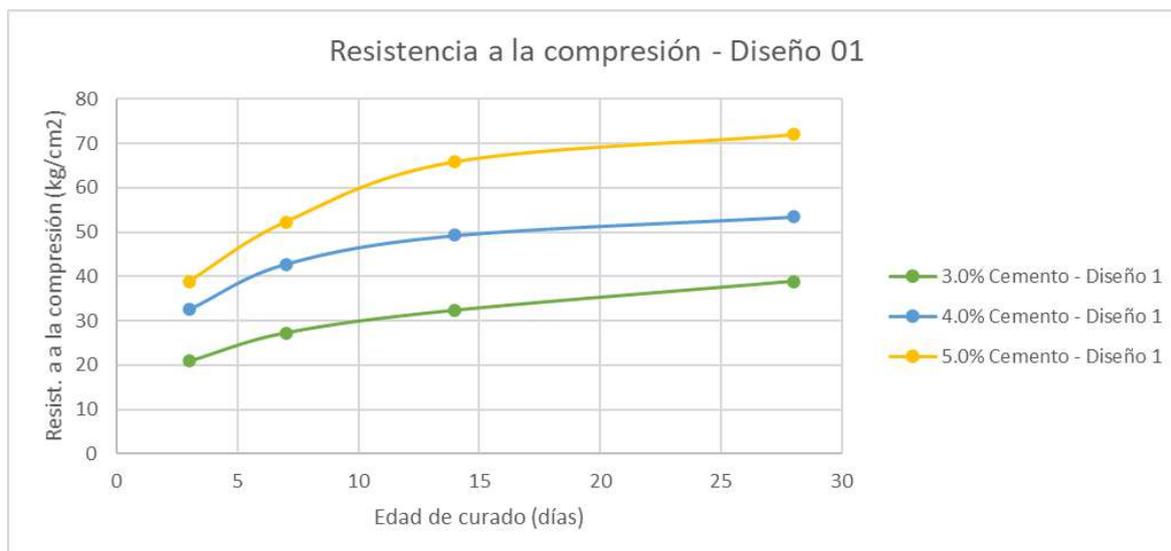


Figura 25. Evolución de la resistencia a la compresión a través del tiempo - Diseño 1

En el gráfico anterior se presenta la evolución de la resistencia a la compresión a través del tiempo para probetas con distintas proporciones de suelo y cemento, para el estudio del comportamiento del material granular usado en el Diseño 1.

### 3.4.2 Resistencia a la compresión no confinada – Diseño 2

Se moldearon, de igual manera, un total de 36 probetas, con la humedad óptima y máxima densidad seca (M.D.S) obtenida del ensayo proctor para cada porcentaje de cemento. La relación de probetas moldeadas y los resultados obtenidos se presenta en el siguiente cuadro:

Tabla 27. Resumen de ensayos de resistencia a la compresión no confinada - Diseño 2 (Parte 1)

Código	Cantidad de cemento	Fecha de compactado	Fecha de inicio de curad	Edad de curado	Fecha de rotura	Resistencia a la compresión no confinada (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
RC-02-03-01						8.1	
RC-02-03-02				3 días	09/12/2020	8.5	8.1
RC-02-03-03						7.8	
RC-02-03-04						11.2	
RC-02-03-05				7 días	13/12/2020	10.8	11.3
RC-02-03-06	3.0%	06/12/2020	07/12/2020			11.8	
RC-02-03-07						15.1	
RC-02-03-08				14 días	20/12/2020	14.9	15.0
RC-02-03-09						11.0*	
RC-02-03-10						17.2	
RC-02-03-11				28 días	03/01/2021	16.5	17.1
RC-02-03-12					17.8		

\*Datos atípicos que no se consideraron en el cálculo de los promedios.

Tabla 28. Resumen de ensayos de resistencia a la compresión no confinada - Diseño 2 (Parte 2)

Código	Cantidad de cemento	Fecha de compactado	Fecha de inicio de curad	Edad de curado	Fecha de rotura	Resistencia a la compresión no confinada (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
RC-02-04-01						13.8	
RC-02-04-02				3 días	10/12/2020	13.4	13.9
RC-02-04-03						14.4	
RC-02-04-04						17.7	
RC-02-04-05				7 días	14/12/2020	15.9	16.8
RC-02-04-06	4.0%	07/12/2020	08/12/2020			21.0*	
RC-02-04-07						20.6	
RC-02-04-08				14 días	21/12/2020	21.4	21.3
RC-02-04-09						22.0	
RC-02-04-10						26.9	
RC-02-04-11				28 días	04/01/2021	28.0	27.6
RC-02-04-12						27.9	
RC-02-05-01						18.0	
RC-02-05-02				3 días	11/12/2020	17.4	17.8
RC-02-05-03						17.9	
RC-02-05-04						23.9	
RC-02-05-05				7 días	15/12/2020	23.3	23.9
RC-02-05-06	5.0%	08/12/2020	09/12/2020			24.4	
RC-02-05-07						31.1	
RC-02-05-08				14 días	22/12/2020	30.8	31.4
RC-02-05-09						32.4	
RC-02-05-10						39.4	
RC-02-05-11				28 días	05/01/2020	41.4	40.2
RC-02-05-12						41.0	

\*Datos atípicos que no se consideraron en el cálculo de los promedios.

De manera que se obtiene el siguiente gráfico:



Figura 26. Evolución de la resistencia a la compresión a través del tiempo - Diseño 2

En los gráficos anteriores se puede apreciar el grado de reacción del suelo-cemento-agua y se evidencia en los resultados, que porcentajes de cemento tan bajos como 3 o 5% en peso, añaden al material granular la capacidad de aumentar su resistencia a la compresión conforme pase el tiempo y según la cantidad de cemento añadido.

### 3.5 Módulo de elasticidad estático

Para el caso del módulo de elasticidad estático, se usaron probetas de 6x12" según la ASTM C 469. El procedimiento después de haber sido moldeadas es básicamente el mismo que con las probetas del ensayo de resistencia a la compresión, se envolvieron en bolsas plásticas para evitar la pérdida de humedad. Sin embargo, estas no fueron curadas en una poza de agua durante 4 horas, sino que se ensayaron en estado seco.



Figura 27. Probeta de suelo cemento de 6x12" con diales de deformación.

Las probetas se rompieron a 28 días de acuerdo con la norma anteriormente mencionada y los resultados obtenidos se compararon con los parámetros mínimos recopilados de distintas fuentes. Para el presente trabajo de investigación, se decidió optar por un valor mínimo de 70,000 kg/cm<sup>2</sup> a 28 días de iniciado el curado según los valores recomendados por distintas fuentes como la PCA y la AASHTO. Esto, con el objetivo de asegurar una buena distribución de cargas y buen desempeño del paquete estructural del pavimento durante su vida útil.

### 3.5.1 Módulo de elasticidad – Diseño 01

En la siguiente tabla, se muestran los valores obtenidos para la mezcla de suelo cemento con material granular A-1-a(0) o grava pobremente graduada.

Tabla 29. Resumen de ensayo de Módulo de elasticidad estático - Diseño 1

Código de probeta	Porcentaje de cemento	Edad de curado	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad promedio (kgcm <sup>2</sup> )
ME-01-3.0-02		28	216.79	
ME-01-3.0-03	3.0	28	175.35	196.07
ME-01-3.0-04		28	-	
ME-01-4.0-02		28	325.63	
ME-01-4.0-03	4.0	28	305.65	315.64
ME-01-4.0-04		28	-	
ME-01-5.0-02		28	321.66	
ME-01-5.0-03	5.0	28	354.96	338.06
ME-01-5.0-04		28	-	

### 3.5.2 Módulo de elasticidad – Diseño 02

En la siguiente tabla, se muestran los valores obtenidos para la mezcla de suelo cemento con material granular A-1-b(0) o arena pobremente graduada.

Tabla 30. Resumen de ensayo de Módulo de elasticidad estático - Diseño 2

Código de probeta	Porcentaje de cemento	Edad de curado	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad promedio (kgcm <sup>2</sup> )
ME-02-3.0-02		28	-	
ME-02-3.0-03	3.0	28	98.75	74.39
ME-02-3.0-03		28	50.04	
ME-02-4.0-03		28	-	
ME-02-4.0-03	4.0	28	126.46	117.60
ME-02-4.0-03		28	108.74	
ME-02-5.0-03		28	150.34	
ME-02-5.0-03	5.0	28	146.48	150.41
ME-02-5.0-03		28	154.40	

Con las tablas anteriores se puede apreciar la evolución del módulo de elasticidad estático y, por lo tanto, la rigidez de las mezclas de suelo cemento evaluadas, a medida que se aumente la cantidad de cemento. Sin embargo, se puede corroborar que el módulo de elasticidad estático será mayor para suelos granulares.

### 3.6 Análisis de resultados y diseño final

A continuación, se compararán los resultados obtenidos en ambas mezclas para determinar el porcentaje de cemento óptimo para cada una de ellas:

#### 3.6.1 Porcentaje óptimo de cemento – Diseño 1

Como se mencionó al inicio de este capítulo, los 2 parámetros a evaluar para la determinación del porcentaje óptimo de cemento son la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad estático.

Tabla 31. Resumen de ensayos - Mezcla 1

Diseño	% Cemento	Humedad - densidad		Resistencia a la compresión a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad estático (kg/cm <sup>2</sup> )	Cumple / No Cumple
		Humedad óptima (%)	Máxima densidad seca (gr/cc)			
01	3.0	2.315	5.6	35	196.07	Cumple
	4.0	2.275	6.6	52	315.64	Cumple
	5.0	2.287	7.0	48	338.06	Cumple

En la tabla anterior se puede apreciar la resistencia a la compresión para 3% de cemento supera el mínimo de 21 kg/cm<sup>2</sup> y el módulo de elasticidad estático es mayor a 70,000 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, se tiene que el porcentaje de cemento óptimo para el diseño de la Mezcla 1 es de menos de 3.0%. Con el objetivo de calcular el porcentaje óptimo de cemento para el material granular en estudio, se decidió añadir un porcentaje extra de cemento (2.0%), al cual se le realizarán todos los ensayos laboratorio necesarios y se evaluarán los resultados obtenidos en los siguientes apartados.

#### 3.6.2 Porcentaje óptimo de cemento – Diseño 2

De igual manera, se evalúa que la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad estático cumplan los valores mínimos previamente determinados.

Tabla 32. Resumen de ensayos - Mezcla 2.

Diseño	% Cemento	Humedad densidad		Resistencia a la compresión a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad estático (kg/cm <sup>2</sup> )	Cumple / No Cumple
		Humedad óptima (%)	Máxima densidad seca (gr/cc)			
02	3.0	8.8	2.131	11.2	74.39	No Cumple
	4.0	8.3	2.137	16.8	117.60	No Cumple
	5.0	9	2.167	23.9	150.41	Cumple

Se puede observar que la mezcla 2 supera el valor mínimo de 70,000 kg/cm<sup>2</sup> para módulo de elasticidad estático en todos los porcentajes de cemento evaluados. Sin embargo, los porcentajes de 3 y 4% no superan el valor mínimo de 21 kg/cm<sup>2</sup> para resistencia a la compresión no confinada pero el de 5% sí. Por lo tanto, es necesario realizar una interpolación, con el objetivo de calcular con precisión el porcentaje óptimo de cemento.

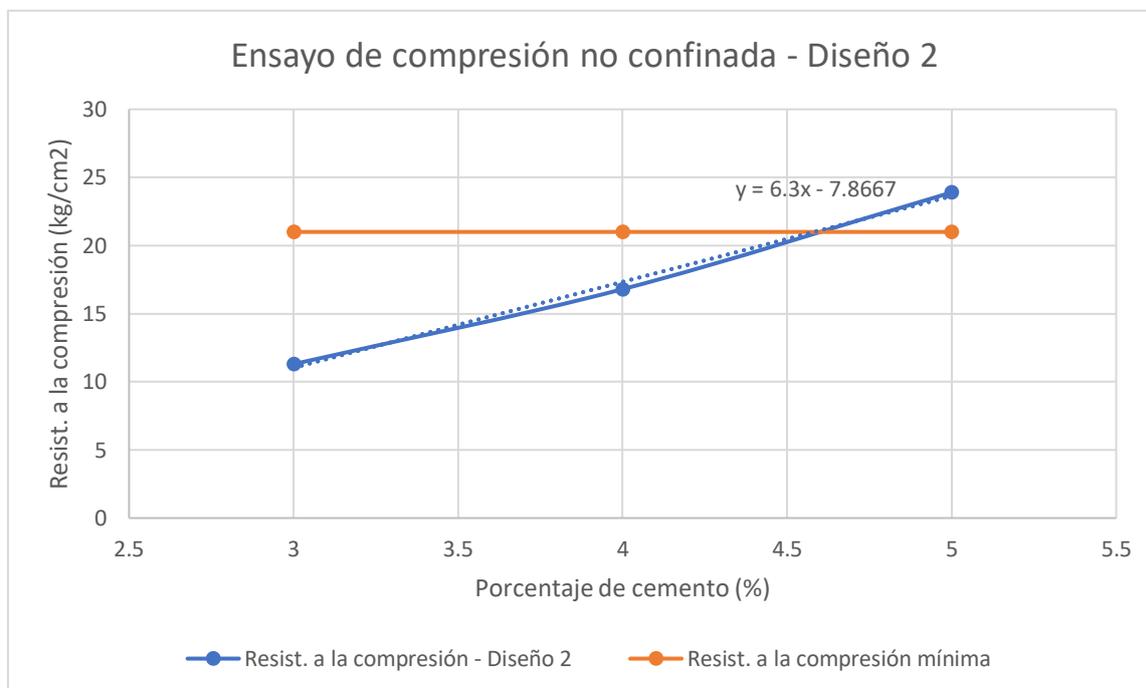


Figura 28 Evolución de la resistencia a la compresión con el porcentaje de cemento – Diseño 2.

Con ayuda de la ecuación obtenida gracias al gráfico, se realizó una interpolación con la cual se pudo determinar que para obtener una resistencia mínima de 21 kg/cm<sup>2</sup>, se requiere un porcentaje de cemento de 4.6% para el material granular evaluado en la mezcla 2.

### 3.6.3 Selección de diseño final

Los resultados obtenidos en ambos diseños se presentan en la siguiente tabla resumen:

Tabla 33. Resumen de resultados - Diseños 1 y 2.

No. de diseño	01		02
Tipo de material	SUCS AASHTO	GP-GC A-1-a (0)	SP A-1-b (0)
IP		3.32	NP
% Cemento óptimo		< 3.0%	4.6%
Distancia al tramo de aplicación (km)		13 km	32 km



Figura 29. Verificación visual de probetas de 4x8" para diseños 1 y 2.

Es importante también, realizar un análisis visual de las probetas ensayadas, con el fin de inspeccionar el comportamiento de ambos materiales durante el desarrollo de los ensayos de laboratorio. Al lado derecho, se puede observar una probeta hecha con material de la mezcla 2 (SP en clasificación SUCS), un suelo arenoso no plástico. Gracias a esta característica, se puede apreciar que el acabado será de menor calidad debido a la poca cohesión que existe entre sus partículas. En comparación a la probeta del lado izquierdo, hecha con material de la mezcla 1 (GP-GC en clasificación SUCS) con cierto grado de plasticidad, su acabado es liso y uniforme.

Se puede observar en la Tabla 32, que la mezcla 1 es la mejor propuesta debido a que el porcentaje de cemento óptimo y las distancias de transporte hacia el tramo son menores. Como se mencionó en el apartado 3.6.1, se evaluará un nuevo punto de muestreo con 2.0% de contenido del material cementante, con el objetivo de calcular el porcentaje de cemento óptimo para la mezcla 1.

Se evaluará el nuevo contenido de cemento teniendo en cuenta que, en realidad, este porcentaje es el más bajo en relación al mínimo que proponen otras entidades, tal como se explicó en el apartado 3.1 en la Tabla 21. La mayoría de ellas proponen un porcentaje mínimo entre 3 y 5%.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los distintos ensayos de laboratorio, de acuerdo al método elegido para el presente trabajo de investigación.

**3.6.3.1 Humedad Densidad – Diseño 01 con 2.0% de cemento.** Se realizó en ensayo de humedad-densidad con el nuevo porcentaje de cemento para la mezcla 1. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 34. Resultados ensayo humedad densidad - Diseño 1

Contenido de cemento	No. de Muestra	1	2	3	4
2.0%	Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.259	2.298	2.227	2.164
	Contenido de humedad (%)	4.6	6.6	8.5	10.5

Se puede observar la nueva curva humedad-densidad obtenida en el presente ensayo, la cual se puede observar en el siguiente gráfico junto a las curvas correspondientes a los demás porcentajes de cemento analizados.

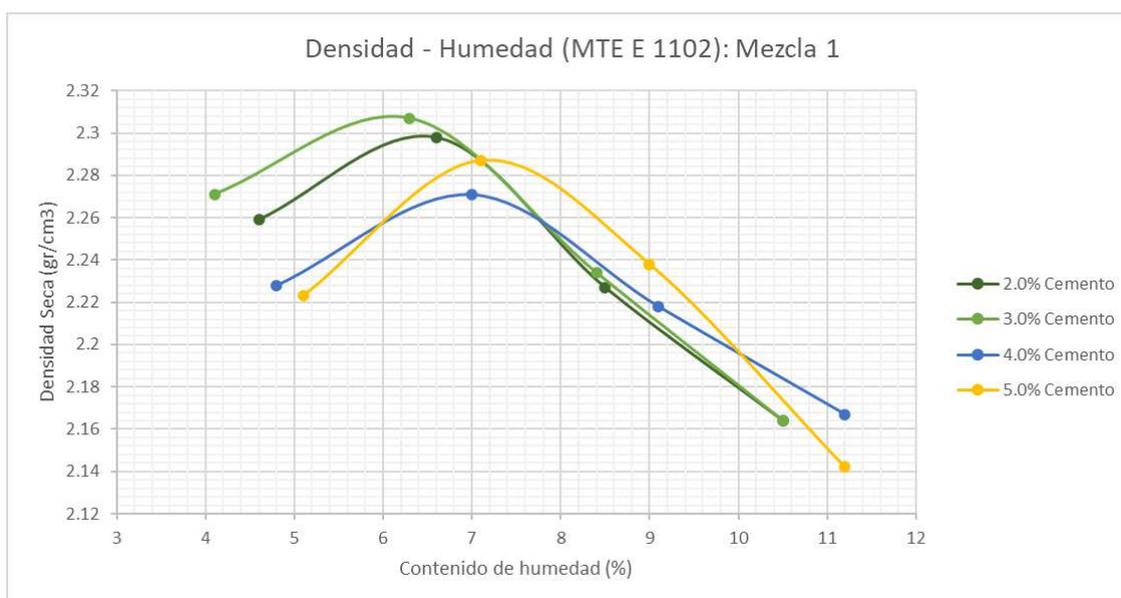


Figura 30. Relación densidad - humedad para contenidos de cemento de 2 a 5% peso – Diseño 1.

Se tiene entonces, una máxima densidad seca y humedad óptima para cada porcentaje evaluado:

- 2.0% Cemento: MDS=2.307 gr/cm<sup>3</sup> Humedad óptima=6.10%

Es importante señalar que, para la fabricación de probetas para ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad se respetarán la máxima densidad seca y humedad óptima obtenidos en el presente ensayo.

**3.6.3.2 Resistencia a la compresión – Diseño 01 con 2.0% de cemento.** Se moldearon 12 probetas las cuales fueron identificadas bajo el mismo esquema de codificación que las probetas anteriores. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 35. Resumen de ensayo de resistencia a la compresión no confinada con 2.0% de cemento - Diseño 1

Código	Cantidad de cemento	Fecha de compactado	Fecha de inicio de curad	Edad de curado	Fecha de rotura	Resistencia a la compresión no confinada (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
RC-01-02-01						10.8	
RC-01-02-02				3 días	29/12/2020	10.2	10.0
RC-01-02-03						9.0	
RC-01-02-04						15.1	
RC-01-02-05				7 días	02/01/2021	15.1	15.2
RC-01-02-06	2.0%	26/12/2020	27/12/2020			15.5	
RC-01-02-07						23.9	
RC-01-02-08				14 días	09/01/2021	22.8	23.5
RC-01-02-09						23.7	
RC-01-02-10						34.2	
RC-01-02-11				28 días	23/01/2021	33.3	33.7
RC-01-02-12						33.7	

De manera que se obtiene el siguiente gráfico:

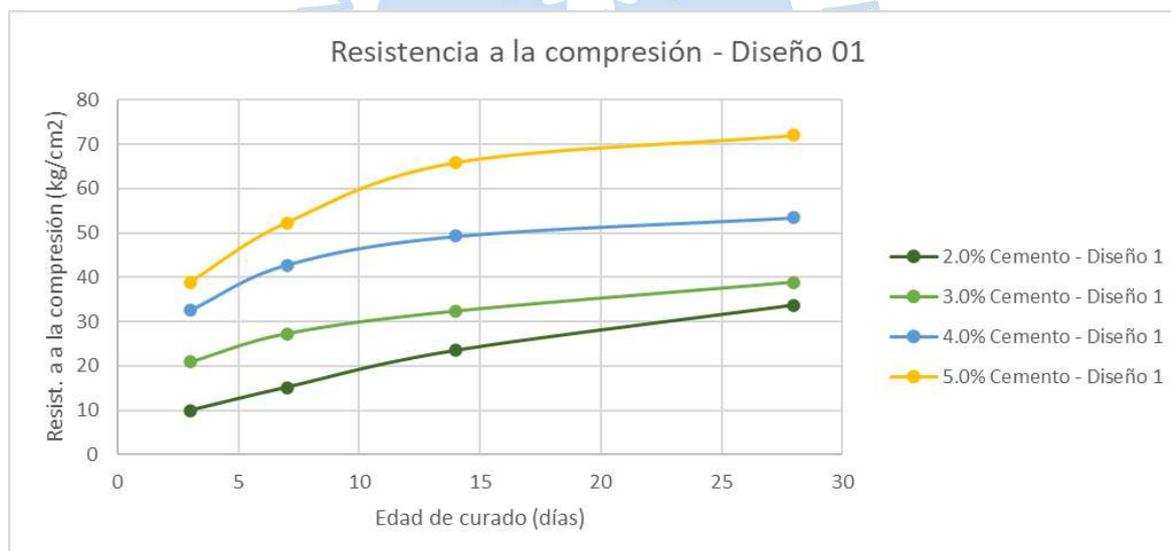


Figura 31. Evolución de la resistencia a la compresión a través del tiempo para contenidos de cemento de 2 a 5% - Diseño 1.

En el gráfico anterior se puede apreciar que para 2.0% de cemento los resultados son muy bajos y que para 5.0% de contenido de cemento, la evolución de la resistencia es mucho mayor a lo largo del tiempo.

Serigos (2007) obtuvo resultados similares en cuanto a la evolución de la resistencia de suelos estabilizados con cemento. Afirma que la resistencia y la rigidez del suelo-cemento crece de forma logarítmica con el tiempo.

Además, se puede realizar también una interpolación que permita calcular el porcentaje de cemento que alcanza los 21.0 kg/cm<sup>2</sup> en resistencia a la compresión.

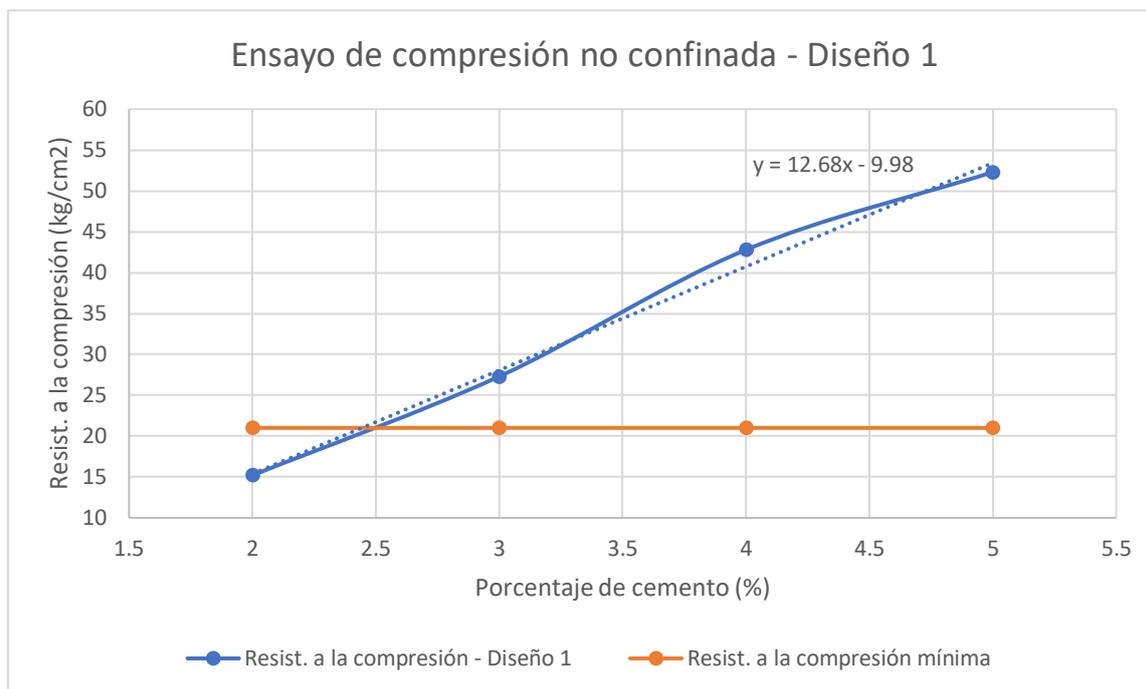


Figura 32. Evolución de la resistencia a la compresión con el porcentaje de cemento – Diseño 2.

Con ayuda de la ecuación obtenida gracias al gráfico anterior, se realizó una interpolación con la cual se pudo determinar que para obtener una resistencia mínima se requiere un porcentaje de cemento de 2.5% para el material granular evaluado en el diseño 1.

**3.6.3.3 Módulo de elasticidad – Diseño 01 con 2.0% de cemento.** De igual manera, se ensayaron 4 probetas de 6x12” pulgadas a 7 días de curado. La primera probeta se usó para hallar la carga máxima de rotura, posteriormente, se ensayaron las últimas 3 con el dial de deformación. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 36. Resumen de ensayo de Módulo de elasticidad estático con 2.0% de cemento - Diseño 1

Código de probeta	Porcentaje de cemento	Edad de curado	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	E promedio (kgcm <sup>2</sup> )
ME-01-02-02	2.0	28	106.11	101.62
ME-01-02-03	2.0	28	108.96	
ME-01-02-04	2.0	28	89.86	

Se puede apreciar que el módulo de elasticidad estático para 2% de cemento en la mezcla 1 supera los 70,000 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que cumple el requisito mencionado.

Después de haber sido desarrollados los capítulos 2 y 3, y luego de haber realizado todos los ensayos en laboratorio y en cumplimiento de la normativa vigente (EG-2013 para

Suelo cemento), se concluye que se usarán los siguientes materiales para la construcción de la base estabilizada con suelo-cemento. Se tienen los siguientes resultados:

**MATERIAL GRANULAR:**

• Cantera	:	Portachuelos 2
• Clasificación AASHTO	:	A-1-a (0)
• Índice de Plasticidad	:	4%
• Resistencia a la compresión a 7 días	:	24.5 kg/cm <sup>2</sup>
• Módulo de elasticidad	:	100 kg/cm <sup>2</sup>

**AGUA POTABLE:**

• Fuente de agua	:	Río Chira
• pH	:	6.1 ppm
• Contenido de sulfatos (SO <sub>4</sub> )	:	87 ppm
• Contenido de materia orgánica	:	0.07ppm

**CEMENTO:**

• Contenido de cemento	:	2.5%
• Tipo	:	MH

Este diseño satisface plenamente las exigencias de la normativa técnica vigente aplicable para carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones: Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, por lo tanto, su empleo es técnicamente viable.

Además, se comprueba el funcionamiento de las tablas de porcentaje mínimo de cemento proporcionados por el MTC (2014) y la PCA (2001). Se concluye que es una buena guía o referencia para establecer los puntos de prueba antes de iniciar con el diseño en laboratorio del suelo – cemento.

## Capítulo 4

### Aplicación en campo

#### 4.1 Actividades preliminares

Para poder realizar la aplicación en campo del suelo-cemento previamente diseñado en el capítulo anterior, son necesarias las siguientes actividades:

- Liberación de subrasante. (Lo explicado en los capítulos 2.2 y 2.3)
- Diseño de suelo-cemento en laboratorio (Lo explicado en el capítulo 3)
- Explotación, zarandeo y acopio de material granular en cantera (Lo explicado en el capítulo 2.4)
- Calibración de planta de suelos. (el cual se explicará más adelante a detalle)

#### 4.2 Producción de suelo-cemento

Para el presente trabajo de investigación, se realizó la producción de suelo cemento en planta de suelos, cuyo procedimiento completo se explica a continuación:



Figura 33. Equipos usados durante el procedimiento completo de producción de suelo cemento.

1- Desbroce y explotación de material de cantera: En el capítulo 2.4 se analizaron las distintas canteras disponibles para la extracción de material granular y en el capítulo 3.6.3 se escogió la más conveniente en cuestiones técnicas para el diseño final. Una vez escogido el diseño final (Mezcla 01) se procede a realizar una limpieza general y desbroce de la superficie de la cantera seleccionada. Posteriormente, se realizó la extracción del material granular de acuerdo con la estratigrafía de la zona. Los equipos usados fueron una excavadora sobre orugas y un tractor sobre orugas.

2- Zarandeo de material granular: De acuerdo con el MTC (2013), el tamaño máximo nominal del material granular a usar en estabilización de suelos con cemento es 2 pulgadas. Por lo tanto, se procede a zarandear el material extraído. Los equipos usados fueron un cargador sobre llantas y una zaranda con apertura de 2 ¼ pulgadas.

3- Carguío y acopio de material zarandeado: El material extraído y zarandeado es trasladado a un lugar específico de acopio, en donde estará a disposición del personal de piso en la planta de suelos para su posterior procesamiento y mezclado para obtener el suelo-cemento. Los equipos usados fueron 2 volquetes de 17 metros cúbicos cada uno y el cargador sobre llantas usado en el zarandeo del material granular.

4- Producción de suelo-cemento. El proceso de producción se realiza a través de una planta de suelos previamente calibrada. La misma que deberá ser abastecida constantemente con agua y cemento necesario para la producción continua de la mezcla. Los equipos usados fueron, además de la planta de suelos, un cargador sobre llantas para el abastecimiento de cemento y material granular, y un camión cisterna para el abastecimiento de agua en los tanques estacionarios.

#### **4.2.1 Planta mezcladora de suelos**

La planta de suelos permite el mezclado de materiales de préstamo, y esta puede tener distintas formas y configuraciones. Sin embargo, el esquema básico usado para la producción de suelo cemento suele tener las siguientes partes principales:

- Alimentador de material granular. - Compuesto por una o varias tolvas alimentadoras, cuyas compuertas deben ser de abertura variable para poder realizar la calibración correspondiente en cada una de ellas.
- Alimentador de cemento. - Usualmente consta de una tolva independiente (de menor tamaño) teniendo en cuenta que la proporción de cemento agregado es muy inferior a la de material granular. Esta deberá conectarse a la faja transportadora principal a través de un tornillo sin fin de frecuencia regulable, con el fin de poder calibrar la tolva de manera adecuada.
- Faja transportadora principal. - Consta de una faja transportadora de velocidad variable, la cual se encarga de alimentar el tambor de mezclado con el material granular y el cemento. En la misma se suelen realiza un “control de faja” el cual forma parte de la rutina diaria pre producción, con el fin de garantizar que se mantenga la proporción de los materiales durante la semana.
- Alimentador de agua. - Usualmente compuesto por un tanque estacionario el cual debe ser abastecido con agua regularmente, una bomba de inyección de agua, una válvula reguladora y tuberías que conecten directamente al tambor de mezclado.

- Tambor de mezclado. - Caja mezcladora donde todos los materiales anteriormente mencionados se combinan y se obtiene suelo cemento como resultado.

En el siguiente esquema se representan las distintas partes de la planta de suelos y el flujo básico de la misma.

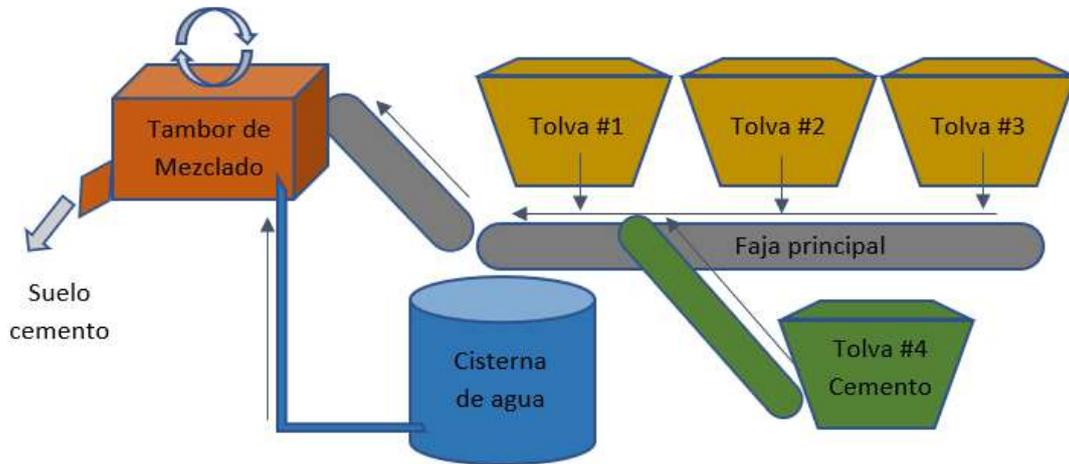


Figura 34. Componentes principales de planta de suelos.



Figura 35. Planta de suelos de tambor rotatorio, usada en el presente trabajo de investigación.

Según la ACI (2009), existen dos tipos básicos de plantas de suelos: mezcladoras de molino (de flujo continuo o por lotes) o mezcladoras de tambor giratorio, siendo el método más común el de la mezcladora de molino de flujo continuo. El rango de producción de este último tipo de planta de suelos, la cual se usó en este trabajo de investigación, varía entre las 200 y 800 toneladas por hora.

A continuación, se explica el método de calibración usado en la planta de suelos con la que se produjo cerca de 130,000 metros cúbicos de suelo cemento, a razón de 250 toneladas por hora.

**4.2.1.1 Calibración del suministro de material granular.** La dotación del material granular es el primero en ser calibrado, debido a que los resultados obtenidos serán utilizados como referencia para la calibración del suministro de agua y de cemento.

No se debe perder de vista que, según el MTC (2013), el tamaño máximo nominal para suelos estabilizados con cemento debe ser de 2". Por lo que, las aberturas de las compuertas de cada tolva no deben ser menores este valor con el fin de evitar posibles atascamientos durante el funcionamiento de la planta. Los pasos a seguir para lograr una correcta calibración son los siguientes:

- I. Se alimenta el material en las tolvas después de cerrar todas las compuertas.
- II. Limpiar la faja transportadora de la planta de suelos, de manera que no exista material residual de producción o la calibración anterior.
- III. Abrir una compuerta en tres o más aberturas distintas y se pone en funcionamiento el alimentador para cada una de ellas.
- IV. Seleccionado la abertura y cuando el alimentador esté funcionando normalmente, se detiene la planta.
- V. Se colocará el marco metálico sobre una sección de la faja transportadora. Con el uso de una escobilla y una espátula se recogerá todo el material encerrado en el cuadrante.
- VI. Se pesará en una balanza el material correspondiente a un cierto número de revoluciones, evitando en todo momento la pérdida del mismo.
- VII. Repetir el proceso desde el punto III. al V. hasta obtener el peso del material recogido con tres aberturas distintas por tolva.
- VIII. Elaborar el diagrama de calibración según Figura 34.
- IX. Seleccionar, según el diagrama de calibración, la abertura para cada tolva según la cantidad de material granular requerido en toneladas por hora (ton/hora) o en metros cúbicos por minuto ( $m^3$ /minuto)
- X. Una vez seleccionado la abertura a utilizar, controlar la faja en peso (con el uso del cuadrante) por lo menos 15 veces con la finalidad de hallar su desviación standard.

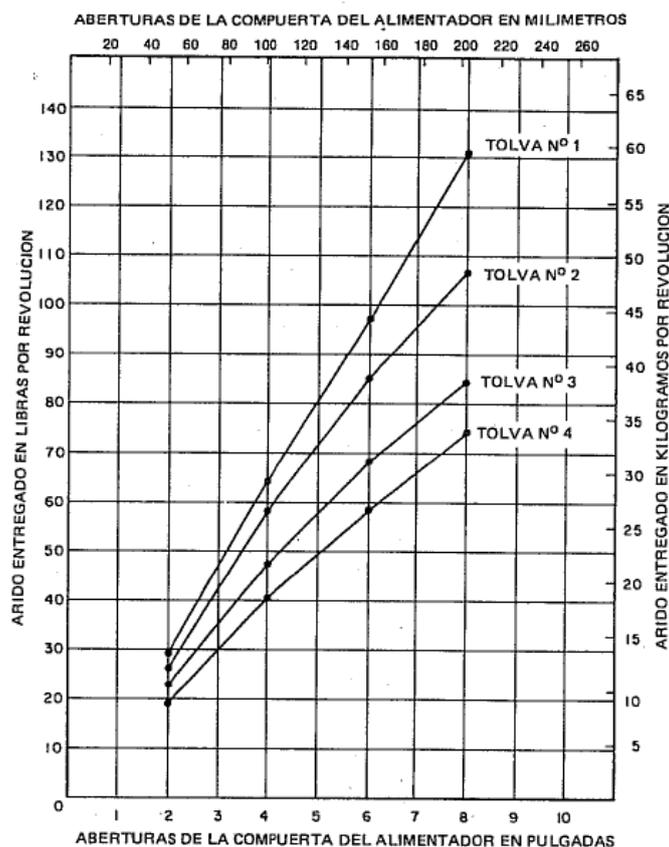


Figura 36. Diagrama de calibración de suministro de agregados.

Fuente: Montaje, Operación y Mantenimiento de plantas para mezcla asfáltica en caliente. Rodríguez (2008).

**4.2.1.2 Calibración de suministro de cemento.** El presente proceso de calibración debe tener como finalidad proporcionar a la mezcla, el porcentaje de cemento óptimo determinado en el diseño de suelo cemento en laboratorio. Además, se debe determinar la desviación estándar del mismo, realizar los ajustes necesarios para aumentar la precisión del alimentador de cemento y mantener estable la proporción del material cementante a lo largo del tiempo.

“En vez de ajustar aleatoriamente el alimentador de cemento hasta encontrar la proporción de cemento adecuada, primero se debe determinar la relación entre distintas revoluciones por minuto o aperturas de compuerta (dependiente del tipo de alimentador) y la cantidad de cemento descargado. Es recomendable graficar esta relación para encontrar el ajuste adecuado para abastecer la cantidad de cemento requerido según diseño”, (PCA, 2001).

Este procedimiento es similar a la calibración de suministro de material granular y siempre debe guardar relación con el diseño de suelo – cemento en laboratorio.

- I. Colocar el cemento VIAFORTE en la tolva independiente, instalada específicamente para el suministro de cemento a la mezcla.
- II. Limpiar la faja transportadora principal de la planta de suelos, de manera que no exista material residual de producción o la calibración anterior.

- III. Se opera el alimentador en tres o más velocidades distintas de la faja.
- IV. Seleccionada la velocidad de faja y cuando el alimentador esté funcionando normalmente, se detiene la planta.
- V. Se colocará el marco metálico sobre una sección de la faja transportadora. Con el uso de una escobilla y una espátula se recogerá todo el material encerrado en el cuadrante.
- VI. Se pesará en una balanza el material correspondiente a un valor determinado de frecuencia, usualmente en hercios (Hz), evitando en todo momento la pérdida del mismo.
- VII. Repetir el proceso desde el punto III. al v. hasta obtener el peso en las tres velocidades diferentes.
- VIII. Elaborar el diagrama de calibración (Kg Vs Hz.).
- IX. Seleccionar según el diagrama de calibración, la configuración del sin-fin en Hertz, según el % de cemento de diseño en kg.
- X. Una vez registrado el peso contenido en 1 metro de faja para las diferentes velocidades, se realiza el siguiente cálculo:

$$\% \text{ Cemento} = \frac{W_{\text{cemento } i}}{W_{\text{cemento } i} + W_{\text{mat.granular}}} * 100 \quad (1)$$

Donde:

% Cemento : porcentaje de cemento contenido en mezcla.

$W_{\text{cemento } i}$  : peso de cemento, registrado en toma de muestra de cada control de faja.

$W_{\text{mat.granular}}$  : peso promedio de material granular

- XI. Una vez seleccionado la velocidad a utilizar, controlar la faja en peso (con el uso del cuadrante) por lo menos 10 veces con la finalidad de hallar su desviación standard.

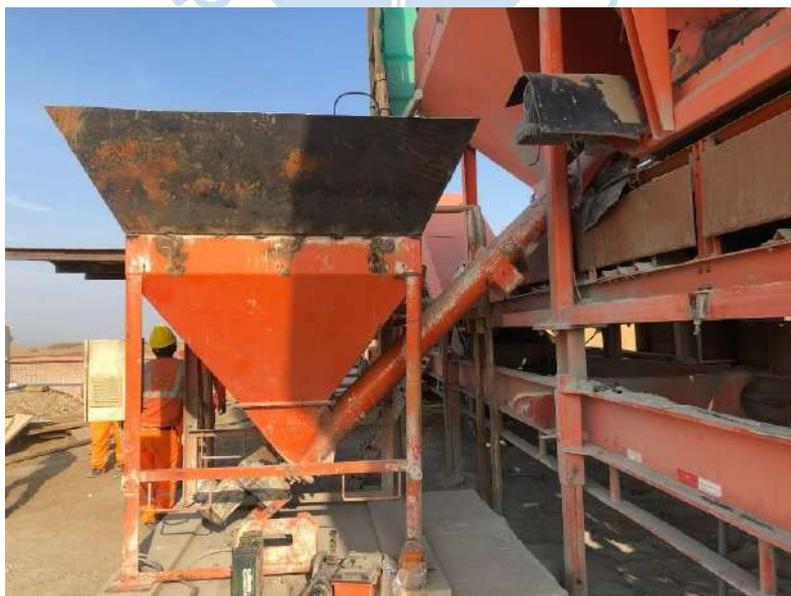


Figura 37. Tolva y tornillo transportador sin fin para abastecimiento de cemento.

**4.2.1.3 Calibración de suministro de agua.** Al comienzo, se debe tomar la humedad óptima de diseño en laboratorio como referencia para la calibración del abastecimiento de agua en la mezcla. Sin embargo, el objetivo de esta calibración también es la obtención de un diagrama (% de humedad v.s. caudal), el cual facilitará el ajuste de la válvula conforme se detecten variaciones en el ensayo de Humedad – Densidad (MTC E 1102), realizado al material acopiado.

- I. Preparar los tanques cisterna y el empalme de las tuberías que conducen el agua a la planta de suelos.
- II. Abrir la válvula en tres o más aberturas distintas y se opera el alimentador para cada una de ellas y se registra el caudal del caudalímetro.
- III. Seleccionado el caudal y cuando el alimentador esté funcionando normalmente, se detiene la planta.
- IV. Se mide la humedad en porcentaje (%) con el uso del ensayo MTC E 108 a través del secado en horno, o con el ensayo MTC E 126 a través del método de carburos de calcio. La muestra a evaluar es extraída del producto mezclado en planta de suelos.
- V. Elaborar el diagrama de calibración (% de humedad vs. Caudal).
- VI. Seleccionar según el diagrama de calibración el caudal según el porcentaje de agua a utilizar.
- VII. Una vez seleccionado el caudal a utilizar, controlar el porcentaje de humedad por lo menos 10 veces con la finalidad de hallar su desviación standard.



Figura 38. Abastecimiento de agua en tanques estacionarios de 10,000 litros de capacidad.

En el Anexo 5, se muestran los diagramas de flujo correspondientes a la calibración de cada uno de los componentes de la planta de suelos, explicados anteriormente. Los resultados obtenidos en la planta de suelos, fueron siguientes:

Tabla 37. Resultados de calibración en planta de suelos.

Material y componente a calibrar	Configuración de calibración	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	Desviación estándar
Suelo (apertura de tolvas)	5 pulgadas	35.21 kg	37.48 kg	36.37 kg	0.83
Agua (apertura de válvula y caudalímetro)	4.2 litros/segundo	6.20%	7.20%	6.71%	0.34
Cemento (revoluciones en tornillo sin fin)	115 Hertz	2.45%	3.92%	3.06%	0.42

“Cuando se trabaja con suelos granulares por lo general no habrá dificultades para su manipulación y mezclado en planta. En cambio, en suelos finos cohesivos será necesaria la preparación previa del suelo mediante pulverizado hasta obtener granulometrías y humedades acordes con las especificadas.” (ICPA, 2015). El material granular utilizado para la producción de suelo cemento es un suelo gravoso, por lo tanto, no habría complicaciones para su procesamiento en planta de suelos.

Una vez calibrada la planta de suelos y habiendo realizado los controles de calidad correspondientes, se procede a la producción continua del material estabilizado y su posterior transporte al tramo donde será colocada. Para ello, se debe asegurar el constante abastecimiento de material granular en tolvas, el suministro de agua y el del cemento.

#### 4.3 Procedimiento constructivo

Según el ICPA (2011), existen factores fundamentales a tomar en cuenta durante la construcción del suelo cemento. Estos factores se pueden resumir de la siguiente manera:

- Contenidos de cemento y humedad correctamente dosificados para alcanzar las características de resistencia y durabilidad especificadas, determinadas previamente en laboratorio.
- Mezclado preciso y uniforme de todos los materiales involucrados.
- Compactación adecuada en el camino, ejecutada dentro de los plazos de trabajabilidad recomendados, que garantice la obtención de las densidades determinadas en laboratorio y la uniformidad en todo el espesor de la base.
- Curado apropiado de la capa terminada que permita mantener las condiciones de humedad durante el tiempo mínimo prescrito, de forma de asegurar la correcta hidratación del cemento y la obtención de las resistencias de acuerdo a la mezcla proyectada.

Para el presente trabajo de investigación, se aplicó el siguiente tren de trabajo para realizar el procedimiento constructivo:



Figura 39. Equipos usados durante el procedimiento completo de producción de suelo cemento.

1- Transporte de suelo-cemento: Consiste en el transporte del material producido en planta de suelos, el cual, para el caso del equipo usado la producción fue en promedio de 150 m<sup>3</sup>/h. Por lo tanto, se debe contar con una flota de volquetes necesaria para cumplir con la demanda en el frente de colocación de suelo-cemento, el cual se explicará más adelante. Los volquetes deben ser cubiertos con los cobertores necesarios para reducir la pérdida de humedad durante el transporte del material. El ICPA (2011) recomienda limitar el tiempo total de transporte a 30 minutos como máximo a partir de la mezcla del cemento con el resto de los materiales.

2- Topografía y emplantillado de niveles: La cuadrilla de topografía tiene como función principal emplantillar los niveles en los hombros y en el eje a nivel de base, respetando el diseño geométrico longitudinal y transversal de la vía.

3- Colocación de suelo-cemento: El suelo cemento producido en planta debe ser colocado sobre una superficie firme y humedecida antes de la colocación. Tanto la PCA (2001), la ACI (2009) y el ICPA (2011) recomiendan colocar capas de suelo cemento con espesores de 15 centímetros de material compactado, teniendo en cuenta que el esponjamiento del suelo cemento suele estar entre el 10 y 30% dependiendo del tipo de material. En caso el diseño de la sección del pavimento requiera espesores mayores, se podrían colocar dos capas sucesivas minimizando el tiempo entre la colocación de ambas, con el objetivo de conservar la humedad en la mezcla, proteger del desgaste y mantener limpia la superficie de contacto entre ambas capas.

El expediente técnico del proyecto solicita la construcción de una capa de 30 centímetros de base estabilizada de suelos con cemento. Sin embargo, El MTC (2014) sugiere que las capas de 30 centímetros de terraplén sean conformadas en capas de 15 centímetros cada una. Por lo tanto, la construcción de la misma se realizó con el uso de una esparcidora o extendedora de pavimentos, en 2 capas con el espesor que indica la norma.



Figura 40. Colocación de la segunda capa de suelo cemento con esparcidora, km 45+600.

Se colocó un carril a la vez, intentando reducir al máximo entre la colocación de un carril y el adyacente, con el fin de evitar crear juntas longitudinales y la pérdida de humedad en la superficie de empalme.

Además, existe la posibilidad de colocar el suelo cemento producido en planta mediante el extendido y distribución de la mezcla con motoniveladora. Sin embargo, la ICPA (2011) no recomienda esta práctica debido a que no se logra una densificación homogénea en toda la mezcla extendida. Además, señala que los movimientos propios de la motoniveladora durante este tipo de trabajos, exponen al suelo cemento a importantes pérdidas en la humedad.



Figura 41. Conformación de la base estabilizada (suelo cemento) con motoniveladora, km 39+500.

4- Compactación inicial: Después de haber realizado la colocación del suelo cemento, se procede a compactar el material de manera inmediata. En general se podrían usar distintos equipos para la realizar la compactación (rodillo liso, tándem, neumático, pata de cabra, etc.). Sin embargo, la PCA (2001) recomienda distintos tipos de rodillo según el tipo de suelo a compactar:

- Rodillos pata de cabra. – son generalmente usados para compactación inicial en suelos no granulares.
- Rodillos vibratorios. - pueden ser usados satisfactoriamente para compactar suelos granulares.
- Compactadores de placas vibratorias. – se recomienda su uso en suelos no plásticos.
- Rodillos neumáticos. – es recomendable su uso en suelos de arena gruesa o grava con poca plasticidad.



Figura 42. Rodillo liso en compactación inicial de suelo cemento recién colocado.

La compactación inicial o pre compactación se realizó con un rodillo liso de 12 toneladas. La fórmula de trabajo o cantidad de ciclos requeridos para alcanzar el porcentaje de compactación mínimo de 95% varía entre 5 a 8 ciclos, siendo recomendable corroborar la misma con mediciones de densidad in situ con el método nuclear o con el ensayo de cono de arena.

5- Topografía y verificación de niveles: Consiste en la verificación de niveles con escantillón y el emplantillado de niveles según diseño geométrico a nivel de base estabilizada para posteriormente realizar el corte y perfilado de la superficie.

6- Corte, perfilado superficie y compactación final: Kraemer et al. (2004) sugiere que durante la compactación, la superficie del suelo estabilizado se debe conformar mediante una motoniveladora con el objetivo de eliminar irregularidades, huellas o discontinuidades inadmisibles. Por lo cual se puede recurrir a una ligera escarificación o perfilado de la superficie, siempre dentro del plazo trabajabilidad recomendado, y su posterior recompactación previa adición del agua necesaria.

Este proceso consiste en el perfilado y refine de bombeos, peraltes, etc. con motoniveladora. La posterior compactación se puede realizar con rodillo vibratorio o rodillo neumático, los cuales cual dejarán la superficie lista para recibir el curado del material. El tramo en estudio recibió una compactación final con 2 - 4 ciclos de rodillo neumático de 23 toneladas de peso, debido a que se trata de un suelo granular con poca plasticidad. Es importante verificar constantemente la fórmula de trabajo de los rodillos con la medición de densidades in situ.



Figura 43. Perfilado de bombeos con motoniveladora en suelo cemento pre compactado.

El ICPA (2011) sugiere realizar una pre compactación de la capa de suelo cemento a un 90 - 92 % de la densidad requerida e inmediatamente iniciar el corte y perfilado final de la base. Con el objetivo de realizar nuevos ciclos de compactación y el sellado final del suelo cemento perfilado según la geometría requerida para la base.

La PCA (1995) sugiere que la compactación final se complete en no más de 4 horas desde el mezclado de los materiales, mientras que la ICPA (2011) sugiere que este tiempo no supere las 2 horas. La importancia de la pronta compactación y perfilado del suelo cemento reside en que las cargas aplicadas por la motoniveladora y los nuevos ciclos de compactación tenderán a “romper” las estructuras formadas durante el proceso de hidratación del material cementado, atentando contra la calidad del mismo.



Figura 44. Rodillo liso y rodillo neumático utilizados para compactación de suelo cemento

#### 4.4 Curado con emulsión asfáltica

El MTC (2013), indica que en ningún caso se realizará el curado después de 24 horas de colocación de la mezcla de suelo con cemento.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó el producto PRIMETEC de TDM Asfaltos, el cual se caracteriza por ser de curado rápido, ser de fácil aplicación, no requerir dilución y presentar buena penetración en bases granulares. La tasa de aplicación dependerá del tipo de producto a aplicar, pero por lo general, la PCA (2001) sugiere tasas entre 0.5 a 1.20 litros por metro cuadrado. En el anexo 6 se encuentra la ficha técnica del producto.



Figura 45. Curado del carril izquierdo a nivel de base estabilizada con cemento, km 23+600.

La ICPA (2011) sugiere que la aplicación de riego de liga se realice entre 20 y 30 minutos después del compactado final. En caso no sea posible realizar el curado con emulsión asfáltica, se mantendrá la humedad superficial con riegos frecuentes de agua. Además, recomienda limpiar la superficie de material suelto mediante el barrido o soplado con compresora para posteriormente aplicar agua previamente a la aplicación de la emulsión.

La PCA (2009) señala que, si en caso fuera necesario abrir el tráfico sobre la superficie curada con el material bituminoso, se puede aplicar arena sobre el mismo para evitar que los vehículos destruyan la película protectora. En la Figura 46 se puede observar la arena esparcida sobre la superficie curada con emulsión asfáltica.



Figura 46. Superficie curada con emulsión y arena esparcida en la superficie antes de permitir el paso del tráfico.

#### 4.5 Controles en campo

La ACI (2009) indica que las propiedades del suelo cemento son influenciadas por distintos factores, entre los cuales encontramos el tipo y proporción del suelo, el tipo de cemento y contenido de agua, el grado de compactación, uniformidad de la mezcla, condiciones de curado y edad de la mezcla compactada.

Es recomendable seguir todas las recomendaciones mencionadas a lo largo del presente capítulo con el objetivo de garantizar resultados favorables.

Los ensayos de laboratorio exigidos según la normativa peruana se muestran en el MTC (2013) de los cuales, se presentarán los más importantes para la evaluación del material según normativa internacional. A continuación, se muestran los controles realizados durante la producción en planta y colocación del suelo cemento, además de los resultados recopilados durante el periodo de ejecución del tramo.

#### 4.5.1 Según ACI-230

**4.5.1.1 Contenido de cemento.** El contenido de cemento puede ser medido de distintas maneras dependiendo del método de esparcido del mismo.

- **A través de un camión esparcidor/propagador:** En este método el camión esparcidor, cargado con una cantidad de cemento determinado, distribuirá el cemento en su totalidad a través de un área determinada. Esta verificación general se realiza para controlar la cantidad de cemento que se colocará en un área específica.

Adicionalmente a ello, se debe realizar controles de tasa de cemento esparcido con el uso de una bandeja o una lona de área y peso conocidos, la misma que será cuidadosamente recogida después de distribuido el cemento. Se procede a pesar el contenido neto del cemento recogido y realizar la siguiente operación.

$$\text{Tasa de cemento} = \frac{\text{Peso neto de cemento recogido.}}{\text{Área de la bandeja o lona.}} \quad (2)$$

Esta tasa debe asegurar el porcentaje de cemento óptimo resultante del diseño explicado en el capítulo 3. Por lo tanto, se tendría que realizar un registro diario de mínimo 3 mediciones a lo largo de la jornada. Con la intención de controlar las variaciones de la tasa de cemento a lo largo del tiempo.

- **Mezclado en planta de suelos:** Como se mencionó anteriormente, este es el método utilizado en el presente trabajo de investigación, para la colocación del Diseño 1 determinado en el capítulo 3.

Posteriormente a ser realizada la calibración de la planta, se procede a realizar el control de contenido de cemento al inicio y al final de la jornada. La medición se realiza en 2 partes: En primero lugar se inicia el mecanismo de la planta de suelos, pero únicamente dejando fluir el material granular durante mínimo 1 minuto. Al apagar el sistema, mediante el uso de un cuadrante metálico el cual establece un área seleccionada en la faja transportadora principal, cuyo material seco dentro de la misma será pesado (material granular). Posteriormente se realiza el mismo procedimiento, pero solamente dejando fluir el cemento.

$$\text{Contenido de cemento (\%)} = \frac{\text{Peso neto de cemento recogido.}}{\text{Peso neto de mat. granular recogido.}} * 100 \quad (3)$$



Figura 47. Control diario de contenido de cemento en faja transportadora con cuadrante metálico.

Se puede ajustar la velocidad de suministro del cemento hasta alcanzar el porcentaje de cemento deseado. A continuación, se muestra un gráfico que representa la variación del porcentaje de cemento obtenido en planta, a través del tiempo de ejecución del tramo II.

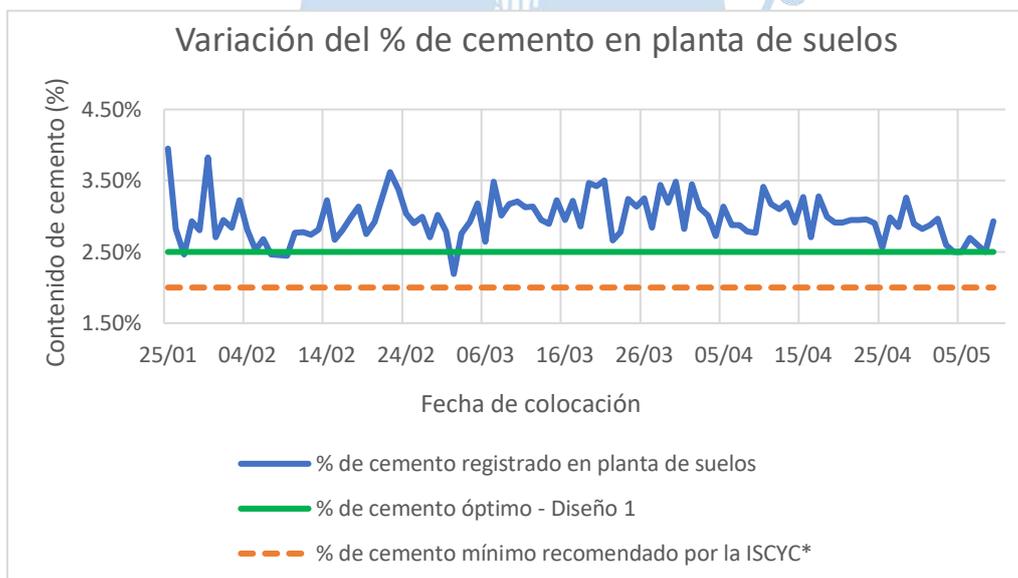


Figura 48. Desarrollo del porcentaje de cemento a lo largo del periodo de ejecución del tramo II.

En el gráfico anterior se puede apreciar que, durante el mes de febrero, la precisión es menor entre los registros diarios del contenido de cemento con el que se produjo el suelo cemento. Este fue el primer mes de funcionamiento de la planta de suelos, en el cual se realizaron diversos ajustes con el objetivo de disminuir la diferencia entre los porcentajes medidos de manera diaria. Posteriormente se logró estabilizar la misma, con la cual se asegura un mejor control en el contenido de cemento.

Tabla 38. Datos estadísticos contenido de cemento diario producido en planta.

Mes de colocación	Número de días ejecutados	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Enero	7.00	2.46%	3.95%	3.07%	0.58%
Febrero	26.00	2.45%	3.75%	2.94%	0.30%
Marzo	30.00	2.19%	3.81%	3.09%	0.31%
Abril	30.00	2.56%	3.45%	2.99%	0.19%
Mayo	9.00	2.09%	2.97%	2.61%	0.21%

En la tabla anterior se puede apreciar cómo es que, gracias al seguimiento constante y a los ajustes realizados oportunamente en planta de suelos, la desviación estándar disminuye a medida que pasa el tiempo y el promedio del contenido de cemento es más preciso en relación al porcentaje de cemento óptimo del diseño 01.

**4.5.1.2 Contenido de humedad.** La PCA (1992) indica que los resultados del ensayo de humedad – densidad del diseño en laboratorio no son directamente aplicables a los controles de campo. Deberá realizarse este ensayo en muestras representativas en campo para conocer la humedad óptima y la densidad máxima a la cual se compactará la mezcla. Este procedimiento se realiza con el objetivo cubrir pequeñas variaciones en estos parámetros, sobre todo en periodos de operación prolongados.

Por tal motivo, el ensayo de humedad - densidad del diseño 01 sirve tan solo como una referencia inicial para el contenido de humedad durante la producción. Se realizó el ensayo de Humedad – Densidad (MTC E-1102 o ASTM D-558) cada 750 m<sup>3</sup> según indica la normativa peruana con muestras obtenidas directamente en la vía, con el objetivo de verificar la humedad óptima, para la cual se respetará una tolerancia de  $\pm 1,5$  % según la misma norma. Es importante conocer este valor y mantener la humedad dentro del rango sugerido pues esta influirá directamente en la compactación del suelo cemento.

Independientemente del método de mezclado del suelo cemento, es necesario el cálculo de la humedad del material granular previamente al mezclado, de manera que se pueda controlar la humedad requerida, la cual se añadirá en planta con mayor precisión.

- **Mezclado in-situ:** Después de conocer la humedad natural del material granular y realizar un mezclado preliminar con el cemento, se agrega la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima, usualmente se realiza el esparcido de la misma con un camión cisterna. Posteriormente se realiza el mezclado y conformación de la capa de suelo cemento, generalmente con motoniveladora. Luego, se procede a verificar el contenido de agua, es recomendable la medición mediante del ensayo de “Contenido de humedad en suelos método del carburo de calcio” (MTC E 126) debido a la rapidez en la obtención de resultados y la facilidad de transportar los equipos durante la jornada.

Sin embargo, el ministerio de transportes y comunicaciones en su “Manual de ensayo de materiales” del 2016, recomienda la calibración del equipo y la obtención de una “curva de correlación” o “curva de conversión” entre el contenido de humedad medido mediante ensayo MTC E 108 a través del secado en horno y la medición propia del manómetro usado en el ensayo MTC E 126.

• **Mezclado en planta de suelos:** Al igual que el material granular y el cemento, la alimentación de agua debe ser calibrada tal y como se explicó en el apartado 4.3.1. Lo cual se verificará diariamente de la misma manera tanto en el proceso de producción como en el de colocación. Se tomarán muestras del resultado producido en planta para el control de humedad antes de iniciar la producción con el método tradicional de secado en horno o en defecto, siguiendo el ensayo MTC E 126 con las recomendaciones previamente mencionadas. Además, se tomarán muestras en campo previamente a la compactación del suelo cemento con el objetivo de verificar que la humedad se encuentre dentro del rangos óptimos y de determinar la pérdida de humedad desde el mezclado en planta de suelos hasta la colocación de la mezcla.



Figura 49. Medición de contenido de humedad en suelos método del carburo de calcio – MTC E 126

Una humedad apropiada es necesaria para obtener una buena compactación y para completar el proceso de hidratación del cemento. Debido a la evaporación, es mejor tener un exceso en la humedad (hasta 2% dependiendo de las condiciones climáticas) a tener déficit en la misma al momento de compactar la mezcla. (PCA, 2001).

Se recopilaron las mediciones de humedad a lo largo de los 36.73 kilómetros del del tramo en estudio. Los resultados fueron los siguientes:

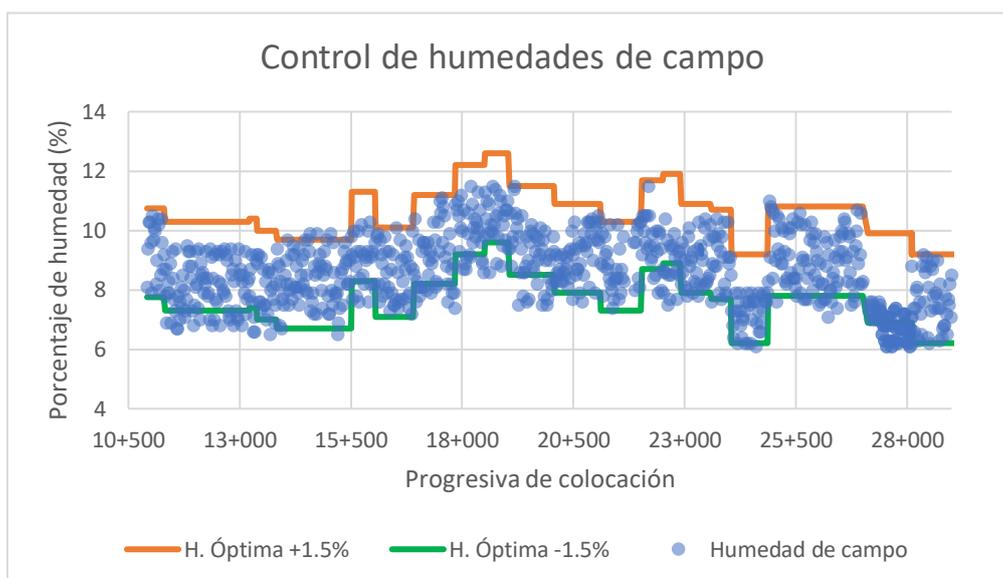


Figura 50. Control de humedades en campo desde el km 10+880 hasta el 29+000.

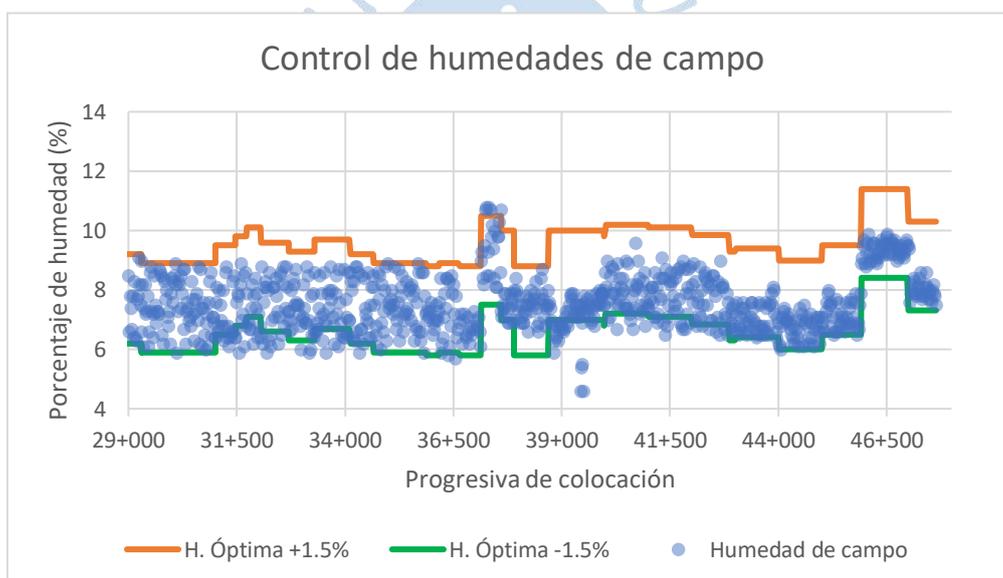


Figura 51. Control de humedades de campo desde el km 29+000 hasta el 47+605.

En los gráficos anteriores se puede corroborar que el rango de humedad recomendada varía a lo largo de la colocación de la base estabilizada, esto debido a los cambios en la humedad óptima con un mínimo de 7.30% y un máximo de 11.10%. Estos resultados pueden diferir de los valores obtenidos en laboratorio debido a variaciones mínimas en el material granular o a causa de los efectos de la hidratación parcial del cemento durante el proceso de mezclado (*Soil - Cement Inspector Manual, Portland Cement Association*). Es ahí donde reside la importancia de mantener un control sobre la humedad óptima de la mezcla para garantizar buenos resultados en la compactación de la capa colocada. La humedad de la mezcla producida en planta de suelos debe ser ajustada diariamente y debe estar acuerdo con los resultados del ensayo de humedad-densidad obtenidos en campo.

Los puntos donde la humedad de campo se encuentra fuera del rango de tolerancia (H. Óptima  $\pm 1.5\%$ ) deben ser corregidos mediante una ligera aplicación de agua en la superficie o el secado al sol según sea conveniente.

#### 4.5.1.3 Verificación visual de mezclado uniforme.

• **Verificación de mezclado in situ:** Para asegurar el correcto mezclado de los materiales, se debe cuidar de manera exhaustiva cada uno de los siguientes procedimientos, los cuales forman parte del mezclado in situ: esparcido el cemento con camión propagador o distribuyendo bolsas de cemento en áreas específicas, pre mezclado entre suelo y el cemento, esparcido agua a través de camión cisterna, mezclado y conformación de la base de suelo cemento con motoniveladora.

La PCA (2001) sugiere cavar zanjas con una profundidad igual el espesor colocado, en puntos aleatorios, verificado el color y textura uniforme en la superficie expuesta en la zanja. Si la mezcla es visualmente homogénea desde la parte superior hasta el fondo de la zanja, entonces los materiales han sido mezclados satisfactoriamente.

• **Verificación visual de mezclado uniforme en planta de suelos:** El mezclado en planta de suelos puede asegurar la uniformidad de la mezcla de suelo cemento la mayoría de las veces. Sin embargo, según la experiencia recopilada en campo, es necesario tomar en cuenta distintos factores que suelen disminuir la homogeneidad de la mezcla. Estos factores se explican a continuación:

1. Suelos plásticos: Los suelos altamente plásticos (sin exceder el valor límite de 18 para el índice de plasticidad) no son recomendables para mezclado en planta de suelos debido a su baja capacidad de pulverización (PCA, 2001). Sin embargo, se puede reducir plasticidad y mejorar la trabajabilidad agregando cal a la mezcla. Posteriormente se realiza un diseño nuevo.

2. Exceso de humedad: En caso de lluvia o saturación del material granular acopiado, se debe reducir el exceso de humedad mediante secado al aire libre o el premezclado en el lugar de acopio. De lo contrario el funcionamiento de la planta puede verse afectado, además del diseño de la mezcla.

3. Falta de mantenimiento de la planta de suelos: Se debe asegurar el mantenimiento mediante un check-list de cada componente de la planta diariamente, antes de iniciar el control de faja y la producción continua de suelo-cemento.

Es importante llevar un control del estado de las paletas del tambor mezclador, las cuales cumplen una función fundamental en el mezclado y estas suelen desgastarse frecuentemente durante su uso. Además, es necesario siempre revisar que las tolvas alimentadoras de material granular las cuales pueden obstruirse con frecuencia si no se revisan regularmente.

4. Contenido de materia orgánica: Se deberá realizar el retiro de materia orgánica, restos de tierra de uso agrícola o tamaños de partículas superiores al máximo especificado durante la etapa de producción (MTC, 2013). Sin embargo, es una práctica frecuente colocar una malla metálica en las bocas de las tolvas alimentadoras de la planta de suelos, con tamaño máximo de 2 ¼". Las mismas que deberán ser limpiadas antes de iniciar cada jornada y en caso se realicen pausas en la producción de suelo-cemento.



Figura 52. Superficie de suelo cemento de color homogéneo.

En la figura anterior se puede verificar el mezclado uniforme de manera visual mediante la inspección del color del suelo-cemento, el mismo suele tener un color grisáceo, producto del mezclado con cemento.

**4.5.1.4 Verificación de espesores.** Como se explicó en el apartado 4.3 en el procedimiento constructivo del tramo en estudio. La colocación de suelo cemento con esparcidora se realizó en 2 capas de un máximo de 15 cm después de compactado. Por lo tanto, durante la colocación se controló el espesor mediante el uso de un escantillón, para ello se comprobó que el material colocado tenía un esponjamiento volumétrico aproximado de 30%. Sin embargo, es recomendable añadir 2 centímetros adicionales para el perfilado según requieran las secciones transversales del pavimento.



Figura 53. Control de espesores con escantillón previa compactación del material colocado.

**4.5.1.5 Control de compactación.** La norma EG-2013 recomienda un porcentaje mínimo de compactación de 95% en relación a la máxima densidad seca registrada en campo. Es por ello que es muy importante realizar el ensayo de humedad – densidad con el objetivo de mantener un control sobre la humedad óptima y la máxima densidad seca, los cuales están estrechamente relacionados para garantizar un buen porcentaje de compactación.

Según la ACI (2009), los métodos de medición de densidad in situ deben ser realizados inmediatamente después de completar el procedimiento de compactación. Entre los ensayos más comunes se encuentran los siguientes:

- Método Nuclear (ASTM D2922 y D3017/MTC E 124).
- Método del cono de arena (ASTM D1556/MTC E 117).
- Método del globo (ASTM D2167).

Se realizaron las mediciones de la densidad in situ según el método nuclear (MTC E 124) y con la frecuencia indicada en la sección 301.A de la EG-2013. Se recopiló datos cada 20 metros alternando entre lado derecho, izquierdo y eje de la base estabilizada compactada. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

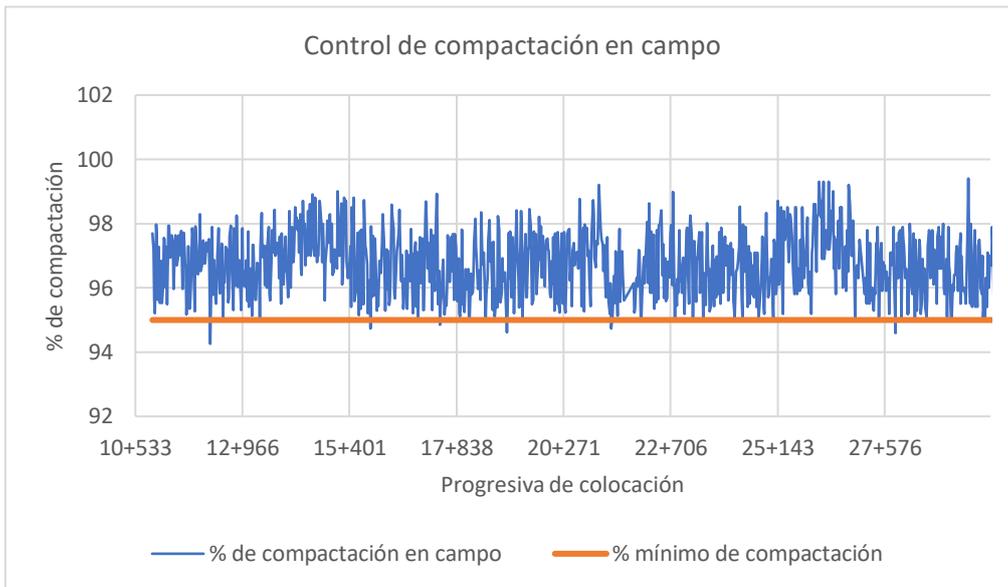


Figura 54. Porcentaje de compactación medido en campo, km 10+880 a 29+981.

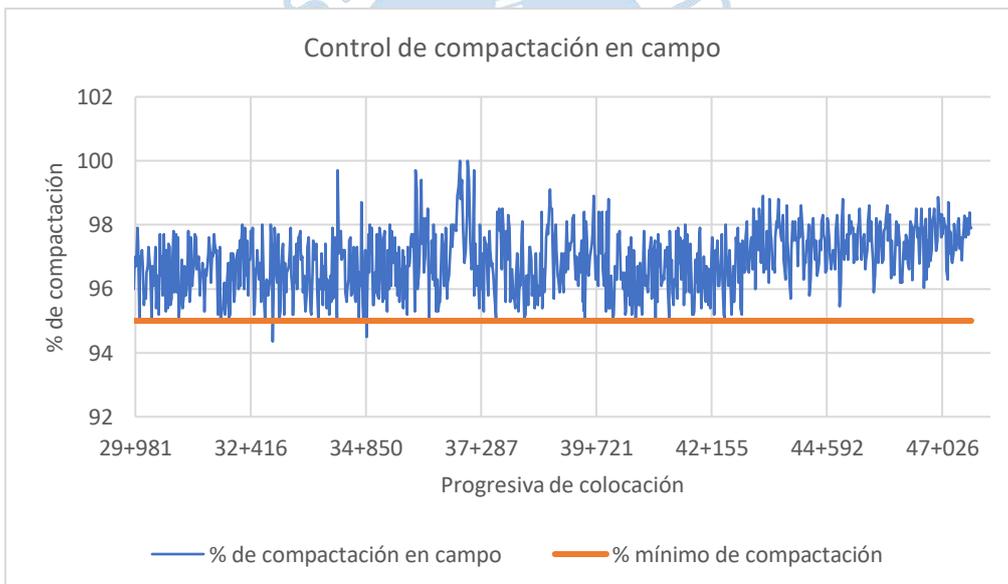


Figura 55. Porcentaje de compactación medido en campo, km 29+981 a 47+640.

En los gráficos anteriores se puede apreciar porcentaje de compactación del material colocado. Se representa el desarrollo de la densidad in situ en relación a la máxima densidad seca registrada en campo. Es importante señalar que los puntos en donde se registran porcentajes de compactación menores a la permitido según normativa peruana (95%), se solucione de manera inmediata con nuevos ciclos de compactación con rodillo liso.



Figura 56. Determinación de densidad in situ con método nuclear

A continuación, se presenta un resumen estadístico de los datos recopilados en campo, a lo largo del tramo en estudio.

Tabla 39. Resumen estadístico de % compactación en campo

PROGRESIVAS		No. DE DATOS	%	%	%	DESVIACIÓN ESTANDAR
DESDE	HASTA					
10+880	15+470	228.00	94.26	99.00	96.96	0.93
15+470	20+060	230.00	94.62	98.92	96.59	0.99
20+060	24+650	219.00	94.73	99.20	96.66	0.97
24+650	29+240	261.00	94.60	99.30	96.81	1.02
29+240	33+830	234.00	94.35	99.40	96.49	0.86
33+830	38+420	226.00	94.50	100.00	96.79	1.11
38+420	43+010	237.00	95.00	99.10	96.66	0.93
43+010	47+600	232.00	95.46	98.90	97.46	0.71

Según la ACI (2009), realizar un seguimiento continuo a la relación entre la densidad in situ y la máxima densidad seca de la mezcla para realizar los ajustes necesarios al método de compactación y así asegurar el cumplimiento de las especificaciones del trabajo.

#### 4.5.2 Según el MTC

**4.5.2.1 Resistencia a la compresión no confinada cada 2000 m<sup>3</sup>.** Se moldearon 2 juegos de 4 probetas cada una, en campo. Posteriormente se curaron durante 7 días y se ensayaron según la norma del MTC E 1103.

A continuación, se presenta un gráfico en donde se puede apreciar la variación de la resistencia a la compresión de la mezcla a lo largo del tiempo.

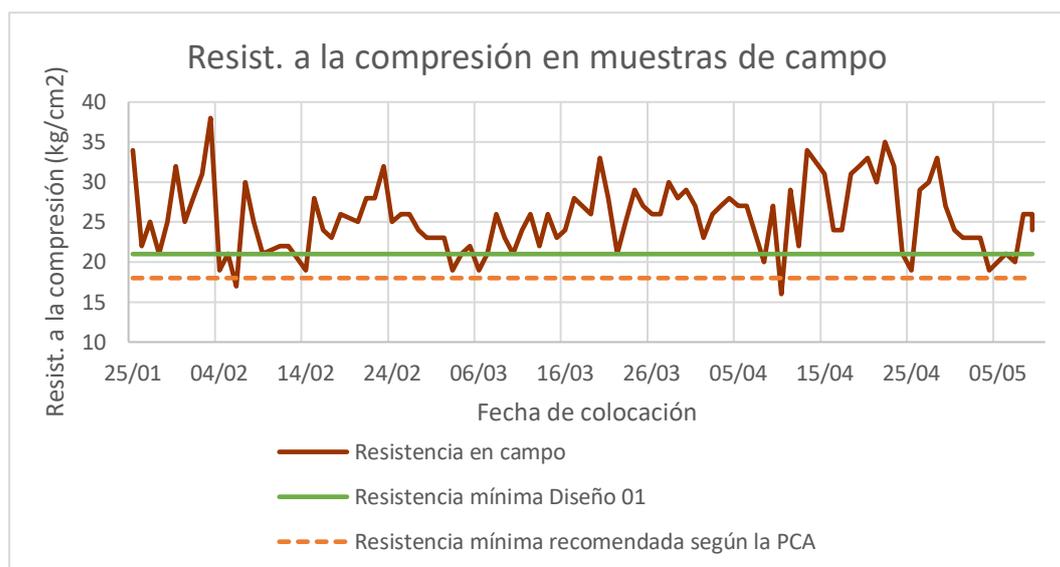


Figura 57. Determinación de densidad in situ con método nuclear.

Se puede apreciar en el gráfico anterior que, debido a la variación del porcentaje obtenido en planta en cada día de producción, la resistencia a la compresión también varía. Sin embargo, es importante considerar que las probetas ensayadas según indica el procedimiento MTC E 1103/ASTM D1633 presentan una resistencia reducida en condiciones saturadas.

Según la ACI (2009), la resistencia a la compresión no confinada está relacionada a la densidad. Esta propiedad es afectada en la misma manera que la densidad, por el grado de compactación y el contenido de humedad. Esto quiere decir que, al ensayar las probetas con material recogido en campo, se está corroborando indirectamente la capacidad de este material de ser compactado.

Tabla 40. Resumen estadístico de la resistencia a la compresión no confinada a 7 días de curado.

MES DE COLOCACIÓN	No. DE DATOS	RESIST. MÍNIMA (kg/cm <sup>2</sup> )	RESIST. MÁXIMA (kg/cm <sup>2</sup> )	RESIST. PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )	DESVIACION ESTANDAR
ENERO	7.00	21.00	34.00	26.29	4.89
FEBRERO	25.00	17.00	38.00	25.24	4.62
MARZO	30.00	19.00	33.00	24.87	3.39
ABRIL	28.00	16.00	35.00	27.18	4.84
MAYO	9.00	19.00	26.00	22.78	2.44

En la tabla anterior también se refleja lo demostrado en la Tabla 37, a medida que se fueron realizando ajustes en la planta de suelos, el porcentaje de cemento en la producción de suelo-cemento fue más preciso. Por lo tanto, se obtuvieron resultados de resistencia a la compresión más cercanos a los del diseño en laboratorio y una desviación estándar menor.

La PCA (1992) sostiene que la resistencia a la compresión de probetas saturadas, ensayadas a 7 días de curado, representan un suelo cemento durable. Estos resultados varían con las propiedades físicas y químicas del suelo y estarán generalmente en el rango de 21 y 56 kg/cm<sup>2</sup>.

**4.5.2.2 Evaluación deflectométrica.** El MTC (2013), indica que el campo de aplicación de la medición de la deflectometría es muy amplio, empleándose principalmente para determinar la vida útil remanente de un pavimento, evaluar estructuralmente los pavimentos con fines de mantenimiento, mejoramiento o rehabilitación, evaluar los métodos de diseño de pavimentos y control de ejecución de obras, evaluar el debilitamiento progresivo de la estructura debido a las solicitaciones del tránsito que lo utiliza, y establecer si éste presenta suficiencia sin presentar fatiga estructural creciente. En el presente trabajo de investigación, se utilizó este método como control de los procedimientos de colocación y compactación del suelo-cemento. Para ello, se realizó el ensayo de medida de deflexión de pavimento flexible empleando la viga benkelman MTC E 1002.

Los siguientes gráficos se presentan los deflectogramas correspondientes a los carriles derecho e izquierdo a lo largo del tramo en estudio según el ensayo mencionado anteriormente.

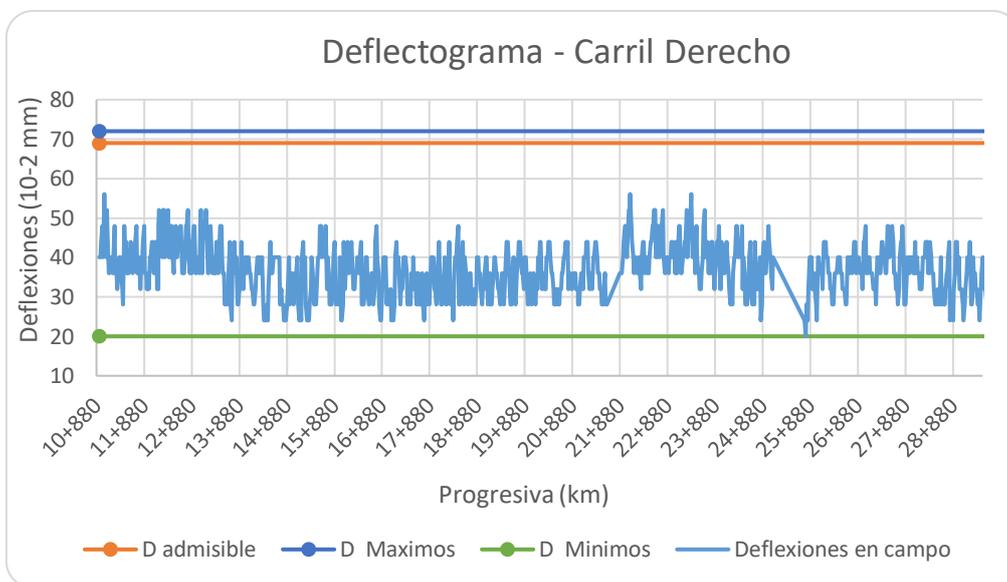


Figura 58. Deflectograma de carril derecho, km 10+880 a 29+500.

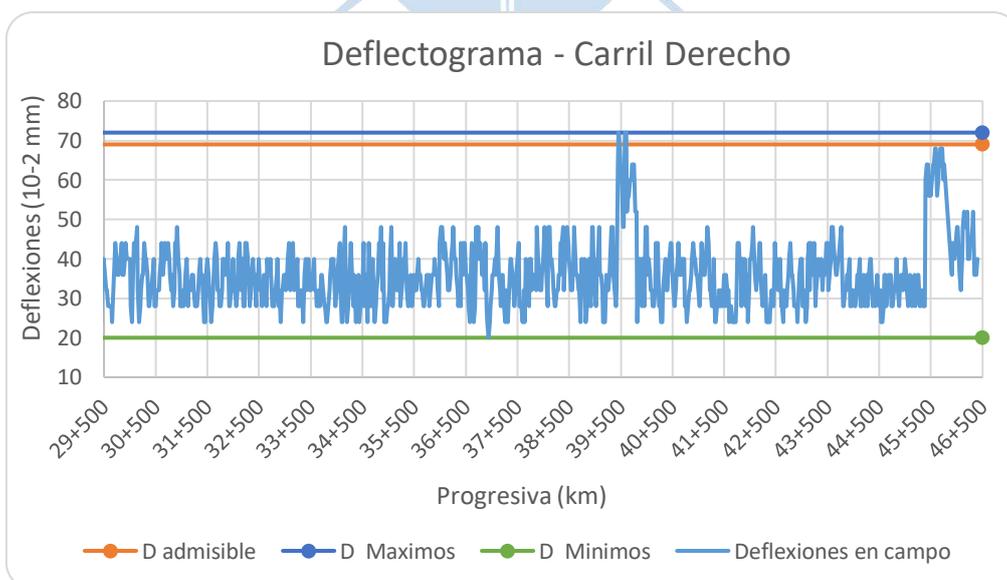


Figura 59. Deflectograma de carril derecho, km 29+500 a 46+500.

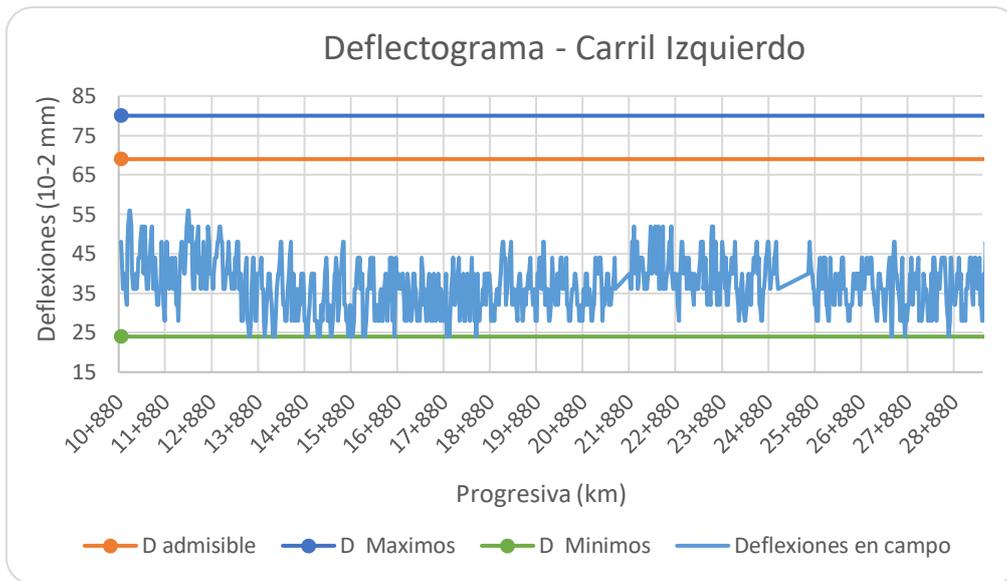


Figura 60. Deflectograma de carril izquierdo, km 10+880 a 29+500.

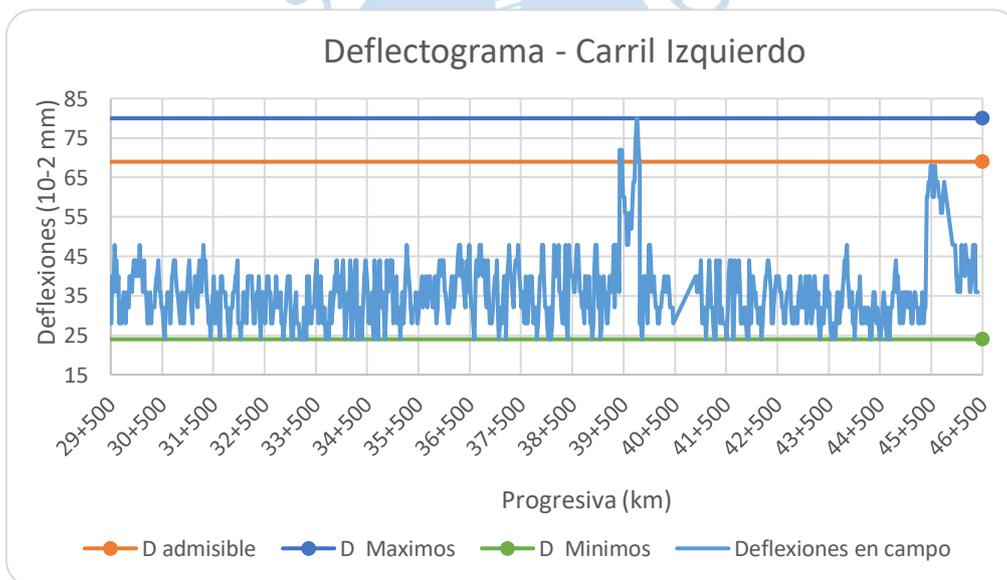


Figura 61. Deflectograma de carril izquierdo, km 29+500 a 46+500.

En los gráficos anteriores se pueden detectar 2 áreas puntuales en donde las deflexiones son evidentemente superiores al resto. En el km 39+500 y el 45+500 se volvió a ejecutar la colocación de suelo cemento, cuidando los procedimientos constructivos y parámetros de control.

Según Balarezo (2017), a partir del deflectograma es posible detectar diferentes tramos donde el comportamiento en referencia a las deflexiones, es anómalo. Por lo tanto, es posible detectar problemas puntuales que pudieran presentarse durante el proceso constructivo y realizar su análisis, además de la oportuna aplicación de los correctivos necesarios.

A continuación, se presenta un cuadro estadístico sobre las deflexiones registradas tanto en el carril derecho como en el izquierdo a lo largo de todo el tramo en estudio.

Tabla 41. Resumen estadístico de deflectometría del tramo en estudio.

PROGRESIVAS (km)		PROMEDIO (10 <sup>-2</sup> mm)		DESVIACION ESTANDAR (10 <sup>-2</sup> mm)		MÁXIMO (10 <sup>-2</sup> mm)		MÍNIMO (10 <sup>-2</sup> mm)	
DESDE	HASTA	DER	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ	DER	IZQ
10+880	15+470	38.07	38.36	7.07	7.71	56.00	56.00	24.00	24.00
15+470	20+060	34.34	34.80	5.72	5.88	48.00	48.00	24.00	24.00
20+060	24+650	38.84	38.57	6.24	6.00	56.00	52.00	28.00	28.00
24+650	29+240	36.16	36.67	5.80	5.81	48.00	48.00	20.00	24.00
29+240	33+830	34.29	34.16	5.58	5.93	48.00	48.00	24.00	24.00
33+830	38+420	34.97	35.69	6.56	6.60	48.00	48.00	20.00	24.00
38+420	43+010	36.47	37.64	9.83	10.57	72.00	80.00	24.00	24.00
43+010	47+600	38.67	37.21	10.69	10.77	68.00	68.00	24.00	24.00



Figura 62. Medición deflectométrica con Viga Benkelman, km 13+200.

#### 4.6 Fisuramiento reflectivo

Según la PCA (2003), el fisuramiento en la capa de la base puede ocasionarse debido tensiones por estrés y/o cambios volumétricos en la misma. Posteriormente se genera un fisuramiento en la carpeta asfáltica, el cual tiende a reflejar el mismo patrón de las fisuras de la base. Estas son conocidas como fisuras reflectivas. Este tipo de fisuras se caracteriza por ser fisuras transversales con un intervalo de separación de 2.4 a 6 metros entre sí. Sin embargo, estos bloques mantendrán su integridad estructural gracias al intertrabado entre los agregados.

Es importante diferenciar entre el “agrietamiento reflectivo” y el agrietamiento por falla del paquete estructural. Este último es provocado por diversos factores entre los cuales se encuentra la mala distribución de cargas de tráfico, lo cual se refleja en la falla en la base granular o en la subrasante, fatiga en la superficie de rodadura, etc.

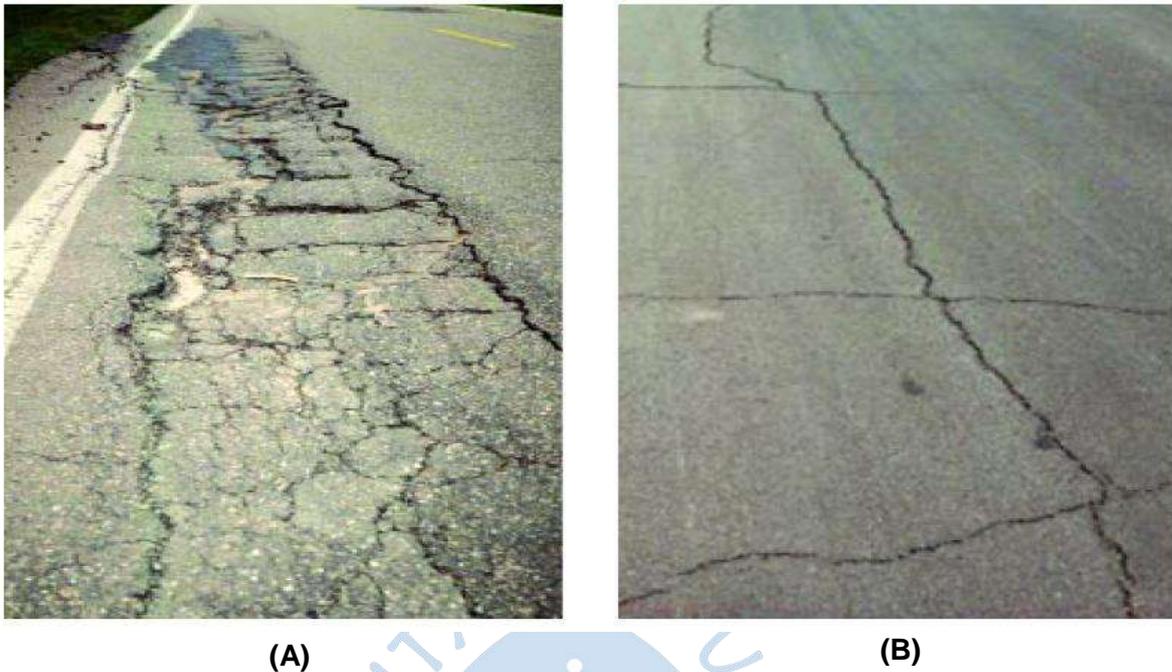


Figura 63. Agrietamiento debido a falla de la base (A) y Agrietamiento reflectivo (B).

Fuente: Reflective cracking in cement stabilized pavements. (PCA, 2003).

Según la PCA, las principales causas de las fisuras reflectivas son:

- Compactación de material a niveles de humedad por encima de la humedad óptima.
- Uso de suelos con alto contenido de arcillas.
- Pérdida rápida de humedad.
- Alto contenido de vacíos debido a compactación deficiente.
- Uso excesivo de contenido de cemento.

En el caso de la vía en estudio, se presentaron este tipo de fisuras a lo largo de la vía, en específico en zonas en donde el curado con emulsión asfáltica fue aplicado después de más de 24 horas de realizada la colocación del suelo cemento. Por lo tanto, la exposición prolongada al sol y la pérdida rápida de humedad fueron causantes de la ocurrencia de las mismas.

Arce (2011) Afirma que las gravas de buena calidad, no plásticas (NP), requieren bajos porcentajes de cemento para alcanzar las resistencias especificadas. Si los valores de resistencia se incrementan es consecuencia el problema de agrietamiento. Se logran mejores resultados con materiales que presentan valores moderados de plasticidad.

Además, propone utilizar la resistencia a compresión a 7 días de curado como criterio de estimación cualitativa para la aparición de agrietamiento en bases estabilizadas, de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 42. Estimación de la severidad de agrietamiento en suelo cemento en función a la resistencia a la compresión no confinada ( $R_c$ ) a 7 días de curado.

<b>Rango de resistencia a la compresión no confinada (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Severidad del agrietamiento</b>
$R_c \leq 20$	Agrietamiento muy leve o imperceptible
$20 \leq R_c < 30$	Agrietamiento de muy leve a leve
$30 \leq R_c < 40$	Agrietamiento de leve a moderado
$40 \leq R_c < 55$	Agrietamiento de moderado a alto
$60 \leq R_c$	Agrietamiento de alto a severo

Fuente: Bases estabilizadas con cemento – PITRA. Arce (2011).

Además, comenta que el agrietamiento de la base estabilizada a un nivel moderado ( $R_c < 40$  kg/cm<sup>2</sup>) no afecta negativamente, ni la vida útil ni el desempeño a largo plazo de la estructura del pavimento. Esto dependerá, ciertamente, de un correcto diseño en laboratorio y un adecuado proceso constructivo, además de los controles de calidad permanentes en campo.



## Conclusiones

Se logró la estabilización de suelo de tipo A-1-a(0) con 2.5% de cemento según manuales propuestos por la PCA, obteniendo valores de resistencia a la compresión mayores a 21 kg/cm<sup>2</sup>.

Se presenta una variabilidad de más de 10 kg/cm<sup>2</sup> en la resistencia a la compresión no confinada al agregar o disminuir tan solo 1.00% de contenido de cemento en peso para el tipo de material A-1-a(0). Lo cual indica que se requerirá de precisión durante el proceso de producción si se requiere optimizar el consumo de cemento y lograr homogeneidad en las propiedades de la mezcla.

Los suelos de tipo A-1-a(0) estabilizados con cemento tienen altas resistencia a la compresión con porcentajes de cemento relativamente bajos. Sin embargo, esto puede traer consigo efectos negativos para el paquete estructural del pavimento. Por ejemplo, el aumento en las probabilidades de aparición de grietas y fisuras.

Los suelos con contenidos apreciables de finos requieren mayor contenido de cemento y por lo tanto los costos son mayores.

Es evidente la importancia de controlar diariamente el contenido de cemento. Se ha demostrado a lo largo del presente trabajo de investigación que la optimización en la proporción del cemento en la mezcla a lo largo del periodo de ejecución, produce que las propiedades del suelo cemento colocado se mantengan dentro de límites recomendados y el consumo de cemento sea menor.

Al igual que en la conclusión anterior, el controlar diariamente el contenido de agua en la mezcla también es de vital importancia pues, la pérdida rápida de humedad aumenta sobremanera las probabilidades de aparición de fisuras de manera prematura debido a los esfuerzos internos producidos en el material granular cementado.

A pesar de usar un porcentaje de cemento relativamente bajo (2.5%), se presentaron fisuras en la vía después de 1 mes de haber sido colocada. Esto quiere decir que el procedimiento de estabilización de suelos con cemento requiere altos niveles de control de calidad tanto en planta como en campo para evitar la aparición de grietas y fisuras. El uso del ensayo de humedecimiento-secado y congelamiento-descongelamiento usualmente sugiere contenidos de cemento aún mayores, aumentando así su índice de contracción y el costo del proyecto.



## **Recomendaciones**

Se recomienda disminuir el tiempo entre el mezclado de los materiales (suelo, cemento y agua) y la compactación de las probetas para cada uno de los ensayos en laboratorio. El efecto coagulante que produce la hidratación del cemento en la mezcla, podría producir resultados no representativos o dispersos si es que los tiempos en que se elaboran cada una las probetas difieren en gran medida.

Se recomienda que en climas extremadamente cálidos como el de Piura, no se realice el curado mediante aspersión constante de agua, debido a que esta se evaporará rápidamente y someterá al suelo cemento a esfuerzos internos por pérdida de humedad. Mas bien, se recomienda el uso de emulsión asfáltica como agente de curado en suelo cemento, aplicado en el menor tiempo posible después de la compactación final de la base estabilizada.

También se recomienda realizar estudios en suelo cemento con el uso de aditivos anti-retracción y sus efectos en la aparición del fisuramiento reflectivo.

Es necesario realizar un seguimiento a las fisuras que se presentaron en el tramo de estudio, con el objetivo de evaluar la evolución de las mismas y el comportamiento del pavimento a través del tiempo.

Se sugiere realizar una evaluación de las condiciones climáticas de cada zona, antes de considerar cualquier método de estabilización de suelos. En caso se realice estabilización de suelos con cemento en una zona cálida con temperaturas muy altas como lo es Piura, se debe hacer énfasis en los controles de calidad a realizar durante el diseño, aplicación y curado del suelo cemento.

En caso se presente alguna situación en donde no es posible realizar el riego de emulsión asfáltica de manera inmediata, se debe mantener la superficie constantemente humectada a través de riegos constantes de agua por esparcido. De lo contrario, las posibilidades de que se presenten grietas y fisuras serán muy altas.



## Referencias bibliográficas

- American Concrete Institute. (2009). *Report on Soil Cement*. ACI Comité 230.
- Arce, M. (2001) Bases estabilizadas con cemento Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes. *Programa de Infraestructura del Transporte, Volumen 2, Número 19*. Costa Rica.
- Crespo, V. (2004). *Mecánica de Suelos, 6ta edición*. Editorial Limusa. México.
- García, J. (2019). *Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de caolín*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Kraemer, C. Pardillo, J. Rocci, S. Romana, M. Sánchez, V. Del Val, M. (2004). *Ingeniería de Carreteras, Volumen 2*. Madrid, España.
- Houben, H.; Guillaud, H. (1994) Earth Construction: Comprehensive Guide. *Intermediate Technology Publications*. Londres, Reino Unido.
- Instituto del Cemento Portland Argentino. (2011). *Construcción de Bases y Subbases de Suelo Cemento*. Buenos Aires, Argentina.
- Instituto Salvadoreño del Cemento y Concreto (2006). *Revista del ISCYC*, Número 43, 4-18.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas y Generales para Construcción, EG-2013*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos*. Lima, Perú.
- Pasquel, E. (1998). *Tópicos de Tecnología del Concreto en el Perú, 2da edición*. Colegio de Ingenieros del Perú. Lima, Perú,
- Portland Cement Association. (2001). *Soil-Cement Inspector's Manual*.

Portland Cement Association. (2001). *Soil-Cement Laboratory Handbook*.

Portland Cement Association. (2003). *Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavements*.

Ramos, B. Torres, J. (2012). *Mejoramiento del material afirmado de las canteras adyacentes para el terraplén de la carretera Lircay – Ccochaccasa*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú.

Rentería, E. Olivera, J. (2019). *Uso de la técnica base suelo cemento en el pavimento flexible de la Av. Los Algarrobos entre Av. R y Av. Las amapolas - 26 de octubre -Piura*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Cesar Vallejo, Piura, Perú.

Rodríguez, A. (2008). *Montaje, operación y mantenimiento de plantas para mezcla asfáltica en caliente*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Cesar Vallejo, Piura, Perú.

Serigos, P. (2009). *Rigidez a baja deformación de mezclas de suelo de la formación pampeano y cemento portland*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). *Tiempo y Clima en la región de Talara, Piura*. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle-turistico&localidad=0034>.

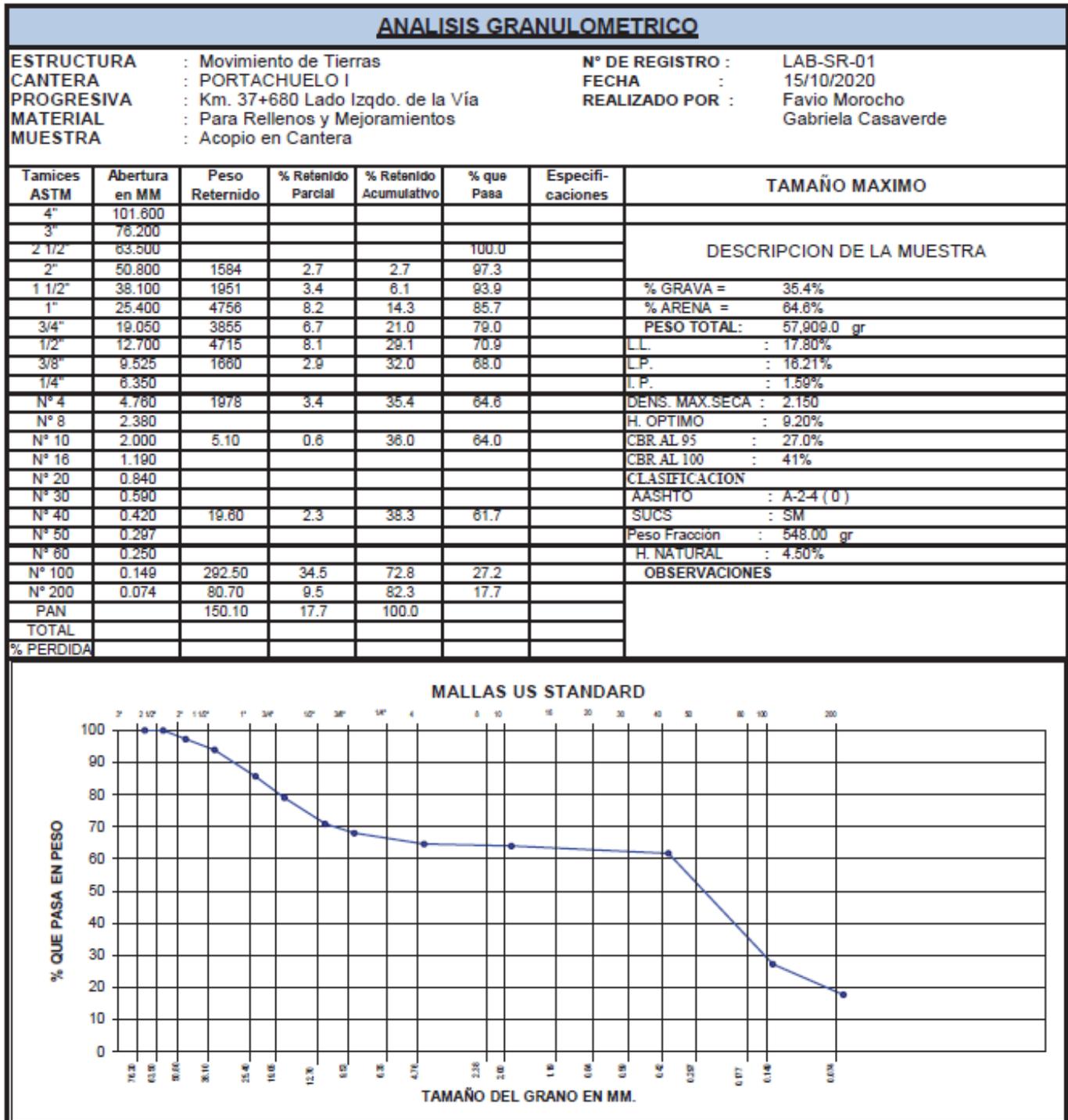
Sowers, GB; Sowers, GF. (1972). *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 3ra edición*. Editorial Limusa. México.

Terzaghi, K. Peck, R. (1978). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica, 2da edición*. Editorial El Ateneo. España.

U.S. Army Corps of Engineers (1984). *Soil Stabilization for Pavements: Mobilization Construction, Engineer Manual No. 1110-3-137*. Washington, Estados Unidos de América.

Velásquez, C. (2018). *Influencia del cemento portland tipo i en la estabilización del suelo arcilloso de la subrasante de la avenida Dinamarca, sector La Molina*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.

## Anexo 1. Propiedades del material de cantera Portachuelos 1



**LIMITES DE CONSISTENCIA**

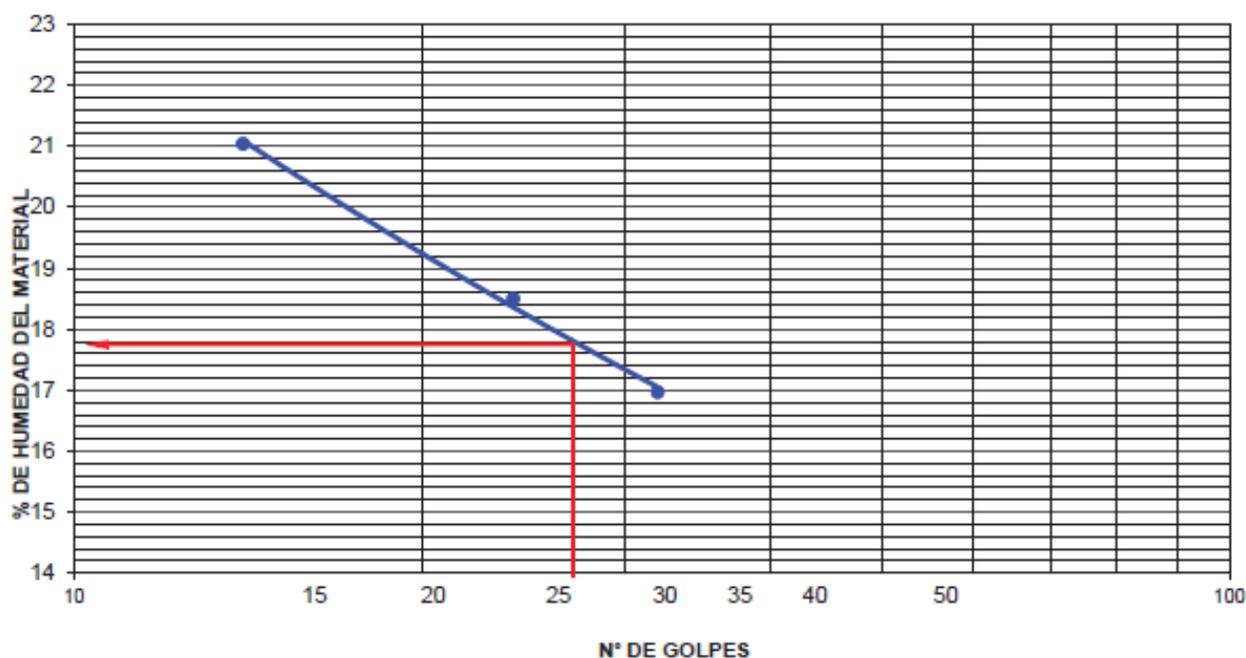
METODO AASHTO T-89/90 Y ASTM D-423/424

DESCRIPCION : Movimiento de Tierras  
 UBICACION : PORTACHUELO I  
 PROGRESIVA : Km. 37+680 Lado Izqdo. de la Vía  
 MATERIAL : Para Rellenos y Mejoramientos  
 MUESTRA : Acopio en Cantera

N° DE REGISTRO : LAB-SR-01  
 FECHA : 15/10/2020  
 REALIZADO POR : Favio Morocho  
 Gabriela Casaverde

Nro. DE CAPSULA	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO		
	22	10	15	23	9	
PESO TARA + SUELO HUMEDO (A)	34.01	38.50	40.55	17.74	20.74	
PESO TARA + SUELO SECO (B)	31.10	34.88	35.91	17.20	19.91	
PESO DE LA TARA (C)	13.95	13.90	13.86	13.82	14.86	
PESO DEL AGUA (A-B)	2.91	3.84	4.64	0.54	0.83	
PESO SUELO SECO (B-C)	17.15	20.76	22.05	3.38	5.05	
HUMEDAD $[W=(A-B)/(B-C)*100]$	16.97	18.50	21.04	15.98	16.44	
Nro. DE GOLPES	32	24	14	16.21		

LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE PLASTICO
17.80%	16.21%	1.59%



**PROCTOR MODIFICADO**

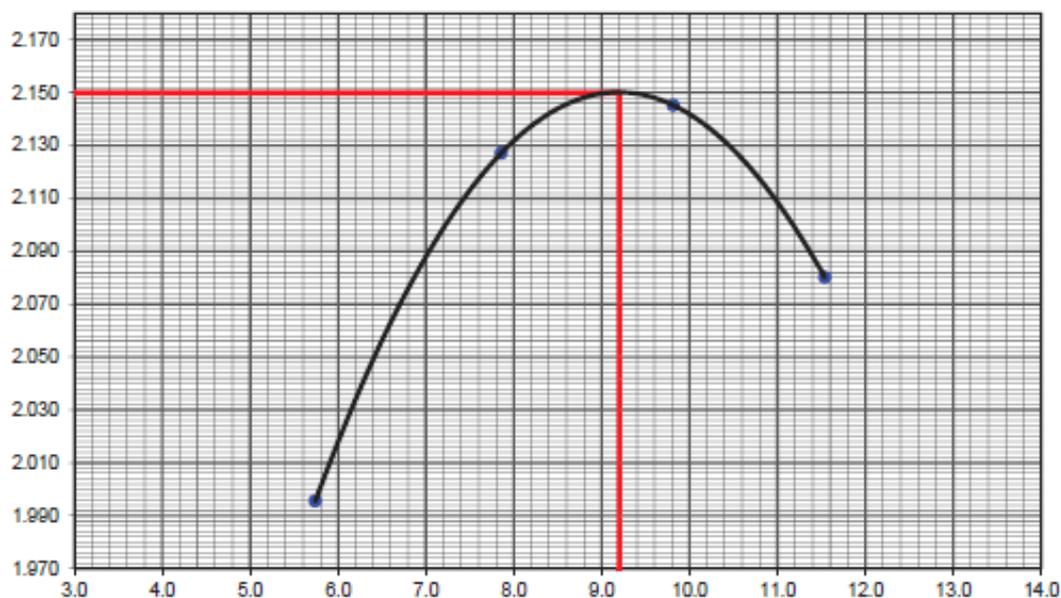
METODO AASHTO T-180-D

DESCRIPCION	: Movimiento de Tierras	N° DE REGISTRO	LAB-SR-01
UBICACION	: PORTACHUELO I	FECHA	15/10/2020
PROGRESIVA	: Km. 37+680 Lado Izqdo. de la Vía	REALIZADO POR	Favio Morocho Gabriela Casaverde
MATERIAL	: Para Rellenos y Mejoramientos		
MUESTRA	: Acopio en Cantera		

METODO DE COMPACTAC "C" VOL.MOLDE 2(cm3) 2080 PESO MOLDE(gr) 6385

ENSAYO DE COMPACTACION						
NUMERO DE ENSAYOS	1	2	3	4	5	6
PESO SUELO + MOLDE	10774	11157	11285	11211		
PESO SUELO HUMEDO COMPACTADO	4389	4772	4900	4826		
PESO VOLUMETRICO HUMEDO	2.110	2.294	2.356	2.320		
PESO VOLUMETRICO SECO	1.996	2.127	2.145	2.080		
CONTENIDO DE HUMEDAD						
RECIPIENTE Nro.	1	2	3	4	5	6
PESO SUELO HUMEDO + TARA	442.00	453.00	481.00	435.00		
PESO SUELOS SECO + TARA	418.00	420.00	438.00	390.00		
PESO DE LA TARA						
PESO DE AGUA	24.0	33.0	43.00	45.00		
PESO DE SUELO SECO	418.0	420.0	438.00	390.00		
CONTENIDO DE AGUA	5.7	7.9	9.8	11.5		

DENSIDAD MAXIMA SECA: 2.150 gr/cc. HUMEDAD OPTIMA: 9.20 %



OBSERVACIONES :

### RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA ( CBR ) NORMA ASTM D1883

TIPO	: Movimiento de Tierras	N° DE REGISTRO :	LAB-SR-01
UBICACIÓN	: PORTACHUELO I	FECHA :	26/02/2021
PROGRESIVA	Km. 37+680 Lado Izqdo. de la Vía	REALIZADO POR :	Favio Morocho
MATERIAL	Para Rellenos y Mejoramientos		Gabriela Casaverde
MUESTRA	Acopio en Cantera		

CLASF. (SUCS) SM  
CLASF. (AASHTO) A-2-4 (0)

#### ENSAYO DE CBR.

METODO ASTM D - 1883

MOLDE Nro.	4		5		6	
	12		25		56	
Nro. GOLPES POR CAPA						
COND. DE LA MUESTRA	SIN MOJAR	MOJADA	SIN MOJAR	MOJADA	SIN MOJAR	MOJADA
Peso molde + suelo humedo	12859	12772	13204	13300	12865	12924
Peso del Molde	7948	7948	8308	8308	7880	7880
Peso del Suelo humedo	4711	4824	4896	4992	4985	5044
Volumen del Suelo	2165	2165	2141	2141	2123	2123
Densidad humeda	2.178	2.228	2.287	2.332	2.348	2.378
% de humedad	9.21	11.88	9.22	11.35	9.20	10.51
Densidad seca	1.992	1.992	2.094	2.094	2.150	2.150
Tara Nro.						
Tara + suelo humedo	550.00	452.00	450.00	510.00	482.00	452.00
Tara + suelo seco	503.80	404.00	412.00	458.00	441.40	409.00
Peso del agua	46.40	48.00	38.00	52.00	40.60	43.00
Peso de tara						
Peso del suelo seco	503.80	404.00	412.00	458.00	441.40	409.00
% de humedad	9.21	11.88	9.22	11.35	9.20	10.51
Promedio de humedad	9.21		9.22		9.20	

#### EXPANSION

FECHA	HORA	TIEMPO HRS.	LECTURA DIAL	EXPANSION		LECTURA DIAL	EXPANSION		LECTURA DIAL	EXPANSION	
				mm.	%		mm.	%		mm.	%
				26/02/2021	11:40 a.m		0	0		0.00	0.00
27/02/2021	11:40 a.m	24	57	0.57	0.51	44	0.44	0.39	50	0.50	0.45
28/02/2021	11:40 a.m	48	95	0.95	0.85	93	0.93	0.83	86	0.86	0.77
01/03/2021	11:40 a.m	72	128	1.28	1.15	129	1.29	1.16	113	1.13	1.01
02/03/2021	11:40 a.m	96	155	1.55	1.39	142	1.42	1.27	141	1.41	1.26
<b>1.31%</b>											

#### PENETRACION

PENETRACION			MOLDE Nro: 4			MOLDE Nro: 5			MOLDE Nro: 6		
			LECTURA DIAL	CORRECCION Kg	Kg/cm2	LECTURA DIAL	CORRECCION Kg	Kg/cm2	LECTURA DIAL	CORRECCION Kg	Kg/cm2
0.30	0.000	0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.30	0.064	0.025	25.5	0	0	20.5	-6	0	75.5	50	3
1.00	1.270	0.060	60.1	35	2	95.5	71	4	101.4	77	4
1.30	1.905	0.075	100.2	75	4	150.2	126	7	190.5	167	9
2.00	2.540	0.100	190.3	167	9	220.5	198	10	290.2	269	14
3.00	3.810	0.150	290.0	268	14	390.3	370	19	400.0	380	20
4.00	5.080	0.200	470.1	451	23	580.1	563	29	630.4	614	32
5.00	6.350	0.250	600.0	583	30	790.1	776	40	870.4	858	44
6.00	7.620	0.300	730.1	715	37	900.5	889	46	1260.1	1254	65
7.00	8.890	0.350									

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

**RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA ( CBR ) NORMA ASTM D1883**

TIPO : Movimiento de Tierras	N° DE REGISTRO : LAB-SR-01
UBICACIÓN : PORTACHUELO I	FECHA : 15/10/2020
PROGRESIVA : Km. 37+680 Lado Izqdo. de la Vía	REALIZADO POR : Favio Morocho
MATERIAL : Para Rellenos y Mejoramientos	Gabriela Casverede
MUESTRA : Acopio en Cantera	

MATERIAL : Arena Fina

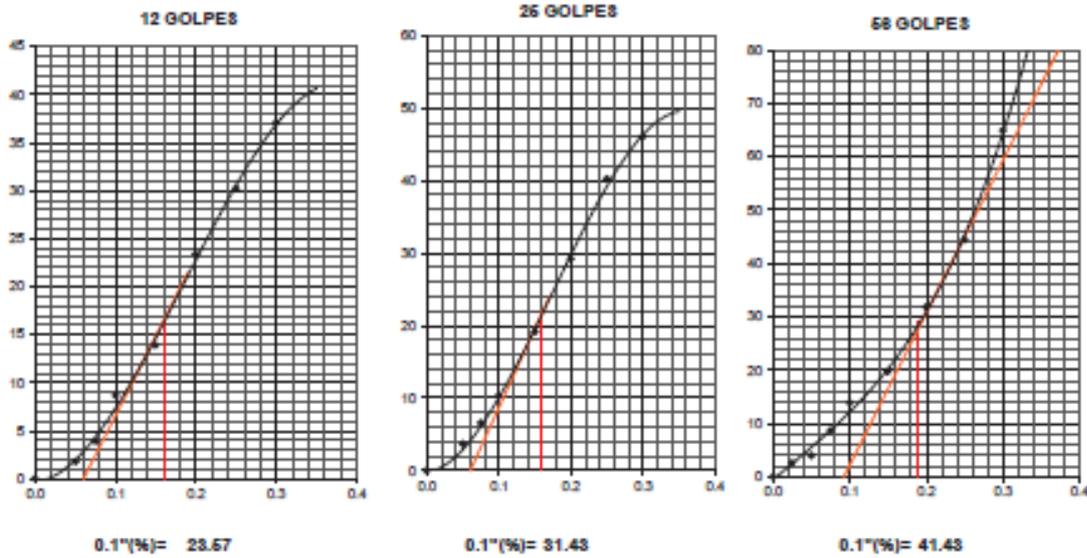
CLASIF(SUCS) : SM

SM

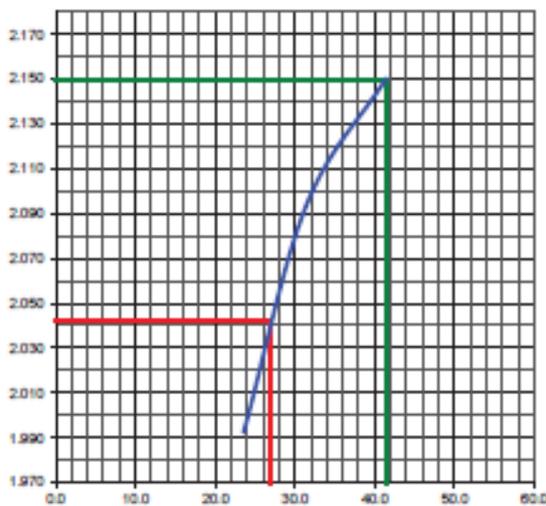
CLASIF(AASHTO) :

A-2-4 ( 0 )

**GRAFICO PENETRACION DE CBR**



**DETERMINACION DE CBR**



Datos de Proctor:

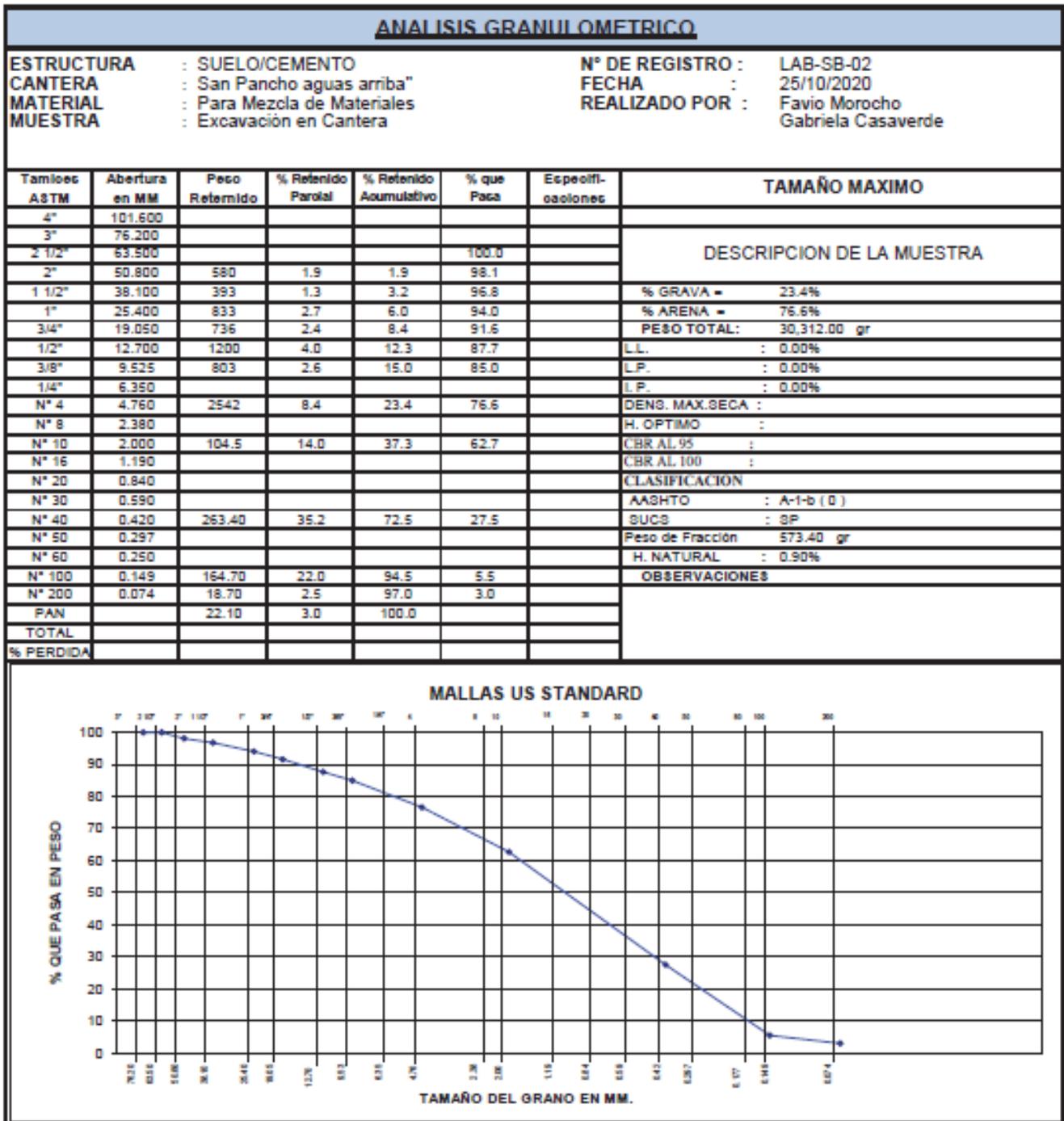
Densidad seca :	2.150	gr/cc.
Óptimo humedad:	9.2	%

CBR AL 95%: 27.0 %

CBR AL 100%: 41.43 %

OBSERVACIONES:


Anexo 2. Propiedades del material de cantera San Pancho



**LIMITES DE CONSISTENCIA**

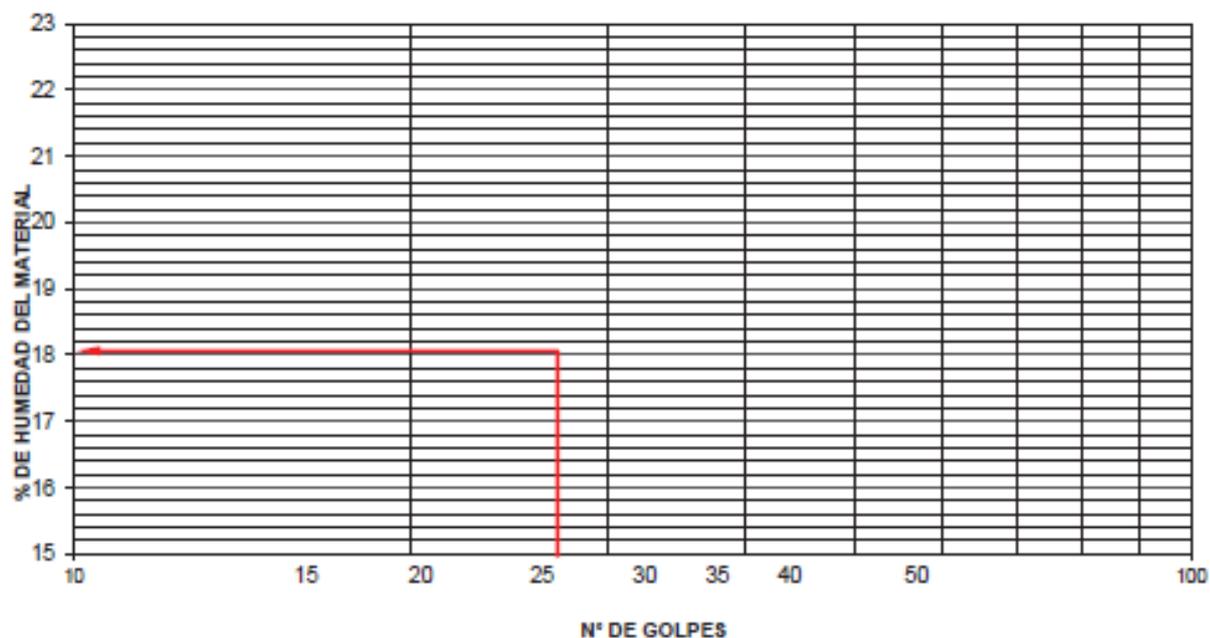
METODO AASHTO T-99/90 Y ASTM D-423/424

ESTRUCTURA : SUELO/CEMENTO  
 CANTERA : San Pancho aguas arriba"  
 MATERIAL : Para Mezcla de Materiales  
 MUESTRA : Excavación en Cantera

N° DE REGISTRO : LAB-SB-02  
 FECHA : 25/10/2020  
 REALIZADO POR : Favio Morocho  
 Gabriela Casaverde

Nro. DE CAPSULA	LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO			
PESO TARA + SUELO HUMEDO (A)								
PESO TARA + SUELO SECO (B)			N.P			N.P		
PESO DE LA TARA (C)								
PESO DEL AGUA (A-B)								
PESO SUELO SECO (B-C)								
HUMEDAD $[W=(A-B)/(B-C) \cdot 100]$								
Nro. DE GOLPES								

LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE PLASTICO
0.00%	0.00%	0.00%



### Anexo 3. Ensayos de laboratorio para la fuente de agua del río Chira



#### INFORME DE ENSAYO

<b>PROYECTO</b>	"Mejoramiento de la Carretera Departamental Ruta PI-101:EMP. PI 100 Negritos-VichayalPuente Simón Rodríguez-Pueblo Nuevo Colan-EMP PI-102 y Puta PI-116. EMP. PE1N: Tamarindo - Amotope EMP PI101, en los Distritos de Pariñas, La Brea, Miramar, Vichayal, Colan Amotape, Tamarindo, Ignacion Escudero, Provincia de Talara, Paita, Sullá, en el Departamento de Piura".
<b>UBICACIÓN</b>	: Provincia de Talara, Paita, Sullá, en el Departamento de Piura
<b>TIPO DE PRODUCTO</b>	: Agua
<b>FECHA DE RECEPCION</b>	: 03/11/2020
<b>FECHA DE EMISION</b>	: 10/11/2020
<b>ING. ESPECIALISTA</b>	: Secundino Burga Fernandez
<b>TECNICO LABORATORIO</b>	: Cesar Adán Díaz Saavedra
<b>NOTA :</b>	

- \* El certificado corresponde única y exclusivamente a la muestra emitida.
- \* Las copias de este ensayo no son válidas sin la autorización del laboratorio.
- \* Este informe es imparcial y confidencial, lo cual esta destinado única y exclusivamente al cliente.
- \* Nuestro laboratorio no ha sido responsable de la etapa de muestreo (el solicitante brindo toda la información), por lo quesalimos de toda responsabilidad por cuestiones que afecten la validez de los resultados.

## SERVICIOS DE LABORATORIOS DE SUELOS Y PAVIMENTOS S.A.C.



Calle Juan Pablo II N°682, of. 2do Piso - Urb. Las Brisas - Chiclayo.  
Telf. (074) 619319 - Cel: 948 852 622 / 954 131 476 / 998 928 250  
Email: servicios\_lab@hotmail.com  
Búscanos en Facebook: Laboratorios de Suelos Chiclayo  
Pág. WEB: www.emplaboratorios.com

**METODO DE MUESTREO** : Fuente de agua

**FECHA DE ENSAYO** : 03/11/2020

**CODIGO INTERNO** : M023

**RESP. LAB.** : S.B.F.

**UBICACIÓN** : km 47+200 lado derecho (acceso km 2+000) - Rio Chira

**TEC. LAB.** : C.A.D.S.

**MATERIAL** : Agua de rio

### DATOS DEL ENSAYO

Ensayos	Norma o Método	Partes por millón (ppm)	Limites permisibles (ppm)	Conclusión
Contenido de Sulfatos en el Agua	NTP 339.074	53.0	600 ppm (Máximo)	LEVE
Contenido de Cloruros en el Agua	NTP 339.073	43.0	1000 ppm (Máximo)	LEVE
Contenido de Materia Orgánica en el Agua	NTP 339.072	0.07	3 ppm (Máximo)	LEVE
Determinación del Potencial de Hidrogeno (ph) en el Agua	pH-metro	6.10	5 a 8 ppm (Máximo)	---
Residuos Sólidos (ppm)	NTP 339.071	87.0	5000 ppm (Máximo)	LEVE
Carbonatos y Bicarbonatos Alcalinos (Alcalinidad total expresada en NaHCO <sub>3</sub> ) (ppm)	Volumétrica	16.9	1000 ppm (Máximo)	LEVE

Observaciones:

## SERVICIOS DE LABORATORIOS DE SUELOS Y PAVIMENTOS S.A.C.



Calle Juan Pablo II N° 682, of. 2do Piso - Urb. Las Brisas - Chiclayo.  
Telf. (074) 619319 - Cel: 948 852 622 / 954 131 476 / 998 928 250  
Email: servicios\_lab@hotmail.com  
Búscanos en Facebook:  Laboratorios de Suelos Chiclayo  
Pág. WEB: www.emplaboratorios.com

### METODO DE ENSAYO : CONTENIDO DE SALES SOLUBLES EN SUELOS Y AGUA SUBTERRANEA

**REFERENCIA NORMATIVA** : (NTP 339.152)  
**FECHA DE ENSAYO** : 03/11/2020  
**METODO DE MUESTREO** : Fuente de agua  
**RESP. LAB.** : S.B.F.  
**CODIGO INTERNO** : M023  
**TEC. LAB.** : C.A.D.S.  
**UBICACIÓN** : km 47+200 lado derecho (acceso km 2+000) - R  
**MATERIAL** : Agua de rio

DATOS DEL ENSAYO					
	Identificación				Promedio
Muestra	1	2			
Peso Tarro (Biker 100 ml.) Pyres	97.98	105.63			
Peso Tarro + agua + sal	142.28	155.63			
Peso Tarro Seco + sal	98.01	105.66			
Peso de Sal	0.03	0.03			
Peso de Agua	44.30	50.00			
Porcentaje de Sal	0.07	0.06			0.06

\*

## Anexo 4. Ficha técnica del producto Cemento Viaforte

# VIAFORTE

## Cemento para Estabilización de Suelos



### CARACTERÍSTICAS

Presentamos nuestro nuevo cemento de moderado calor de hidratación para caminos y bases con el objetivo de mejorar la trabajabilidad en el proceso constructivo, y ofreciendo mayor durabilidad a las vías.

### ATRIBUTOS

Apoyo Técnico desde el diseño del pavimento hasta la ejecución, asegurando el correcto desempeño de la vía.

 **CONTROLA FISURAS POR RETRACCIÓN**

 **MAYOR DURABILIDAD**

 **MAYOR TRABAJABILIDAD**

### MODO DE EMPLEO

#### 1. PRUEBAS DE LABORATORIO:



- Caracterizar el suelo (Pruebas de Granulometría, Pruebas de Clasificación y Pruebas Proctor).
- Diseñar mezcla de Suelo Cemento (% de Cemento + Agua Añadida + Aditivos (si es necesario)).

#### 2. PREPARAR EL SUELO:



- Disgregar el suelo y suprimir los elementos de tamaño superior a 50 mm.
- Obtener la rasante y nivelar.
- Determinar la humedad óptima del suelo, mediante ensayo Proctor.

**DOSIFICAR.** Según resultados de ensayos de laboratorio.

#### 3. DOSIFICAR:



Según resultados de ensayos de laboratorio.  
**MEZCLAR IN-SITU.**  
 El suelo, el cemento y el agua, obteniendo una mezcla homogénea.  
 (Idealmente se usa una recicladora de suelos)  
**COMPACTAR.**  
 Obtener una capa uniforme según las especificaciones del proyecto.

#### 4. PROTECCIÓN:



**NIVELAR:**  
 Verificar los niveles, de ser necesario.  
**CURAR Y PROTEGER:**  
 Mantener la superficie húmeda, creando una película impermeable.

### RECOMENDACIONES



1. Realizar los ensayos de laboratorio correspondientes por tipo de suelo, para determinar la dosificación de uso.

2. Transportar el material protegiéndolo de la intemperie y almacenarlo en un lugar fresco.



a. No emplear el material cuando la temperatura descienda por debajo de los 10°C

b. En caso de lluvia, el proceso de estabilización de suelo debe suspenderse.

c. NO APTO PARA ESTRUCTURAS, diseñado de forma exclusiva para uso en vías carreteras.



3. Utilizar equipos de mezclado adecuados (Recicladora).



## Cemento Viaforte tipo MH

### Requisitos Normalizados

NTP 334.082 / ASTM C1157

#### REQUERIMIENTOS FÍSICOS

REQUISITOS	TIPO	VALOR	UNIDAD		RESULTADO
Contenido de aire	Máximo	12	%	NTP 334.048	6
Superficie específica	A	A	cm <sup>2</sup> /g	NTP 334.002	5219
Retenido M325	A	A	%	NTP 334.045	2.7
Expansión en autoclave	Máximo	0.80	%	NTP 334.004	0.03
Densidad	A	A	g/cm <sup>3</sup>		2.91
<b>Resistencia a la compresión</b>					
3 días	Mínimo	5	Mpa	NTP 334.051	21.5
7 días	Mínimo	11	Mpa	NTP 334.051	31.0
28 días <sup>1</sup>	Mínimo	22	Mpa	NTP 334.051	44.5
<b>Tiempo de Fraguado Vicat</b>					
Fraguado inicial	Mínimo	45	minutos	NTP 334.006	197
Fraguado final	Máximo	420	minutos	NTP 334.006	306
Expansión de la barra de mortero	Máximo	0.020	%	NTP 334.093	0.004
Calor de hidratación	Máximo	335	J/g	NTP 334.064	250

A No específica.

<sup>1</sup> Requisito opcional

#### VENTAJAS



Elevada capacidad de soporte que mejora la calidad de suelos deficientes.



Resistencia a la erosión y a todo tipo de clima.



Aumenta la durabilidad de la vía.



Amigable con el medio ambiente ya que busca el uso de materiales existentes



Solución con costos competitivos de construcción y en el ciclo de vida de la obra

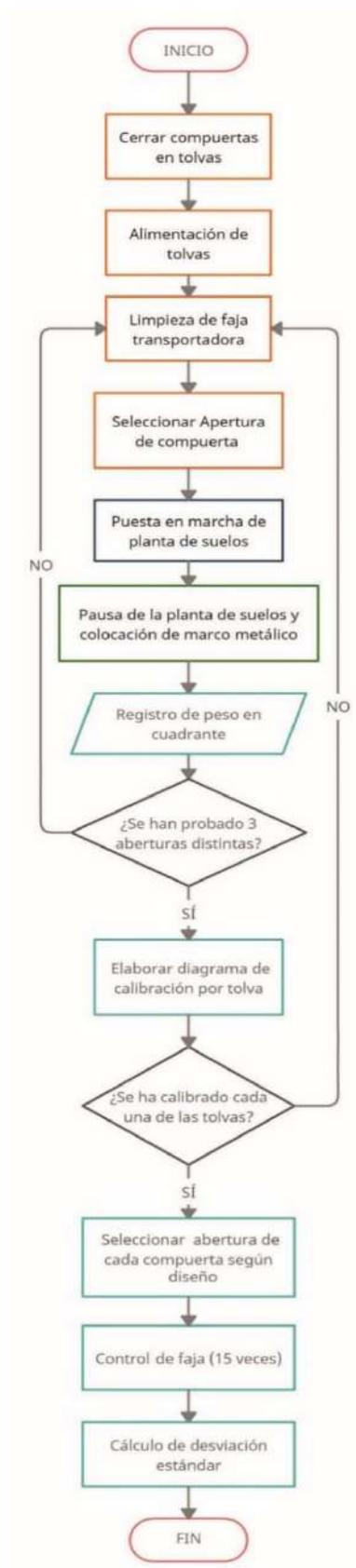


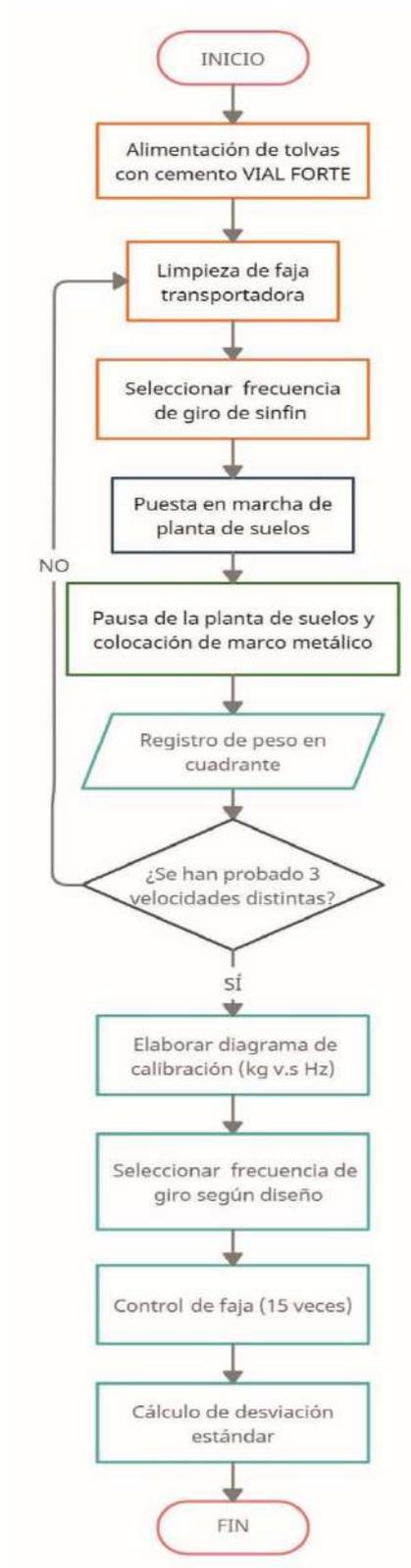
Uso de materiales y equipos para proceso constructivo, disponibles en todo el Perú.

El cemento descrito arriba, al tiempo del envío, cumple físicos de la NTP 334.082

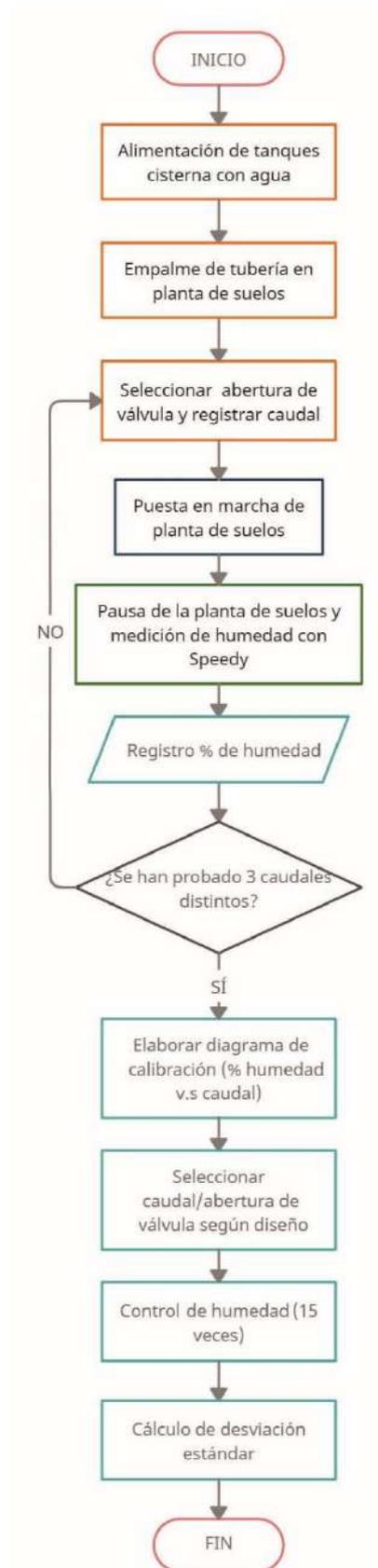
## Anexo 5. Diagramas de flujo para la calibración de la planta de suelos

## Calibración de planta de suelos (material granular)



**Calibración de planta de suelos (cemento)**

## Calibración de planta de suelos (agua)



## Anexo 6. Ficha técnica del producto PRIMETEC

	<b>FICHA TECNICA</b> <b>PRIMETEC</b>	<b>FT-PRIME</b>
		<b>Aprobación:</b> 10/09/2012
		<b>Version:</b> 01

### DESCRIPCION

Emulsión de cemento asfáltico y agua especialmente desarrollada por TDM Asfaltos, para ser utilizado en servicios de imprimación de bases granulares o estabilizados proporcionando a estas una capa impermeable y una superficie de liga para la carpeta asfáltica.

### VENTAJAS

El PRIMETEC® es una emulsión que posee algunas características que lo vuelven en un producto único:

- Gran facilitador de la aplicación de una nueva capa asfáltica;
- Presenta buena penetración en bases granulares además de formar una película superficial impermeabilizante;
- Fácil aplicación y curado rápido de hasta 24 horas;
- Tasa de aplicación de 0,8 a 1,2 litros/m<sup>2</sup>, dependiendo del tipo de base;
- No requiere dilución;
- Aplicada a temperatura ambiente y con equipos convencionales;
- Sustituye el uso del CM-30 evitando la liberación de solvente para el medio ambiente, reduciendo el calentamiento global.

### APLICACIÓN

Recomendada para la ejecución de trabajos de imprimación.

En la aplicación del PRIMETEC® se deben tener los mismos cuidados seguidos en la aplicación del ADP MC-30. La base debe estar preparada para recibir la imprimación, compactada y con la humedad óptima. El camión imprimador debe estar libre de otros productos y debidamente calibrado (altura de la barra esparcidora, inclinación de las boquillas).

El PRIMETEC® no requiere calentamiento o dilución para su uso.

	<b>FICHA TECNICA</b> <b>PRIMETEC</b>		<b>FT-PRIME</b>	
			<b>Aprobación:</b> 10/09/2012	
			<b>Version:</b> 01	

## ESPECIFICACIONES

ENSAYOS		METODO		PRIMETEC®	
Ensayos sobre la emulsión		ASTM	MTC	Mínimo	Máximo
Viscosidad Brookfield a 25°C SP 29, 20 RPM, cP.		D 4402	----	----	300
Estabilidad al almacenamiento, 24 hr, %		D 244	----	----	1
Destilación	- Contenido de asfalto residual, %	D 244	E 401	50	----
	- Contenido de solventes, %	D 244	E 401	0	15
Prueba del tamiz N°20, %		D 244	E 405	----	0.1
Carga de partícula		D 244	E 407	Positiva	
Ensayos sobre el residuo de emulsión		ASTM	MTC	Mínimo	Máximo
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, dmm		D 5	E 304	100	----
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm		D 113	E 306	40	----
Solubilidad en tricloroetileno, %		D 2042	E 302	97.5	----

## PRESENTACION

A granel ó en tambores de 55 galones.

## ALMACENAMIENTO

Almacene la emulsión entre 10°C y 35°C. No permita que la emulsión asfáltica se congele. Esto produce la rotura la emulsión, separando el asfalto del agua. No permita que la emulsión asfáltica sea calentada por encima de los 85°C. Las temperaturas elevadas evaporan el agua, modificando las características de la emulsión asfáltica. No permita que la temperatura de la superficie de calentamiento exceda los 100°C, de suceder esto, se producirá la rotura prematura de la emulsión sobre aquella. No use aire a presión para agitar la emulsión. Puede causar la rotura de la emulsión. El exceso de mezclado y de bombeo debe evitarse.