



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena- Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante

Presentado por:

HUBER MISAEL NAVARRO GAMBARINI

Para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesor:

Ing. EIGNER ROMAN VILLEGAS

CUSCO - PERÚ

2022



Dedicatoria

A mi padre César por sus consejos de vida, su apoyo para mí en cada momento de mi vida y ser una inspiración y admiración que me impulsa cada día hacia adelante, por lo que siempre le estaré agradecido.

A mi madre Sulma por su amor y apoyo incondicional, por sus palabras de aliento y por ser mi fuente de fortaleza en cada momento de mi vida.

A mis hermanas Saida y Eveling, por su aliento constante para perseguir mis sueños y lograr mis metas.

Huber Misael



Agradecimientos

A mis padres y seres queridos, por su apoyo incondicional durante el desarrollo de esta investigación.

A mi asesor, el Ing. Eigner Román Villegas, porque sin su apoyo profesional este trabajo no hubiera sido posible.

A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil por sus enseñanzas y consejos a lo largo de mi carrera universitaria.

Huber Misael



Resumen

El objetivo del presente estudio de investigación es determinar la variación de las propiedades físico- mecánicas con la adición de cal (2 y 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán utilizados para subrasante. El enfoque de investigación es de corte cuantitativo, el nivel o alcance corresponde al nivel descriptivo explicativo, y en cuanto a diseño es una investigación experimental. Se realizaron ensayos en laboratorio con adición de cal en peso en las proporciones de 2 y 4% y con cemento de 7; 9 y 11% respectivamente, luego se presentan los resultados del análisis de las propiedades del suelo con adición de cal y cemento en las proporciones señaladas se presenta en tablas y figuras, a partir de estas se establecen las variaciones en las características físico-mecánicas para el empleo en subrasante. A partir del análisis e interpretación de los resultados se concluye que los valores del índice de plasticidad con adición de cal oscilan entre el 7.34 y el 7.77%; mientras que con adición de cemento fluctúan entre 4.55 y 5.05%, observándose, con aditamento de cemento existe una disminución de índice de plasticidad; las pruebas de compactación utilizando energía modificada con cal y cemento como aditivos, el contenido de humedad óptimo con la adición de 9% de cemento es la más representativa al 11,95% a una densidad seca máxima de $1,69\text{gr}/\text{cm}^3$; el índice de CBR al 95% densidad seca máxima se logra con adición de cemento a una proporción de 11% obteniéndose un porcentaje de 10,50%, y las pruebas de resistencia a la compresión inconfiada se puede señalar que el esfuerzo o resistencia del suelo se logró una mejor cohesión con adición de cemento al 11%.

Palabras Clave: Propiedades físico mecánicas, estabilización del suelo, adición de cal y cemento, subrasante.



Abstract

The objective of this research study is to determine the variation of the physical-mechanical properties with the addition of lime (2 and 4%) and cement (7; 9 and 11%) respectively, in clay soils from the Agua Buena-Colegio La Salle road that will be used for subgrade. The research approach is quantitative, the level or scope corresponds to the explanatory descriptive level, and in terms of design it is an experimental research. Laboratory tests were carried out with the addition of lime by weight in the proportions of 2 and 4% and with cement of 7; 9 and 11% respectively, then the results of the analysis of the properties of the soil with the addition of lime and cement in the proportions indicated are presented in tables and figures, from these the variations in the physical-mechanical characteristics for the use in subgrade are established. From the analysis and interpretation of the results it is concluded that the values of the plasticity index with lime addition range between 7.34 and 7.77%; while with the addition of cement they fluctuate between 4.55 and 5.05%, observing, with cement attachment there is a decrease in the plasticity index; compaction tests using energy modified with lime and cement as additives, the optimal moisture content with the addition of 9% cement is the most representative at 11.95% at a maximum dry density of 1.69gr/cm³; the CBR index at 95% maximum dry density is achieved with the addition of cement at a proportion of 11% obtaining a percentage of 10.50%, and the tests of resistance to unconfined compression can be indicated that the stress or resistance of the soil was achieved a better cohesion with the addition of cement at 11%.

Keywords: Mechanical treasury properties, soil stabilization, addition of lime and cement, subgrade.



Introducción

El presente estudio de investigación “Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena- Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento: (4 y 6%) para subrasante”, pongo a consideración de los lectores, donde se ofrece los resultados del comportamiento del suelo arcilloso con el aditamento de cal y cemento en las proporciones señaladas, con la finalidad de establecer las mejores en las características físico-mecánicas para su uso en subrasante.

El trabajo de investigación está estructurado convenientemente para su mejor comprensión y lectura apropiada. El estudio inicia en el primer capítulo con un planteamiento del problema objeto de estudio, donde se identifica y describe brevemente el problema de investigación, y a partir de él se formuló la pregunta de investigación, así como las justificaciones del estudio, propósitos de la investigación, y limitaciones de diseño y laboratorio durante la implementación del proyecto.

Luego, en el Capítulo II, se construye el marco teórico teniendo en cuenta los antecedentes local, nacional e internacional de la tesis, seguido de las bases teóricas científicas que sustentan las variables estudiadas; el capítulo finaliza con el planteamiento de las hipótesis, variables e indicadores de la investigación. A continuación, se presenta la metodología de investigación adoptado considerando el enfoque, alcance o nivel y diseño de la investigación; asimismo, se registra la población y muestra, los instrumentos y equipos para la recolección de la información y el procedimiento empleado para el análisis de los resultados.

El estudio concluye con la presentación de los resultados, los cuales se presentan en tablas y figuras de acuerdo a los objetivos específicos de la investigación, y de igual forma se analizan los resultados de los respectivos experimentos; a esto le sigue una discusión de los resultados en relación a los antecedentes, teorías científicas y los resultados obtenidos según las variables de investigación. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio luego del análisis y discusión de los resultados, y también se alcanzan las recomendaciones y las referencias bibliográficas consultadas.



Índice General

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Introducción	v
Índice General	vi
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras.....	xv
CAPÍTULO I	1
Planteamiento del Problema.....	1
1.1. Identificación del Problema.....	1
1.1.1. Descripción del Problema.....	1
1.1.2. Formulación interrogativa del problema.....	2
1.1.2.1. Formulación interrogativa del problema general	2
1.1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos	3
1.2. Justificación e importancia de la investigación.....	3
1.3. Limitaciones	4
1.4. Objetivos de la investigación.....	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO II	6
Marco Teórico.....	6
2.1. Antecedentes de la tesis.....	6
2.1.1. Antecedentes locales	6
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	7
2.1.3. Antecedentes internacionales.....	8
2.2. Aspectos Teórico Pertinentes	9
2.2.1. El suelo.....	9
2.2.2. Propiedades físico – mecánicas de los Suelos.....	20
2.3. Hipótesis	27
2.3.1. Hipótesis general	27
2.3.2. Hipótesis específicas	27
2.4. Variables e indicadores	28



2.4.1. Variable independiente.....	28
2.4.1.1. Indicadores	28
2.4.2. Variable dependiente.....	28
2.4.2.1. Indicadores	28
2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables.....	28
CAPITULO III.....	30
Metodología.....	30
3.1. Metodología de la investigación.....	30
3.1.1. Enfoque de la investigación.....	30
3.1.2. Nivel o alcance de la investigación.....	30
3.1.3. Método de la investigación.....	31
3.2. Diseño de la investigación.....	31
3.2.1. Diseño metodológico.....	31
3.2.2. Diseño de ingeniería.....	32
3.3. Población y muestra	32
3.3.1. Población.....	32
3.3.1.1. Descripción de la población.....	33
3.3.1.2. Cuantificación de la población	33
3.3.2. Muestra.....	34
3.3.2.1. Descripción de la muestra.....	34
3.3.2.2. Cuantificación de la muestra.....	34
3.3.2.3. Método de muestreo	34
3.3.2.4. Criterios de la evaluación de muestra	35
3.3.3. Criterios de inclusión.....	35
3.4. Instrumentos.....	36
3.4.1. Instrumentos de recolección de datos	36
3.4.2. Instrumentos de ingeniería.....	42
3.5. Procedimientos de Recolección de Datos.....	46
3.5.1. Ensayo del límite líquido del suelo.....	47
3.5.1.1. Equipos utilizados en la prueba del límite líquido	47
3.5.1.2. Procedimiento del ensayo del límite líquido del suelo	49
3.5.1.3. Toma de datos del límite líquido	53
3.5.2. Ensayo del límite plástico del suelo.....	53



3.5.2.1. Equipos utilizados en la prueba del límite plástico	53
3.5.2.2. Procedimiento del límite plástico.....	55
3.5.2.3. Toma de datos del límite plástico	57
3.5.3. Ensayo del Proctor modificado.....	58
3.5.3.1. Equipos utilizados en la prueba del Proctor modificado	58
3.5.3.2. Procedimiento del Proctor modificado	59
3.5.3.3. Toma de datos del Proctor modificado	62
3.5.4. Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR)	63
3.5.4.1. Equipos utilizados en la prueba de Relación de Soporte de California (CBR).....	63
3.5.4.2. Procedimiento de Relación de Soporte de California (CBR)	64
3.5.4.3. Toma de datos de Relación de Soporte de California (CBR).....	71
3.5.5. Ensayo de compresión inconfínada	74
3.5.5.1. Equipos utilizados en la prueba de compresión inconfínada.....	74
3.5.5.2. Procedimiento de compresión inconfínada	75
3.5.5.3. Toma de datos de compresión inconfínada.....	78
3.6. Procedimientos de análisis de datos	79
3.6.1. Prueba de laboratorio del límite líquido del suelo (NTP 339.129; MTC E-110; ASTM D-4318 y AASHTO T-89).....	79
3.6.1.1. Procedimiento o cálculo de la prueba del límite líquido del suelo	79
3.6.1.2. Diagramas, tablas del límite líquido del suelo	79
3.6.1.3. Análisis de la prueba del límite líquido del suelo	83
3.6.2. Prueba de laboratorio del límite plástico del suelo (NTP 339.129; MTC E-111; ASTM D-4318 y AASHTO T-89).....	83
3.6.2.1. Procedimiento o cálculo de la prueba del límite plástico del suelo	83
3.6.2.2. Diagramas, tablas del límite plástico del suelo	84
3.6.2.3. Análisis de la prueba del límite plástico del suelo	88
3.6.2.4. Análisis de la prueba del índice de plasticidad	88
3.6.3. Prueba de laboratorio del Proctor modificado del suelo (NTP 339.141; MTC E-115; ASTM D-1557 y AASHTO T-180).....	89
3.6.3.1. Procedimiento o cálculo de la prueba del Proctor modificado del suelo	89
3.6.3.2. Diagramas, tablas del Proctor modificado del suelo	90
3.6.3.3. Análisis de la prueba del Proctor modificado del suelo	96



3.6.4. Prueba de laboratorio del CBR del suelo de acuerdo (NTP 339.167; MTC E 132; AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883.....	97
3.6.4.1. Procedimiento o cálculo de CBR del suelo.....	97
3.6.4.2. Diagramas, tablas de CBR del suelo.....	98
3.6.4.3. Análisis de la prueba de CBR del suelo.....	121
3.6.5. Prueba de laboratorio de compresión inconfiada del suelo.....	122
3.6.5.1. Procedimiento o cálculo de compresión inconfiada del suelo.....	122
3.6.5.2. Diagramas, tablas de compresión inconfiada del suelo.....	124
3.6.5.3. Análisis de la prueba de compresión inconfiada del suelo.....	133
CAPITULO IV.....	135
Resultados.....	135
4.1. Resultados respecto a los objetivos específicos.....	135
4.2. Resultados respecto al objetivo general.....	141
CAPÍTULO V.....	143
Discusión.....	143
5.1. Contraste de resultados con referentes del marco teórico.....	143
5.2. Interpretación de los resultados encontrados en la investigación.....	144
5.3. Comentarios de la demostración de la hipótesis.....	145
5.4. Aporte de la investigación.....	145
5.5. Incorporación de temas nuevos que se han presentado durante el proceso de la investigación.....	145
Glosario.....	146
Conclusiones.....	147
Recomendaciones.....	149
Referencias.....	150
Anexos.....	153
Anexo 01: Matriz de Consistencia.....	153
Anexo 02: Panel Fotográfico.....	155
Anexo 03: Certificado de Calibración.....	158
Anexo 04: Análisis de costos unitarios con adición de cal (2% y 4%) y cemento (7%, 9% y 11%).....	160



Índice de Tablas

<i>Tabla 1: El Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS)</i>	12
<i>Tabla 2: El Sistema de Clasificación de Suelos según AASHTO</i>	14
<i>Tabla 3: Rango Requerido de Cemento en Estabilización de Suelos.....</i>	20
<i>Tabla 4: Operacionalización de las Variables de Investigación</i>	28
<i>Tabla 5: Cuantificación de las Muestras de Estabilización de Suelo con cal y Cemento ..</i>	34
<i>Tabla 6: Formato para Límite Líquido MTC E-110, según AASHTO T - 89 y ASTM D - 4318.....</i>	36
<i>Tabla 7: Formato para Límite Plástico - MTC - E111, según AASHTO T - 90 y ASTM D - 4318.....</i>	37
<i>Tabla 8: Formato para Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural – MTC - E115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557</i>	37
<i>Tabla 9: Formato para Ensayo de Compactación – Relación De Soporte De California (CBR) MTC E – 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	38
<i>Tabla 10: Formato para Ensayo de Expansión – Relación De Soporte De California (CBR) MTC E – 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	39
<i>Tabla 11: Formato para Ensayo de Penetración – Relación de Soporte De California (CBR) MTC E – 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	39
<i>Tabla 12: Formato para Relación Esfuerzo - Penetración de las Muestras.....</i>	40
<i>Tabla 13: Formato para Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de las Muestras.</i>	41
<i>Tabla 14: Formato para Compresión Inconfinada de las Muestras.</i>	41
<i>Tabla 15: Toma de datos de ensayo del límite líquido del suelo.</i>	53
<i>Tabla 16: Toma de Datos de Ensayo del Límite Plástico del Suelo.....</i>	57
<i>Tabla 17: Toma de Datos de Ensayo del Proctor modificado del suelo.....</i>	62
<i>Tabla 18: Toma de Datos de Ensayo de Compactación de Relación de Soporte de California (CBR).</i>	71
<i>Tabla 19: Toma de Datos de Ensayo de Expansión de Relación de Soporte de California (CBR).....</i>	72
<i>Tabla 20: Toma de Datos de Ensayo de Penetración de Relación de Soporte de California (CBR).....</i>	73



<i>Tabla 21: Toma de Datos de Ensayo de Esfuerzo - Penetración de Relación de Soporte de California (CBR).</i>	73
<i>Tabla 22: Toma de Datos de Ensayo de Compresión Inconfinada</i>	78
<i>Tabla 23: Límite Líquido de Suelo Natural, MTC E-110, según AASHTO T – 89 y ASTM D – 4318.</i>	79
<i>Tabla 24: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cal 2%</i>	80
<i>Tabla 25: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cal 4%</i>	80
<i>Tabla 26: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 7%</i>	81
<i>Tabla 27: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 9%</i>	82
<i>Tabla 28: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 11%</i>	82
<i>Tabla 29: Límite Plástico de Suelo Natural</i>	84
<i>Tabla 30: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cal 2%</i>	85
<i>Tabla 31: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cal 4%</i>	85
<i>Tabla 32: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 7%</i>	86
<i>Tabla 33: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 9%</i>	87
<i>Tabla 34: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 11%</i>	87
<i>Tabla 35: Índice de Plasticidad para el suelo natural y las diferentes dosificaciones de cal y cemento.</i>	88
<i>Tabla 36: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557</i>	90
<i>Tabla 37: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 2% cal - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557</i>	91
<i>Tabla 38: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 4% cal - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557</i>	92
<i>Tabla 39: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 7% Cemento - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557</i>	93
<i>Tabla 40: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 9% Cemento - MTC E 115, según la AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557</i>	94
<i>Tabla 41: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 11% Cemento - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557</i>	95



<i>Tabla 42:: Resumen de Proctor Modificado del suelo natural y a diferentes dosificaciones de cal y cemento</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 43: Ensayo de Compactación de Suelo Natural de CBR, MTC E 132, según la Norma AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 44: Ensayo de Expansión de Suelo Natural de CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 45: Ensayo de Penetración de Suelo Natural de CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 46: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural - MTC E 115.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 47: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 2% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 48: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 2% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 49: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 2% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 50: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 2% de Cal - MTC E 132.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 51: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 4% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 52: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 4% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 53: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 4% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 54: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 4% de Cal - MTC E 132.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 55: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 7% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 56: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 7% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 57: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 7% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 58: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 7% de Cemento - MTC E 132.</i>	<i>112</i>



<i>Tabla 59: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 9% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	114
<i>Tabla 60: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 9% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	114
<i>Tabla 61: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 9% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	115
<i>Tabla 62: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 9% de Cemento - MTC E 132.</i>	116
<i>Tabla 63: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 11% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	118
<i>Tabla 64: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 11% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	118
<i>Tabla 65: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 11% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883</i>	119
<i>Tabla 66: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 11% de Cemento - MTC E 132.</i>	120
<i>Tabla 67: Resumen de los Resultados de CBR en Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento.....</i>	122
<i>Tabla 68: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo Natural</i>	124
<i>Tabla 69: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 2% Cal.....</i>	126
<i>Tabla 70: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 4% Cal.....</i>	127
<i>Tabla 71: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 7% Cemento</i>	129
<i>Tabla 72: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 9% Cemento</i>	130
<i>Tabla 73: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 11% Cemento</i>	132
<i>Tabla 74: Resumen de los Resultados del Esfuerzo sobre la Muestra Asociado a la Deformación Unitaria en Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento</i>	134



*Tabla 75: Cuadro Resumen de los resultados de las características físico-mecánicas del
Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento 141*



Índice de Figuras

<i>Figura 1: Área de influencia de la zona de estudio vía Agua Buena-Colegio la Salle.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2: Muestra de Suelo Arcilloso</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3: Diagrama de Flujo del Diseño de Investigación</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4: Ubicación de la vía Agua Buena – Colegio La Salle para el muestreo.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 5: Instrumentos de Ingeniería para Análisis Granulométrico</i>	<i>42</i>
<i>Figura 6: Instrumentos para el Ensayo de Límite Plástico.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 7: Instrumentos para el Ensayo de Límite Líquido.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 8: Instrumentos para el Ensayo de CBR.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 9: Instrumentos para Ensayo de Compresión Inconfinada.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 10: Equipos e Instrumentos del Límite Líquido del Suelo.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 11: Preparado para Ensayo de Compresión Inconfinada</i>	<i>49</i>
<i>Figura 12: Pasta Consistente para Ensayo de Compresión Inconfinada</i>	<i>50</i>
<i>Figura 13: Pasta Consistente en la copa de Casagrande</i>	<i>50</i>
<i>Figura 14: Corte de la Pasta en la copa de Casagrande con el acanalador.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 15: La Ranura se cierra en la copa de Casagrande al Proporcionar Golpes.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 16: Medida de la Masa de la Muestra en una capsula.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 17: Medida de la Masa de la Muestra en una capsula.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18: Equipos e Instrumentos del límite Plástico del Suelo</i>	<i>54</i>
<i>Figura 19: Enrollado de la Muestra con los Dedos de la Mano Formando Cilindros</i>	<i>55</i>
<i>Figura 20: Cantidad Necesaria de los Cilindros de la Muestra con un Diámetro de 1/8"</i>	<i>56</i>
<i>Figura 21: Los Cilindros de la Muestra en un Recipiente</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22: Cálculo del peso de los Cilindros de la Muestra</i>	<i>57</i>
<i>Figura 23: Equipos e Instrumentos del Proctor modificado.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 24: Preparado y Desmenuzando de la Muestra</i>	<i>60</i>
<i>Figura 25: Mezclado de la Muestra con una Porción de Agua.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 26: Compactado de la Muestra con el Pisón.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 27: Cálculo del peso de la Muestra Representativa del Suelo</i>	<i>62</i>
<i>Figura 28: Equipos e Instrumentos de Relación de Soporte de California (CBR).....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 29: Preparado y Desmenuzando de la Muestra para CBR.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 30: Tamizado del Material para CBR.....</i>	<i>65</i>



<i>Figura 31: Los tres Moldes para CBR</i>	66
<i>Figura 32: Compactación de la muestra con Golpes de Pisón para CBR.....</i>	67
<i>Figura 33: Colocada de Papel Filtro y la Placa con Vástago - CBR.....</i>	68
<i>Figura 34: Sumersión de los moldes en un Recipiente con Agua - CBR</i>	69
<i>Figura 35: Retiro de la Pesas, Papel Filtro y Collar - CBR.....</i>	69
<i>Figura 36: Secado del Molde - CBR</i>	70
<i>Figura 37: La Muestra en la Prensa - CBR</i>	70
<i>Figura 38: Cálculo del peso de la Suelo Ensayado - CBR</i>	71
<i>Figura 39: Equipos e Instrumentos para el Ensayo de Comprensión Incofinada</i>	74
<i>Figura 40: Nivelación o Perfilado de la Probeta según las Medidas Señaladas.</i>	75
<i>Figura 41: Cálculo del peso de la probeta en una Balanza.....</i>	76
<i>Figura 42: La Probeta en la Máquina de Compresión Inconfinada.....</i>	76
<i>Figura 43: Proceso de Deformación de Compresión Inconfinada.</i>	77
<i>Figura 44: Cálculo del Peso de una Pequeña Muestra de Compresión Inconfinada.....</i>	77
<i>Figura 45: Límite Líquido de Suelo Natural</i>	79
<i>Figura 46: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cal 2%</i>	80
<i>Figura 47: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cal 4%</i>	81
<i>Figura 48: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 7%.....</i>	81
<i>Figura 49: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 9%.....</i>	82
<i>Figura 50: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 11%.....</i>	83
<i>Figura 51: Límite Plástico de Suelo Natural.....</i>	84
<i>Figura 52: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cal 2%</i>	85
<i>Figura 53: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cal 4%</i>	86
<i>Figura 54: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 7%</i>	86
<i>Figura 55: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 9%</i>	87
<i>Figura 56: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 11%</i>	88
<i>Figura 57: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural.....</i>	90
<i>Figura 58: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 2% cal.....</i>	91
<i>Figura 59: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 4% cal.....</i>	92
<i>Figura 60: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural +7% Cemento</i>	93



<i>Figura 61: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 9% Cemento</i>	94
<i>Figura 62: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 11% Cemento</i>	95
<i>Figura 63: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural.</i>	99
<i>Figura 64: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural</i>	100
<i>Figura 65: Densidad Seca Máxima - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural</i>	101
<i>Figura 66: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 2% de Cal</i>	103
<i>Figura 67: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 2% Cal</i>	104
<i>Figura 68: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 2% cal.....</i>	105
<i>Figura 69: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 4% de Cal</i>	107
<i>Figura 70: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 4% Cal</i>	108
<i>Figura 71: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 4% cal.....</i>	109
<i>Figura 72: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 7% de Cemento.....</i>	111
<i>Figura 73: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 7% Cemento.....</i>	112
<i>Figura 74: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 7% Cemento</i>	113
<i>Figura 75: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 9% de Cemento.....</i>	115
<i>Figura 76: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 9% Cemento.....</i>	116
<i>Figura 77: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 9% Cemento</i>	117
<i>Figura 78: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 11% de Cemento.....</i>	119
<i>Figura 79: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 11% Cemento.....</i>	120
<i>Figura 80: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 11% Cemento</i>	121



<i>Figura 81: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo Natural</i>	125
<i>Figura 82: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con edición de cal 2%</i>	127
<i>Figura 83: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con edición de cal 4%</i>	128
<i>Figura 84: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con edición de Cemento 7%</i>	130
<i>Figura 85: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con edición de Cemento 9%</i>	131
<i>Figura 86: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con adición de Cemento 11%</i>	133
<i>Figura 87: Índice de plasticidad para el suelo natural y las diferentes dosificaciones de cal y cemento</i>	136
<i>Figura 88: Proctor Modificado del Suelo Natural y a Diferentes Dosificaciones de Cal y Cemento</i>	137
<i>Figura 89: Resultados de CBR al 95% de la Densidad Seca Máxima en Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento</i>	139
<i>Figura 90: Resultados del Esfuerzo Sobre la Muestra Asociado a la Deformación Unitaria en Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento</i>	140



CAPÍTULO I

Planteamiento del Problema

1.1. Identificación del Problema

1.1.1. Descripción del Problema

Los suelos, no necesariamente presentan las condiciones o características adecuadas para ser aprovechados en los distintos diseños de ingeniería, ya que muchas veces son de baja o defectuosa resistencia, padecen desequilibrios, deterioros y con el paso del tiempo se estropean a causa de los agentes climatológicos y atmosféricos de manera negativa.

Se observaron entonces cuidadosamente diferentes partes de la vía Agua Buena-Colegio la Salle y como resultado de esas observaciones, se llegó a la conclusión que la mayor parte de las secciones de la zona, presenta mayor cantidad de suelos arcillosos.

Según el MTC (2018), las proyecciones del inventario vial departamental y vecinal para el año 2021 en el siguiente: en el departamento del Cusco de un total de 2,803.5 km de carreteras, 565.2 km de carreteras están pavimentadas y 2,238.3 km están no pavimentadas; además, en la ciudad del Cusco de un total de 12,668.4 km de carreteras, solo 304.6 km están pavimentadas y 12,363.8 km no están pavimentadas. El hecho que estas carreteras contengan suelos arcillosos conlleva a que al momento del tránsito de vehículos se levante polvo. “Esto es aplicable en particular al material particulado suspendido en el aire” (OMS, 2006). “El material particulado proveniente tanto de fuentes fijas como de móviles y es emitido en mayor porcentaje en las ciudades de Cusco y Pasco” (MINAM, 2016, p. 7).

Al respecto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que aproximadamente siete millones de seres humanos mueren anualmente por la exposición a elementos en el aire contaminado, que ingresan al interior de los pulmones y el sistema cardiovascular y provocan graves problemas de salud, enfermedades como accidente cerebrovascular, enfermedad cardíaca, cáncer de pulmón, enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias, como la neumonía. Además, los suelos arcillosos pueden causar asentamientos y deslizamiento de ahí viene la importancia de poder estabilizar este tipo de suelos para poder usarlo en subrasantes.

El área de influencia del estudio se desarrollará en la zona de la vía Agua Buena-Colegio la Salle en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco, donde presenta suelos arcillosos.



Figura 1: Área de influencia de la zona de estudio vía Agua Buena-Colegio la Salle



La presente investigación está enmarcada dentro de la especialidad de Geotecnia de la escuela profesional de Ingeniería Civil, el cual se hizo de manera experimental con la asistencia del laboratorio PRO&CON SILVER S.C.R.L, donde se realizará estudios para la estabilización del suelo con el aditamento de cal y cemento mediante ensayos como, por ejemplo: ensayo de relación de densidad-humedad, resistencia a la compresión suelo cemento y otros.

1.1.2. Formulación interrogativa del problema

1.1.2.1. Formulación interrogativa del problema general

¿En qué medida variará las propiedades físico- mecánicas con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán utilizados para subrasante?



1.1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos

- ¿En qué medida variará las propiedades de plasticidad con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante?
- ¿En qué medida variará el peso específico seco máximo con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante?
- ¿En qué medida variará el índice de soporte de California (CBR) con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante?
- ¿En qué medida variará la compresión inconfiada con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante?

1.2. Justificación e importancia de la investigación

1.2.1. Justificación técnica

Desde el punto de vista técnico, la cal y el cemento como aditivos en diferentes proporciones constituyen componentes que se utilizan en suelos arcillosos y puede optimizar suelos para subrasantes; además, los resultados de este trabajo constituyen un aporte sobre las propiedades físicas del suelo estabilizado para realizar un afirmado consistente en la vía en estudio.

1.2.2. Justificación social

Desde perspectivas sociales, los habitantes del sector Agua buena – Colegio La Salle son los beneficiarios directos y quienes transitan y hacen uso de estas vías de la ciudad del Cusco, lo que permite optimizar el movimiento de las diferentes actividades cotidianas que se realizan en esta zona, así como también para evitar accidentes.

1.2.3. Justificación por viabilidad

Esta investigación es posible, porque el estudio es autofinanciado por el investigador y existe el compromiso de hacerlo con la finalidad de lograr los objetivos de la investigación. Además, la vía es un bien público que permite el acceso para realizar trabajos de extracción del material para el estudio correspondiente y posterior análisis e interpretación de los resultados.



1.2.3. Justificación por relevancia

Este estudio se justifica porque en la actualidad en el mundo el uso de la cal y el cemento para optimizar las propiedades físico – mecánicas del suelo especialmente q contenga en mayor proporción arcilla que se usara para subrasante en carretas pavimentadas está en buen avance de investigación debido a que se presenta buenos resultados al implementar estos componentes en el suelo arcillo. Motivo por el cual conviene usar estos procedimientos, nos permitirá proponer una alternativa en lugar de usar otros aditivos más costosos, para el mejoramiento de las propiedades físico – mecánicas del suelo, en la vía Agua Buena-Colegio la Salle.

1.3. Limitaciones

1.3.1. Limitaciones geográficas

El presente trabajo de investigación, geográficamente está delimitado solamente a la región Cusco, porque el análisis está basado en el estudio del suelo arcilloso del tramo de carretera de Hilario Mendivil hasta el nuevo colegio de la Salle.

1.3.2. Limitaciones de diseño

El estudio se limita a la adición de cal y cemento en proporciones de 4%, 6% y en 7; 9 y 11% respectivamente.

1.3.3. Limitaciones de ensayos de laboratorio

Los ensayos o las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en las condiciones ambientales de la ciudad del Cusco, debido al confinamiento social producido por la pandemia del coronavirus, no fue posible realizarlo en los establecimientos de la Universidad Andina del Cusco, por lo que se recorrió a estudios privados, en este caso al laboratorio particular PRO&CON SILVER S.C.R.L.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Determinar la variación de las propiedades físico- mecánicas con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán utilizados para subrasante.



1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la variación las propiedades de plasticidad con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.
- Determinar la variación el peso específico seco máximo con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.
- Determinar la variación el índice de soporte de california (CBR) con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.
- Determinar la variación de la compresión inconfiada con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.



CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la tesis

Examinando la bibliografía existente sobre los antecedentes de la investigación, relacionados con el presente estudio son escasos; sin embargo, a continuación, se presenta algunos trabajos de investigaciones realizaos a nivel local, nacional e internacional

2.1.1. Antecedentes locales

Lines & Palomino (2016), presentaron un informe de tesis titulado “Estabilización con sal, de bases y sub bases de pavimentos, con material de las canteras de Patapata, Saylla y Andahuaylillas”, en el cual el objetivo general es determinar el efecto del uso de sal granular de la Salineras de Maras para estabilizar suelos en canteras, utilizados como base y/o sub base para pavimentos; tanto es así que, a partir de pruebas de laboratorio con la adición de sal de nuez de Maras en diferentes porcentajes, se obtuvieron importantes resultados, en los cuales el estudio demostró que los parámetros mecánicos mejoraron al agregar 2% de sal, porcentaje máximo óptimo en las canteras evaluadas; asimismo, trató de revelar las peculiaridades físicas y mecánicas del suelo en las canteras de Patapata, ubicadas en Saylla y Andahuaylillas. De igual forma, se puede señalar que los hallazgos conseguidos distinguieron que la tierra con mejor CBR fue la mina ubicada en Andahuaylillas, por su parte la que presentó un importante aumento de propiedades mecánicas con la adición del 2% de sal como materia prima del suelo ubicado en Saylla.

Santos & Sarmiento (2018), en la tesis titulado “Incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en la estabilización de suelo arcilloso, propuesto como material de subrasante de la vía Fundo Molleray San Sebastián – Cusco”, estudiaron especímenes de suelo arcilloso en su ambiente natural y con adición de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) de 5%, 10% y 15% respectivamente, con el objetivo de estabilizar el suelo en la subrasante en el camino Fundo Molleray, la cual es ubicada en el distrito de San Sebastián, provincia y departamento del Cusco, utiliza ceniza de cascarilla de arroz en determinadas proporciones por peso. Para ello, realizaron diversos ensayos de propiedades, como: la granularidad, el límite plástico, el límite líquido, el Proctor y CBR modificado, teniendo en cuenta el sistema ASTM y AASHTO. En este estudio, una de las conclusiones fue que la dosificación favorable de CCA fue de 5% en masa del suelo, lo que permitió lograr la textura óptima de la subrasante usando suelo con un CBR promedio de 32%, optimizando 8,3% de CBR de



muestras de suelo sin aditivo; asimismo, advierten que para dosis mayores al 5% de adición de ceniza de cascarilla de arroz, el CBR del suelo emprende a reducir por la cantidad excesiva de material estabilizante utilizado, formándose así grandes corpúsculos con vacíos más grandes, cambiando así las características del suelo.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Jara (2014), en su tesis “Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso”, tuvo como propósito valorar la importancia de la cal como estabilizador de arcilla de una subrasante para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos. El contenido de la arcilla presente en la subrasante crea desventajas debido a su alta plasticidad, baja resistencia e inestabilidad dependiendo del contenido de humedad. Se realizaron pruebas de muestra de acuerdo con la norma ASTM 6276 con proporciones distintas de adición de cal: 0 %, 2 %, 4 % y 6 % en masa con base en el porcentaje de cal de las muestras de suelo arcilloso y de acuerdo con las instrucciones estandarizados. Los resultados del estudio de estabilidad arrojaron excelentes resultados, la adición de 6% de cal redujo el índice de plasticidad a 9,23, el índice de plasticidad inicial en el suelo natural fue de 36,87, y el CBR (fisuración) fue con cambio de crecimiento, logró un CBR de 11,48% con 4% de cal y 2,55 con 0% de cal. En resumen, para el tipo de suelo A-7-5, los resultados obtenidos al aplicar diferentes cantidades de cal fueron mejores que los obtenidos al agregar 4% de cal con mayor CBR.

Velarde (2015), en su trabajo de investigación “Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en la determinación de la resistencia a la compresión simple de suelos arcillosos estabilizados con cal y cemento”, realizó estudios para evaluar la consistencia a la compresión simple del suelo arcilloso con cal y cemento para la estabilización, especialmente en la Bahía del Lago Titicaca de la ciudad de Puno. En el ensayo se utilizó un modelo circular, donde el cemento y la cal fueron los componentes investigados, lo que permitió obtener resultados positivos además de la cal y el cemento al calcular una función de resistencia a la compresión simple. Los hallazgos del análisis estadístico de la consistencia a la compresión simple son los siguientes: a) en la zona Huaje - Puno la composición conveniente de los elementos estabilizantes de $C^* = 9.77\%$ y $P^* = 9.66\%$, la resistencia a la compresión simple es de 44.79 kg/cm^2 , b) por su parte en el estadio universitario UNA-PUNO la mezcla óptima de los factores estabilizantes de $C^* = 10.15\%$ y $P^* = 9.84\%$, la resistencia a la compresión simple es de 55.97 kg/cm^2 , y c) por último, en la



zona Salcedo - Puno la composición óptima de los elementos estabilizantes $C^* = 9.79\%$ y $P^* = 9.89\%$, la resistencia a la compresión se logró a 31.79 kg/cm^2 .

Castro & Navarro (2020) en la investigación “Propuesta de mejora de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante mediante la adición de cemento Portland para disminuir el cambio volumétrico provocado por las condiciones climáticas”, el objetivo del estudio fue reducir la variación volumétrica de la arcilla de alta elasticidad que forma la subrasante a través de la estabilización del suelo con cemento Portland en la Av. Padre Salas, Villa Rica, en la región de Pasco, la resistencia y expansión que presenta el suelo de la manera indicada, se realizó el estudio mediante ensayos CBR. Para optimizar las características físicas y mecánicas del suelo se utilizaron la técnica de suelo cohesivo, el proceso consistió en combinar suelo natural con cemento portland tipo I, de esta forma se forma un 10% de suelo cohesivo, un 15% y un 20%, mostrando un aumento sustantivo en CBR (máximo: 138.7% y mínimo: 91.9%) obteniendo así un importante tipo de suelo para subrasante, de manera que podrá soportar estructuras de pavimento y 7.18% de reducción en la expansión de las muestras.

2.1.3. Antecedentes internacionales

Sánchez (2014), en su informe de tesis “Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del cantón Tosagua provincia de Manabí”, desarrolló en la República de Ecuador, un estudio centrado en observar el comportamiento de las cualidades físicas y mecánicas de la tierra del sector Calcical del cantón Tosagua, la que se identifica de alta plasticidad, con una potencia expansiva amplia y elevada. La investigación se sustenta en la adición de un componente estabilizante en el suelo, como en el caso de la cal viva y el cemento Portland puzolánico, para comprobar los cambios de la expansión del suelo. Para llevar a cabo la investigación, el autor ha realizado varios ensayos de laboratorio para evaluar las propiedades físicas y mecánicas, el índice del suelo, así como su presión de expansión y el porcentaje de expansión que puede llegar a presentar, ambos en su estado natural, y con adición de cal y cemento en porcentajes de 3,5 y 7%. Su principal conclusión, con la adición de cal viva como estabilizador, se puede reducir la tasa de expansión del suelo, con un 3% esta tasa se redujo en un 20%, con un 5% de cal la tasa de hinchamiento disminuyó en un 40%. y con el uso de un estabilizador al 7% se logró una reducción del 57%. Además, con la adición de cal, es posible reducir la expansión alta a media con estabilizador del 3 y 5% y se alcanza un potencial de expansión bajo con 7% de cal. Además, con el 3% de cemento, el porcentaje de expansión se reduce en un 57%, a través de la adición



del 5% de cemento, esta reducción es del 74% y con el 7% de una disminución del 87%. El uso de una proporción de cemento del 3 % reduce la capacidad de hinchamiento de alta a media, de alta a baja al 5 % y con un 7 %, la capacidad de expansión disminuye de alta a muy baja.

Camargo & Duran (2018) sobre el estudio “Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias” llevaron a cabo en la República de Colombia, su objetivo de la investigación fue evaluar las propiedades mecánicas del suelo, donde se realizaron una serie de ensayos y estudios de variables con el intención de establecer la clasificación del suelo en relación a la cantidad de agua, tamaño de la partícula y el límite de Atterberg. En el cual los resultados se obtuvieron de la siguiente manera: el límite plástico es de 18%, el límite líquido es 33.19%, e índice de plasticidad es de 15.19%. La Relación de Soporte de California del suelo ensayado fue de 6.22%, clasificando el suelo de muy pobre a bueno. Asimismo, se ejecutaron 3 proporciones de cantidades de cemento: 10%, 12% y 14% para conseguir la relación óptima del suelo con cemento, formando un 12% en peso de cemento. Por su parte, la pasta alcanzó su máxima densidad seca cuando se llevó a un contenido de humedad del 18%. Con la estabilización, la posibilidad de soporte ha aumentado al 30,00%. Finalmente, el suelo en estudio está clasificado bajo según ASSHTO como clase A-6 y de acuerdo con SUCS corresponde a un suelo CL, que es un suelo arcilloso de baja plasticidad; por lo que se deben mejorar sus propiedades mecánicas mezclando en mayor proporción de cemento.

2.2. Aspectos Teórico Pertinentes

2.2.1. El suelo

El término “suelo” adopta diferentes acepciones, obedeciendo al quehacer de los profesionales, es decir, el argumento varía de acuerdo con los intereses de cada profesión. Por ejemplo, para el agrónomo (Cuadrado & Lorenzo, 1980, p. 11), el suelo es la parte externa de la corteza terrestre, que contiene partículas sólidas, agua y aire, y sirve de soporte a la vida vegetal. Mientras que, para el Geólogo (Duque, 2017, p. 231), “es el resultado de todos los procesos que han transformado el material original, es decir, la roca que antes había donde hoy se halla el suelo”. Como se puede advertir, las concepciones sobre la temática del suelo, son diversos. Estas disquisiciones, están en función a la actividad y profesión que ejercen las personas.



A continuación, se presenta las explicaciones que presentan los estudiosos, sobre el suelo que está en relación con los quehaceres de la ingeniería. Es así que, para los ingenieros, Juárez & Rico (2005), el suelo es “todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves” (p. 34). Mientras que para, Duque & Escobar (2016), son aquellas sedimentaciones no afirmadas de corpúsculos sólidos, como resultado de la transformación de los peñascos, o suelos trasladados por aquellos agentes atmosféricos, como es el viento, agua o hielo por efecto de la gravedad, y que pueden contener materia orgánica. Por su parte, el ingeniero Crespo (2004), sostiene que, el suelo “es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración, física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan” (p. 20). Así, el suelo constituye una delgada capa de la corteza terrestre, esta capa no se tiene una medida exacta, se puede concebir como las diferentes actividades que realizan los seres humanos en dicha corteza terrestre. Asimismo, las características o propiedades del suelo, varían en relación a las alteraciones físicas y/o químicas respectivamente.

El suelo es un agregado natural constituido por partículas minerales, puede o no tener materiales orgánicos (Peck, Hanson & Thornburn, 1983). El suelo es básicamente un sistema de partículas (Lambe & Whitman, 2012). El suelo está compuesto de un conjunto de fragmentos sólidos y otro conjunto de vacíos (Díaz, 2014). A partir de las concepciones de los tres especialistas, se puede colegir que el suelo como sistema de partículas sólidas está constituida por una variedad de minerales y constituyentes orgánicos, y como un sistema de vacíos puede estar ocupado por aire, agua, y otros gases o líquidos en forma parcial o totalmente.

En consecuencia, el contenido total de un suelo está compuesto por el volumen de sistema de partículas de sólidos y por el otro volumen de sistema de vacíos; pero, este último está constituido por agua, aire y otros elementos.

2.2.1.2. Clasificaciones de los Suelos

En este apartado, se precisan las propiedades físicas básicas de los principales tipos de suelos, con los métodos para medirlos. Se consideran algunos sistemas de clasificación elementales.

Actualmente, existen dos sistemas de clasificación de suelos, uno es el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) y otro el sistema de clasificación de la Asociación



Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO). Uno y otro sistema tienen en común es sobre la distribución del tamaño de partículas y la plasticidad del suelo. El sistema de clasificación AASHTO, es fundamentalmente utilizado por los ingenieros de carreteras, mientras que el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS), es ampliamente empleado por los profesionales geotécnicos (Das & Sobhan, 2014, p. 123).

En ese sentido, la clasificación del suelo considerando al tamaño de las partículas que la componen son: grava, arena, limo, arcilla. A continuación, se expone, muy sucintamente las características de cada uno de los sistemas de clasificación de suelos.

2.2.1.2.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Primigeniamente, el sistema Unified Soil Classification System (USCS) fue propuesto por Casagrande en 1942 con el propósito de emplear en las obras de construcción de aeródromos emprendidas por la Corporación de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. En la actualidad, es ampliamente empleado por los ingenieros geotécnicos.

Para clasificar y agrupar suelos, el sistema SUCS, se basa en el comportamiento del suelo, que es un reflejo de las propiedades físicas del suelo y sus constituyentes. El sistema SUCS clasifica los suelos en dos grandes categorías: los suelos finos se clasifican de acuerdo a su plasticidad y mientras que los suelos gruesos según su composición granulométrica.

- a. Suelos gruesos:** Los suelos de grano grueso es generalmente una mezcla de grava y arena, y menos de 50% logran pasar la malla No 200 (0.075 mm). En la clasificación, los símbolos de cada grupo inician con el prefijo G o S, donde G indica suelo grava o con grava, y S significa arenisca, arena o suelo arenoso (Díaz, 2014).
- b. Suelos finos:** Los suelos de grano fino logran pasar con 50% o mayor la malla No 200 (0.075 mm). Los símbolos de cada grupo de suelos utilizan el prefijo M, que simboliza limo inorgánico; por su parte el prefijo C, señala arcillas inorgánicas; y el símbolo O, significa arcillas o limos orgánicos. El símbolo Pt se utiliza para identificar a turbas, lodos y otros suelos con bastante contenido orgánico. Además, se disponen de otras letras, como W que indica bien graduado, P significa mal graduado, L es de baja plasticidad ($w_L < 50\%$) y H representa alta plasticidad ($w_L > 50\%$) (Díaz, 2014).



Como se podrá notar, este sistema de clasificación de suelos, tiene su fundamento en la distribución del tamaño de partícula, el límite líquido, la plasticidad del suelo y las concentraciones de materia orgánica. Además, los distintivos utilizados en los símbolos de grupo para distinguir suelos de grano grueso y de grava son GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM y GP-GC. Mientras que, los símbolos o distintivos de grupo utilizados para suelos de grano fino son como sigue CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML y Pt. A continuación, en la tabla No 1, se presenta el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Tabla 1: El Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS)

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo	
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW	
		Menos de 5% finos ^a	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP	
		Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM	
		Más de 12% finos ^{a,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC	
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW	
		Menos de 5% finos ^b	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP	
Arenas con finos		$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	SM		
Más de 12% finos ^{b,d}		$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SC		
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL	
		Orgánico	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	ML	
			Límite líquido: secado	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OL	OL
				Límite líquido: no secado	
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	CH	
		Orgánico	Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	MH	
		Límite líquido: secado	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OH	OH	
		Límite líquido: no secado			
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt	

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Fuente: Das B. (2015), Fundamentos de ingeniería geotécnica, pág. 83.

Para una adecuada clasificación del suelo, considerando el sistema SUCS, es necesario establecer la siguiente información, tal como señala Duque (2017):



- El porcentaje de grava que contiene el suelo, es el fragmento que atraviesa por el colador de 76.2 mm e interceptada en el tamiz No 4 (4.75 mm de diámetro).
- La proporción de arena que comprende el suelo, es la porción que atraviesa por el tamiz No 4 (4.75 mm de diámetro) y es interceptada en el cedazo No 200 (0.075 mm de apertura).
- La proporción de limo y arcilla que presenta el suelo, es el fragmento más fino que pasa el tamiz No. 200 (0.075 mm de rendija).
- También se considera el coeficiente de gradación o curvatura (C_c), así como el coeficiente de uniformidad (C_u)
- El índice de plasticidad y el límite líquido de la fracción de suelo que atraviesa el tamiz No 40.

2.2.1.2.2. Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (Aashto)

El sistema de clasificación de los suelos de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), como tal se llevó a cabo en 1929 denominándose la clasificación del sistema de la administración pública de carreteras (Das, 2015). Si bien ha sufrido varias revisiones, según este sistema, la clasificación del suelo está conformado por siete principales grupos: desde A - 1 hasta A - 7. Los suelos que son clasificados en los grupos A - 1, A - 2 y A - 3 se denominan material granular, ya que el 35% o menos de las partículas aventajan por el tamiz No. 200. Mientras en los suelos en los que pasa más del 35% por el tamiz No. 200 se clasifican y se agrupan en los siguientes grupos A - 4, A - 5, A - 6 y A - 7. Estos suelos son generalmente son materiales de tipo limoso y arcilloso. El sistema AASHTO principalmente es utilizado por los ingenieros de carreteras.

En el estudio realizado por Das & Sobhan (2014), este sistema de clasificación se fundamenta en la distribución del tamaño de las partículas y la plasticidad del suelo y, se utiliza esencialmente en carreteras y pavimentos.

A continuación, en la tabla N° 2 se presenta la clasificación del suelo de acuerdo al sistema AASHTO, este sistema de clasificación, considera el análisis de tamiz, es decir la distribución granulométrica; así como el índice de plasticidad de los suelos.



Tabla 2: El Sistema de Clasificación de Suelos según AASHTO

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

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo de clasificación				A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Fuente: Das B. (2015) , Fundamentos de ingeniería geotécnica, pág. 79).

De acuerdo al sistema AASHTO de tipificación de suelos se sustenta en los siguientes criterios a saber: la dimensión del grano y la plasticidad del suelo.



2.2.1.3. Estabilización del suelo

La mecánica de suelos, es la encargada de estudiar el comportamiento y la estabilización de los suelos, de manera que resulte viable usarlo como material de construcción en la ingeniería. Para realizar el estudio, es necesario recordar que, los suelos están formados por diferentes materiales que se hallan en las tres fases de la materia, es decir, el suelo está compuesto por: materia sólida, líquido y gas.

La mejora de las características del suelo mediante el uso de materiales aditivos se denomina estabilización. La estabilización del suelo, fundamentalmente consiste en el mejoramiento de los suelos, mediante diversos procedimientos para reducir la plasticidad y mejorar la textura del suelo. “Las propiedades de los suelos se pueden alterar por medio de diversos procedimientos, a saber: medios mecánicos, drenando el suelo, de forma eléctrica, por cambios de temperatura o adicionando agentes estabilizadores” (Roux, 2010, p. 23).

Denominamos estabilización del suelo a ese proceso que consiste en modificar las características físicas y mecánicas del suelo en estado natural, en cuanto se someten dichos suelos a ciertos tratamientos o manipulaciones, de modo que se puede conseguir las condiciones óptimas, lográndose un suelo estable, de manera que pueda soportar los movimientos de tránsito vehicular, así como las condiciones climáticas severas.

Los suelos se pueden mejorar mecánica, química, eléctrica y térmicamente; el grado de estabilidad conseguido puede variar de acuerdo a los tipos o estabilizantes empleados, debido a que diferentes suelos responden de manera diferente a diferentes tipos de estabilización (Montejo, Montejo, & Montejo , 2018).

La estabilización implica mezclar una cierta cantidad suficiente de aditivo en el suelo cohesivo para generar una reacción química que une las partículas del suelo, lo que incrementa en gran medida la resistencia del suelo. En conclusión, se puede afirmar que los suelos que son estables en estado de sequedad o humedad, es cuando tienen una resistencia significativa y estable a la deformación bajo cargas repetidas o continuas.

2.2.1.3.1. Estabilización de suelos utilizando cal

El suelo natural en el área de construcción no siempre es apropiado para el peso de la estructura deseada. Para ello, se debe aplicar ciertas técnicas con el propósito de optimizar las características físicas y mecánicas del suelo. En la optimización del suelo, con mucha frecuencia se utilizan técnicas para obtener suelos mejorados, mediante el aditamento de



agentes aditivos como la cal y el cemento. Cuando la cal se añade a los suelos arcillosos, se ocasionan una serie de reacciones que conducen al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo (Ghobadi, Abdilor, & Babazadeh, 2014). Las reacciones de cal y arcilla obedecen a varios factores, como es la constitución mineralógica del suelo arcilloso, la cantidad de cal empleada para el tratamiento, el contenido de humedad del suelo, el tiempo de curado y la temperatura (Sherwood 1993). Asimismo, la selección del tipo de estabilizador está sujeto a diferentes factores, como es el tipo de suelo, las condiciones climáticas y el costo de operación de construcción.

Generalmente se reconoce que la adición de cal a arcillas expansivas reduciría la plasticidad del suelo y, por lo tanto, su potencial de hinchazón. Chen (1975), hizo un estudio sobre la cantidad de cal necesaria para la estabilización de suelos arcillosos y concluyó que la cantidad de cal necesaria para estabilizar los suelos arcillosos oscila entre 2 y 8 por ciento. Añadir cal hasta el porcentaje óptimo puede mejorar las características del suelo. Si la cantidad de cal es superior al porcentaje óptimo, hay una cantidad de cal no utilizada en el medio ambiente que disminuye la resistencia. Es por eso que encontrar la tasa óptima se considera un tema importante para agregar al suelo.

Figura 2: Muestra de Suelo Arcilloso



En verdad al mejoramiento del suelo, se le conoce como estabilización del suelo, que consiste en un proceso de modificación de las propiedades físico mecánicas del suelo a través de ensayos de laboratorio. Por eso por estabilización se entiende al suministro de aditivos



para mejorar el comportamiento, la manejabilidad de los suelos, haciendo del material más fácil de emplear para labores de ingeniería.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) para la estabilización de suelos, entre otros criterios geotécnicos, recomienda tomar en consideración los tipos de suelo; así como la cubierta de la subrasante del suelo debe permanecer sobre el nivel de la napa freática cuando la subrasante es muy buena y condiciones óptimas y como mínimo a 0.60 m; mientras tanto cuando la subrasante del suelo es regular y buena a 0.80 m, si se advierte de una subrasante pobre a 1.00 m, y por último si se trata de una subrasante inapropiada a 1.20 m.

La estabilización del suelo con cal tiene como objetivo crear una reacción puzolánica entre la cal y la arcilla, que siempre tiene lugar durante un largo período de tiempo. Durante este proceso, es importante preservar y mantener las condiciones de curado del material para garantizar el progreso general de la reacción. Asimismo, es importante asegurar la resistencia a influencias externas como presión, heladas, erosión por solutos fuertes, limpieza de vehículos, etc.

Cuando se aplica cal al suelo para mejorar o estabilizar, varios factores condicionan el resultado exitoso del procedimiento. Se derivan en mayoría de ellos del mecanismo de interacción que exista entre la cal y la arcilla, pero existen también otros factores que pueden denominarse extrínsecos, cuya correlación también es necesario considerar. Como manifiesta Bauzá (2006) de todos los elementos que pueden afectar a la eficacia del procesado de la cal, se pueden extraer los más importantes y agruparlos como estén relacionados con los siguientes: Composición del suelo (contenido de arcilla, propiedades minerales, contenido de sulfatos solubles y materia orgánica), maleabilidad del suelo, pH del medio de tratamiento, método de aplicación (humedad compacta, uniformidad y desintegración de la mezcla, inconveniente de compactación) y presencia de agua en el suelo.

Cuando se añade cal al suelo arcilloso, este modifica su comportamiento como resultado de la variación de sus propiedades. En ese sentido, la aplicación de cal a la arcilla cambia las propiedades físicas de su comportamiento original, que son los efectos de la adición de la cal al suelo. Si bien ya se ha mencionado que más o menos ocurrirá un proceso u otro dependiendo de los minerales del suelo, la cantidad y la forma de la cal, los efectos más generales de las mejoras de la estabilización del suelo con cal, se pueden resumirse en los siguientes (Bauzá, 2003): Reducir la humedad natural del suelo, cambiar tamaño de partícula, aumenta la permeabilidad, mayor movilidad, índice de plasticidad reducido,



reducir la posibilidad de cambios de volumen, modificar las propiedades de compresión, aumento instantáneo de la consistencia, mayor resistencia a mediano y largo plazo

En este punto, dado que se conocen los efectos de las adiciones de cal sobre las arcillas y los mecanismos por los cuales se conocen, es importante distinguir entre las dos amplias clases de tratamientos en función de sus efectos. Esto es la mejora y la estabilización de suelos. La fijación del suelo con cal solo pretende cambiar los efectos inmediatos y a corto plazo del encalado sobre el suelo, o lo que sea, a corto plazo. Sin embargo, dicho uso puede requerir la durabilidad del efecto o simplemente la precisión dentro de una fracción de la vida útil del trabajo. A diferencia de la mejora, la estabilidad de suelos con cal es un procedimiento que intenta alterar las propiedades mecánicas de un material para lograr una resistencia estructural que puede no considerarse apropiada para este tipo de material.

2.2.1.3.2. Estabilización de suelos utilizando cemento

Tanto el cemento como la cal se han utilizado en la estabilización para modificar las propiedades mecánicas y físicas del suelo. La estabilización de suelos con el empleo del cemento se asemeja a la estabilización con cal. En suelos predominantemente de grano grueso, la pasta de cemento une las partículas del suelo por fuerzas de adhesión superficiales entre el gel de cemento y las superficies de partículas. En suelos de grano fino la fase de arcilla también puede contribuir a la estabilización a través de la solución en el entorno de alto pH y la reacción con la cal libre del cemento para formar suplemento solución de silicato de calcio (CSH). Una diferencia básica es que la reacción de estabilización del cemento con un suelo más grueso se produce más rápidamente que la reacción de suelo de cal. Sin embargo, las reacciones de cemento y cal continúan con el tiempo.

Spangler & Patel (1950), informaron sobre el tratamiento del suelo con cemento portland, quienes concluyeron que la adición de 2 por ciento y 4 por ciento de cemento portland redujo considerablemente el cambio de volumen potencial del suelo. La mayoría de los suelos se pueden estabilizar con éxito con cemento, pero cada situación debe ser analizada para determinar la cantidad de cemento necesaria para proporcionar una estabilización adecuada del suelo.

Dado que el suelo suele ser un agregado de partículas inertes y otras activas con diversos grados de plasticidad, tal como señala el papel del cemento para él es doble: por un lado, funciona como el hormigón, es decir, como aglutinante de arena, grava y limo; y por otro lado, cuando el cemento entra en contacto con el agua se forma el hidrato de calcio, lo que



provoca la liberación de iones de calcio que, debido a su alta afinidad con el agua, eliminan parcialmente la molécula de agua entre las dos capas de arcilla. El resultado de este proceso es una porosidad y ductilidad reducidas, y una mayor resistencia y durabilidad.

El tratamiento del suelo con una cantidad relativamente pequeña de cemento, es mejorar las propiedades del suelo para que puedan ser utilizados en las aceras; asimismo, al agregar una pequeña cantidad de cemento, se une para formar una estructura rígida; por tanto, el grado de mejora depende en gran medida del tipo de suelo y de la cantidad de cemento en la mezcla.

Juárez & Inzunza (2011) aseguran que se pueden lograr mejoras en las propiedades del material con una pequeña cantidad de cemento en: reducir la ductilidad del suelo (IP), disminución de partículas finas, principalmente arcilla, aumento de la resistencia, aumento de la tasa de esfuerzo cortante, y mayor volumen estático. Por su parte, la Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de Suelos y Reciclado de Firmes (ANTER), Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE) y el Instituto del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) (2008) al referirse al suelo estabilizado con cemento, distinguen dos efectos, unos inmediatos y otros a largo plazo, aunque para el cemento se prefieren estos últimos; para una mejora inmediata, se trata de un cambio en el estado del agua y las propiedades de la parte arcillosa del suelo, y en cuanto a los efectos a largo plazo, son el fraguado y endurecimiento del conglomerante concede al suelo tratado una firmeza mecánica que puede llegar a ser preponderante su comportamiento.

Este valor de firmeza varía mucho según el tipo y la cantidad de adhesivo. En algunos casos, para contrarrestar los efectos del contenido de materia orgánica, se recomienda cemento de alta resistencia, ya temperaturas más bajas, se puede utilizar cemento de fraguado rápido o cloruro de calcio como aditivo. De esta forma, Montejo et al (2018) sostienen que el cemento no solo destruye su plasticidad, sino que también aumenta su resistencia al corte; es decir, reduce su afinidad por el agua, lo que reduce a su vez la capacidad de la arcilla para retener agua; en ese sentido, proporciona una capa protectora a las partículas del suelo, y también previniendo la hinchazón debido al aumento de la humedad.

Para la estabilización del suelo con cemento, los granulares y cohesivos con baja plasticidad son mejores. La arcilla de calcio es más fácil de estabilizar agregando cemento, mientras que la arcilla hidrogenada y con componente de sodio es más expansible y reacciona mejor a la estabilización con cal, por lo que se debe tener cuidado al elegir un material estabilizador.



Tabla 3: Rango Requerido de Cemento en Estabilización de Suelos

Clasificación de suelos AASHTO	Rango usual de cemento requerido Porcentaje del peso de los suelos
A-1-a	3-5
A-1-b	5-8
A-2	5-9
A-3	7-11
A-4	7-12
A-5	8-13
A-6	9-15
A-7	10-16

Fuente: Adaptado del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014). *Manual de Carreteras. Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos*, pag. 103.

2.2.2. Propiedades físico – mecánicas de los Suelos

2.2.2.1. Índices de Consistencia

En la rama de Ingeniería Civil uno de las categorías es el estudio del comportamiento del suelo que viene a ser el soporte de toda obra civil. Y una de las propiedades del suelo se denomina plasticidad, que algunos suelos son susceptibles de ser modificadas su consistencia en relación con la humedad.

En 1911, el científico sueco Atterberg, realizó un procedimiento con la finalidad de determinar la consistencia límite de los suelos de grano fino sobre la base del contenido de humedad. Estos límites son el límite líquido, el límite plástico y el límite de contracción.

a. Límite líquido

El límite líquido de un suelo generalmente está determinado por el dispositivo Estándar de Casagrande. Este dispositivo consiste en una taza de latón y una base de goma dura.

El límite líquido es concebido como la cantidad de humedad que contiene, en porcentaje, en el que un suelo transforma de un estado líquido a un estado plástico (Das, 2019). Los contenidos de humedad (en porcentaje) del suelo se transforma de un estado plástico a otro estado semisólido y de este a un estado sólido se distingue como el límite plástico y de encogimiento respectivamente.



b. Límite plástico

El límite plástico se define como el contenido húmedo, en porcentaje, en el que el suelo se desmorona cuando se enrolla en hilos de 3,2 mm de diámetro (Das B. , Advanced Soil Mechanics, 2019). El límite de plástico es el límite inferior de la fase plástica del suelo. El ensayo del límite plástico es sencillo y se procede a través del laminado frecuente de una masilla de suelo de cierta dimensión elipsoidal manualmente sobre una placa de vidrio esmerilado.

Como en el caso del límite líquido para su determinación se realizan de tres a cuatro pruebas para distintos niveles de humedad del suelo y para determinar la penetración de cono correspondiente. Pues la cantidad de humedad correspondiente a una penetración de cono de 20 mm diámetro es el límite de plástico.

c. Índice de plasticidad (IP).

La variación que existe entre el límite plástico y el límite líquido de un suelo se define como el índice de plasticidad (IP).

En ese sentido, el límite líquido y límite plástico de los suelos se les conoce como límites de Atterberg. Así como señala Graux (1975) los límites de Atterberg determinan la cantidad de humedad que contiene con que una muestra de suelo alcanza distintos estados de consistencia. Los límites de consistencia realizadas en el presente estudio, son el límite líquido y límite plástico.

De esta manera, el índice de plasticidad o consistencia es una propiedad del suelo que en tiempos pasados ha servido para clasificar suelos en forma meramente descriptivo. En la actualidad la plasticidad se convierte en una propiedad de bastante interés en el campo de la ingeniería, dejando de ser una cualidad puramente descriptiva; posteriormente las investigaciones han demostrado que la plasticidad de un suelo es debida a su contenido de partículas más finas.

En mecánica de suelos Juárez & Rico (2005) afirman que la plasticidad es una propiedad de la materia, que tiene la capacidad de resistir deformaciones repentinas, sin variación volumétrica apreciable, sin repercusión elástico y sin desmoronarse ni agrietarse. En la misma postura, para Crespo (2004) la plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de soportar deformaciones, hasta cierto límite, sin romperse, y a través de ella establecer el comportamiento de los suelos. Para comprender la plasticidad o consistencia del suelo



necesariamente se emplea los límites de Atterberg, separándolos en cuatro estados de consistencia. Los suelos arcillosos presentan esta propiedad en varios niveles.

El suelo puede o no estar moldeable o tener una forma característica de textura debido a la presencia de agua. Adecuado para suelos finos. La consistencia se puede cambiar libremente agregando o disminuyendo humedad. En ese sentido, el índice de consistencia, permite describir el rango de contenidos de agua bajo los cuales un suelo tiene comportamiento plástico.

Usando el índice de viscosidad, la consistencia actual del suelo se puede evaluar sobre la base del límite líquido, el índice de plasticidad y el contenido actual de agua en el suelo, a saber:

$$CI = \frac{LL - w}{LL - I_p}$$

Donde:

CI = Índice de consistencia del suelo.

w = Contenido de humedad actual del suelo.

LL = Límite líquido.

IP = Índice de plasticidad.

El índice de plasticidad constituye una de las propiedades físicas de un suelo y según el manual de suelos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, (2014) y otros estudios, al adicionar cal al suelo natural, el índice de plasticidad se reduce considerablemente, debido a una reducción del límite líquido y a un incremento del límite plástico. Asimismo, Bauzá (2006) manifiesta, una de las principales manifestaciones del uso de la cal en los suelos que contiene arcilla es la disminución del índice de plasticidad, propiedad convincente y diferenciadora de este tipo de suelo. Por su parte, las tres asociaciones españolas ANCADE, ANTER y ECA (2008) sostienen que los efectos más significativos de la cal en un suelo radican en alternar considerablemente su plasticidad. Además, las principales manifestaciones del uso de la cal como estabilizante de suelos que contiene arcilla es la disminución del índice de plasticidad, que es una caracteriza que se distingue en este tipo de suelos.



2.2.2.2. Densidades secas máxima y mínima

Como se conoce el suelo está compuesto por materiales sólidos, líquidos y gaseosos. De manera que el análisis de las características físicas de los suelos es muy importante para realizar obras de ingeniería. Entre otras características se necesita el estudio de densidades secas máxima y mínima del suelo.

Como quiera que la compactación es el proceso que sirve para aumentar la densidad de un material aplicando fuerzas externas estáticas o dinámicas, con ello se pretende conseguir los siguientes efectos: primero aumentar el rozamiento interno de las partículas, disminuir los huecos o impermeabilizar, todos estos efectos son muy importantes en las obras de ingeniería.

Para determinar la curva de compactación se toman al menos 4 o 5 determinaciones de un suelo con distintos grados de humedad y con una energía de compactación estándar establecida, medir la densidad seca alcanzada, para ello se hizo el ensayo de Proctor. Para una óptima humedad existe una densidad máxima para ese suelo con esa firmeza de compactación.

El peso específico del suelo se explica como el valor de su peso por unidad de volumen. Por ello, es importante establecer la densidad seca mínima y máxima de los suelos no cohesivos, no pavimentos, cuyo tamaño nominal máximo es de 80 mm, hasta un contenido de 12% de volumen de fragmentos inferiores a 0,08 mm y un índice de plasticidad (IP) menor o igual a 5. Este procedimiento se utiliza porque en ese tipo de suelos, tanto secos como saturados, el impacto de compactación no provoca una relación claramente definida entre la densidad y la humedad.

La compactación de estos suelos fue expresada por Karl Terzaghi (1943) en expresiones de densidad relativa, conocida también como índice de densidad (ID), que se encontró en relación de las densidades mínima y máxima conseguidas en un experimento de laboratorio.

La densidad mínima seca del suelo ($\gamma_{d \min}$) está:

$$\gamma_{d \min} = (W_1 - M_m) / V_m \text{ (grs/cc)}$$

Donde:

M_m = peso del molde (grs.)

W_1 = peso del molde más el suelo (grs.)

V_m = volumen del molde (cc.)



La densidad máxima seca del suelo ($\gamma_{d \max}$) por la vía seca:

$$\gamma_{d \max} = (W_2 - M_m) / (V_m - f_c \cdot A \cdot (L_i - L_f)) \text{ (gr/c}^3\text{)}$$

Donde:

W_2 = peso del molde más el suelo vibrado (gr.)

A = área del molde (cm^2)

f_c = factor de corrección de diales (valor = 1/10)

L_i = promedio de lecturas de dial iniciales

L_f = promedio de lecturas de dial finales

La densidad máxima seca del suelo ($\gamma_{d \max}$) por la vía húmeda:

$$\gamma_{d \max} = W_3 / (V_m - f_c \cdot A \cdot (L_i - L_f)) \text{ (gr/c}^3\text{)}$$

Donde:

W_3 = masa del suelo oscilado seco (gr.)

La magnitud máxima de la densidad del suelo estará determinada por el valor máximo conseguido entre los procedimientos por la vía seco y húmedo.

2.2.2.3. Capacidad de soporte CBR del suelo

El CBR (California Bearing Ratio) en el idioma español se conoce como la relación de soporte California es un ensayo que sirve para valorar la calidad del suelo en relación a su consistencia. Cabe mencionar que el índice CBR no es una característica propia de los suelos, sino que obedece a ciertas condiciones de la densidad y humedad del suelo.

Sánchez-Leal (2020) señala que el CBR, es la relación que existe entre la carga unitaria sobre el pistón necesaria para penetrar 0,1 pulgadas (0,25 cm) y 0,2 pulgadas (0,5 cm) en el suelo ensayado y unidad de carga requerida para la penetración en una piedra desmenuzada estandarizada; esta relación de soporte California se expresa en porcentaje. Por su parte Gutiérrez (2016) explica que el CBR es un proceso de compactación, a diferencia del ensayo de Proctor, el CBR estima la resistencia que ofrece al esfuerzo cortante de una muestra en un terreno de linealidad, sin lograr a alcanzar al sector plástica y menos a la falla.

La capacidad de carga o soporte es una de las propiedades más importantes del suelo. Cuando se somete a esfuerzos, su comportamiento es mucho más complejo que el de otros materiales. La deformación que sufre depende no sólo de un tipo de suelo dado, sino también de su estado en términos de contenido de humedad, su estructura interna, calidad de compactación, etc. Por otro lado, el suelo bajo la cimentación (subyacente) puede tener una heterogeneidad



significativa, mostrando grandes diferencias en resistencia dependiendo de la aplicación de tensión direccional (anisotrópica).

Esta prueba contrasta la resistencia que ofrece al corte de un suelo bajo ciertas condiciones de humedad controladas y densidad para producir un porcentaje de soporte California (%). Por eso, el CBR (%) se define como la fuerza necesaria para que un pistón estándar logre penetrar a cierta profundidad, formulada como un porcentaje de la fuerza requerida de manera que el pistón penetre la misma profundidad con la misma velocidad, en grados, modelos de reloj de material fresado en muestras compuestas estandarizadas.

El soporte de California CBR, se puede expresar de la manera siguiente:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} \cdot 100 \%$$

2.2.2.4. Capacidad de corte del suelo

La deformación está determinada casi en su totalidad por las fuerzas concentradas en los puntos de contacto, ya que la estructura solo puede deformarse por deslizamiento y rodadura en estos puntos de contacto. Sin embargo, el suelo tiene una serie de propiedades que lo distinguen de otros materiales. Primero, la propiedad especial es que el suelo solo puede transmitir esfuerzos de compresión normales, pero no esfuerzos de tracción. En segundo lugar, los esfuerzos cortantes solo pueden transmitirse si son relativamente pequeños en comparación con los esfuerzos normales.

Las propiedades del suelo para soportar cargas y mantener su estabilidad dependen de la resistencia al corte del suelo. Cuando se vence esta resistencia, cualquier terrón se romperá. En mecánica de suelos, la resistencia al corte es una propiedad imprescindible que representa la capacidad de un suelo para soportar cargas sin que se genere la falla (Juarez & Rico, 2005); de manera que la resistencia del suelo a los esfuerzos de tracción y compresión no se considera en la actividad de la ingeniería porque la resistencia del suelo a los esfuerzos de tracción es prácticamente nula, mientras que la resistencia a los esfuerzos de compresión (pura) es muy alta, hasta el punto de que los suelos compresivos fallarán debido al esfuerzo cortante antes de que se agote su mínima resistencia a dicha compresión.

De acuerdo con la ecuación de Coulomb, los suelos y las rocas respecto al corte se comportan de acuerdo con la teoría característica de fricción y adherencia:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' \quad (\text{para suelos saturados})$$



Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = Cohesión o cementación efectiva

σ = Esfuerzo normal total

μ = Presión del agua intersticial o de poros.

2.2.2.5. Resistencia a la compresión inconfiada

La prueba de compresión no confinada se realiza para establecer la resistencia última o el estrés de los suelos arcillosos a la compresión inconfiada, aplicando una carga axial controlada por deformación y manipulando muestras de suelo no afectada en forma cilíndrica principalmente con un diámetro igual a 2. Este método proporciona una aproximación de la resistencia de los suelos cohesivos a la tensión total. Este ensayo se aplica solo a los materiales que están unidos de modo que no se pierda humedad durante la carga.

El objetivo primordial de efectuar una prueba de compresión inconfiada es conseguir al momento una estimación aproximada de la resistencia a la compresión de un suelo con bastante cohesión para ser ensayado en una condición no compactada (Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC, 2016).

Para el ensayo de compresión inconfiada, se calcula la deformación axial

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100$$

Dónde:

ε = Deformación axial unitaria para la carga dada

ΔL = Es la variación de la longitud de la muestra, obtenido a partir de las lecturas de los deformímetros.

L_0 = Longitud inicial de la muestra del ensayo

La superficie transversal promedio de la muestra A, para una carga está dada por la ecuación:

$$A = \frac{A_0}{1-\varepsilon}$$

Donde:

ε = La deformación axial unitaria para la carga dada

A_0 = La superficie inicial promedio de la probeta.



La superficie A, se puede calcular alternativamente a partir de las mediciones conseguidas por cálculo directo, cuando se puede medir las áreas de la probeta.

$$A_o = (A_t + 2 A_m + A_b) / 4$$

Donde:

A_t = Área en la parte superior de la probeta

A_m = Área en la parte media de la probeta

A_b = Área de la parte inferior de la probeta

El esfuerzo, σ_c se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = p / A$$

Donde:

p = Carga aplicada dada, y

A = Área de la sección promedio correspondiente.

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis general

Mejora significativamente las propiedades físico – mecánicas al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena-Colegio la Salle que serán usados para subrasante.

2.3.2. Hipótesis específicas

- Disminuye las propiedades de plasticidad del suelo al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena-Colegio la Salle que serán usados para subrasante.
- Aumenta el peso específico seco máximo del suelo al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena-Colegio la Salle que serán usados para subrasante.
- Aumenta el índice de soporte de California (CBR) del suelo al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena-Colegio la Salle que serán usados para subrasante.
- Aumenta la compresión inconfiada del suelo al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena-Colegio la Salle que serán usados para subrasante.



2.4. Variables e indicadores

2.4.1. Variable independiente

Proporciones de adición de cal y cemento

2.4.1.1. Indicadores

X₁: Porcentaje de cal en peso en proporciones de 2 y 4% con respecto al peso de la muestra de suelo arcilloso.

X₂: Porcentaje de cemento en peso en proporciones de 7; 9 y 11% con respecto al peso de la muestra de suelo arcilloso

2.4.2. Variable dependiente

Propiedades físico-mecánicas del suelo

2.4.2.1. Indicadores

X₁: Índice de Plasticidad (%)

X₂: Peso específico máximo (Kg/m³)

X₃: Índice de CBR (%)

X₄: Resistencia a la Compresión Inconfinada (KN/m²)

2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables

La operacionalización de variables se refiere al proceso metodológico que consiste en disgregar las variables en sus componentes cada vez más precisas, partiendo de lo más general a lo más específico, es decir, en dimensiones e indicadores. Además, es posible considerar los instrumentos.

Tabla 4: Operacionalización de las Variables de Investigación

Variables	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
V. independiente				
Proporciones de adición de cal y cemento	Las proporciones de cal de acuerdo a la masa de la muestra del suelo para la estabilización es de 2 y 4 %.	Proporciones de cal en suelo arcilloso	<ul style="list-style-type: none"> • Proporción de cal en 2% • Proporción de cal en 4% 	Fichas de laboratorio y gabinete
	Las proporciones de cemento de acuerdo a la masa de la muestra del suelo para la estabilización es de 7, 9 y 11%.	Proporciones de cemento en suelo arcilloso	<ul style="list-style-type: none"> • Proporción de cemento en 7% • Proporción de cemento en 9% • Proporción de cemento en 11% 	Fichas de laboratorio y gabinete



V. dependiente				
Propiedades físico-mecánicas del suelo	Indicadores que proporcionan el probable funcionamiento del suelo como material para subrasante.	Propiedades de plasticidad de suelo estabilizado con cal	Índice de Plasticidad (%)	Hojas de calculo
		Propiedades de plasticidad de suelo estabilizado con cemento	Índice de Plasticidad (%)	Hojas de calculo
	Es el valor máximo que se obtiene al someter a un suelo, a una misma energía de compactación. Este valor se obtiene a través del ensayo de compactación.	Peso específico seco máximo de suelo estabilizado con cal	Peso específico máximo (Kg/m ³)	Hojas de calculo
		Peso específico seco máximo de suelo estabilizado con cemento	Peso específico máximo (Kg/m ³)	Hojas de calculo
	Establece la resistencia que ofrece al esfuerzo cortante del suelo y así poder valorar la calidad del terreno que será usado para subrasante.	Índice de soporte de california (CBR) del suelo estabilizado con cal	Índice de CBR (%)	Hojas de calculo
		Índice de soporte de california (CBR) del suelo estabilizado con cemento	Índice de CBR (%)	Hojas de calculo
	Es la carga por cada unidad de superficie a la cual una probeta de suelo, ya sea prismática o cilíndrica, falla en el estudio de compresión simple.	Resistencia a la compresión inconfínada del suelo estabilizado con cal	Resistencia a la Compresión Inconfínada (KN/m ²)	Hojas de calculo
		Resistencia a la compresión inconfínada del suelo estabilizado con cemento	Resistencia a la Compresión Inconfínada (KN/m ²)	Hojas de calculo



CAPITULO III

Metodología

3.1. Metodología de la investigación

3.1.1. Enfoque de la investigación

Según las particularidades del presente proceso de investigación corresponde al enfoque cuantitativo. Hernández-Sampieri & Mendoza (2018) refiriéndose al enfoque de la investigación, señalan que cuando se quiere estimar las magnitudes u ocurrencia de los fenómenos y probar hipótesis, es conveniente utilizar la ruta cuantitativa. Por su parte, Neill & Cortez (2018) sostienen que un estudio cuantitativo es una forma organizada de recopilar información y analizar datos extraídos a partir de la observación de un hecho o fenómeno, lo que implica el uso de herramientas estadísticas, que permita contrsatar o refutar las hipótesis de invetigación.

En ese sentido considerando el propósito de la investigación es de tipo aplicativo, porque se hizo uso de estabilizantes para el suelo de la vía Agua Buena-Colegio la Salle, con la finalidad de establecer propiedades físico-mecánicas del suelo.

3.1.2. Nivel o alcance de la investigación

Considerando el nivel de conocimiento que se desea alcanzar con el presente trabajo de investigación, corresponde al nivel descriptivo explicativo. Es descriptivo, porque se desea describir, las propiedades físico mecánicas de suelos arcillosos. En cambio, la investigación explicativa busca comprender y descubrir los factores causales que pueden incidir o afectar la ocurrencia de un hecho o fenómeno (Sánchez & Reyes, 2017). Además, para explicar un hecho o fenómeno necesariamente se debe realizar una descripción de las características de las variables de estudio.

Las investigaciones explicativas van más allá de una caracterización de hechos o fenómenos de la realidad; más bien están orientados a explicar y responder por qué ocurren los fenómenos y en qué situaciones se manifiesta, o cómo se relacionan dos o más variables de estudio (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018). Una investigación puede incluir más de un alcance. El presente estudio tiene alcance explicativo, pero incluye elementos descriptivos, es decir la investigación se inicie como descriptiva y después alcance carácter explicativo.



3.1.3. Método de la investigación

El método de investigación empleado es de tipo científico de carácter experimental ya que se hizo uso de laboratorio para realizar ensayos de muestras respectivas. Desde esta perspectiva, se hizo uso del método hipotético deductivo que es propio de las investigaciones cuantitativas; tal como manifiestan Sánchez & Reyes (2017) este método parte de una hipótesis como resultado de inferencias lógicas a partir de datos empíricos o teorías científicas, y que se puede contrastar experimentalmente.

3.2. Diseño de la investigación

3.2.1. Diseño metodológico

Un diseño de investigación expresa tanto la estructura del problema de investigación como el plan de investigación para obtener resultados empíricos para responder a las preguntas de indagación. En ese sentido, Kerlinger & Lee (2002) consideran que los criterios para un diseño de investigación deben responder convenientemente a las preguntas de investigación, y el control de las variables independientes.

En esa misma orientación, para Hernández, Fernández & Baptista (2014) el primer requisito es la manipulación intencional de la variable independiente, es la que se considera como presunta causa en una relación entre variables, y el efecto originado por dicha causa se le conoce con el nombre de variable dependiente.

En la literatura, los autores coinciden en señalar que existen dos tipos de diseños de investigación: experimental y no experimental. En el caso del presente estudio, atendiendo a la formulación del problema, la hipótesis de investigación y consecuentemente la manipulación de la variable independiente realizando la mezcla asfáltica convencional y adicionada, con la finalidad de obtener resultados en la variable dependiente. Por estas consideraciones, corresponde el diseño de investigación experimental.

En este proceso existe una intervención en la variable independiente, es decir se manipula para conocer los efectos que produce en la variable dependiente, de modo que la variable dependiente se mide. El estudio realizado es un diseño con posprueba únicamente y grupo de control. Se esquematiza de la siguiente manera:

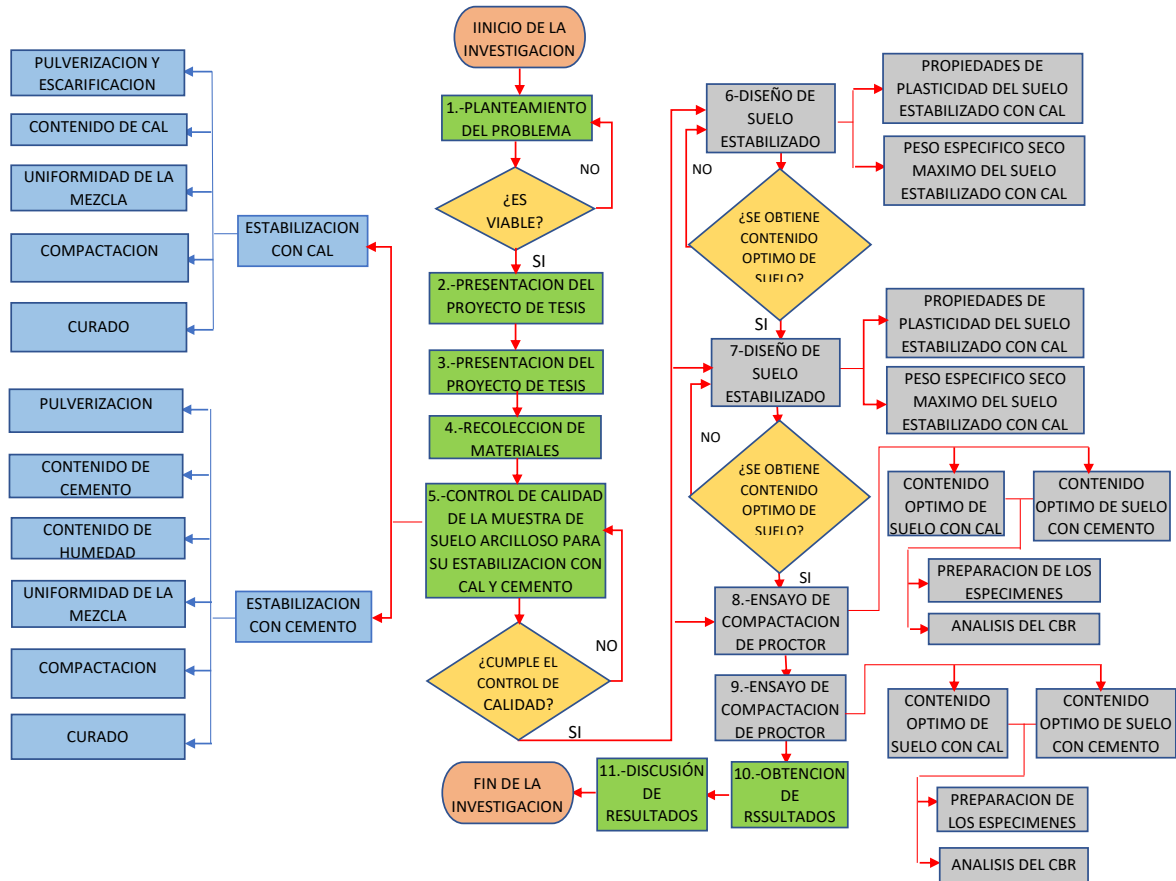
Suelo natural	$G_0 - - - - - O_0$
Suelo natural + 2% de cal	$G_1 - - - X_1 - - - O_1$
Suelo natural + 4% de cal	$G_2 - - - X_2 - - - O_2$



Suelo natural + 7% de cemento $G_3 - - - X_3 - - - O_3$
 Suelo natural + 9% de cemento $G_4 - - - X_4 - - - O_4$
 Suelo natural + 11% de cemento $G_5 - - - X_5 - - - O_5$

3.2.2. Diseño de ingeniería

Figura 3: Diagrama de Flujo del Diseño de Investigación



3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

En investigación la población de un conjunto de todos los elementos o casos, que pueden ser individuos, objetos o acontecimientos, que comparten una serie de características comunes; y que pueden identificarse en un determinado espacio de interés para ser estudiados por el investigador (Sánchez, Reyes, & Mejía, 2018).

Para el presente estudio, la población está constituido por la vía Agua Buena - Colegio La Salle, donde se realizó los respectivos ensayos para la estabilización del suelo arcilloso tanto

con cal y cemento, con la finalidad de realizar pruebas necesarias para obtener el comportamiento físico-mecánico del suelo arcilloso.

3.3.1.1. Descripción de la población

La población en estudio es la vía Agua Buena – Colegio La Salle, ubicado en la jurisdicción del distrito de San Sebastián, provincia y región Cusco, con una longitud aproximada de 678,93 m.

Figura 4: Ubicación de la vía Agua Buena – Colegio La Salle para el muestreo



Fuente: <https://earth.google.com/web/search/Agua+Buena,+Cusco/@-13.55032873,-71.94327478,3357.96456433a,1318.76006819d,35y,299.28050055h,0t,0r/data=CiqjJqokCTwcY-pDczJAETocY-pDczLAGcEbSCYUqiPAIb1ozXHEJlvA>

3.3.1.2. Cuantificación de la población

La población cuantificada se considera como la totalidad del suelo de la vía Agua Buena – Colegio La Salle, de suelo natural y con la adición de cal y cemento, ubicado en el distrito San Sebastián, provincia y departamento del Cusco.



3.3.2. Muestra

3.3.2.1. Descripción de la muestra

La muestra de la presente investigación está constituida por la misma población presentada en el párrafo anterior de la descripción de la población, como se indicó la longitud del tramo es de 678,93 m y está comprendido entre 500m y 1000m, tal como señala el Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos del Ministerio de Transportes Comunicaciones (2018), por lo que corresponde realizar el muestreo por medio de tres calicatas con una profundidad de 1,50m. La muestra presenta bajo contenido de arcilla y por tal motivo presenta mediana capacidad de soporte.

3.3.2.2. Cuantificación de la muestra

En la tabla 5, se presenta en forma detallada la cuantificación de la muestra, considerando los tipos de estabilizantes utilizados, así como ensayos realizados en laboratorio.

Tabla 5: Cuantificación de las Muestras de Estabilización de Suelo con cal y Cemento

Ensayos	Sin estabilizante	Tipo de estabilizante		NORMAS	N° de ensayos
		Adición de Cal (2% y 4%)	Adición de cemento (7%; 9% y 11%)		
Limite Líquido	3	6	9	MTC E – 110	18
Limite Plástico	3	6	9	MTC E – 111	18
Proctor modificado	3	6	9	MTC E – 115	18
CBR	3	6	9	MTC E – 132	18
Compresión inconfiada	1	2	3	MTC E – 121	6
Total	13	26	39		78

Nota: La cuantificación de la muestra se realizó de acuerdo al Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos del Ministerio de Transportes Comunicaciones aprobado por RD N° 36-2016-MTC/14.

3.3.2.3. Método de muestreo

En el proceso de la investigación existen dos tipos de muestras: probabilísticas y no probabilísticas. El método de muestreo probabilístico consiste en la selección adecuado mediante un procedimiento que permita la aleatoriedad en la selección; mientras que, en el muestreo no probabilístico, la elección de los elementos no depende del cálculo



probabilístico, sino con las características de la investigación o del proceso de toma de decisiones del investigador (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

El procedimiento de muestreo aplicado en la presente investigación es la no probabilística, debido a que no se seleccionó al azar, sino por conveniencia e intencionada por el investigador, de modo que la muestra es obtenida de la vía Agua Buena – Colegio La Salle, que fue de interés para la evaluación de esta investigación.

3.3.2.4. Criterios de la evaluación de muestra

Para realizar un adecuado estudio, se requiere que las muestras cumplan con ciertos criterios que a continuación se explicita:

- El cemento que es utilizado como estabilizador es necesario que cumpla con todos los estándares de calidad que están establecidas en las normas con el propósito de lograr una muestra de buena calidad.
- La cal como estabilizante utilizado también deberá cumplir con todos los requisitos y estándares de calidad que están especificadas en las normas vigentes de tal manera que logre conseguir una muestra de calidad.
- La preparación de los especímenes debe procederse de una forma que realicen dentro del marco de los estándares de calidad que están establecidas en los manuales y normas para lograr con eficiencia y eficacia los resultados.
- En el diseño de las mezclas las muestras deben cumplir con el criterio de homogeneidad, con la masa o peso señalado. De esta manera, se debe cumplir con las dimensiones previamente especificadas.
- Para el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada y para la determinación del peso específico máximo se utiliza el contenido óptimo de cal y cemento asfáltico para la realización de las muestras de suelo estabilizados con cal y cemento.

3.3.3. Criterios de inclusión

En el estudio realizado se contemplaron como estabilizantes cal y cemento, que han considerado anticipadamente con las especificaciones técnicas y generales de carreteras (EG-2013) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

De igual forma, los especímenes deben obedecer a las recomendaciones y especificaciones de vías y carreteras (EG-2013) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones y el manual de suelos y pavimentos del MTC.



3.4. Instrumentos

En la literatura existen distintos modos de realizar la indagación, la mayoría de los autores coinciden en señalar que no basta con emplear métodos de investigación, para operativizar se requiere de técnicas e instrumentos. En ese sentido, para la recolección de datos se requiere de técnicas y sus respectivos instrumentos de investigación. Por las características del presente estudio, se hace uso de la técnica de observación. Esta técnica consiste en dirigir su atención en forma intencionada y consciente hacia ciertos aspectos de los fenómenos o acontecimientos y se registra aquellos datos que son relevantes para el estudio (Heinemann, 2003).

Pero, las técnicas van acompañadas de instrumentos de investigación. Por la naturaleza de la presente investigación, los instrumentos son las guías de observación, y estos son los formatos de recolección de datos.

3.4.1. Instrumentos de recolección de datos

A continuación, se presenta los formatos de laboratorio que son utilizados para registrar y recolectar los datos de experimentos del presente estudio. Dichos formatos se formularon acorde a los manuales y normas técnicas vigentes nacionales e internacionales con la finalidad de efectuar los procedimientos de los ensayos de laboratorio de manera adecuada durante su ejecución y así lograr resultados fehacientes y aportes significativos.

Tabla 6: Formato para Límite Líquido MTC E-110, según AASHTO T - 89 y ASTM D - 4318

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante				
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini				
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle				
Muestra					
Fecha					
	Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
	N° de Golpes				
	Masa de la lata (gr)				
	Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)				
	Masa de la lata + Espécimen seca (gr)				
	Masa del agua (gr)				



Masa del espécimen seco (gr)				
Cantidad de Humedad				

Tabla 7: Formato para Límite Plástico - MTC - E111, según AASHTO T - 90 y ASTM D - 4318

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante			
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini			
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle			
Muestra				
Fecha				
	Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3
	Masa de la lata (gr)			
	Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)			
	Masa de la lata + Espécimen seca (gr)			
	Masa del agua (gr)			
	Masa del espécimen seco (gr)			
	Cantidad de Humedad			

Tabla 8: Formato para Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural – MTC - E115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante				
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini				
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle				
Muestra					
Fecha					
	DESCRIPCIÓN	MUESTRA - 1	MUESTRA - 2	MUESTRA - 3	MUESTRA - 4
	N° de Proctor empleado				
	Diámetro Ø del cilindro (cm)				
	Altura del cilindro (cm)				
	Volumen del cilindro (cm ³)				
	Masa del cilindro (gr)				
	Masa del cilindro + Muestra húmeda (gr)				
	Masa de la Muestra Húmeda (gr)				



Masa de la Muestra Seca (gr)				
Peso específico (gr/cm³)				
PORCENTAJE DE HUMEDAD				
Masa de la lata (gr)				
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)				
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)				
Masa del Agua (gr)				
Masa del Espécimen Seca (gr)				
Cantidad de Humedad				

Tabla 9: Formato para Ensayo de Compactación – Relación De Soporte De California (CBR)

MTC E – 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante						
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini						
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle						
Muestra							
Fecha							
PRUEBA DE COMPACTACIÓN							
	ESPÉCIMEN	MUESTRA – 1		MUESTRA – 2		MUESTRA – 3	
	N° de Golpes por cada Capa	55		26		12	
	Características del Espécimen	Conte. Hum Óptimo	Saturada	Conte. Hum Óptimo	Saturada	Conte. Hum Óptimo	Saturada
	Ubicación del Contened. de Humedad						
	Masa de la lata (gr)						
	Masa de la lata + Espécimen Húmeda (gr)						
	Masa de la lata + Espécimen Seca (gr)						
	Masa del Agua (gr)						
	Masa del Espécimen Seca (gr)						
	Cantidad de Humedad						
	Porcentaje de Absorción						
	Masa del Cilindro (gr)						
	Masa del Cilindro + Muestra Húmeda (gr)						
	Masa del Espécimen Húmeda (gr)						
	Masa del Espécimen Seca (gr)						
	Masa del Agua Absorbida (gr)						
	Porcentaje de Absorción						
	Peso específico húmedo (gr/cm ³)						
	Peso específico Seco (gr/cm³)						

3.4.2. Instrumentos de ingeniería

Los instrumentos de ingeniería utilizados en el presente estudio son todos las herramientas y equipos que se requieren para para llevar a cabo correctamente los ensayos. Para realizar las pruebas pertinentes para el análisis de suelos se utilizó los siguientes equipos e instrumentos:

Figura 5: Instrumentos de Ingeniería para Análisis Granulométrico



Nota. La balanza denominada también báscula es un instrumento que sirve para medir la masa de los cuerpos. El juego de tamices ASTM se utiliza para análisis granulométrico de las partículas de los suelos.

Figura 6: Instrumentos para el Ensayo de Límite Plástico.

<p>Balanza de precisión, con sensibilidad a 0,01 gr</p> 	<p>Placa de vidrio esmerilado</p> 
<p>Horno de secado</p> 	<p>Espátula de acero inoxidable</p> 
<p>Cápsula de evaporación para el mezclado</p> 	<p>Taras numeradas</p> 

Figura 7: Instrumentos para el Ensayo de Límite Líquido.



Fuente: Equipo para el análisis del límite líquido, recuperado de:

<https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/suelos/clasificacion-en-laboratorio/ver-todos-es-clasificacion-en-laboratorio/conjunto-determinar-limite-liquido/>

Balanza de precisión: <https://suminstrosenmetrologia.com/productos/medidores-de-masas-y-peso/balanzas-de-precision/balanza-de-precision-4500-gr-0-01-gr-cal-automatica-radwag-ps-4500-r2-copia/>

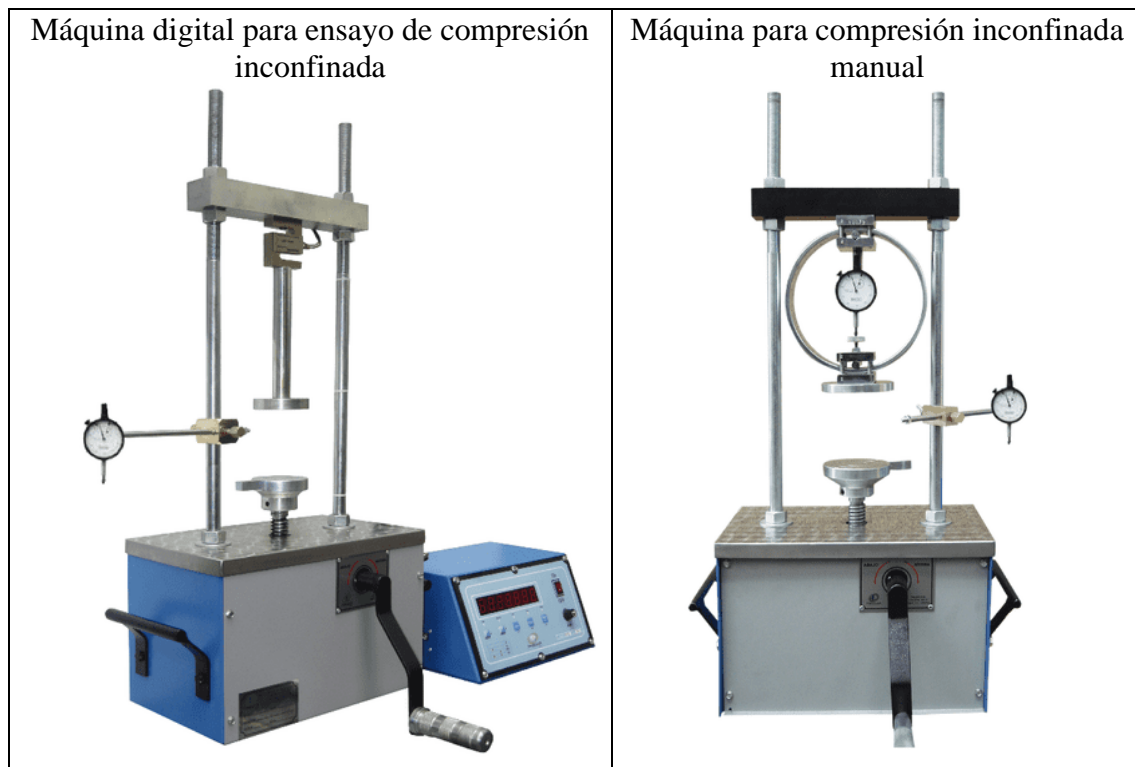
Figura 8: Instrumentos para el Ensayo de CBR.



Nota. La máquina manual para ensayos CBR, se utiliza para forzar la penetración del pistón en la muestra compactada. Máquina semiautomática digital para ensayos MARSHALL Y CBR, se caracteriza por el diseño en la rapidez, precisión y el registro exacto de los resultados hallados. Tomado de

https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/?s=Ensayo+de+CBR&post_type=product&lang=es

Figura 9: Instrumentos para Ensayo de Compresión Inconfinada



Nota. La máquina digital de prueba para compresión no confinada es un dispositivo con un sistema de medición de fuerza digital que permite monitorear la cantidad de carga y el esfuerzo aplicados durante la prueba. Una máquina de prueba de compresión inconfinada es un instrumento que se utiliza para aplicar manualmente una carga a una base a través de una varilla unida a un dispositivo de transmisión. Las dos máquinas son recuperados de https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/?s=compresi%C3%B3n+inconfinada&post_type=product&lang=es

3.5. Procedimientos de Recolección de Datos

En un primer momento se evalúa la zona en la que se realizará el trabajo, definiendo tres puntos para la extracción de muestras a través de las calicatas de prueba para realizar el estudio correspondiente.

Las muestras fueron llevadas al laboratorio para realizar los ensayos específicos del estudio los cuales deberán ser evaluadas, analizadas y comparadas con los resultados cuando se utilizó cal y cemento como estabilizadores. Para encontrar un grupo de suelo adecuado, se



llevó a cabo un análisis granulométrico utilizando dos métodos bien conocidos (SUCS, ASSTHO).

Luego se realizó las pruebas de límites de Atterberg para determinar la diferencia de resultados entre suelos naturales y suelos con aditivos de cal o cemento. En seguida se realizan las pruebas Proctor modificadas para cada capa y se extrajo calicatas para lograr un contenido de humedad óptimo y una densidad seca máxima.

Se eligió como Proctor patrón el suelo natural, para realizar comparaciones y obtener resultados diversos con la adición de cal y cemento durante el proceso de las pruebas de CBR. Los aditivos utilizados en este estudio se dosificaron de manera diferente para evaluar su eficacia.

Finalmente, se comparó el suelo natural con el suelo adicionado con cal y cemento para determinar el mejor aditivo que optimice las propiedades físico-mecánicas del suelo estudiado.

3.5.1. Ensayo del límite líquido del suelo

Cuando se quiere estudiar el suelo, se habla de su consistencia a la deformación y la ruptura, Para determinar su consistencia se calcula por muestras de suelo mojado, húmedo y seco. El límite líquido es el porcentaje de contenido de humedad por debajo del cual el suelo se convierte en material plástico y se comporta como tal.

3.5.1.1. Equipos utilizados en la prueba del límite líquido

Para realizar el estudio del límite líquido del suelo, se hizo uso de los siguientes equipos, materiales e insumos.

a) Equipos

Los aparatos o equipos que son empleados para realizar el ensayo del límite líquido del suelo, son los siguientes y se observa en la figura 10.

- **Un recipiente de almacenamiento:** es una vasija de cerámica que mide aproximadamente 115 mm (4½”) de diámetro.
- **Equipo del límite líquido (o de Casagrande):** es un instrumento que consiste en una copa de bronce con sus accesorios, construida de acuerdo a las dimensiones especificadas. Se utiliza para determinar la altura y el número de golpes.
- **Acanalador:** Esta herramienta se ajusta a las dimensiones críticas que se muestran en la Figura 10.

- **Recipientes o Pesa Filtros.** Esto evita que la muestra pierda humedad antes de pesarla por primera vez y evita que absorba humedad de la atmósfera después del secado y antes del pesaje final.
- **Una Balanza:** La balanza tiene una escala de sensibilidad de 0,01 gr.
- **Horno de secado:** Se usa para secar la muestra.

Figura 10: Equipos e Instrumentos del Límite Líquido del Suelo



b) Materiales

Espátula: es una herramienta de hoja flexible cuyas medidas oscilan de 75-100 mm (3"-4") de largo y 20 mm (3/4") de ancho.



c) Insumos

Agua potable: para este tipo de ensayos es preferible utilizar agua destilada o agua desmineralizada.



3.5.1.2. Procedimiento del ensayo del límite líquido del suelo

Primero preparamos la muestra seca en una vasija, disgregándola con el mortero. En seguida tamizamos el suelo pasante por una malla No. 40 en una vasija de vaporación y luego añadir una pequeña cantidad de agua, y permitir que la muestra permanezca y se humedezca.

Figura 11: Preparado para Ensayo de Compresión Inconfinada



Después de humedecer la muestra con agua, con ayuda de la espátula mezclamos hasta conseguir una mezcla homogénea y que el color sea uniforme. Para que la pasta tenga consistencia debe ser pegajosa.



Figura 12: Pasta Consistente para Ensayo de Compresión Inconfinada



Para obtener una mezcla homogénea, se coloca una determinada cantidad de pasta húmeda en la parte central del vaso Casagrande y se nivela la superficie.

La copa de cobre se puede dejar caer a la base mediante una leva giratoria maniobrada mediante una manivela. Para realizar una prueba de límite líquido, se debe colocar pasta de suelo en el recipiente.

Figura 13: Pasta Consistente en la copa de Casagrande



La ranuradora se lleva inmediatamente al centro de la copa Casagrande para cortar la masa de suelo por la mitad.



Inmediatamente se pasa el acanalador por el centro de la copa de Casagrande para cortar en

Figura 14: Corte de la Pasta en la copa de Casagrande con el acanalador.



Después de eso, la incisión separa completamente el suelo en dos partes y debe estimarse claramente. La profundidad máxima del suelo en la copa Casagrande debe ser igual a la altura de la punta del acanalador ASTM.

Luego con ayuda de la manivela poner en movimiento la cazuela y proporcionar los golpes necesarios para cerrar la ranura en 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ “).

Figura 15: La Ranura se cierra en la copa de Casagrande al Proporcionar Golpes.





Cuando se cierre la ranura en $\frac{1}{2}$ ", registramos el número de golpes y tomamos muestras de la parte central para determinar el contenido de humedad. Luego se lleva a la balanza de precisión para determinar el peso.

Figura 16: Medida de la Masa de la Muestra en una capsula.



Finalmente, la muestra se introduce al horno secador, tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 17: Medida de la Masa de la Muestra en una capsula.





Es dificultoso regular el contenido de humedad del suelo para conseguir con un cierre necesario de 12,7 mm de la ranura en el suelo a 25 golpes. Entonces se hicieron tres pruebas para el mismo suelo con diferentes niveles de contenido de humedad, y el número de golpes necesarios para cerrar la capa de suelo que osciló entre 15 y 35. La relación que existe entre el contenido de humedad y el logaritmo de N se aproxima a una línea recta. Esta línea se denomina curva de flujo. El contenido de humedad para $N = 25$, se especifica a partir de la curva de flujo, que viene a ser el límite líquido del suelo. En ese sentido, la pendiente de la línea de flujo se define como el índice de flujo.

3.5.1.3. Toma de datos del límite líquido

Tabla 15: Toma de datos de ensayo del límite líquido del suelo.

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante			
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini			
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle			
Muestra	Límite Líquido - MTC E-110			
Fecha	02 de julio de 2021			
Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
N° de Golpes	40	33	26	19
Masa de la lata (gr)	7.94	9.55	8.12	7.88
Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)	33.87	33.14	32.65	32.21
Masa de la lata + Espécimen seca (gr)	28.42	28.22	27.47	27.09
Masa del agua (gr)	5.45	4.92	5.18	5.12
Masa del espécimen seco (gr)	2048.00	1867.00	1935.00	1921.00
Cantidad de Humedad	26.61%	26.35%	26.77%	26.65%

3.5.2. Ensayo del límite plástico del suelo

Para determinar su consistencia no solamente se requiere límite líquido, sino también límite plástico que expresa en porcentaje de contenido de humedad con que un suelo cambia al disminuir su humedad de la consistencia plástica a la semisólida; es decir, se puede amasar y moldear.

3.5.2.1. Equipos utilizados en la prueba del límite plástico

Para efectuar el estudio del límite plástico del suelo, se hizo uso de los siguientes aparatos o equipos, y puede observar en la figura N° 18.



- Espátula, es una hoja flexible de 75-100 mm (3" - 4") de largo y 20 mm (3/4") de ancho aproximadamente.
- Recipiente de almacenamiento de porcelana o similar, cuya medida es de 115 mm (4 1/2") de ancho (diámetro).
- Balanza de precisión, con una aproximación a 0,01 gr.
- Horno de secado, es un equipo termostático controlado y regulable a 110 ± 5 °C.
- Tamiz o malla, cuya medida es de 426 μm (N° 40).
- Agua destilada, para humectar la muestra.
- Vidrios de reloj, o recipientes adecuados para monitorear la humedad
- determinación de humedades.
- Vidrio grueso esmerilado, sirve de superficie de rodadura.

Figura 18: Equipos e Instrumentos del límite Plástico del Suelo





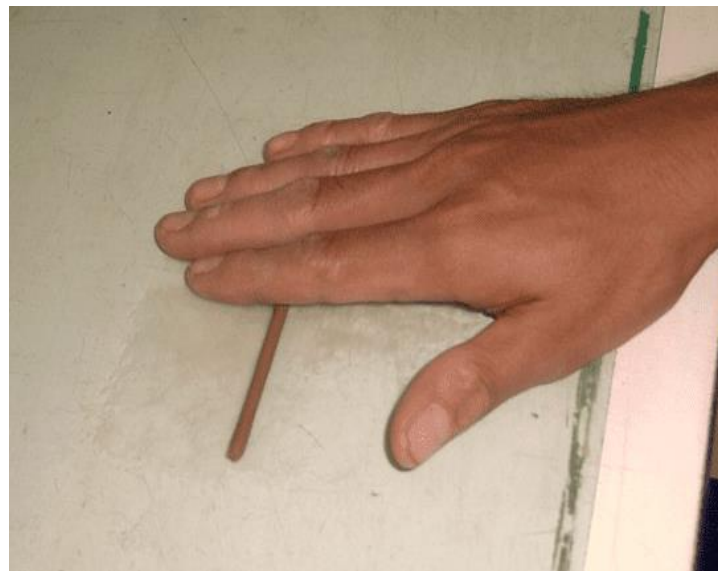
3.5.2.2. Procedimiento del límite plástico

Para determinar el límite plástico del suelo, las actividades que se realizó se detallan a continuación, respetando los manuales de procedimiento del MTC, y haciendo uso de los materiales descritos en el ítem precedente:

Primero procedemos a escoger aproximadamente 20 gramos de la muestra que pase por el tamiz de 426 mm (N° 40).

Luego se amasa el material preparado y en seguida se permite que pierda la humedad hasta que se obtenga una consistencia apropiada que facilite el enrollado y se rueda con los dedos de la mano sobre una superficie plana y lisa sin que se pegue a las manos formando cilindros sobre la placa de vidrio.

Figura 19: Enrollado de la Muestra con los Dedos de la Mano Formando Cilindros



El cilindro o rollito debe ser adelgazado en cada movimiento que se realice con los dedos de la mano hasta que su diámetro sea de 3,2 mm (1/8"); pero, si antes de llegar el cilindro a la medida de dicho diámetro no se ha desmoronado, entonces se vuelve a repetir el procedimiento, las veces que sea necesario, hasta que empiece a rajarse y se derrumbe aproximadamente con dicho diámetro.



Figura 20: Cantidad Necesaria de los Cilindros de la Muestra con un Diámetro de 1/8"



Una vez que se alcanza el límite plástico, el rollito se coloca en un recipiente con un peso conocido (vidrios de reloj o pesa-filtros) y el proceso continúa hasta que se recolecten aproximadamente 6 gramos de suelo.

Figura 21: Los Cilindros de la Muestra en un Recipiente



A continuación, para determinar el contenido de humedad de la muestra se pesa y se determina la humedad en concordancia con la norma técnica MTC E 108.

Figura 22: Cálculo del peso de los Cilindros de la Muestra



Ahora repetimos el procedimiento tomando otra muestra de suelo. El límite plástico es el promedio de dos selecciones. El límite plástico se determina a partir del promedio de ambas determinaciones.

3.5.2.3. Toma de datos del límite plástico

Tabla 16: Toma de Datos de Ensayo del Límite Plástico del Suelo.

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante		
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini		
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle		
Muestra	Límite Plástico - MTC E 111		
Fecha	02 de julio de 2021		
Descripción	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03
Masa de la lata (gr)	8.00	9.27	7.98
Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)	15.16	17.31	15.21
Masa de la lata + Espécimen seca (gr)	13.99	15.97	14.01
Masa del agua (gr)	1.17	1.34	1.20
Masa del espécimen seco (gr)	5.99	6.70	6.03
Cantidad de Humedad	19.53%	20.00%	19.90%



3.5.3. Ensayo del Proctor modificado

La prueba Proctor modificada se utiliza para determinar la relación entre el contenido de humedad del suelo compactado y la densidad seca del suelo compactado.

3.5.3.1. Equipos utilizados en la prueba del Proctor modificado

Se utilizaron las siguientes herramientas y equipos para obtener el Proctor modificado, es decir, la relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco del suelo compactado, como se muestra en la figura adjunta.

- Una balanza de precisión de 1gr y 0,1gr.
- Un horno de secado, para deshidratación o secado homogéneo y uniforme de las muestras del suelo.
- para el secado homogéneo o deshidratación de las muestras de suelo por convección mecánica, con recirculación forzada de aire.
- Un pisón o martillo cuyo peso del pisón oscila entre 10 ± 0.02 lb-m, y la altura de caída de 18 ± 0.05 pulgadas.
- Un molde de cilindro de 4 pulgadas, que puede variar de $4 \pm 0,016$ pulgadas de ancho (diámetro) promedio del interior, una altura de $4,584 \pm 0,018$ pulgadas y un volumen de $0,0333$ pie³.
- Un molde de forma cilíndrica de 6", cuyas medidas puede oscilar de $6 \pm 0,026$ pulgadas de ancho (diámetro) en promedio el interior, una altura de $4,584 \pm 0,018$ pulgadas y un volumen de $0,075$ pie³.
- Mallas o tamices N° 4 de 3/4 y 3/8 pulgadas.
- Una bandeja metálica y
- Una regla metálica.

Figura 23: Equipos e Instrumentos del Proctor modificado

<p>Horno de secado</p> 	<p>Molde de 6"</p> 	<p>Molde y Pisón o martillo de compactación</p> 
<p>Balanzas de precisión</p> 	<p>Bandeja metálica</p> 	<p>Tamiz N° 4</p>  <p>Regla metálica</p> 

3.5.3.2. Procedimiento del Proctor modificado

La compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada según el Manual de MTC existen tres métodos. En el presente estudio se hizo por el método A, con 5 capas y 25 golpes por capa.

Primero se prepara las muestras de aproximadamente de 3 kg para el método "A". Luego se seca la muestra hasta que se vuelva desmenuzable con un mazo de goma.

Figura 24: Preparado y Desmenuzando de la Muestra



Una vez desmenuzado el material, se tamiza el suelo aplicando el procedimiento indicado en la norma.

Luego, una parte del suelo se mezcla con una determinada cantidad de agua. En seguida esta porción mezclada se deposita dentro del molde cilíndrico aproximadamente a la quinta parte de manera que su altura deberá ser uniforme.

Figura 25: Mezclado de la Muestra con una Porción de Agua.





Cuando el suelo es compactado en cinco capas consecutivas, cada una de las cuales recibió 25 golpes de masa distribuidos uniformemente.

La capa de compactación final debe penetrar en el interior del collar aproximadamente 1 cm. Una vez que se comprimen las cinco capas, se retira el collar y en seguida se iguala o enrasa el suelo.

Figura 26: Compactado de la Muestra con el Pisón.



A continuación, en la balanza de precisión se pesa el molde de cilindro con el contenido del suelo. Luego, se retiró el suelo del molde y se tomó una porción representativa del suelo compactado, no menos de 100 gramos, a partir de la cual se determinó el contenido de humedad.

Figura 27: Cálculo del peso de la Muestra Representativa del Suelo



Para ejecutar y obtener los resultados requeridos, todo el procedimiento del ensayo del Proctor modificado la prueba completa se repite con otras partes de la mezcla, mezcladas con diferentes cantidades de agua.

3.5.3.3. Toma de datos del Proctor modificado

Tabla 17: Toma de Datos de Ensayo del Proctor modificado del suelo

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante			
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini			
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle			
Muestra	Compactación de suelos utilizando energía modificada - MTC E-115			
Fecha	02 de julio de 2021			
Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
N° de Proctor empleado	P-2	P-2	P-2	P-2
Diámetro Ø del cilindro (cm)	10.16	10.16	10.16	10.16
Altura del cilindro (cm)	11.64	11.64	11.64	11.64
Volumen del cilindro (cm ³)	943.96	943.96	943.96	943.96
Masa del cilindro (gr)	4,661.00	4,661.00	4,661.00	4,661.00
Masa del cilindro + Muestra húmeda (gr)	6,545.00	6,611.00	6,631.00	6,620.00
Masa de la Muestra Húmeda (gr)	1884	1950	1970	1959



Masa de la Muestra Seca (gr)	1729.51	1755.33	1737.14	1687.58
Peso específico (gr/cm³)	1.83	1.86	1.84	1.79
PORCENTAJE DE HUMEDAD	Medio	Medio	Medio	Medio
Masa de la lata (gr)	16.83	16.5	14.89	14.89
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	71.83	98.24	71.91	71.91
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	67.32	90.08	65.17	64.01
Masa del Agua (gr)	4.51	8.16	6.74	7.9
Masa del Espécimen Seca (gr)	50.49	73.58	50.28	49.12
Cantidad de Humedad	8.93%	11.09%	13.40%	16.08%

3.5.4. Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR)

El Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) se efectúa bajo condiciones de control de densidad y humedad del suelo compactado que cuantifica su capacidad resistente como subrasante, sub base y base en el diseño de pavimentos.

3.5.4.1. Equipos utilizados en la prueba de Relación de Soporte de California (CBR)

Para efectuar el ensayo de Relación de Soporte de California (CBR), se hizo uso de los siguientes aparatos o equipos, y puede observar en la figura.

- Una placa perforada de metal, por cada molde cilíndrico de 149,2 mm (5 7/8 pulgadas) de ancho (diámetro), cuyas perforaciones de no más de 1,6 mm (1/16 pulgadas) de diámetro.
- Molde de compactación CBR
- Trípode de expansión para CBR con dial
- Placa de expansión para CBR
- Juego de pesas abierta y cerrada (sobrecargas metálicas)
- Prensa para ensayos CBR manual digital
- Martillo o Pisón, con una masa del pisón que oscila de 10 ± 0.02 lb-m.
- Bandeja metálica.
- Disco espaciador (falso fondo para CBR)

Figura 28: Equipos e Instrumentos de Relación de Soporte de California (CBR)

<p>Molde de compactación CBR</p> 	<p>Trípode de expansión para CBR con dial</p> 	<p>Prensa para ensayos CBR</p> 
<p>Juego de pesas abierta y cerrada</p> 	<p>Bandeja metálica</p> 	<p>Tamiz</p> 
<p>Placa de expansión para CBR</p> 	<p>Pisón o martillo</p> 	<p>Disco espaciador</p> 

Fuente: adaptado de PyS Equipos https://pys.pe/?s=CBR&post_type=product

3.5.4.2. Procedimiento de Relación de Soporte de California (CBR)

El procedimiento para determinar el índice de resistencia de los suelos en condiciones específicas de humedad y densidad, denominado relación de soporte de California, se procedió de la forma siguiente:

Primero se debe secar el material y luego desmenuzarlo, este proceso se realizó cuando se ha efectuado el ensayo Proctor modificado.

Figura 29: Preparado y Desmenuzando de la Muestra para CBR



En seguida se procede a realizar el tamizado, haciendo uso de los tamices $\frac{3}{4}$ " $\frac{3}{8}$ " y N° 4 y la pasante, la fracción retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ se separa y es reemplazada e igual proporción por el material comprendido entre el tamiz N° 4.

Figura 30: Tamizado del Material para CBR





Posteriormente, se calcula la cantidad requerida para para moldear la muestra. Los moldes con contenido de la muestra se compactan para obtener el óptimo contenido de humedad durante el ensayo de Proctor modificado.

Luego, se prepararon tres moldes CBR y se unieron a las placas base. La placa de soporte se colocará sobre la placa base de cada molde. Cada molde se compacta con una fuerza de compresión diferente.

Figura 31: Los tres Moldes para CBR



La energía o la fuerza de compactación con que se controla el número de golpes en cada uno de los casos son de 55, 26 y 12 golpes por capa respectivamente. Todo este procedimiento se realizó respetando estrictamente las normas técnicas del Ministerio de Transportes y comunicaciones.



Figura 32: Compactación de la muestra con Golpes de Pisón para CBR



Después del proceso de compactación, se enrasa con un enrasador y luego se retira de la placa la base. Posteriormente, se gira el molde de tal manera que la parte superior del molde quede abajo, también se saca el disco espaciador quedando un espacio de volumen para que se coloque la sobrecarga.

Nuevamente se coloca a la placa de base. Luego el espécimen está preparado para el período de saturación.

El papel filtro se coloca sobre la parte superior de la muestra. Luego se ubica la placa perforada con vástago graduado y sobre ella se le colocan las pesas de sobrecarga.



Figura 33: Colocada de Papel Filtro y la Placa con Vástago - CBR



Se coloca un trípode con la cara del manómetro en el borde del molde y se fija a la varilla de la placa perforada. Las lecturas se registran, se guardan y se retira el trípode.

Remoje el molde introduciendo en un recipiente con contenido de agua y deja remojar durante cuatro días. Después, se coloca un trípode sobre la muestra cada día y se registre las lecturas de las expansiones.



Figura 34: Sumersión de los moldes en un Recipiente con Agua - CBR



Después del cuarto día, se retira el molde, y se deja drenar durante 15 minutos aproximadamente. En seguida se quita las pesas, papel filtro y collar de extensión del molde.

Figura 35: Retiro de la Pesas, Papel Filtro y Collar - CBR





A continuación, se realiza el secado del molde a la intemperie durante 15 minutos, después llevar a la prensa para ensayos CBR.

Figura 36: Secado del Molde - CBR



Después de quitar la placa de expansión y las pesas, se colocan nuevamente las pesas de sobrecarga y se prepara para la etapa de penetración.

Figura 37: La Muestra en la Prensa - CBR



La velocidad a la que el pistón penetra en el suelo es de 0,05 pulgadas por minuto. La velocidad se calcula con un cronómetro. Lea atentamente la presión de admisión. Cuando se completa la prueba, se elimina el recargo, se devuelve el suelo analizado y se toma una muestra para determinar el contenido final de humedad.

Figura 38: Cálculo del peso de la Suelo Ensayado - CBR



Se traza la gráfica o curva de presión vs penetración en una escala aritmética. El CBR se calcula a presiones correspondientes a penetraciones que fluctúan entre de 0,1 y 0,2 pulgadas.

3.5.4.3. Toma de datos de Relación de Soporte de California (CBR)

Tabla 18: Toma de Datos de Ensayo de Compactación de Relación de Soporte de California (CBR).

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante					
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini					
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle					
Muestra	Relación de Soporte de California (CBR) MTC E - 132					
Fecha	02 de julio de 2021					
ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
ESPÉCIMEN	MUESTRA – 1		MUESTRA – 2		MUESTRA – 3	
Nº de Golpes por Capa	55		26		12	
Características de la Muestra	Conte. Humi Óptimo	Saturada	Conte. Humi Óptimo	Saturada	Conte. Humi Óptimo	Saturada
Ubicación del Contend. de Humedad	Medio	Arriba	Medio	Arriba	Medio	Arriba



Masa de la lata (gr)	14.00	19.29	19.19	19.24	15.61	18.5
Masa de la lata + Espécimen Húmeda (gr)	83.82	74.88	115.13	84.92	94.65	80.45
Masa de la lata + Espécimen Seca (gr)	76.42	66.26	104.97	75.21	86.28	70.66
Masa del Agua (gr)	7.40	8.62	10.16	9.71	8.37	9.79
Masa del Espécimen Seca (gr)	62.42	46.97	85.78	55.97	70.67	52.16
Cantidad de Humedad	11.86%	18.35%	11.84%	17.35%	11.84%	18.77%
Porcentaje de Absorción	-	6.50%	-	5.50%	-	6.93%
Masa del Cilindro (gr)	7345		7115		7868	
Masa del Cilindro + Muestra Húmeda (gr)	11775	11698	11123	11677	11815	12242
Masa del Espécimen Húmeda (gr)	4430	4353	4008	4562	3947	4374
Masa del Espécimen Seca (gr)	3960.48		3583.55		3529.03	
Masa del Agua Absorbida (gr)	-	-77	-	554	-	427
Porcentaje de Absorción	-	-1.94%	-	15.46%	-	12.10%
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	2.09	2.03	1.89	2.11	1.86	2.00
Peso específico Seco (gr/cm³)	1.86	1.84	1.69	1.65	1.66	1.62

Tabla 19: Toma de Datos de Ensayo de Expansión de Relación de Soporte de California (CBR).

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante												
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini												
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle												
Muestra	Relación de Soporte de California (CBR) MTC E - 132												
Fecha	02 de julio de 2021												
ENSAYO DE EXPANSIÓN													
ESPÉCIMEN		MUESTRA – 1				MUESTRA – 2				MUESTRA – 3			
Tiempo Transcurrido		Dial	Deformación		% de Expan.	Dial	Deformación		% de Expan.	Dial	Deformación		% de Expan.
Días	HH:MM	*0.001"	Pulg.	mm		*0.001"	Pulg.	mm		*0.001"	Pulg.	mm	
0	0 hor 00 min	0	0	0.000	0.00%	0	0	0.000	0.00%	0	0	0.000	0.00%
0.0625	1 hor 30 min	17	0.017	0.432	0.37%	24	0.024	0.61	0.52%	45	0.045	1.143	0.98%
0.125	3 hor 00 min	23	0.023	0.584	0.50%	30	0.03	0.762	0.65%	72	0.072	1.829	1.57%
0.25	6 hor 00 min	25	0.025	0.635	0.55%	46	0.046	1.168	1.00%	98	0.098	2.489	2.14%
0.5	12 hor 00 min	29	0.029	0.737	0.63%	62	0.062	1.575	1.35%	112	0.112	2.845	2.44%
1	24 hor 00 min	40	0.04	1.016	0.87%	82	0.082	2.083	1.79%	123	0.123	3.124	2.68%
2	48 hor 00 min	47	0.047	1.194	1.03%	87	0.087	2.210	1.90%	128	0.128	3.251	2.79%
4	96 hor 00 min	55	0.055	1.397	1.20%	92	0.092	2.337	2.01%	132	0.132	3.353	2.88%

Tabla 20: Toma de Datos de Ensayo de Penetración de Relación de Soporte de California (CBR).

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante													
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini													
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle													
Muestra	Relación de Soporte de California (CBR) MTC E - 132													
Fecha	02 de julio de 2021													
ENSAYO DE PENETRACIÓN														
Muestra			MUESTRA 01				MUESTRA 02				MUESTRA 03			
Carga Unitaria Patrón (kg/cm²)	Dial	Penetración	Dial	Fuerza	Esfuerzo	CBR	Dial	Fuerza	Esfuerzo	CBR	Dial	Fuerza	Esfuerzo	CBR
	*0.001"	mm		kgr	kg/cm²	%		kgr	kg/cm²	%		kgr	kg/cm²	%
	0	0,000	0	0,00	0,00		0	0,00	0,00		0	0,00	0,00	
	25	0,635	10.5	31.26	1.62		5.5	14.92	0.77		5	13.29	0.69	
	50	1.270	13.5	41.07	2.12		8	23.09	1.19		6	16.56	0.86	
	75	1.905	15.5	47.6	2.46		9	26.36	1.36		7	19.83	1.02	
70.31	100	2.540	17.5	54.14	2.8	3.98%	10	29.63	1.53	2.18%	8.4	24.4	1.26	1.79%
	125	3.175	19.5	60.68	3.13		11.5	34.53	1.78		9.4	27.67	1.43	
	150	3.810	21.5	67.21	3.47		13	39.43	2.04		10.8	32.24	1.67	
105.46	200	5.080	26.5	83.55	4.32	4.09%	16	49.24	2.54	2.41%	13	39.43	2.04	1.93%
	300	7.620	36.5	116.23	6.01		21	65.58	3.39		17	52.51	2.71	
	400	10.160	48.5	155.45	8.03		25	78.65	4.06		20	62.31	3.22	
	500	12.700	61.5	197.94	10.23		31	98.26	5.08		24	75.38	3.89	

Tabla 21: Toma de Datos de Ensayo de Esfuerzo - Penetración de Relación de Soporte de California (CBR).

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante									
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini									
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle									
Muestra	Relación de Soporte de California (CBR) MTC E - 132									
Fecha	02 de julio de 2021									
CORRECCIONES		ESPÉCIMEN - 1			ESPÉCIMEN - 2			ESPÉCIMEN - 3		
Carga Unitaria Patrón	Penetrac Corregida	Esfuerzo Corregido	CBR Corregido	Penetrac Corregida	Esfuerzo Corregido	CBR Corregido	Penetrac Corregida	Esfuerzo Corregido	CBR Corregido	
kg/cm²	mm	kg/cm²	%	mm	kg/cm²	%	mm	kg/cm²	%	
70.31	2.540	2.80	3.98%	2.540	1.53	2.18%	2.540	1.26	1.79%	
105.46	5.080	4.32	4.09%	5.080	2.54	2.41%	5.080	2.04	1.93%	

3.5.5. Ensayo de compresión inconfiada

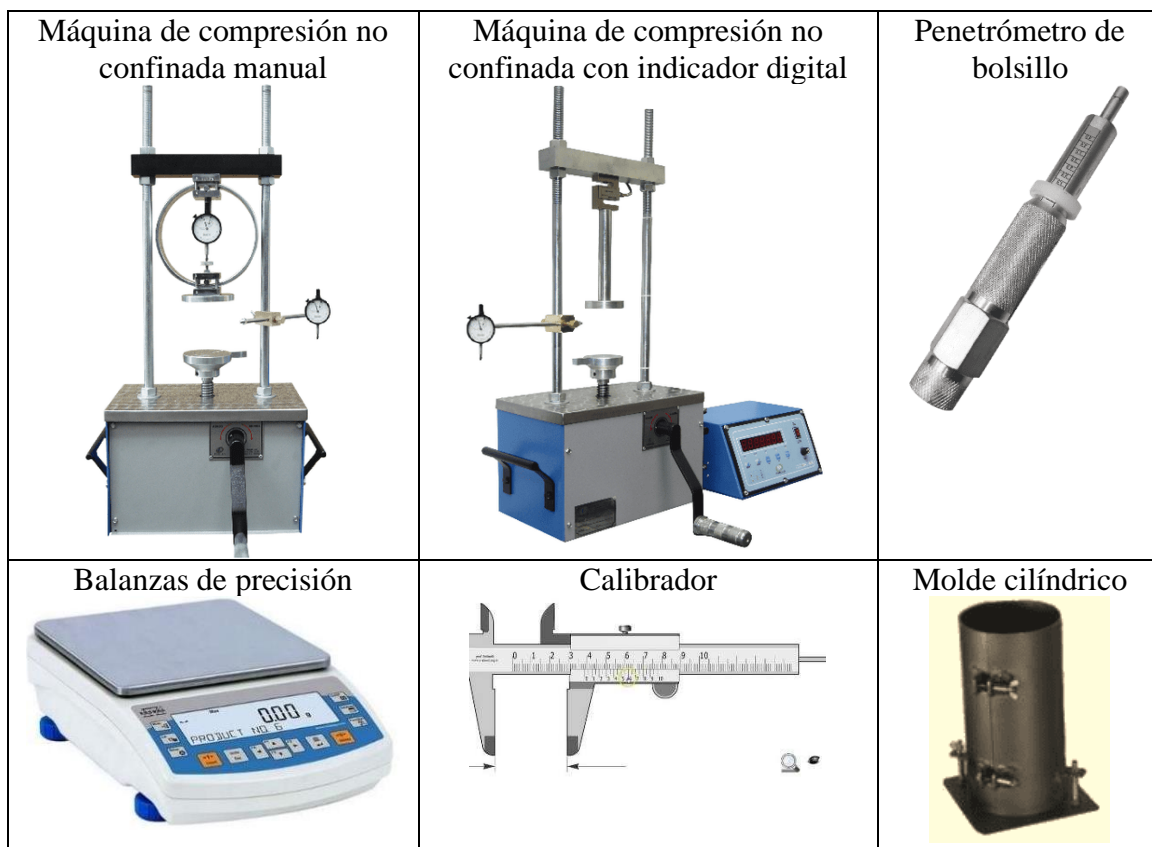
El ensayo de Proctor modificado sirve para determinar la relación entre el contenido de humedad de remoldeo y la densidad seca del suelo compactado

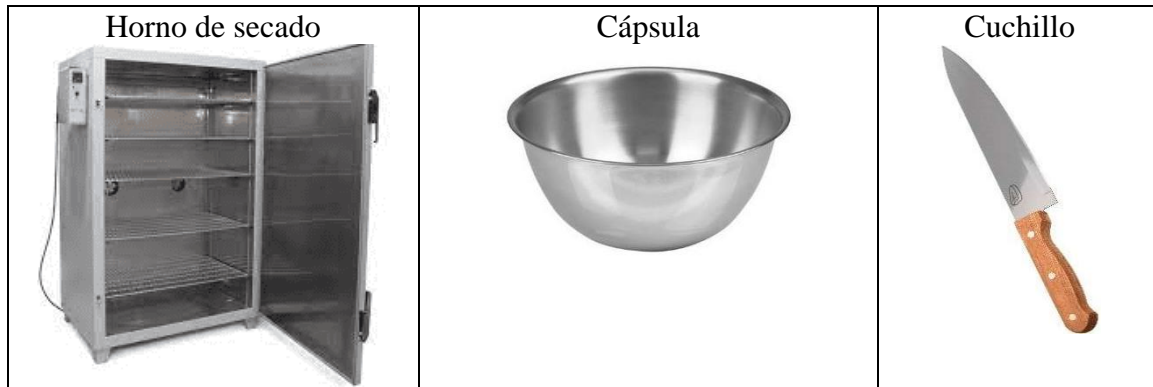
3.5.5.1. Equipos utilizados en la prueba de compresión inconfiada

Para efectuar el estudio del límite plástico del suelo, se hizo uso de los siguientes aparatos o equipos, y puede observar en la figura N° 39.

- Máquina para compresión inconfiada con indicador digital
- Máquina para compresión inconfiada manual
- Calibrador.
- Balanzas de precisión.
- Penetrómetro de bolsillo
- Molde cilíndrico.
- Una cápsula.
- Horno de secado.
- Un cuchillo

Figura 39: Equipos e Instrumentos para el Ensayo de Compresión Inconfiada





Fuente: Adaptado de

https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/?s=compresi%C3%B3n+inconfinada&post_type=product&lang=es

3.5.5.2. Procedimiento de compresión inconfinada

El procedimiento desarrollado para el ensayo de compresión inconfinada del suelo es el siguiente:

Se toma la muestra y se perfecciona la probeta, de tal manera que estén debidamente niveladas las caras transversales de la muestra cilíndrica, según las siguientes medidas: diámetro 53,7mm y una altura de 137,7mm. con una precisión de 0,1 mm haciendo uso de un calibrador.

Figura 40: Nivelación o Perfilado de la Probeta según las Medidas Señaladas.





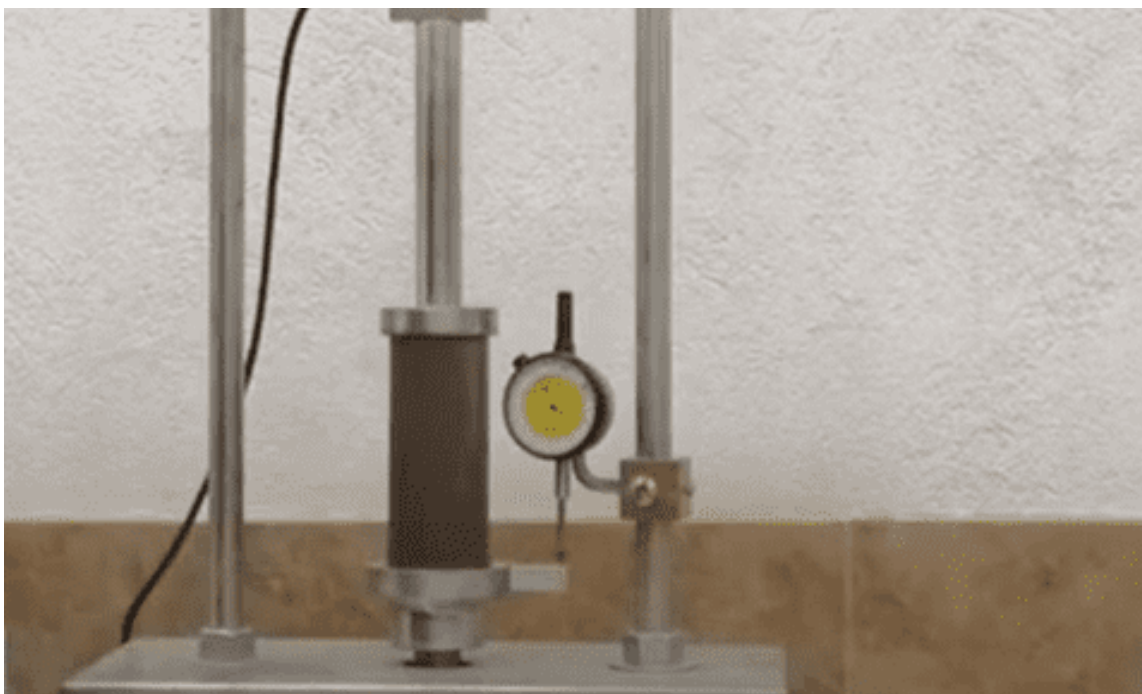
A continuación, se determina la masa de la probeta mediante una balanza de precisión. El valor de la masa del espécimen es de 621,20 gramos.

Figura 41: Cálculo del peso de la probeta en una Balanza.



Después de determinar la masa de la muestra, se coloca la probeta en la máquina para compresión inconfiada cuidando que quede perfectamente centrada. En seguida, se manobra el mecanismo de avance lo suficientemente necesario para que la probeta se ponga en contacto a la placa superior de la prensa.

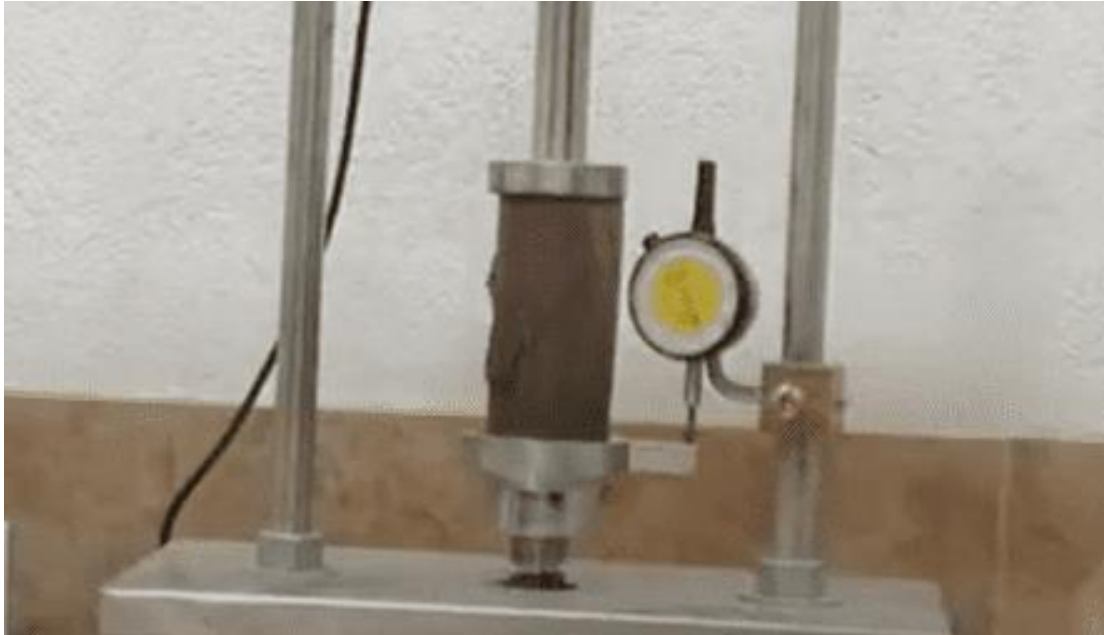
Figura 42: La Probeta en la Máquina de Compresión Inconfiada.





Después de ubicar convenientemente la probeta en la máquina de compresión y el indicador de deformaciones en cero, se aplica la carga de tal manera que se produzca una deformación axial. Asimismo, se registra de carga y la deformación en función del tiempo.

Figura 43: Proceso de Deformación de Compresión Inconfinada.



Del espécimen en donde se ha ocasionado la deformación se toma una pequeña muestra en una capsula (recipiente) y se determina su humedad.

Figura 44: Cálculo del Peso de una Pequeña Muestra de Compresión Inconfinada.



Para finalizar se introduce la probeta en el horno de secado para determinar su humedad natural.

3.5.5.3. Toma de datos de compresión inconfiada

Tabla 22: Toma de Datos de Ensayo de Compresión Inconfiada

Proyecto de Tesis	Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena - Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante						
Tesista	Huber Misael Navarro Gambarini						
Ubicación	San Sebastián - Cusco - Cusco - Tramo Agua Buena – Colegio La Salle						
Muestra	Compresión No Confinada MTC E-121, según ASTM D-2166 y AASHTO T-208						
Fecha	02 de julio de 2021						
DEFORMÍMETRO DE LONGITUD	DEFORMÍMETRO DE CARGA	CARGA TOTAL SOBRE LA MUESTRA	DEFORMACIÓN DE LA MUESTRA ΔL	DEFORMACIÓN UNITARIA $\Delta L/L_0$	FACTOR DE CORRECCIÓN DE ÁREA $1 - \Delta L/L_0$	ÁREA CORREGIDA A'	ESFUERZO SOBRE LA MUESTRA
	M-01	M-01					M-01
* 0.01 mm	*0.419 kg	kg	mm			cm ²	kg/cm ²
10	2	0.84	0.1	0.001	0.999	22.66	0.04
20	3.5	1.47	0.2	0.001	0.999	22.68	0.06
30	6	2.51	0.3	0.002	0.998	22.7	0.11
40	8.5	3.56	0.4	0.003	0.997	22.71	0.16
50	10	4.19	0.5	0.004	0.996	22.73	0.18
60	12.5	5.23	0.6	0.004	0.996	22.75	0.23
70	15.5	6.49	0.7	0.005	0.995	22.76	0.29
80	18	7.53	0.8	0.006	0.994	22.78	0.33
90	22.4	9.38	0.9	0.007	0.993	22.8	0.41
100	25	10.46	1	0.007	0.993	22.81	0.46
125	28.6	11.97	1.25	0.009	0.991	22.86	0.52
150	31	12.98	1.5	0.011	0.989	22.9	0.57
175	34.5	14.44	1.75	0.013	0.987	22.94	0.63
200	37.5	15.7	2	0.015	0.985	22.98	0.68
250	40	16.74	2.5	0.018	0.982	23.07	0.73
300	43.3	18.12	3	0.022	0.978	23.15	0.78
350	46	19.25	3.5	0.025	0.975	23.24	0.83
400	49.4	20.68	4	0.029	0.971	23.33	0.89
450	52	21.77	4.5	0.033	0.967	23.41	0.93
500	55.5	23.23	5	0.036	0.964	23.5	0.99
600	58	24.28	6	0.044	0.956	23.68	1.03
700	61.2	25.62	7	0.051	0.949	23.86	1.07
800	64	26.79	8	0.058	0.942	24.05	1.11
900	67.6	28.3	9	0.065	0.935	24.23	1.17
1000	70	29.3	10	0.073	0.927	24.42	1.2
1100	73.5	30.77	11	0.08	0.92	24.61	1.25
1200	75.3	31.52	12	0.087	0.913	24.81	1.27
1300	77.4	32.4	13	0.094	0.906	25.01	1.3
1400	77.9	32.61	14	0.102	0.898	25.21	1.29
1500	78	32.65	15	0.109	0.891	25.42	1.28
1600	78	32.65	16	0.116	0.884	25.63	1.27
1700	78	32.65	17	0.123	0.877	25.84	1.26
1800	78	32.65	18	0.131	0.869	26.05	1.25



3.6. Procedimientos de análisis de datos

3.6.1. Prueba de laboratorio del límite líquido del suelo (NTP 339.129; MTC E-110; ASTM D-4318 y AASHTO T-89)

3.6.1.1. Procedimiento o cálculo de la prueba del límite líquido del suelo

Se hizo seis ensayos, una para muestra natural, dos para suelos con adición de 2% y 4% de cal y tres para suelos con adición de 7%, 9% y 11% de cemento.

El límite líquido es el contenido de humedad que contiene el suelo y el valor se obtiene como la razón entre peso del agua y peso del suelo seco de una determinada muestra. Este valor se expresa en porcentaje con aproximación a un entero y se calcula así:

$$\text{Límite Plástico} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso del suelo secado al horno}} \times 100\%$$

Los resultados de la prueba del límite líquido del suelo se presentan en la siguiente tabla.

3.6.1.2. Diagramas, tablas del límite líquido del suelo

Tabla 23: Límite Líquido de Suelo Natural, MTC E-110, según AASHTO T – 89 y ASTM D – 4318

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3	MUESTRA – 4
N° de Golpes	40	33	26	19
Masa de la lata (gr)	7.94	9.55	8.12	7.88
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	33.87	33.14	32.65	32.21
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	28.42	28.22	27.47	27.09
Masa del Agua (gr)	5.45	4.92	5.18	5.12
Masa de la Muestra Seca (gr)	2048.00	1867.00	1935.00	1921.00
Porcentaje de Humedad	26.61%	26.35%	26.77%	26.65%

Figura 45: Límite Líquido de Suelo Natural

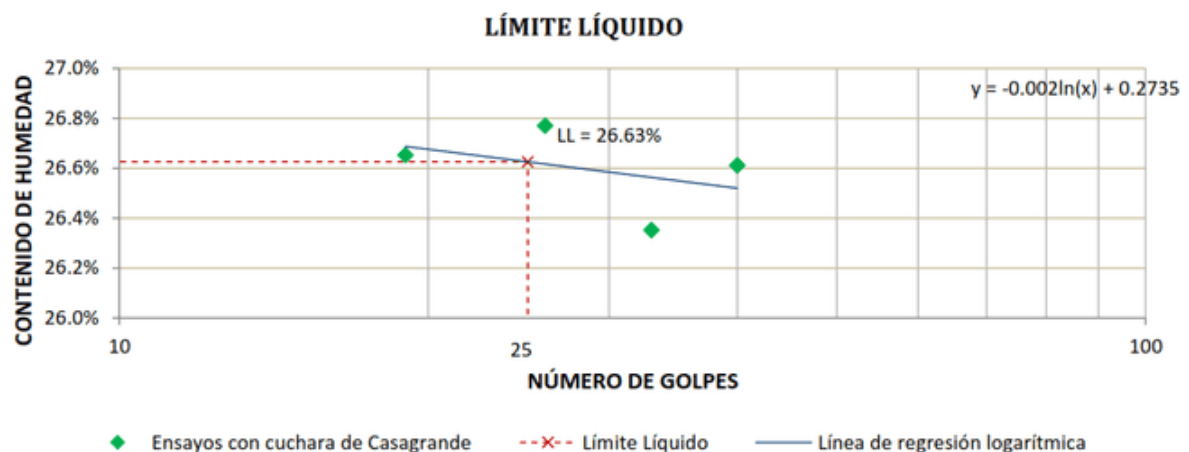




Tabla 24: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cal 2%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3	MUESTRA – 4
N° de Golpes	40	33	26	19
Masa de la lata (gr)	7.95	9.55	8.22	7.88
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	34.65	33.16	32.65	31.21
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	29.15	28.32	27.47	26.35
Masa del Agua (gr)	5.5	4.84	5.18	4.86
Masa de la Muestra Seca (gr)	21.20	18.77	19.25	18.47
Porcentaje de Humedad	25.94%	25.79%	26.91%	26.31%

Figura 46: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cal 2%

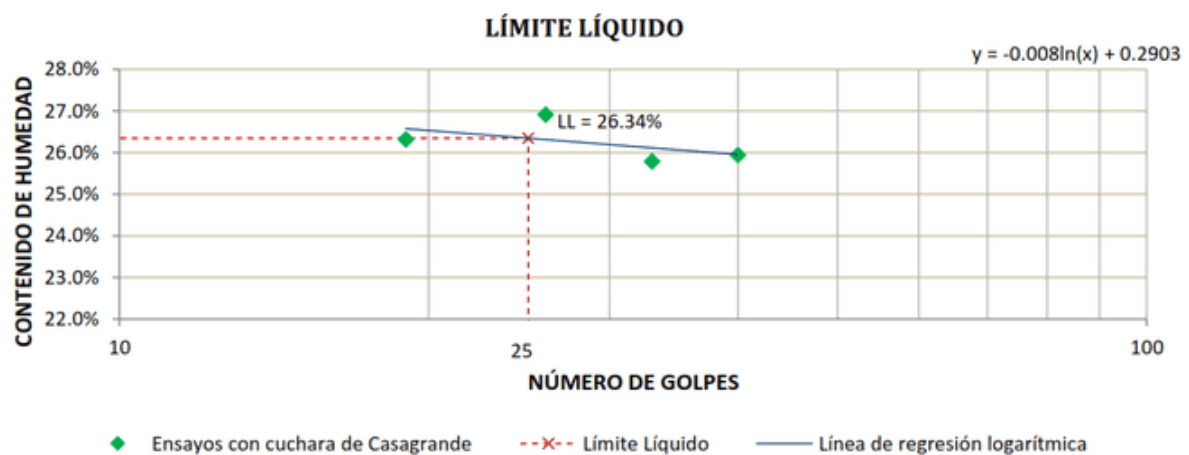


Tabla 25: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cal 4%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3	MUESTRA – 4
N° de Golpes	35	26	18	10
Masa de la lata (gr)	11.63	8.14	6.55	10.81
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	35.11	29.51	25.88	34.43
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	30.10	25.03	21.75	29.40
Masa del Agua (gr)	5.01	4.48	4.13	5.03
Masa de la Muestra Seca (gr)	18.47	16.89	15.20	18.59
Porcentaje de Humedad	27.13%	26.52%	27.17%	27.06%



Figura 47: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cal 4%

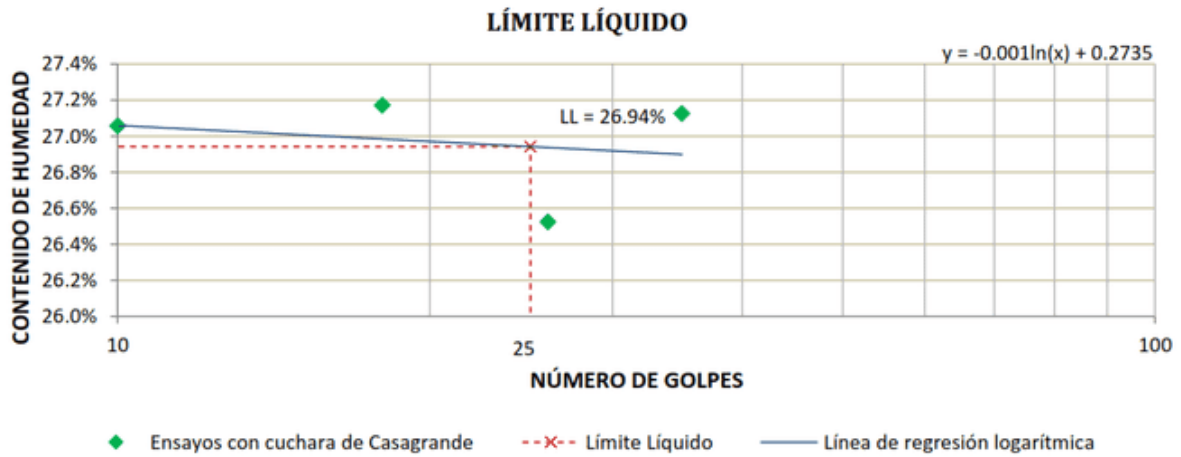


Tabla 26: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 7%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3	MUESTRA – 4
N° de Golpes	35	26	18	10
Masa de la lata (gr)	11.43	8.12	6.54	10.8
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	35.19	29.38	25.68	34.53
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	30.47	25.18	21.87	29.60
Masa del Agua (gr)	4.72	4.2	3.81	4.93
Masa de la Muestra Seca (gr)	19.04	17.06	15.33	18.80
Porcentaje de Humedad	24.79%	24.62%	24.85%	26.22%

Figura 48: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 7%

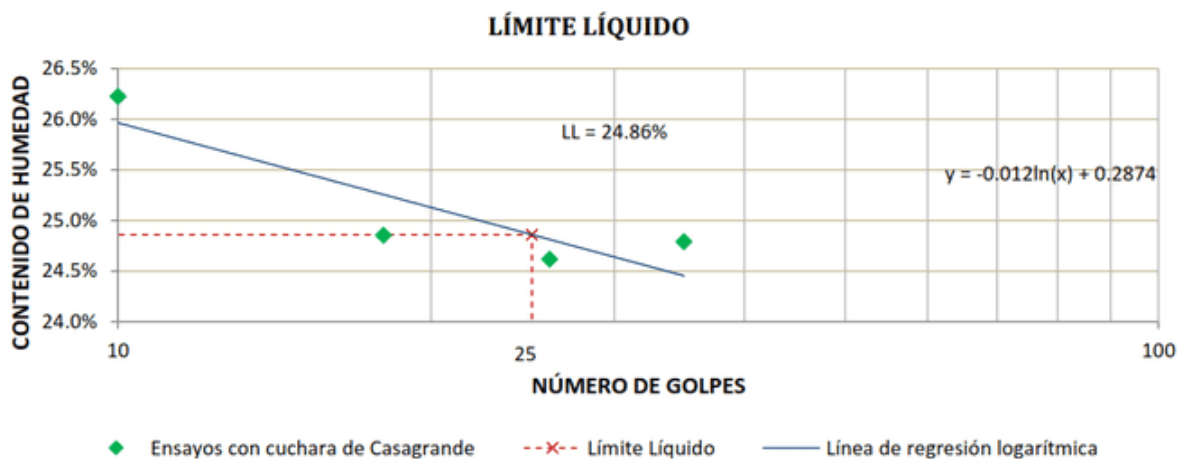




Tabla 27: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 9%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3	MUESTRA – 4
N° de Golpes	35	26	18	10
Masa de la lata (gr)	11.73	8.12	6.54	10.63
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	35.14	29.65	25.75	34.13
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	30.55	25.43	21.98	29.45
Masa del Agua (gr)	4.59	4.22	3.77	4.68
Masa de la Muestra Seca (gr)	18.82	17.31	15.44	18.82
Porcentaje de Humedad	24.39%	24.38%	24.42%	24.87%

Figura 49: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 9%

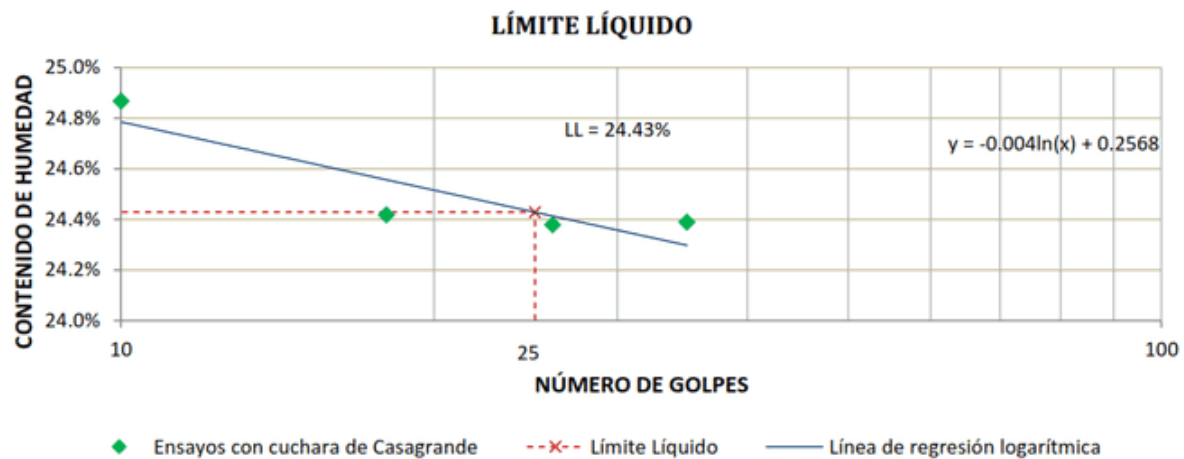
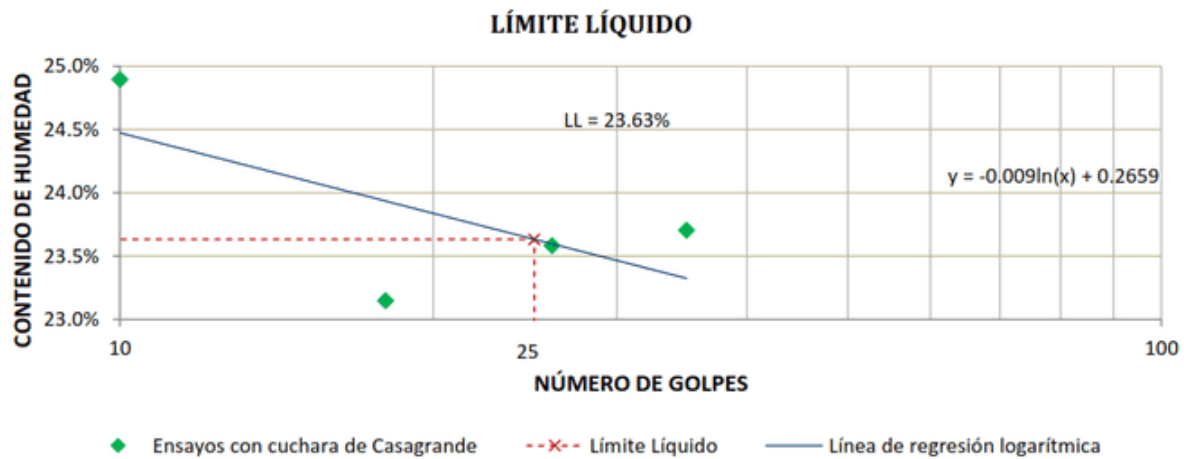


Tabla 28: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 11%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3	MUESTRA – 4
N° de Golpes	35	26	18	10
Masa de la lata (gr)	11.65	8.12	6.54	10.8
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	35.03	29.5	25.48	34.53
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	30.55	25.42	21.92	29.80
Masa del Agua (gr)	4.48	4.08	3.56	4.73
Masa de la Muestra Seca (gr)	18.90	17.30	15.38	19.00
Porcentaje de Humedad	23.70%	23.58%	23.15%	24.89%

Figura 50: Límite Líquido de Suelo Natural con Adición de Cemento 11%



3.6.1.3. Análisis de la prueba del límite líquido del suelo

Considerando y observando diferentes tablas y figuras presentados en el numeral 3.6.1.2., se desprende que el límite líquido de la muestra del suelo natural es 26,63% a 25 golpes, con la adición de cal al 2% se reduce a 26,34%; mientras que con la adición de cal a 4% el límite líquido es de 26,94%, en este último un ligero incremento. En todos los casos es a 25 golpes. Para la muestra con adición de 7% de cemento el límite líquido es de 24,86%, con edición de 9% de cemento indica 24,43% y con adición de 11% de cemento indica 23,63%. En todos los casos los resultados son a 25 golpes.

3.6.2. Prueba de laboratorio del límite plástico del suelo (NTP 339.129; MTC E-111; ASTM D-4318 y AASHTO T-89)

3.6.2.1. Procedimiento o cálculo de la prueba del límite plástico del suelo

A partir de los ensayos llevados a cabo y presentados en el numeral 3.5.2., el límite plástico se expresa como el promedio de las humedades de los tres especímenes. El límite plástico del suelo se calcula mediante la siguiente ecuación y se expresa en valores porcentuales de humedad:

$$\text{Límite Plástico} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso del suelo secado al horno}}$$

Los resultados de las tres muestras con todas las especificaciones para el cálculo del límite líquido, se presenta en tablas y figuras.



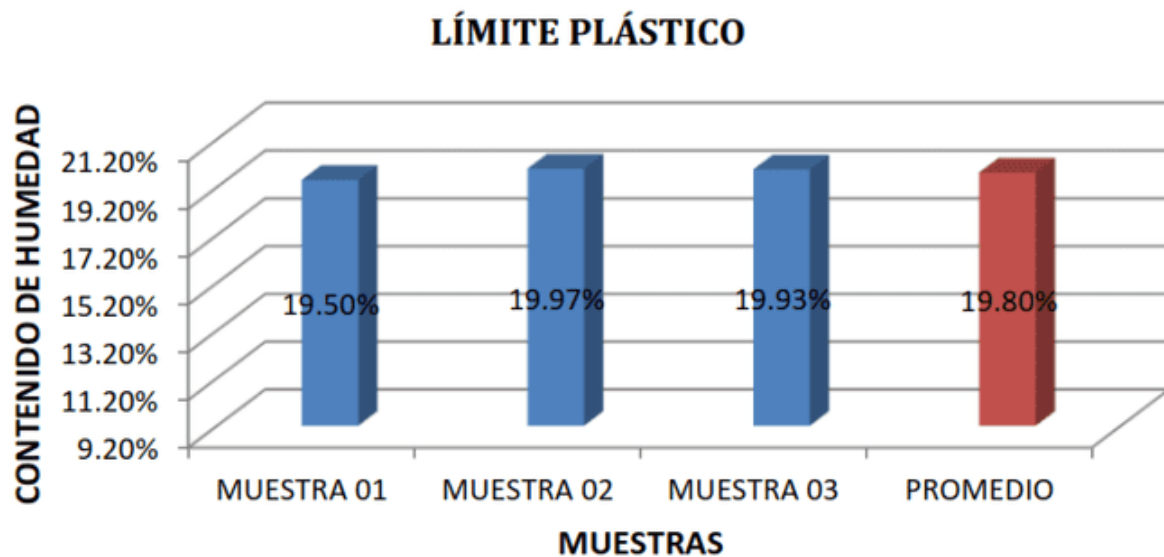
De igual forma, cuando el límite plástico es mayor o igual que el límite líquido, entonces el índice de plasticidad se expresa como no plástico (NP).

3.6.2.2. Diagramas, tablas del límite plástico del suelo

Tabla 29: Límite Plástico de Suelo Natural

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3
Masa de la lata (gr)	7.99	9.26	7.99
Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)	15.16	17.31	15.21
Masa de la lata + Espécimen seca (gr)	13.99	15.97	14.01
Masa del agua (gr)	1.17	1.34	1.2
Masa del espécimen seco (gr)	6	6.71	6.02
Contenido de Humedad	19.50%	19.97%	19.93%

Figura 51: Límite Plástico de Suelo Natural



En la Tabla 29 y la Figura 51, se pueden ver los resultados de la investigación de laboratorio en suelo natural sin aditamento, donde el contenido de humedad promedio de las tres muestras fue de 19.80%. Luego, en las páginas siguientes, se analizan los resultados con la adición de cal y cemento en diferentes proporciones y se comparan para determinar los resultados relevantes.



Tabla 30: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cal 2%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3
Masa de la lata (gr)	7.99	9.26	7.99
Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)	15.01	17.31	15.21
Masa de la lata + Espécimen seca (gr)	13.99	15.97	14.01
Masa del agua (gr)	1.02	1.34	1.20
Masa del espécimen seco (gr)	6.00	6.71	6.02
Contenido de Humedad	17.00%	19.97%	19.93%

Figura 52: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cal 2%

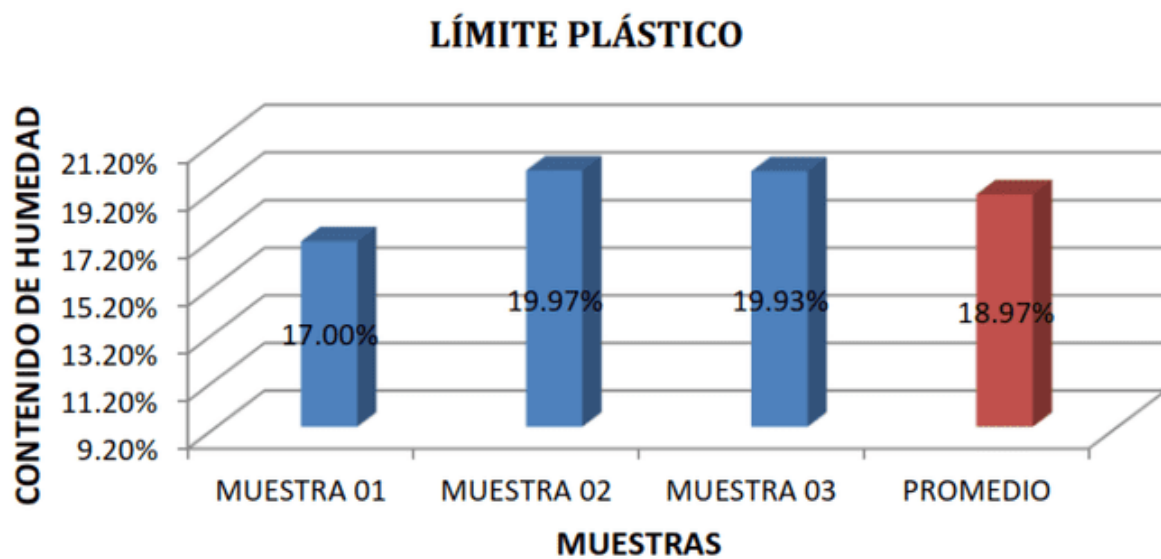


Tabla 31: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cal 4%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3
Masa de la lata (gr)	7.98	9.31	7.99
Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)	15.16	17.19	15.21
Masa de la lata + Espécimen seca (gr)	13.99	15.97	14.02
Masa del agua (gr)	1.17	1.22	1.19
Masa del espécimen seco (gr)	6.01	6.66	6.03
Contenido de Humedad	19.47%	18.32%	19.73%



Figura 53: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cal 4%

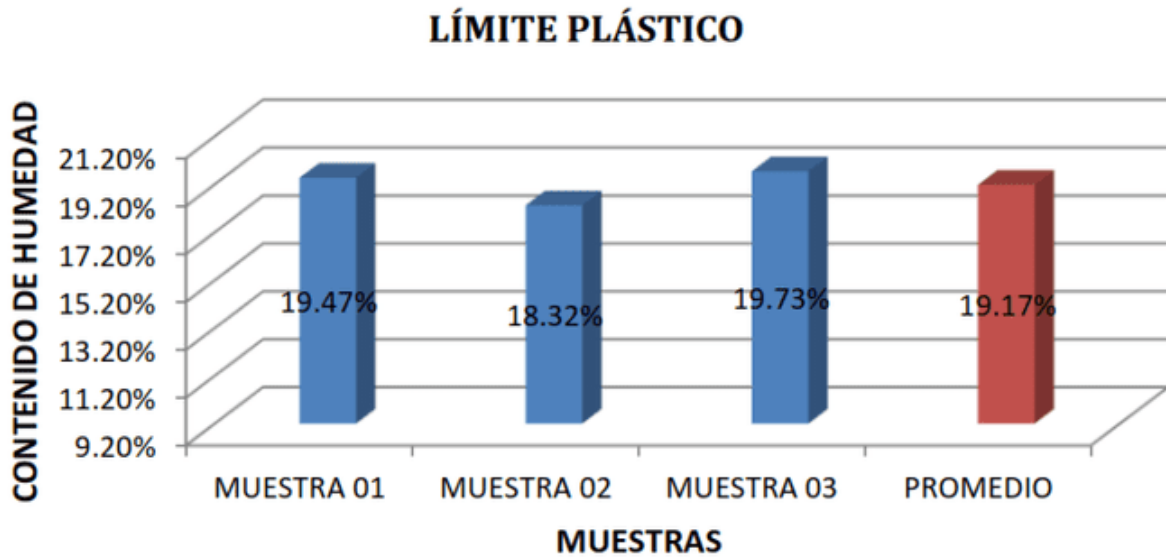


Tabla 32: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 7%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3
Masa de la lata (gr)	7.99	9.26	7.99
Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)	15.06	17.33	15.21
Masa de la lata + Espécimen seca (gr)	13.92	15.97	14.01
Masa del agua (gr)	1.14	1.36	1.20
Masa del espécimen seco (gr)	5.93	6.71	6.02
Contenido de Humedad	19.22%	20.27%	19.93%

Figura 54: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 7%

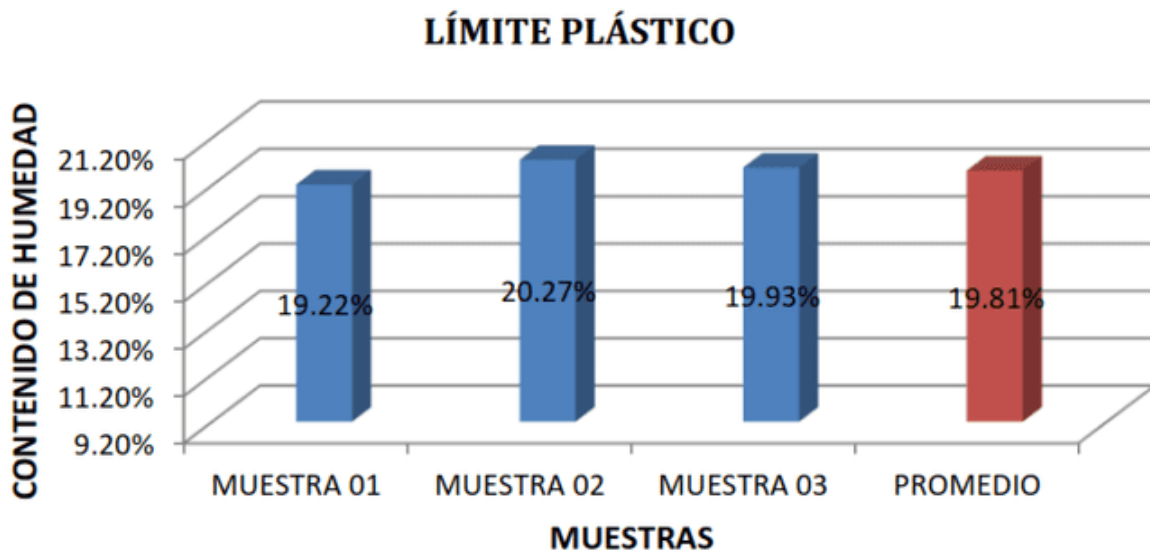




Tabla 33: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 9%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3
Masa de la lata (gr)	8.00	9.27	7.98
Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)	15.16	17.31	15.21
Masa de la lata + Espécimen seca (gr)	13.99	15.97	14.01
Masa del agua (gr)	1.17	1.34	1.20
Masa del espécimen seco (gr)	5.99	6.70	6.03
Contenido de Humedad	19.53%	20.00%	19.90%

Figura 55: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 9%

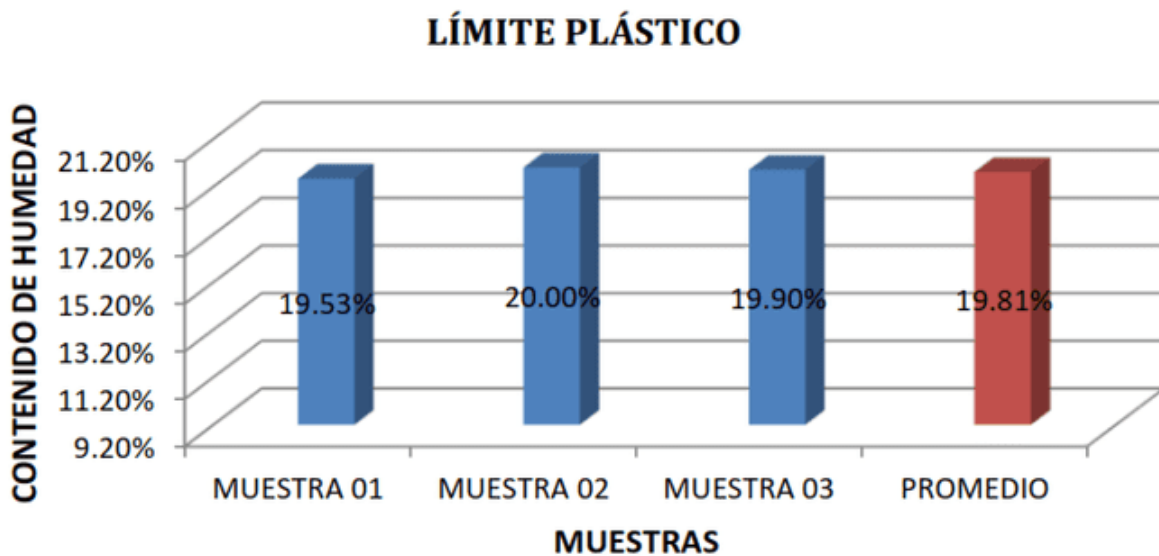
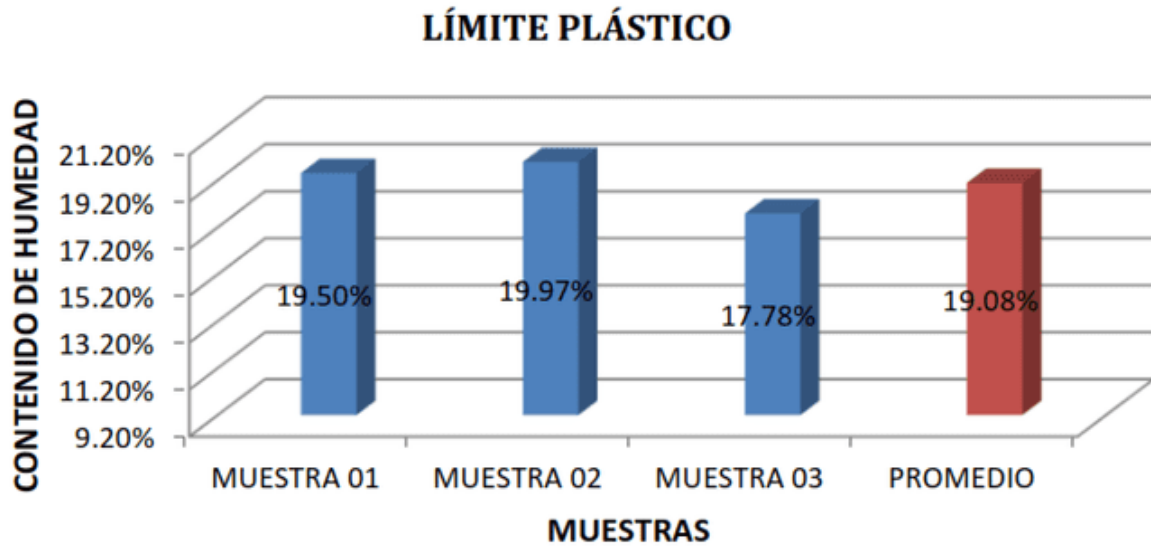


Tabla 34: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 11%

DESCRIPCIÓN	MUESTRA – 1	MUESTRA – 2	MUESTRA – 3
Masa de la lata (gr)	7.99	9.26	7.99
Masa de la lata + Espécimen húmedo (gr)	15.16	17.31	15.21
Masa de la lata + Espécimen seca (gr)	13.99	15.97	14.12
Masa del agua (gr)	1.17	1.34	1.09
Masa del espécimen seco (gr)	6.00	6.71	6.13
Cantidad de Humedad	19.50%	19.97%	17.78%



Figura 56: Límite Plástico de Suelo Natural con Adición de Cemento 11%



3.6.2.3. Análisis de la prueba del límite plástico del suelo

Observando y examinando diferentes tablas y figuras presentados en el numeral 3.6.1.3., se entiende que el límite plástico de la muestra del suelo natural es 19,80%, con la adición de cal al 2% se reduce a 18,97%; mientras que con la adición de cal a 4% el límite plástico es de 19,17%, en este último un ligero incremento.

Para el espécimen con adición de 7% de cemento el límite plástico es de 19,81%, con edición de 9% de cemento indica 19,81% no habiendo variación alguna, y con adición de 11% de cemento el límite plástico es 19,08%. En este último, existe una ligera disminución.

3.6.2.4. Análisis de la prueba del índice de plasticidad

Tabla 35: Índice de Plasticidad para el suelo natural y las diferentes dosificaciones de cal y cemento.

DESCRIPCION	Limite Líquido	Limite Plástico	Índice de Plasticidad
Suelo Natural	26.63	19.80	6.83
Suelo Natural + 2% de Cal	26.34	18.97	7.37
Suelo Natural + 4% de Cal	26.94	19.17	7.77
Suelo Natural + 7% de Cemento	24.86	19.81	5.05
Suelo Natural + 9% de Cemento	24.43	19.81	4.62
Suelo Natural + 11% de Cemento	23.63	19.08	4.55



De la tabla 35 se puede observar que para el suelo natural se obtuvo un IP del 6.83%, con la dosificación de cal del 2% se obtuvo un IP del 7.37% viéndose un incremento con respecto al suelo natural, con una dosificación de cal 4% se obtuvo un IP del 7.77% viéndose un incremento con respecto al suelo natural y con respecto a la dosificación del 2% de cal.

Con la dosificación del 7% de cemento se obtuvo un IP del 5.05% observándose una disminución con respecto al suelo natural, con la dosificación del 9% de cemento se obtuvo un IP del 4.62% observándose una disminución con respecto al suelo natural y con una dosificación del 11% de cemento se obtuvo un IP del 4.55% observándose una disminución con respecto al suelo natural.

3.6.3. Prueba de laboratorio del Proctor modificado del suelo (NTP 339.141; MTC E-115; ASTM D-1557 y AASHTO T-180)

3.6.3.1. Procedimiento o cálculo de la prueba del Proctor modificado del suelo

La compactación de suelos se representa con el ensayo de Proctor modificado. El ensayo para el Proctor modificado se hace uso del formato donde se consigna los datos y las características del molde, tanto el diámetro como su altura, de tal manera que se calcula el volumen del molde.

Primero se calcula la densidad del suelo húmedo que corresponde a la primera parte, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{m_{total}}{V_{total}}$$

La ecuación de la energía total de compactación (E)

$$E = \frac{(\# \text{ golpes})(\# \text{ capas})(W_{pison})(h_{caida})}{volumen}$$

La unidad de medida $E = \frac{N \cdot m}{m^3}$

En el numeral 3.6.3.2. se presentan todas las tablas de cada una de las muestras con adición de aditivos de cal al 2% y 4%, y de cemento al 7%, 9% y 11% respectivamente, acompañado de su gráfico correspondiente de las curvas de compactación de peso unitario seco en función del contenido de humedad.

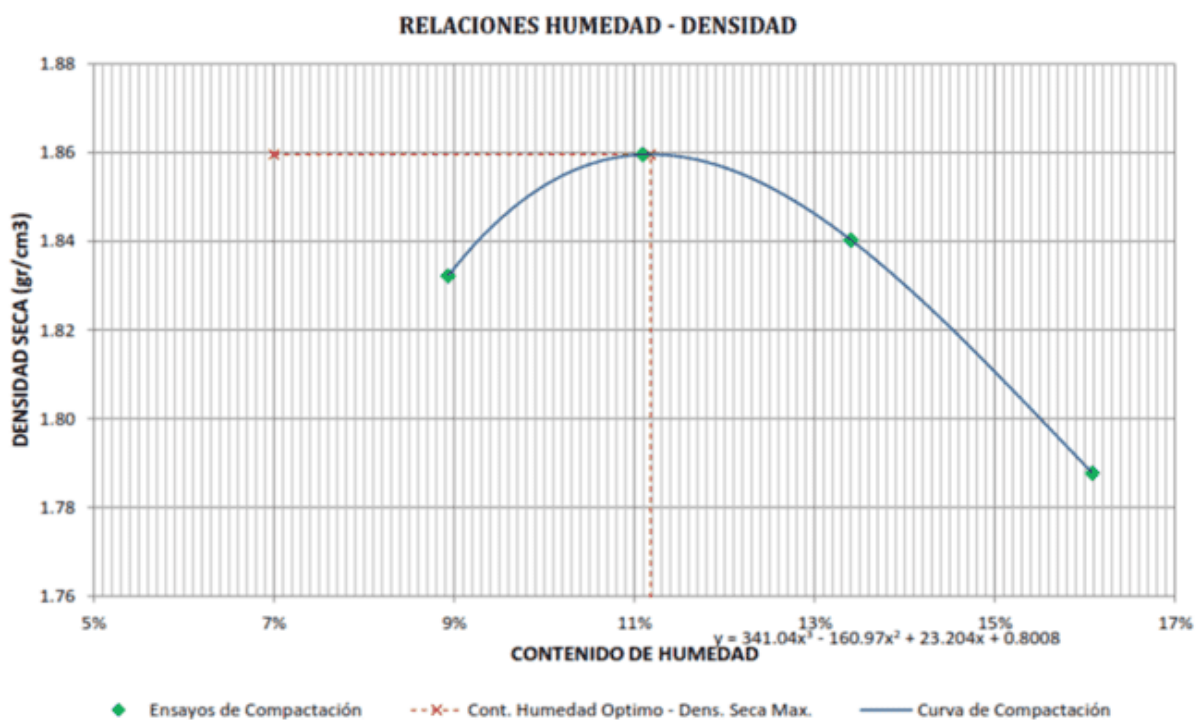
3.6.3.2. Diagramas, tablas del Proctor modificado del suelo

Tabla 36: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557

Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
N° de Proctor empleado	P-2	P-2	P-2	P-2
Diámetro Ø del cilindro (cm)	10.16	10.16	10.16	10.16
Altura del cilindro (cm)	11.64	11.64	11.64	11.64
Volumen del cilindro (cm ³)	943.96	943.96	943.96	943.96
Masa del cilindro (gr)	4,661.00	4,661.00	4,661.00	4,661.00
Masa del cilindro + Muestra húmeda (gr)	6,545.00	6,611.00	6,631.00	6,620.00
Masa de la Muestra Húmeda (gr)	1884	1950	1970	1959
Masa de la Muestra Seca (gr)	1729.51	1755.33	1737.14	1687.58
Peso específico (gr/cm³)	1.83	1.86	1.84	1.79
Porcentaje de humedad	Medio	Medio	Medio	Medio
Masa de la lata (gr)	16.83	16.5	14.89	14.89
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	71.83	98.24	71.91	71.91
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	67.32	90.08	65.17	64.01
Masa del Agua (gr)	4.51	8.16	6.74	7.9
Masa del Espécimen Seca (gr)	50.49	73.58	50.28	49.12
Contenido de Humedad	8.93%	11.09%	13.40%	16.08%

Nota. El Proctor Modificado del Suelo se realizó según a las siguientes normas técnicas NPT 339.141; MTC E 115, de acuerdo a las Normas AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557.

Figura 57: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural



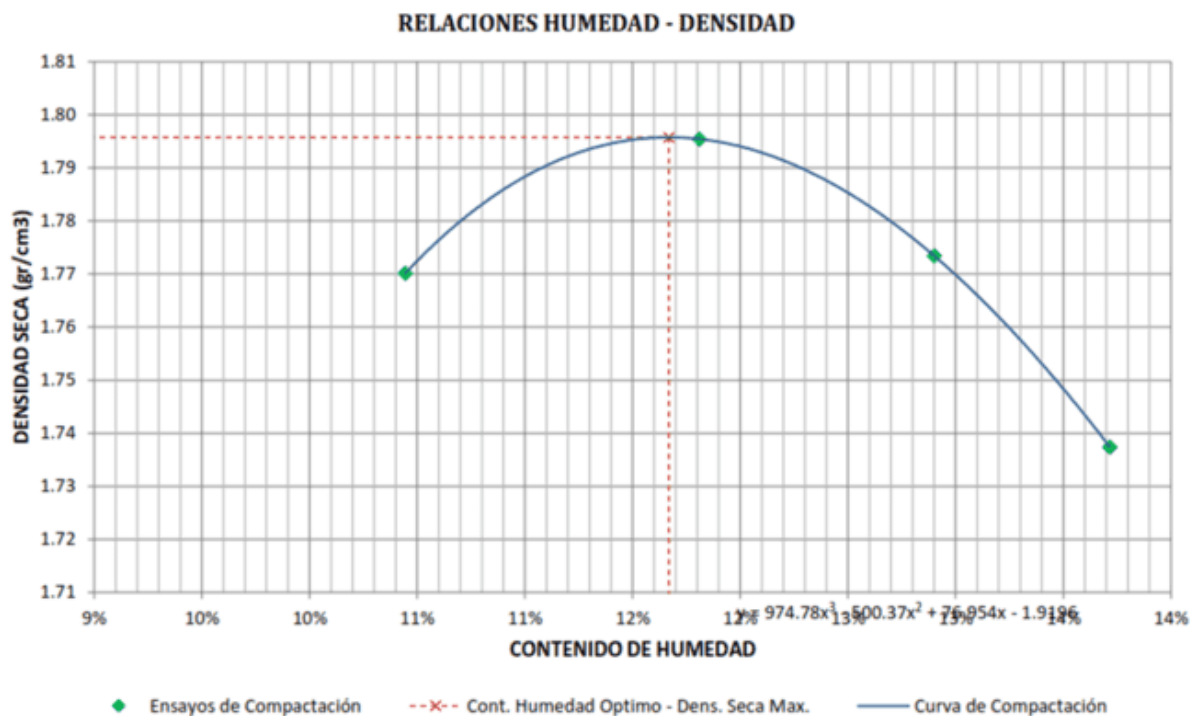


Nota: Densidad Seca Máxima = 1.86 gr/cm³. Contenido de Humedad Óptimo = 11.18 %

Tabla 37: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 2% cal - MTC E 115, según AASHTO T - 180 y ASTM D - 1557

Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
N° de Proctor Utilizado	P-2	P-2	P-2	P-2
Diámetro Ø del cilindro (cm)	10.16	10.16	10.16	10.16
Altura del cilindro (cm)	11.64	11.64	11.64	11.64
Volumen del cilindro (cm ³)	943.96	943.96	943.96	943.96
Masa del cilindro (gr)	4,715.00	4,715.00	4,715.00	4,715.00
Masa del cilindro + Muestra húmeda (gr)	6,560.50	6,610.00	6,605.00	6,580.00
Masa de la Muestra Húmeda (gr)	1845.5	1895	1890	1865
Masa de la Muestra Seca (gr)	1670.96	1694.83	1674.03	1640.05
Densidad Seca (gr/cm³)	1.77	1.8	1.77	1.74
Porcentaje de Humedad	97.58	Medio	Medio	Medio
Masa de la lata (gr)	16.55	16.43	15.87	15.87
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	61.7	82.13	115.11	115.11
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	57.43	75.19	103.77	103.14
Masa del Agua (gr)	4.27	6.94	11.34	11.97
Masa del Espécimen Seca (gr)	40.88	58.76	87.9	87.27
Contenido de Humedad	10.45%	11.81%	12.90%	13.72%

Figura 58: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 2% cal



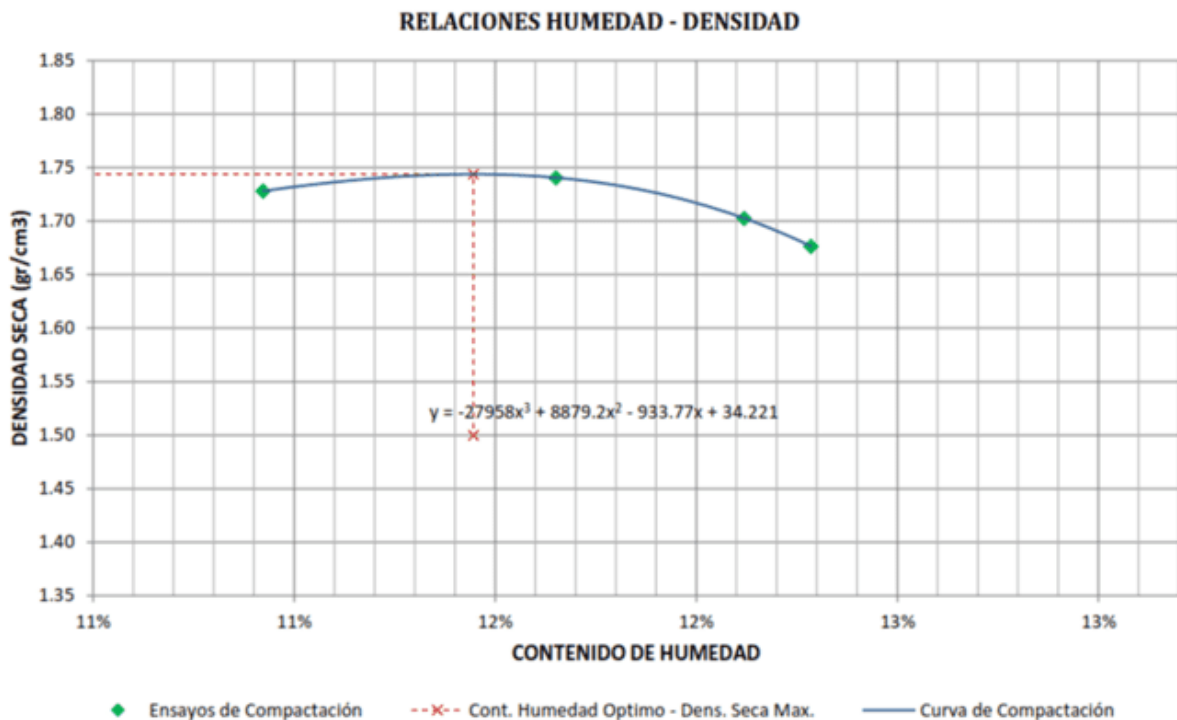
Nota: Densidad Seca Máxima = 1.80 gr/cm³. Contenido de Humedad Óptimo = 11.67 %



Tabla 38: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 4% cal - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557

Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
N° de Proctor Utilizado	P-2	P-2	P-2	P-2
Diámetro Ø del cilindro (cm)	10.16	10.16	10.16	10.16
Altura del cilindro (cm)	11.64	11.64	11.64	11.64
Volumen del cilindro (cm ³)	943.96	943.96	943.96	943.96
Masa del cilindro (gr)	5,113.00	5,113.00	5,113.00	5,113.00
Masa del cilindro + Muestra húmeda (gr)	6,922.50	6,947.50	6,915.00	6,890.00
Masa de la Muestra Húmeda (gr)	1809.5	1834.5	1802	1777
Masa de la Muestra Seca (gr)	1631.31	1643.07	1607.21	1582.57
Densidad Seca (gr/cm3)	1.73	1.74	1.7	1.68
Porcentaje de Humedad	97.58	Medio	Medio	Medio
Masa de la lata (gr)	15.93	16.4	16.29	16.29
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	61.12	79.84	92.15	92.15
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	56.67	73.22	83.95	83.85
Masa del Agua (gr)	4.45	6.62	8.2	8.3
Masa del Espécimen Seca (gr)	40.74	56.82	67.66	67.56
Contenido de Humedad	10.92%	11.65%	12.12%	12.29%

Figura 59: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 4% cal

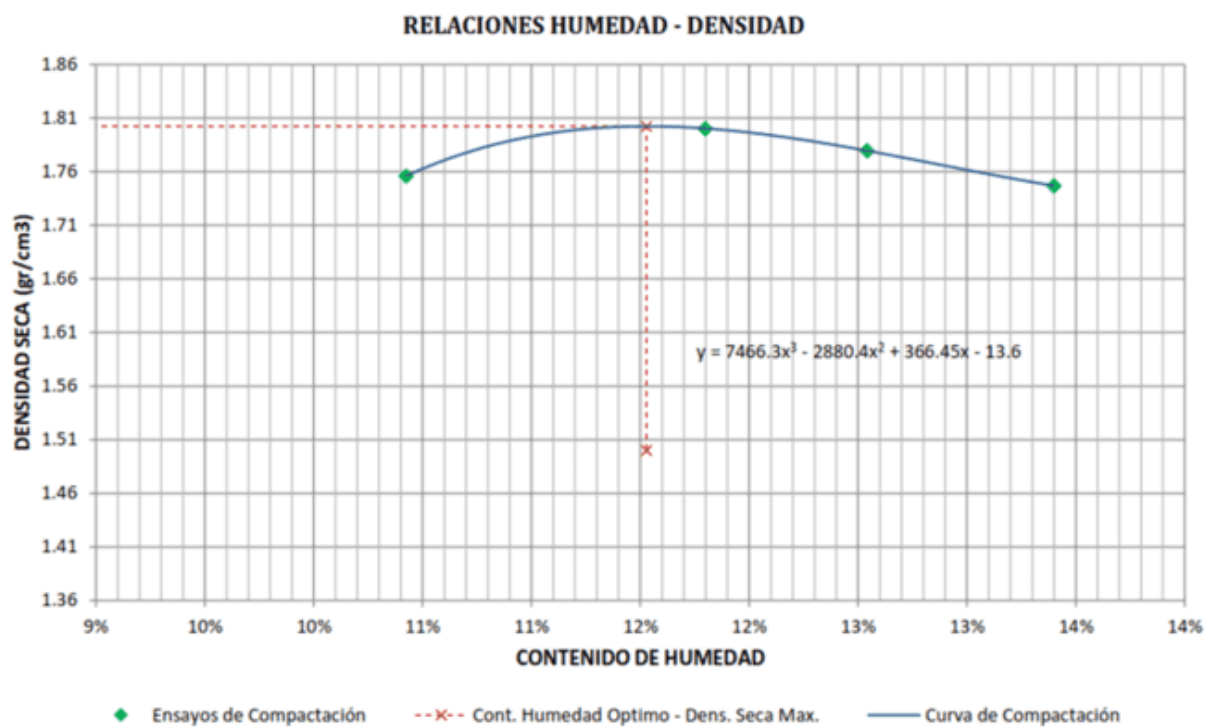


Nota: Densidad Seca Máxima = 1.74 gr/cm³. Contenido de Humedad Óptimo = 11.45 %

Tabla 39: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 7% Cemento - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557

Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
N° de Proctor Utilizado	P-2	P-2	P-2	P-2
Diámetro Ø del cilindro (cm)	10.16	10.16	10.16	10.16
Altura del cilindro (cm)	11.64	11.64	11.64	11.64
Volumen del cilindro (cm ³)	943.96	943.96	943.96	943.96
Masa del cilindro (gr)	4,875.00	4,875.00	4,875.00	4,875.00
Masa del cilindro + Muestra húmeda (gr)	6,705.50	6,775.00	6,765.50	6,745.00
Masa de la Muestra Húmeda (gr)	1830.5	1900	1890.5	1870
Masa de la Muestra Seca (gr)	1657.68	1699.48	1679.81	1649.05
Densidad Seca (gr/cm³)	1.76	1.8	1.78	1.75
Porcentaje de Humedad	97.58	Medio	Medio	Medio
Masa de la lata (gr)	16.5	16.1	16.57	16.57
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	94.14	84.04	73.19	73.19
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	86.81	76.87	66.88	66.5
Masa del Agua (gr)	7.33	7.17	6.31	6.69
Masa del Espécimen Seca (gr)	70.31	60.77	50.31	49.93
Contenido de Humedad	10.43%	11.80%	12.54%	13.40%

Figura 60: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural +7% Cemento

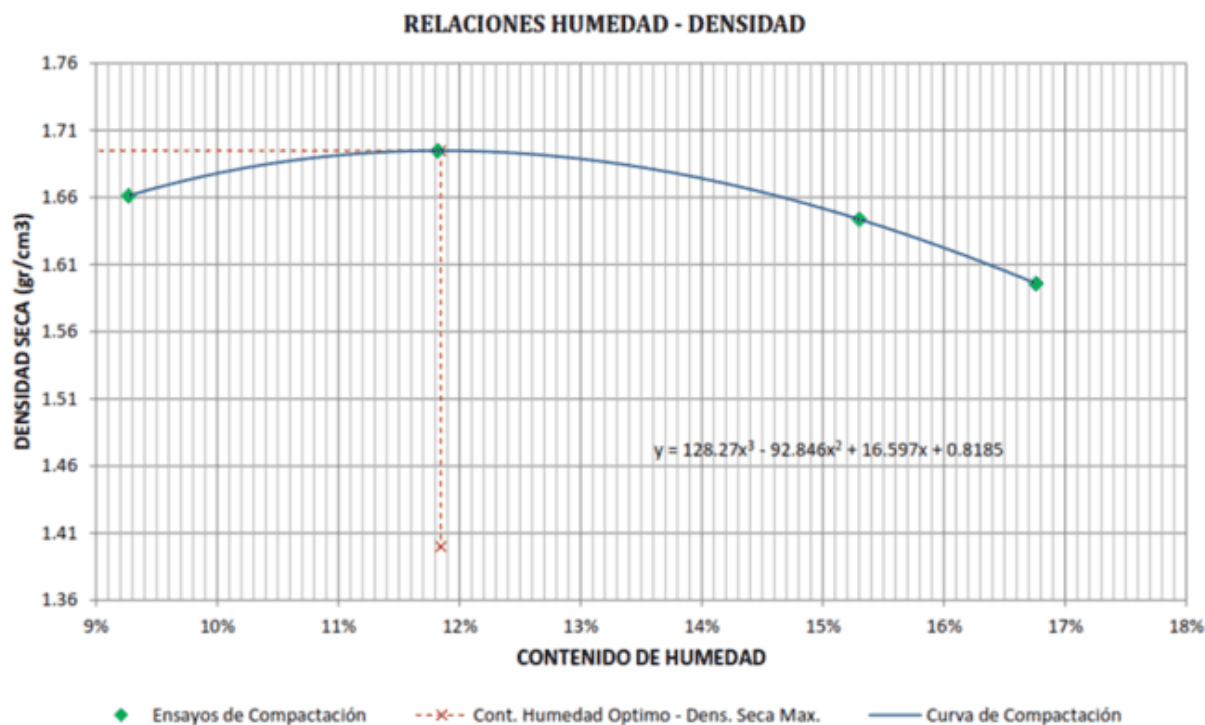


Nota: Densidad Seca Máxima = 1.80 gr/cm³. Contenido de Humedad Óptimo = 11.53%

Tabla 40: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 9% Cemento - MTC E 115, según la AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557

Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
N° de Proctor Utilizado	P-2	P-2	P-2	P-2
Diámetro Ø del cilindro (cm)	10.16	10.16	10.16	10.16
Altura del cilindro (cm)	11.64	11.64	11.64	11.64
Volumen del cilindro (cm ³)	943.96	943.96	943.96	943.96
Masa del cilindro (gr)	4,576.00	4,576.00	4,576.00	4,576.00
Masa del cilindro + Muestra húmeda (gr)	6,289.50	6,365.00	6,365.00	6,335.00
Masa de la Muestra Húmeda (gr)	1713.5	1789	1789	1759
Masa de la Muestra Seca (gr)	1568.17	1599.88	1551.58	1506.52
Densidad Seca (gr/cm³)	1.66	1.69	1.64	1.60
Porcentaje de Humedad	97.58	Medio	Medio	Medio
Masa de la lata (gr)	16.07	16.26	16.89	16.89
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	63.82	60.91	63.08	63.08
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	59.77	56.19	56.95	56.45
Masa del Agua (gr)	4.05	4.72	6.13	6.63
Masa del Espécimen Seca (gr)	43.7	39.93	40.06	39.56
Contenido de Humedad	9.27%	11.82%	15.30%	16.76%

Figura 61: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 9% Cemento



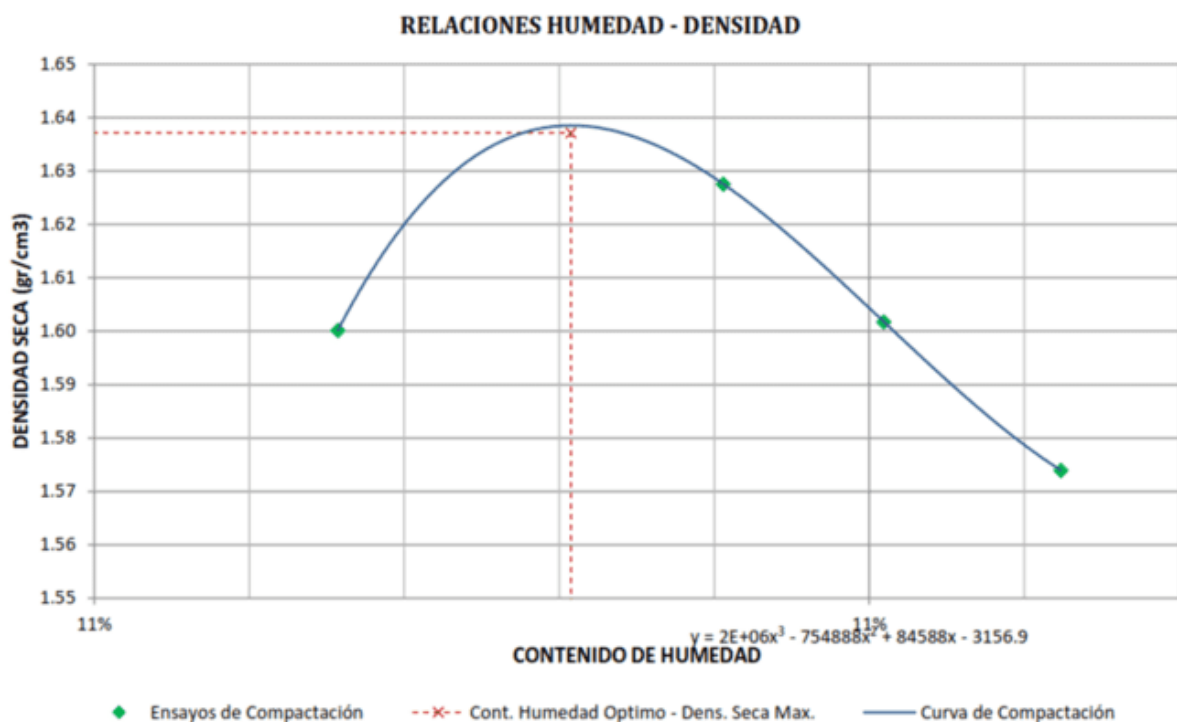
Nota: Densidad Seca Máxima = 1.69 gr/cm³. Contenido de Humedad Óptimo = 11.85%



Tabla 41: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 11% Cemento - MTC E 115, según AASHTO T – 180 y ASTM D – 1557

Descripción	Muestra - 1	Muestra - 2	Muestra - 3	Muestra - 4
N° de Proctor Utilizado	P-2	P-2	P-2	P-2
Diámetro Ø del cilindro (cm)	10.16	10.16	10.16	10.16
Altura del cilindro (cm)	11.64	11.64	11.64	11.64
Volumen del cilindro (cm ³)	943.96	943.96	943.96	943.96
Masa del cilindro (gr)	4,847.00	4,847.00	4,847.00	4,847.00
Masa del cilindro + Muestra húmeda (gr)	6,528.50	6,554.00	6,521.50	6,501.00
Masa de la Muestra Húmeda (gr)	1681.5	1707	1674.5	1654
Masa de la Muestra Seca (gr)	1512.01	1536.37	1510.5	1485.76
Densidad Seca (gr/cm³)	1.60	1.63	1.60	1.57
Porcentaje de Humedad	Medio	Medio	Medio	Medio
Masa de la lata (gr)	18.84	15.98	11	11
Masa de la lata + Muestra Húmeda (gr)	103.07	86.81	98.3	98.3
Masa de la lata + Muestra Seca (gr)	94.58	79.73	89.75	89.42
Masa del Agua (gr)	8.49	7.08	8.55	8.88
Masa del Espécimen Seca (gr)	75.74	63.75	78.75	78.42
Contenido de Humedad	11.21%	11.11%	10.86%	11.32%

Figura 62: Relación Humedad - Densidad de la Muestra Natural + 11% Cemento



Nota: Densidad Seca Máxima = 1.64 gr/cm³. Contenido de Humedad Óptimo = 11.01 %.



3.6.3.3. Análisis de la prueba del Proctor modificado del suelo

Para realizar la prueba del Proctor modificado del suelo se utilizó el método A, es necesario considerar los datos preliminares para su ejecución, estos las 5 capas, con 25 golpes por cada capa, la masa del pisón de 4,45 kilogramos y una altura de caída del pisón de 45,72 centímetros.

En la curva de compactación se busca el punto más alto, este punto está asociado al peso unitario máximo (densidad máxima seca) y el contenido de humedad óptimo.

Tabla 42.: Resumen de Proctor Modificado del suelo natural y a diferentes dosificaciones de cal y cemento

Ensayo	Contenido de humedad óptimo	Densidad Seca Máxima
Suelo Natural	11,18 %	1,86 gr/cm ³
Suelo Natural + 2% de Cal	11,67 %	1.80 gr/cm ³
Suelo Natural + 4% de Cal	11,45 %	1,74 gr/cm ³
Suelo Natural + 7% de Cemento	11,53 %	1,80 gr/cm ³
Suelo Natural + 9% de Cemento	11,85 %	1,69 gr/cm ³
Suelo Natural + 11% de Cemento	11,01 %	1,64 gr/cm ³

Para el suelo natural, es decir sin adicionar ningún producto, el punto más alto de la curva de compactación corresponde a los siguientes valores: peso unitario máximo (densidad seca máxima) es 1,86 gr/cm³ y el contenido de humedad óptimo es 11,18%.

Según los resultados hallados, el suelo natural con aditamento de cal al 2%, la curva de compactación corresponde a los siguientes valores: peso unitario máximo (densidad seca máxima) adquiere un valor de 1.80 gr/cm³ y el porcentaje de humedad óptimo es de 11,67%.

Mientras que para el suelo adicionado con cal al 4%, el punto más alto de la curva de compactación corresponde a los siguientes valores: densidad seca máxima (peso unitario máximo) es de 1,74 gr/cm³ y el contenido de humedad óptimo es de 11,45%.

Por su parte para el suelo con adición de cemento al 7%, en la curva de compactación el punto más alto corresponde a los siguientes valores: peso unitario máximo (densidad seca máxima) es de 1,80 gr/cm³ y el contenido de humedad óptimo es de 11,53%.



Para el suelo con adición de cemento al 9%, en la curva de compactación el punto más alto corresponde a los siguientes valores: peso unitario máximo (densidad seca máxima) es de 1,69 gr/cm³ y el contenido de humedad óptimo es de 11,85%.

Finalmente, para el suelo con adición de cemento al 11%, el punto más alto de la curva de compactación corresponde a los siguientes valores: peso unitario máximo (densidad seca máxima) es de 1,64 gr/cm³ y el contenido de humedad óptimo es de 11,01%.

3.6.4. Prueba de laboratorio del CBR del suelo de acuerdo (NTP 339.167; MTC E 132; AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

3.6.4.1. Procedimiento o cálculo de CBR del suelo

El CBR (California Bearing Ratio) de un suelo viene a ser la carga unitaria que corresponde a 0,1 o 0,2 pulgadas de penetración expresada en porcentaje.

Para determinar el valor de CBR de un suelo, se procede en determinar la relación entre la carga unitaria en kg/cm² que son necesarias para conseguir una penetración de profundidad del pistón o martillo (en cm²) dentro del espécimen compactado de suelo con un contenido de humedad y densidad dadas. Matemáticamente, esta relación se expresa en la siguiente ecuación:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria de ensayo}}{\text{carga unitaria patron}} \times 100\%$$

Los cálculos obtenidos en los ensayos de CBR están en correspondencia con las normas técnicas vigentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC E 132, en correspondencia con las normas AASHTO T-193 y ASTM D-1883.

Los ensayos de CBR (California Bearing Ratio) de un suelo tiene como finalidad establecer la relación entre el comportamiento del suelo como subrasante. Los resultados de los ensayos se presentan en el numeral 3.6.4.2. en formas de tablas y figuras que permitirá observar con más detenimiento para su análisis correspondiente.



3.6.4.2. Diagramas, tablas de CBR del suelo

Para una mejor comprensión del comportamiento del suelo, se presentan en tablas y figuras los resultados de los ensayos de laboratorio de compactación del suelo con y sin aditamento de cal y cemento a diferentes dosificaciones.

Tabla 43: Ensayo de Compactación de Suelo Natural de CBR, MTC E 132, según la Norma AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN – 1		ESPÉCIMEN – 2		ESPÉCIMEN – 3	
N° de Golpes por Capa	55		26		12	
Características del Espécimen	Conte. Hume Óptimo	Saturada	Conte. Hume Óptimo	Saturada	Conte. Hume Óptimo	Saturada
Ubicación del Contend. de Humedad	Medio	Arriba	Medio	Arriba	Medio	Arriba
Masa de la lata (gr)	14.00	19.29	19.19	19.24	15.61	18.5
Masa de la lata + Espécimen Húmeda (gr)	83.58	74.88	113.99	84.92	93.98	80.45
Masa de la lata + Espécimen Seca (gr)	76.28	66.26	104.11	75.21	85.85	70.66
Masa del Agua (gr)	7.30	8.62	9.88	9.71	8.13	9.79
Masa del Espécimen Seca (gr)	62.28	46.97	84.92	55.97	70.24	52.16
Contenido de Humedad	11.72%	18.35%	11.63%	17.35%	11.57%	18.77%
Porcentaje (%) de Absorción	-	6.63%	-	5.71%	-	7.19%
Masa del cilindro (gr)	7275		7135		7868	
Masa del cilindro + Espécimen Húmedo (gr)	11555	11698	10974	11677	11102	12242
Masa de la Espécimen Húmeda (gr)	4280	4423	3839	4542	3234	4374
Masa de la Espécimen Seca (gr)	3830.96		3438.90		2898.51	
Masa del Agua Absorbida (gr)	-	143	-	703	-	1140
Porcentaje (%) de Absorción	-	3.73%	-	20.44%	-	39.33%
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	2.02	2.06	1.81	2.10	1.52	2.00
Peso específico Seco (gr/cm³)	1.80	1.78	1.62	1.59	1.36	1.33



Tabla 44: Ensayo de Expansión de Suelo Natural de CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE EXPANSIÓN													
ESPÉCIMEN		ESPÉCIMEN 1			ESPÉCIMEN 2			ESPÉCIMEN 3					
Tiempo Transcurrido		Dial	Deformac	% de	Deformac	% de	Dial	Deformac	% de				
Días	HH:MM	*0.001"	pulg	mm	Expans.	*0.001"	pulg	mm	Expans.	*0.001"	pulg	mm	Expans.
0	0 h 00 min	0	0	0	0.00%	0	0	0	0.00%	0	0	0	0.00%
0.0625	1 h 30 min	15	0.015	0.381	0.33%	22	0.022	0.559	0.48%	43	0.043	1.092	0.94%
0.125	3 h 00 min	21	0.021	0.533	0.46%	28	0.028	0.711	0.61%	70	0.07	1.778	1.53%
0.25	6 h 00 min	23	0.023	0.584	0.50%	44	0.044	1.118	0.96%	96	0.096	2.438	2.09%
0.5	12 h 00 min	27	0.027	0.686	0.59%	60	0.06	1.524	1.31%	110	0.11	2.794	2.40%
1	24 h 00 min	38	0.038	0.965	0.83%	80	0.08	2.032	1.75%	121	0.121	3.073	2.64%
2	48 h 00 min	45	0.045	1.143	0.98%	85	0.085	2.159	1.85%	126	0.126	3.2	2.75%
4	96 h 00 min	53	0.053	1.346	1.16%	90	0.09	2.286	1.96%	130	0.13	3.302	2.84%

Figura 63: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural.

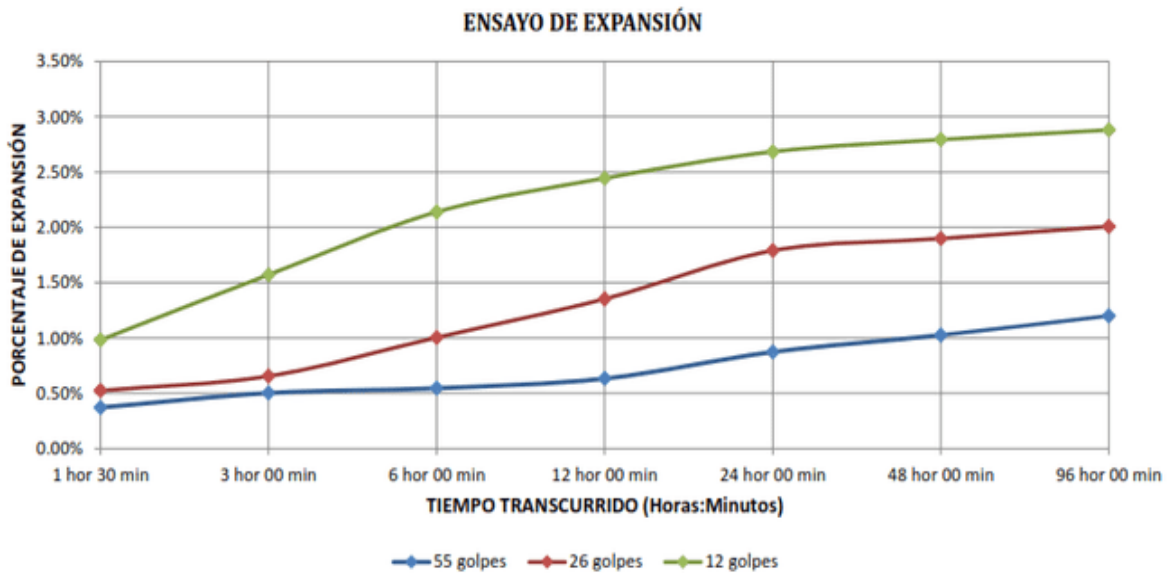




Tabla 45: Ensayo de Penetración de Suelo Natural de CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE PENETRACIÓN														
ESPÉCIMEN			ESPÉCIMEN 1				ESPÉCIMEN 2				ESPÉCIMEN 3			
Carga Unitaria Patrón (kg/cm ²)	Dial	Penetración	Fuerza	Esfuerzc	CBR	Fuerza	Esfuerzc	CBR	Fuerza	Esfuerzc	CBR			
	*0.001"	mm	Dial	kg	kg/cm ²	%	Dial	kg	kg/cm ²	%	Dial	kg	kg/cm ²	%
	0	0.000	0	0.00	0.00		0	0.00	0.00		0	0.00	0.00	
	25	0.635	16.5	50.87	2.63		15.5	47.6	2.46		15	45.97	2.38	
	50	1.270	19.5	60.68	3.13		18	55.77	2.88		16	49.24	2.54	
	75	1.905	21.5	67.21	3.47		19	59.04	3.05		17	52.51	2.71	
70.31	100	2.540	23.5	73.75	3.81	5.42%	20	62.31	3.22	4.58%	18.4	57.08	2.95	4.19%
	125	3.175	25.5	80.29	4.15		21.5	67.21	3.47		19.4	60.35	3.12	
	150	3.810	27.5	86.82	4.49		23	72.12	3.73		20.8	64.93	3.35	
105.46	200	5.080	32.5	103.16	5.33	5.05%	26	81.92	4.23	4.01%	23	72.12	3.73	3.53%
	300	7.620	42.5	135.84	7.02		31	98.26	5.08		27	85.19	4.40	
	400	10.160	54.5	175.06	9.04		35	111.33	5.75		30	94.99	4.91	
	500	12.700	67.5	217.55	11.24		41	130.94	6.77		34	108.06	5.58	

Figura 64: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural

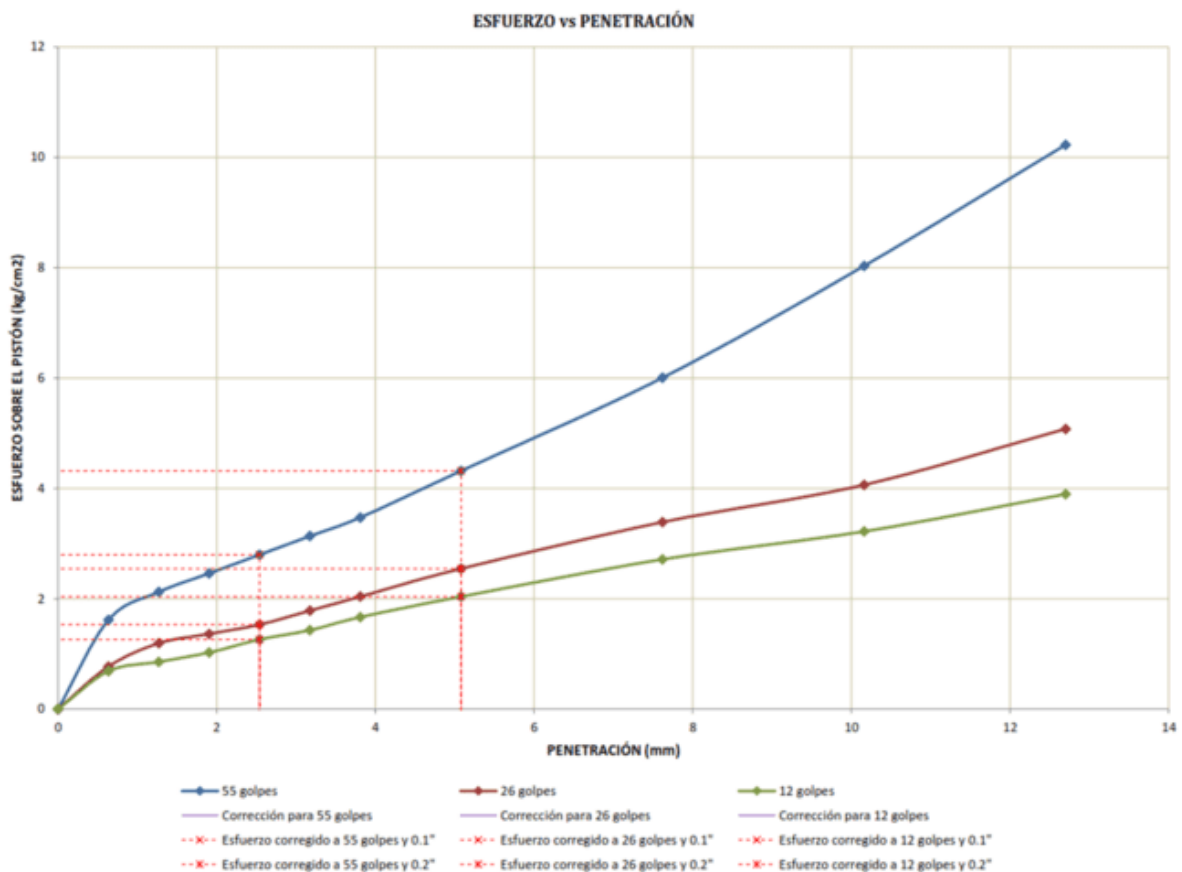
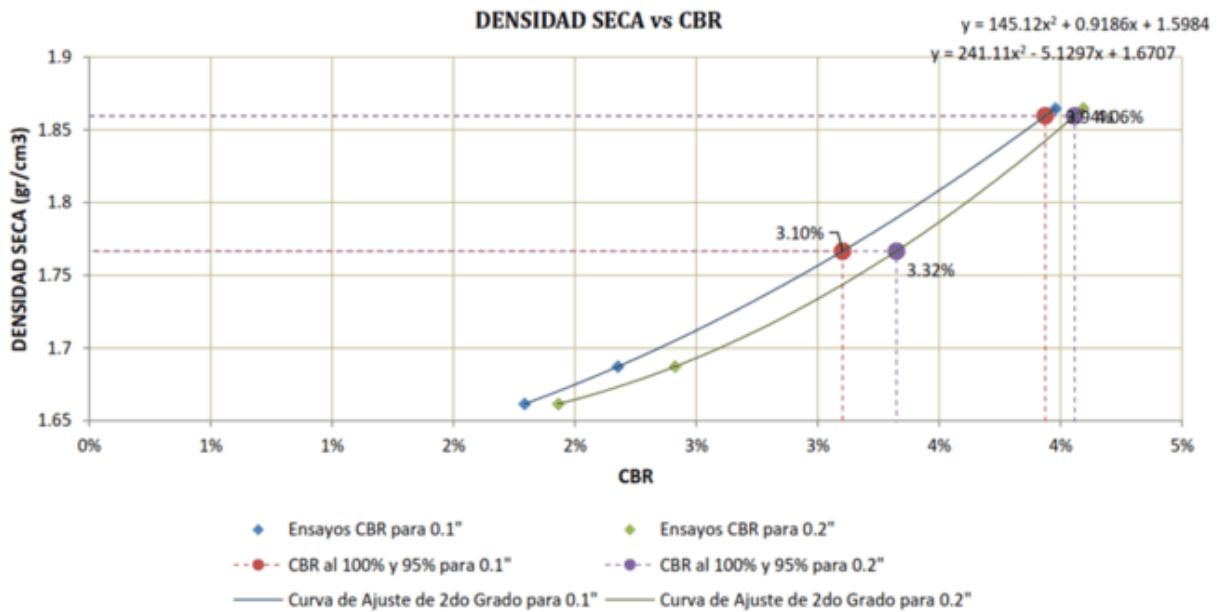




Tabla 46: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural - MTC E 115.

CORRECCIONES	ESPÉCIMEN - 1			ESPÉCIMEN - 2			ESPÉCIMEN - 3			
	Carga Unitaria Patrón	Penetra Corregi	Esfuerz Corregi	CBR Corregid	Penetra Corregi	Esfuerz Corregi	CBR Corregi	Penetra Corregi	Esfuerz Corregi	CBR Corregi
	kg/cm ²	mm	kg/cm ²	%	mm	kg/cm ²	%	mm	kg/cm ²	%
	70.31	2.540	2.80	3.98%	2.540	1.53	2.18%	2.540	1.26	1.79%
	105.46	5.080	4.32	4.09%	5.080	2.54	2.41%	5.080	2.04	1.93%

Figura 65: Densidad Seca Máxima - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural



N° de Golpes	CBR		Densidad Seca Max.
	0.1"	0.2"	
55	3.98%	4.09%	1.86 gr/cm ³
26	2.18%	2.41%	1.69 gr/cm ³
12	1.79%	1.93%	1.66 gr/cm ³

Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)	1.86
95% de la DSM (gr/cm ³)	1.77

	0.1"	0.2"
CBR al 100% de la DSM	3.94%	4.06%
CBR al 95% de la DSM	3.10%	3.32%

Tabla 47: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 2% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN - 1		ESPÉCIMEN - 2		ESPÉCIMEN - 3	
N° de Golpes por Capa	55		26		12	
Características de la Muestra	Conte. Hum Óptimo	Saturada	Conte. Hum Óptimo	Saturada	Conte. Hum Óptimo	Saturada
Ubicación del Contend. de Humedad	Medio	Arriba	Medio	Arriba	Medio	Arriba
Masa de la lata (gr)	14.00	19.29	19.19	19.24	15.61	18.5
Masa de la lata + Espécimen Húmeda (g)	83.58	74.88	113.99	84.92	93.98	80.45
Masa de la lata + Espécimen Seca (gr)	76.28	66.26	104.11	75.21	85.85	70.66
Masa del Agua (gr)	7.30	8.62	9.88	9.71	8.13	9.79
Masa del Espécimen Seca (gr)	62.28	46.97	84.92	55.97	70.24	52.16
Contenido de Humedad	11.72%	18.35%	11.63%	17.35%	11.57%	18.77%
Porcentaje (%) de Absorción	-	6.63%	-	5.71%	-	7.19%
Masa del cilindro (gr)	7275		7135		7868	
Masa del cilindro + Espécimen Húmedo (g)	11555	11698	10974	11677	11102	12242
Masa de la Espécimen Húmeda (gr)	4280	4423	3839	4542	3234	4374
Masa de la Espécimen Seca (gr)	3830.96		3438.90		2898.51	
Masa del Agua Absorbida (gr)	-	143	-	703	-	1140
Porcentaje (%) de Absorción	-	3.73%	-	20.44%	-	39.33%
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	2.02	2.06	1.81	2.10	1.52	2.00
Peso específico Seco (gr/cm³)	1.80	1.78	1.62	1.59	1.36	1.33

Tabla 48: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 2% de Cal para CBR, MTC E 132, según y AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE EXPANSIÓN																	
ESPÉCIMEN		ESPÉCIMEN 1			ESPÉCIMEN 2				ESPÉCIMEN 3								
Tiempo Transcurrido		Dial	Deform		% de		Deform		% de		Dial	Deform		% de			
Días	HH:MM	*0.001"	pulg	mm	Expans.	*0.001"	pulg	mm	Expans.	*0.001"	pulg	mm	Expans.	*0.001"	pulg	mm	Expans.
0	0 h 00 min	0	0	0	0.00%	0	0	0	0.00%	0	0	0	0.00%	0	0	0	0.00%
0.0625	1 h 30 min	15	0.015	0.381	0.33%	22	0.022	0.559	0.48%	43	0.043	1.092	0.94%				
0.125	3 h 00 min	21	0.021	0.533	0.46%	28	0.028	0.711	0.61%	70	0.07	1.778	1.53%				
0.25	6 h 00 min	23	0.023	0.584	0.50%	44	0.044	1.118	0.96%	96	0.096	2.438	2.09%				
0.5	12 h 00 min	27	0.027	0.686	0.59%	60	0.06	1.524	1.31%	110	0.11	2.794	2.40%				
1	24 h 00 min	38	0.038	0.965	0.83%	80	0.08	2.032	1.75%	121	0.121	3.073	2.64%				
2	48 h 00 min	45	0.045	1.143	0.98%	85	0.085	2.159	1.85%	126	0.126	3.2	2.75%				
4	96 h 00 min	53	0.053	1.346	1.16%	90	0.09	2.286	1.96%	130	0.13	3.302	2.84%				

Figura 66: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 2% de Cal

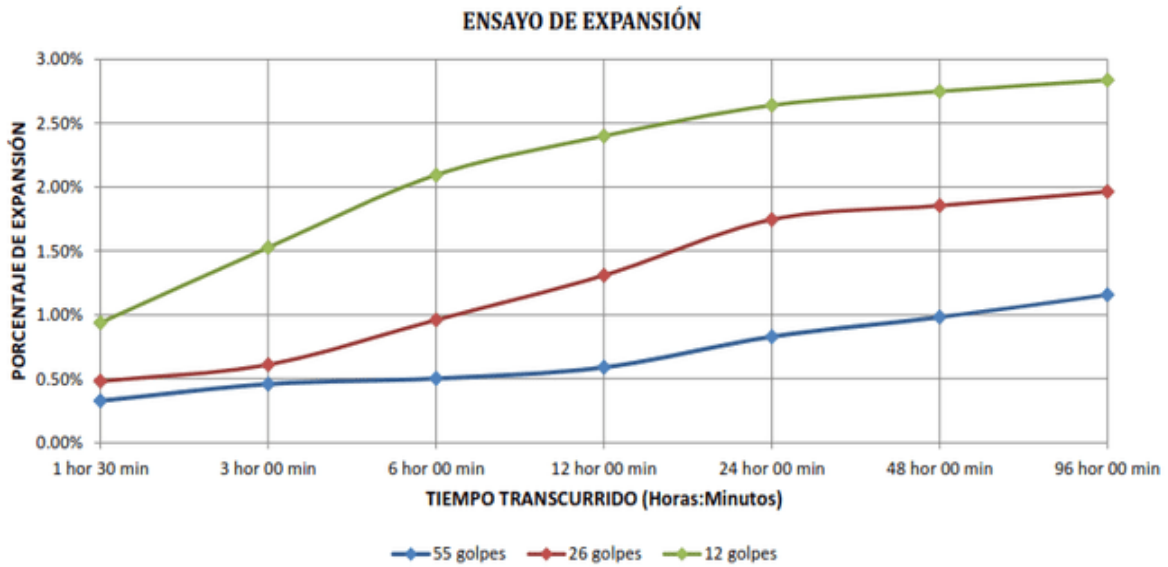


Tabla 49: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 2% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE PENETRACIÓN														
ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN 1			ESPÉCIMEN 2				ESPÉCIMEN 3						
	Carga Unitaria Patrón (kg/cm ²)	Dial	Penetración mm	Fuerza kg	Esfuerzo kg/cm ²	CBR %	Dial	Fuerza kg	Esfuerzo kg/cm ²	CBR %	Dial	Fuerza kg	Esfuerzo kg/cm ²	CBR %
	0	0.000	0	0.00	0.00		0	0.00	0.00		0	0.00	0.00	
	25	0.635	16.5	50.87	2.63		15.5	47.6	2.46		15	45.97	2.38	
	50	1.270	19.5	60.68	3.13		18	55.77	2.88		16	49.24	2.54	
	75	1.905	21.5	67.21	3.47		19	59.04	3.05		17	52.51	2.71	
70.31	100	2.540	23.5	73.75	3.81	5.42%	20	62.31	3.22	4.58%	18.4	57.08	2.95	4.19%
	125	3.175	25.5	80.29	4.15		21.5	67.21	3.47		19.4	60.35	3.12	
	150	3.810	27.5	86.82	4.49		23	72.12	3.73		20.8	64.93	3.35	
105.46	200	5.080	32.5	103.16	5.33	5.05%	26	81.92	4.23	4.01%	23	72.12	3.73	3.53%
	300	7.620	42.5	135.84	7.02		31	98.26	5.08		27	85.19	4.40	
	400	10.160	54.5	175.06	9.04		35	111.33	5.75		30	94.99	4.91	
	500	12.700	67.5	217.55	11.24		41	130.94	6.77		34	108.06	5.58	

Figura 67: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 2% Cal

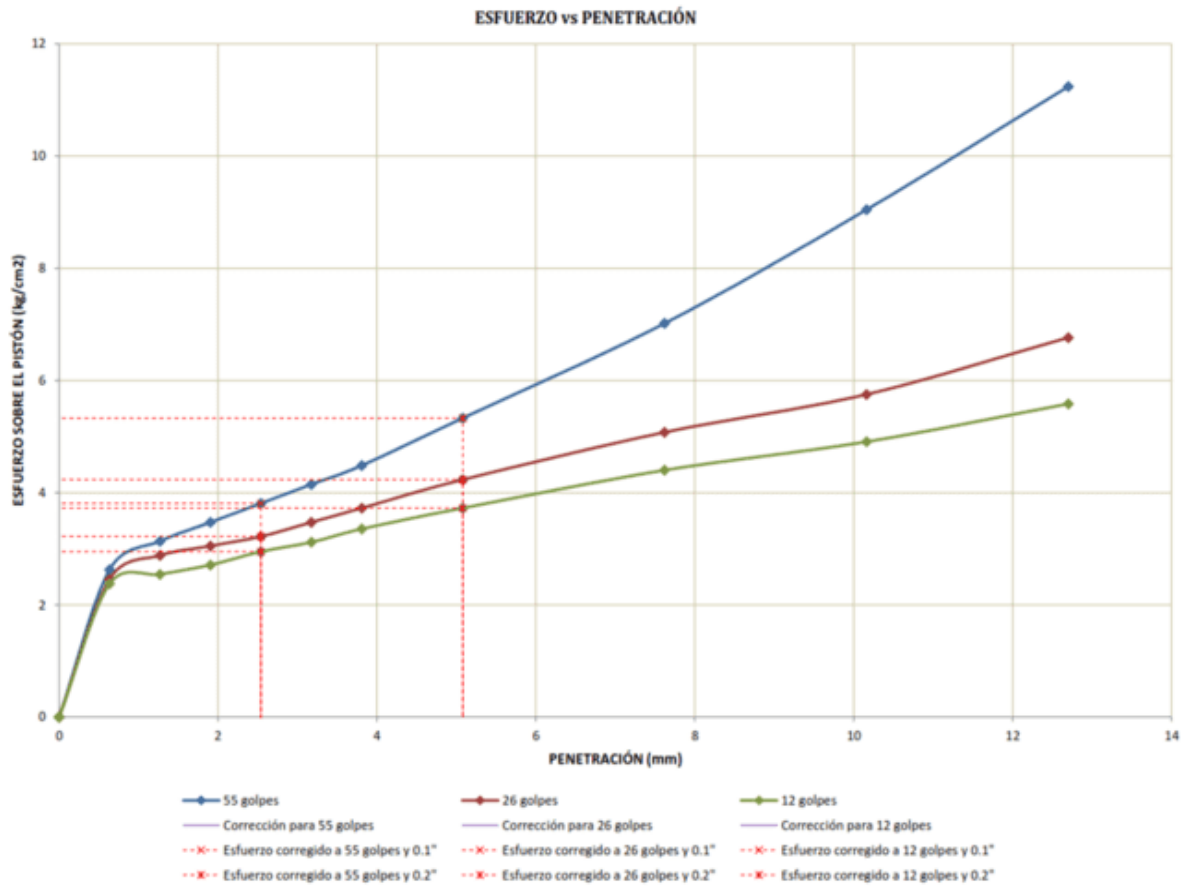
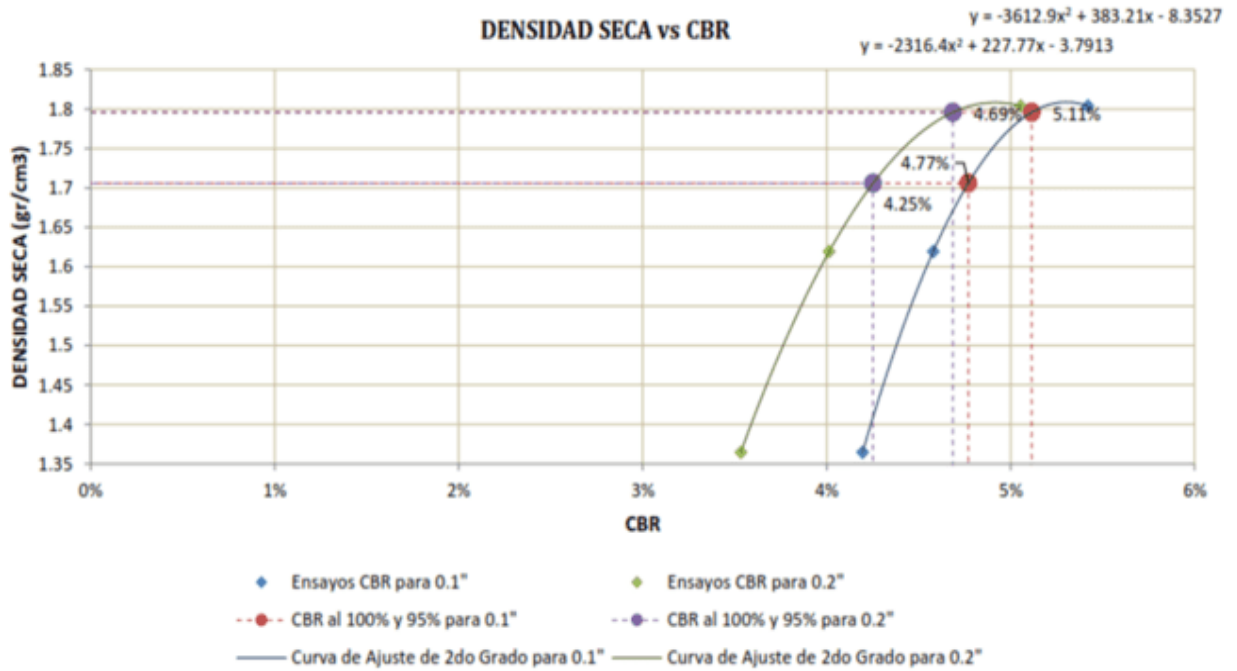


Tabla 50: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 2% de Cal - MTC E 132.

CORRECCIONES	ESPÉCIMEN - 1			ESPÉCIMEN - 2			ESPÉCIMEN - 3			
	Carga Unitaria Patrón	Penetra Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetra Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetra Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi
	kg/cm²	mm	kg/cm²	%	mm	kg/cm²	%	mm	kg/cm²	%
	70.31	2.540	3.81	5.42%	2.540	3.22	4.58%	2.540	2.95	4.19%
	105.46	5.080	5.33	5.05%	5.080	4.23	4.01%	5.080	3.73	3.53%



Figura 68: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 2% cal



N° de Golpes	CBR		Densidad Seca Máxima
	0.1"	0.2"	
55	5.42%	5.05%	1.80 gr/cm ³
26	4.58%	4.01%	1.62 gr/cm ³
12	4.19%	3.53%	1.36 gr/cm ³

Densidad Seca Máxima (gr/cm³)	1.80	0.1"	0.2"
95% de la DSM (gr/cm³)	1.71	CBR al 100% de la DSM	5.11%
		CBR al 95% de la DSM	4.77%
			4.25%

Tabla 51: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 4% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2		ESPÉCIMEN 3	
Nº de Golpes por Capa	55		26		12	
Características de la Muestra	Conte. Hume Óptimo	Saturada	Conte. Hume Óptimo	Saturada	Conte. Hume Óptimo	Saturada
Ubicación del Contend. de Humedad	Medio	Arriba	Medio	Arriba	Medio	Arriba
Masa de la lata (gr)	14.11	19.29	19.19	19.24	15.61	18.5
Masa de la lata + Espécimen Húmeda (82.98	74.88	113.89	84.92	93.92	80.45
Masa de la lata + Espécimen Seca (gr)	75.94	66.26	104.34	75.21	86.08	70.66
Masa del Agua (gr)	7.04	8.62	9.55	9.71	7.84	9.79
Masa del Espécimen Seca (gr)	61.83	46.97	85.15	55.97	70.47	52.16
Contenido de Humedad	11.39%	18.35%	11.22%	17.35%	11.13%	18.77%
Porcentaje (%) de Absorción	-	6.97%	-	6.13%	-	7.64%
Masa del cilindro (gr)	7275		7135		7868	
Masa del cilindro + Espécimen Húmedo	11425	11698	10695	11677	11085	12242
Masa de la Espécimen Húmeda (gr)	4150	4423	3560	4542	3217	4374
Masa de la Espécimen Seca (gr)	3725.78		3200.99		2894.93	
Masa del Agua Absorbida (gr)	-	273	-	982	-	1157
Porcentaje (%) de Absorción	-	7.33%	-	30.68%	-	39.97%
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	1.95	2.06	1.68	2.10	1.51	2.01
Peso específico Seco (gr/cm³)	1.75	1.74	1.51	1.48	1.36	1.33

Tabla 52: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 4% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE EXPANSIÓN													
ESPÉCIMEN		ESPÉCIMEN 1				ESPÉCIMEN 2				ESPÉCIMEN 3			
Tiempo Transcurrido		Dial	Deformac		% de	Deformac		% de	Dial	Deformac		% de	
Días	HH:MM	*0.001"	pulg	mm	Expans. *0.001"	pulg	mm	Expans. *0.001"	pulg	mm	Expans.		
0	0 h 00 min	0	0	0	0.00%	0	0	0	0.00%	0	0	0	0.00%
0.0625	1 h 30 min	3	0.003	0.076	0.07%	10	0.01	0.254	0.22%	31	0.031	0.787	0.68%
0.125	3 h 00 min	9	0.009	0.229	0.20%	16	0.016	0.406	0.35%	58	0.058	1.473	1.27%
0.25	6 h 00 min	12	0.012	0.305	0.26%	32	0.032	0.813	0.70%	84	0.084	2.134	1.83%
0.5	12 h 00 min	15	0.015	0.381	0.33%	48	0.048	1.219	1.05%	98	0.098	2.489	2.14%
1	24 h 00 min	26	0.026	0.66	0.57%	68	0.068	1.727	1.48%	109	0.109	2.769	2.38%
2	48 h 00 min	33	0.033	0.838	0.72%	73	0.073	1.854	1.59%	114	0.114	2.896	2.49%
4	96 h 00 min	39	0.039	0.991	0.85%	78	0.078	1.981	1.70%	118	0.118	2.997	2.57%



Figura 69: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 4% de Cal

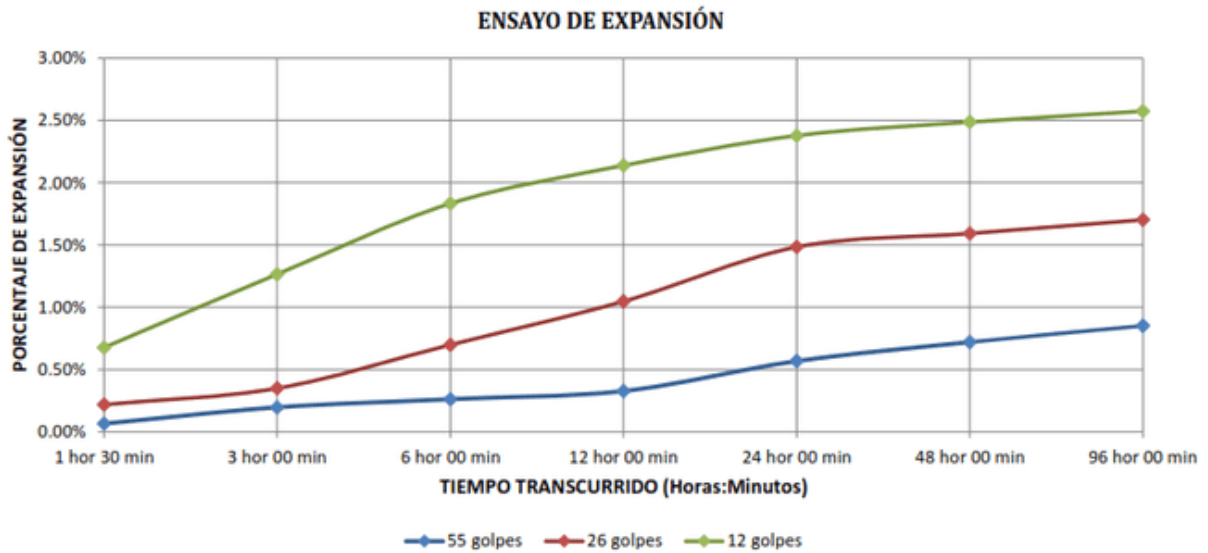


Tabla 53: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 4% de Cal para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE PENETRACIÓN														
ESPÉCIMEN			ESPÉCIMEN 1				ESPÉCIMEN 2				ESPÉCIMEN 3			
Carga Unitaria Patrón (kg/cm ²)	Dial	Penetración	Fuerza	Esfuerzo	CBR	Fuerza	Esfuerzo	CBR	Fuerza	Esfuerzo	CBR			
	*0.001"	mm	Dial	kg	kg/cm ²	%	Dial	kg	kg/cm ²	%	Dial	kg	kg/cm ²	%
	0	0.000	0	0	0.00		0	0.00	0		0	0.00	0.00	
	25	0.635	24	75.38	3.89		22.5	70.48	3.64		22	68.85	3.56	
	50	1.270	27	85.19	4.40		25	78.65	4.06		23	72.12	3.73	
	75	1.905	29	91.72	4.74		26	81.92	4.23		24	75.38	3.89	
70.31	100	2.540	31	98.26	5.08	7.22%	27	85.19	4.40	6.26%	25.4	79.96	4.13	5.88%
	125	3.175	33	104.8	5.41		28.5	90.09	4.65		26.4	83.23	4.30	
	150	3.810	35	111.33	5.75		30	94.99	4.91		27.8	87.80	4.54	
105.46	200	5.080	40	127.67	6.60	6.25%	33	104.80	5.41	5.13%	30	94.99	4.91	4.65%
	300	7.620	50	160.35	8.28		38	121.14	6.26		34	108.06	5.58	
	400	10.16	62	199.57	10.31		42	134.21	6.93		37	117.87	6.09	
	500	12.700	75	242.06	12.51		48	153.82	7.95		41	130.94	6.77	



Figura 70: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 4% Cal

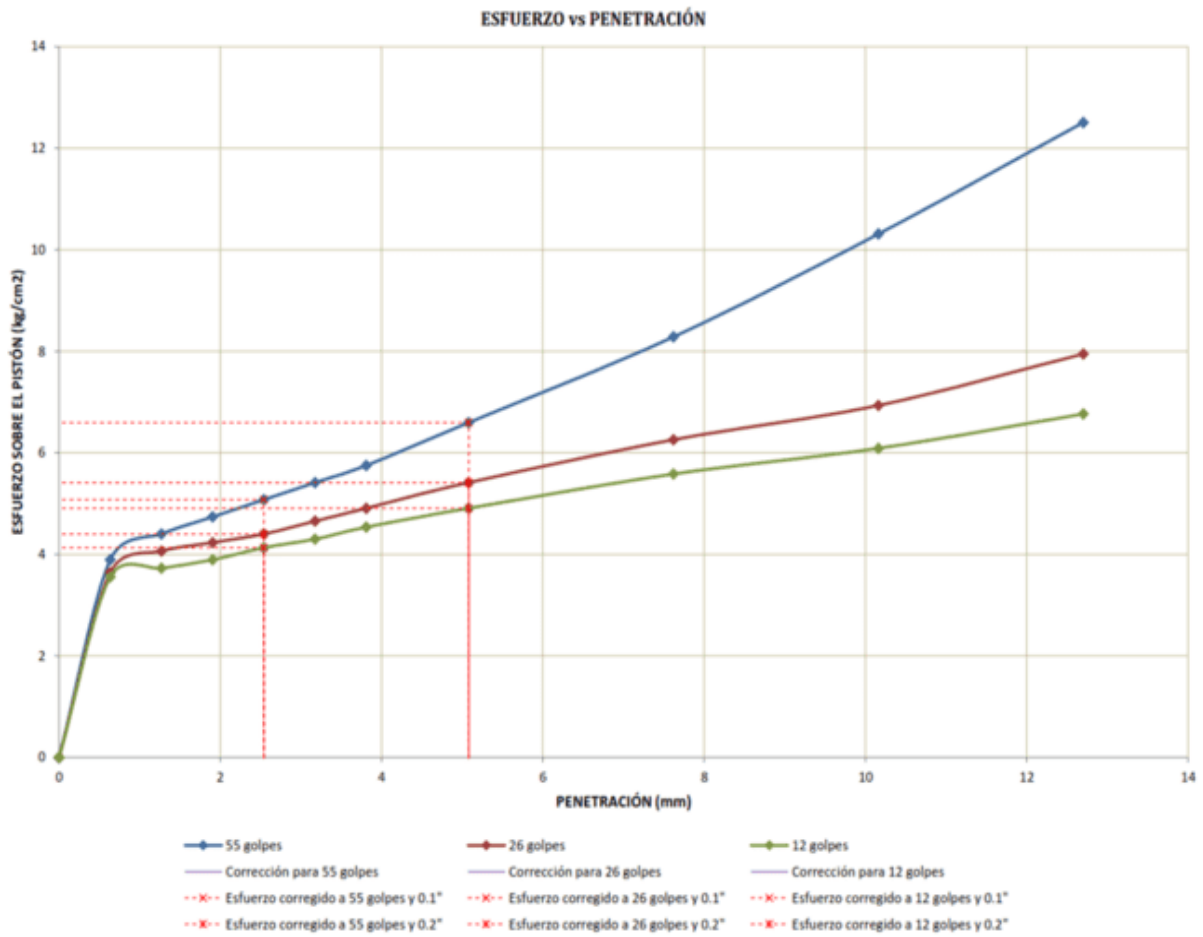
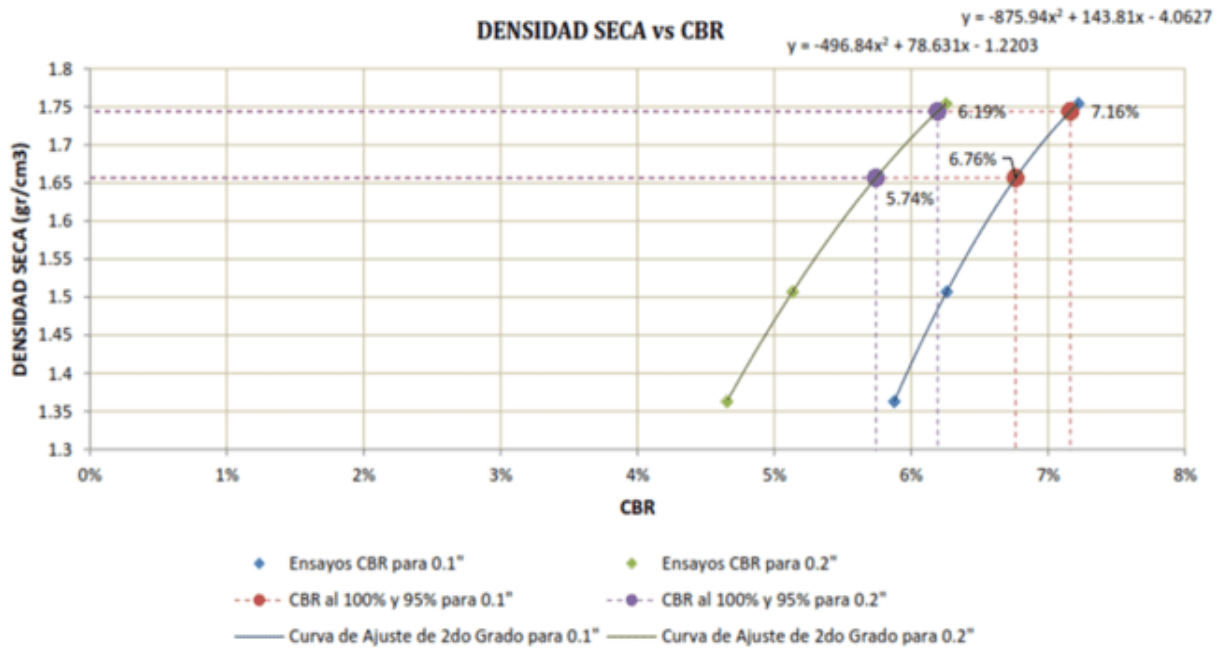


Tabla 54: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 4% de Cal - MTC E 132.

CORRECCIONES	ESPÉCIMEN - 1			ESPÉCIMEN - 2			ESPÉCIMEN - 3			
	Carga Unitaria Patrón	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi
	kg/cm ²	mm	kg/cm ²	%	mm	kg/cm ²	%	mm	kg/cm ²	%
	70.31	2.54	5.08	7.22%	2.54	4.4	6.26%	2.54	4.13	5.88%
	105.46	5.08	6.6	6.25%	5.08	5.41	5.13%	5.08	4.91	4.65%



Figura 71: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 4% cal



N° de Golpes	CBR		Densidad Seca Máxima
	0.1"	0.2"	
55	7.22%	6.25%	1.75 gr/cm ³
26	6.26%	5.13%	1.51 gr/cm ³
12	5.88%	4.65%	1.36 gr/cm ³

		0.1"	0.2"
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)	1.74	7.16%	6.19%
95% de la DSM (gr/cm ³)	1.66	6.76%	5.74%

Tabla 55: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 7% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2		ESPÉCIMEN 3	
N° de Golpes por Capa	55		26		12	
Características de la Muestra	Conte. Hum. Óptimo	Conte. Hum. Saturada	Conte. Hum. Óptimo	Conte. Hum. Saturada	Conte. Hum. Óptimo	Conte. Hum. Saturada
Ubicación del Contend. de Humedad	Medio	Arriba	Medio	Arriba	Medio	Arriba
Masa de la lata (gr)	14.05	19.29	19.21	19.24	15.71	18.5
Masa de la lata + Espécimen Húmeda (gr)	83.71	74.88	114.85	84.92	94.57	80.45
Masa de la lata + Espécimen Seca (gr)	76.42	66.26	104.87	75.21	86.38	70.66
Masa del Agua (gr)	7.29	8.62	9.98	9.71	8.19	9.79
Masa del Espécimen Seca (gr)	62.37	46.97	85.66	55.97	70.67	52.16
Contenido de Humedad	11.68%	18.35%	11.65%	17.35%	11.59%	18.77%
Porcentaje (%) de Absorción	-	6.67%	-	5.70%	-	7.18%
Masa del cilindro (gr)	7256		7115		7868	
Masa del cilindro + Espécimen Húmedo (gr)	11520	11698	10690	11677	11165	12242
Masa de la Espécimen Húmeda (gr)	4264	4442	3575	4562	3297	4374
Masa de la Espécimen Seca (gr)	3818.04		3201.95		2954.59	
Masa del Agua Absorbida (gr)	-	178	-	987	-	1077
Porcentaje (%) de Absorción	-	4.66%	-	30.82%	-	36.45%
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	2.01	2.07	1.68	2.11	1.55	2.01
Peso específico Seco (gr/cm³)	1.80	1.78	1.51	1.48	1.39	1.36

Tabla 56: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 7% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE EXPANSIÓN													
ESPÉCIMEN		ESPÉCIMEN 1			ESPÉCIMEN 2			ESPÉCIMEN 3					
Días	Tiempo Transcurrido	Dial	Deformac	% de	Dial	Deformac	% de	Dial	Deformac	% de	Dial	Deformac	% de
0	0 h 00 min	0	0	0.000	0.00%	0	0	0.000	0.00%	0	0	0.000	0.00%
0.0625	1 h 30 min	4.5	0.0045	0.114	0.10%	11.5	0.0115	0.292	0.25%	32.5	0.0325	0.826	0.71%
0.125	3 h 00 min	10.5	0.0105	0.267	0.23%	17.5	0.0175	0.445	0.38%	59.5	0.0595	1.511	1.30%
0.25	6 h 00 min	12.5	0.0125	0.318	0.27%	33.5	0.0335	0.851	0.73%	85.5	0.0855	2.172	1.87%
0.5	12 h 00 min	16.5	0.0165	0.419	0.36%	49.5	0.0495	1.257	1.08%	99.5	0.0995	2.527	2.17%
1	24 h 00 min	27.5	0.0275	0.699	0.60%	69.5	0.0695	1.765	1.52%	110.5	0.1105	2.807	2.41%
2	48 h 00 min	34.5	0.0345	0.876	0.75%	74.5	0.0745	1.892	1.63%	115.5	0.1155	2.934	2.52%
4	96 h 00 min	42.5	0.0425	1.08	0.93%	79.5	0.0795	2.019	1.73%	119.5	0.1195	3.035	2.61%

Figura 72: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 7% de Cemento

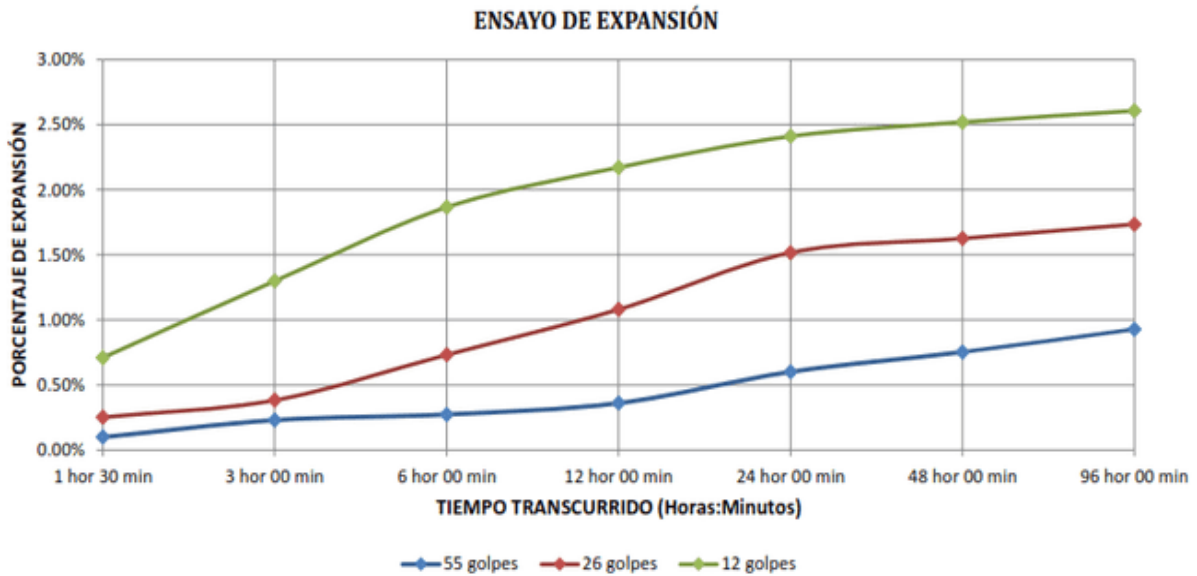


Tabla 57: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 7% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE PENETRACIÓN

ESPÉCIMEN		ESPÉCIMEN 1					ESPÉCIMEN 2					ESPÉCIMEN 3				
Carga Unitaria Patrón (kg/cm ²)	Dial	Penetración	Fuerza Esfuerzo CBR			Fuerza Esfuerzo CBR			Fuerza Esfuerzo CBR							
	*0.001"	mm	Dial	kg	kg/cm ²	%	Dial	kg	kg/cm ²	%	Dial	kg	kg/cm ²	%		
	0	0.000	0	0	0.00		0	0.00	0		0	0.00	0.00			
	25	0.635	16	49.24	2.54		14.5	44.34	2.29		14	42.7	2.21			
	50	1.270	19	59.04	3.05		17	52.51	2.71		15	45.97	2.38			
	75	1.905	21	65.58	3.39		18	55.77	2.88		16	49.24	2.54			
70.31	100	2.540	23	72.12	3.73	5.30%	19	59.04	3.05	4.34%	17.4	53.81	2.78	3.95%		
	125	3.175	25	78.65	4.06		20.5	63.95	3.30		18.4	57.08	2.95			
	150	3.810	27	85.19	4.40		22	68.85	3.56		19.8	61.66	3.19			
105.46	200	5.080	32	101.53	5.25	4.97%	25	78.65	4.06	3.85%	22	68.85	3.56	3.37%		
	300	7.620	42	134.21	6.93		30	94.99	4.91		26	81.92	4.23			
	400	10.160	54	173.43	8.96		34	108.06	5.58		29	91.72	4.74			
	500	12.700	67	215.91	11.16		40	127.67	6.60		33	104.8	5.41			



Figura 73: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 7% Cemento

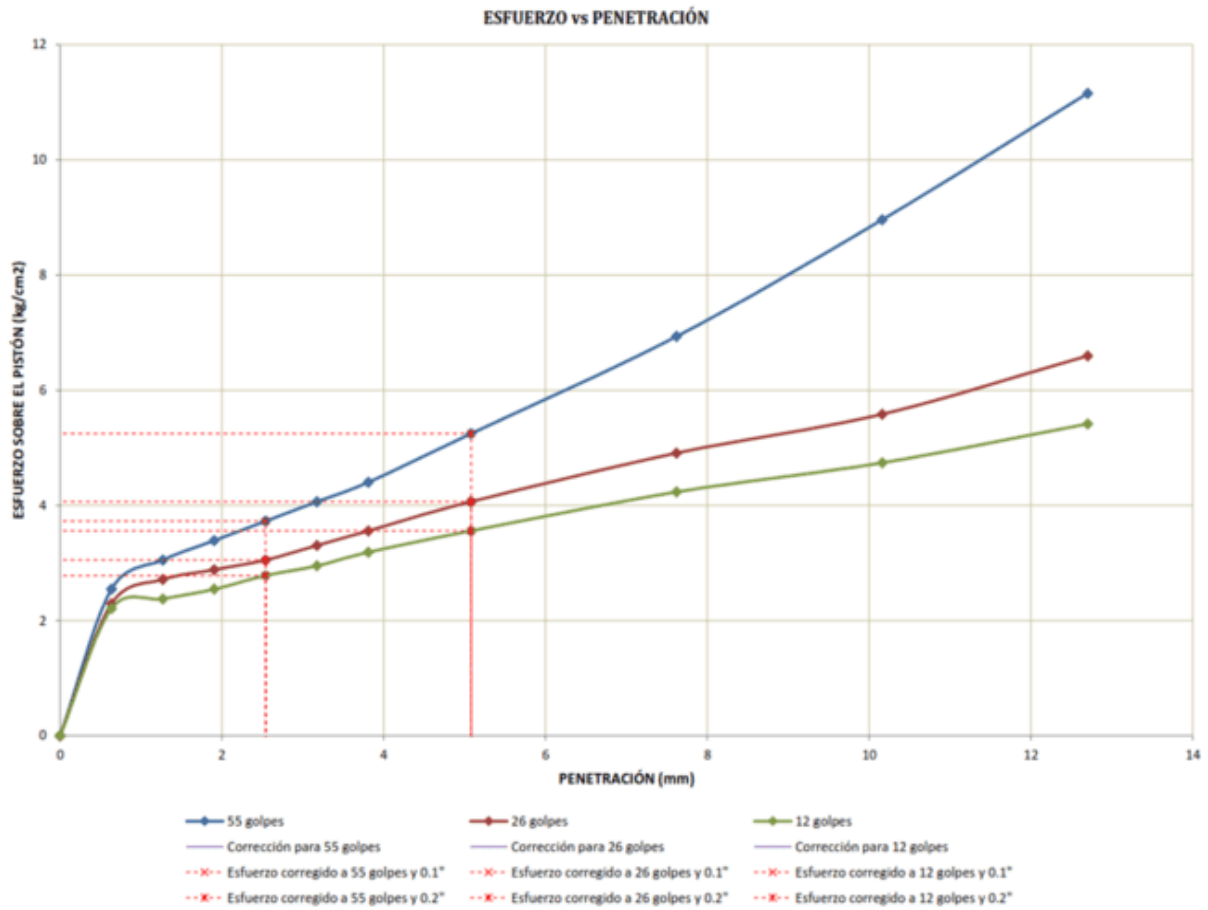
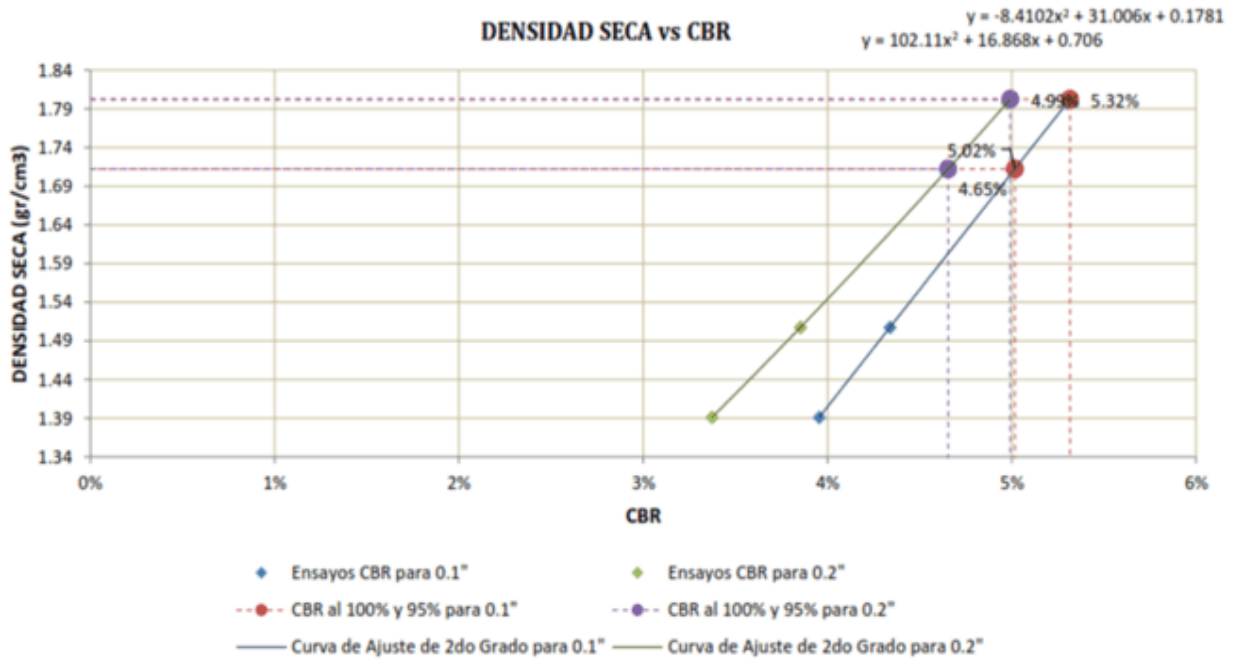


Tabla 58: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 7% de Cemento - MTC E 132.

CORRECCIONES	ESPÉCIMEN - 1			ESPÉCIMEN - 2			ESPÉCIMEN - 3			
	Carga Unitaria Patrón	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi
	kg/cm ²	mm	kg/cm ²	%	mm	kg/cm ²	%	mm	kg/cm ²	%
	70.31	2.54	3.73	5.30%	2.54	3.05	4.34%	2.54	2.78	3.95%
	105.46	5.08	5.25	4.97%	5.08	4.06	3.85%	5.08	3.56	3.37%



Figura 74: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 7% Cemento



N° de Golpes	CBR		Densidad Seca Máxima
	0.1"	0.2"	
55	5.30%	4.97%	1.80 gr/cm ³
26	4.34%	3.85%	1.51 gr/cm ³
12	3.95%	3.37%	1.39 gr/cm ³

Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)	1.80
95% de la DSM (gr/cm ³)	1.71

	0.1"	0.2"
CBR al 100% de la DSM	5.32%	4.99%
CBR al 95% de la DSM	5.02%	4.65%

Tabla 59: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 9% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2		ESPÉCIMEN 3	
N° de Golpes por Capa	55		26		12	
Características de la Muestra	Conte. Hum Óptimo	Saturada	Conte. Hum Óptimo	Saturada	Conte. Hum Óptimo	Saturada
Ubicación del Contend. de Humedad	Medio	Arriba	Medio	Arriba	Medio	Arriba
Masa de la lata (gr)	14.25	19.29	19.31	19.24	15.75	18.5
Masa de la lata + Espécimen Húmeda (g)	83.37	74.88	115.27	84.92	94.8	80.45
Masa de la lata + Espécimen Seca (gr)	75.98	66.26	105.03	75.21	86.38	70.66
Masa del Agua (gr)	7.39	8.62	10.24	9.71	8.42	85.53
Masa del Espécimen Seca (gr)	61.73	46.97	85.72	55.97	70.63	52.16
Contenido de Humedad	11.97%	18.35%	11.95%	17.35%	11.92%	163.98%
Porcentaje (%) de Absorción	-	6.38%	-	5.40%	-	152.05%
Masa del cilindro (gr)	7236		7117		7858	
Masa del cilindro + Espécimen Húmedo (gr)	11265	11698	10439	11677	11015	12242
Masa de la Espécimen Húmeda (gr)	4029	4462	3322	4560	3157	4384
Masa de la Espécimen Seca (gr)	3598.24		2967.51		2820.73	
Masa del Agua Absorbida (gr)	-	433	-	1238	-	1227
Porcentaje (%) de Absorción	-	12.03%	-	41.72%	-	43.50%
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	1.90	2.08	1.56	2.11	1.49	2.01
Peso específico Seco (gr/cm³)	1.69	1.68	1.40	1.37	1.33	1.30

Tabla 60: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 9% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE EXPANSIÓN													
ESPÉCIMEN		ESPÉCIMEN 1				ESPÉCIMEN 2				ESPÉCIMEN 3			
Días	Tiempo Transcurrido HH:MM	Dial *0.001"	Deformac		% de Expan.	Deformac		% de Expan.	Dial *0.001"	Deformac		% de Expan.	
			Pulg.	mm		Pulg.	mm			Pulg.	mm		
0	0 h 00 min	0	0	0.000	0.00%	0	0	0.000	0.00%	0	0	0.000	0.00%
0.0625	1 h 30 min	2	0.002	0.051	0.04%	9	0.009	0.229	0.20%	30	0.03	0.762	0.65%
0.125	3 h 00 min	8	0.008	0.203	0.17%	15	0.015	0.381	0.33%	57	0.057	1.448	1.24%
0.25	6 h 00 min	10	0.01	0.254	0.22%	31	0.031	0.787	0.68%	83	0.083	2.108	1.81%
0.5	12 h 00 min	14	0.014	0.356	0.31%	47	0.047	1.194	1.03%	97	0.097	2.464	2.12%
1	24 h 00 min	25	0.025	0.635	0.55%	67	0.067	1.702	1.46%	108	0.108	2.743	2.36%
2	48 h 00 min	32	0.032	0.813	0.70%	72	0.072	1.829	1.57%	113	0.113	2.87	2.47%
4	96 h 00 min	40	0.04	1.016	0.87%	77	0.077	1.956	1.68%	117	0.117	2.972	2.55%



Figura 75: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 9% de Cemento

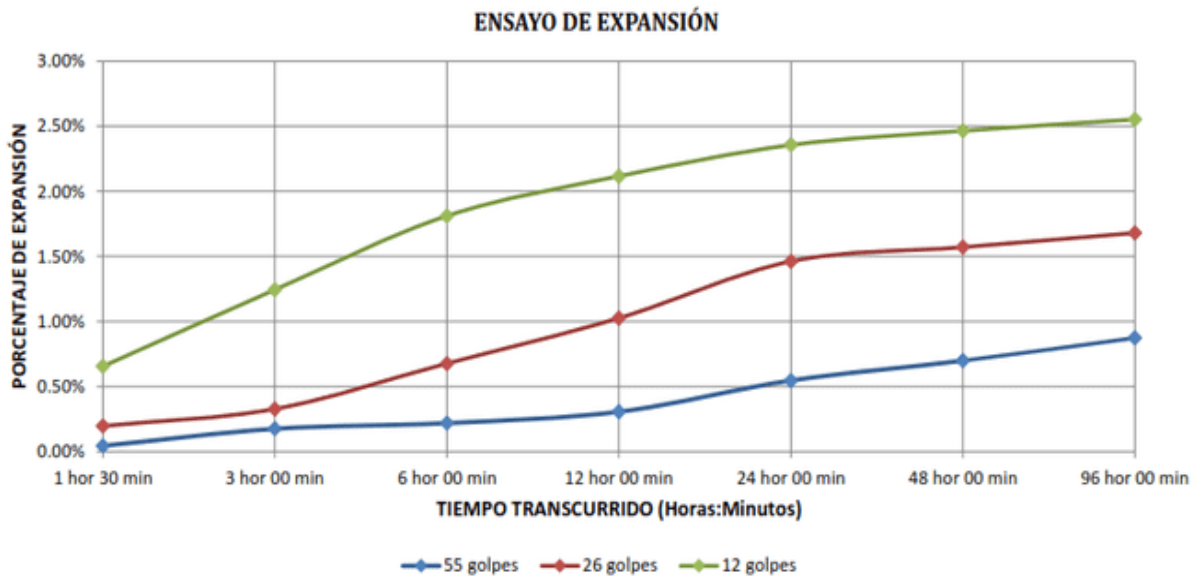


Tabla 61: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 9% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE PENETRACIÓN													
ESPÉCIMEN			ESPÉCIMEN 1				ESPÉCIMEN 2				ESPÉCIMEN 3		
Carga Unitaria Patrón (kg/cm ²)	Dial *0.001"	Penetración mm	Fuerz kg	Esfuerzo kg/cm ²	CBR %	Fuerz kg	Esfuerzo kg/cm ²	CBR %	Fuerz kg	Esfuerzo kg/cm ²	CBR %		
0	0	0.000	0	0.00		0	0.00	0	0	0.00			
25	25	0.635	78.65	4.06		23.5	73.75	3.81	21	65.58	3.39		
50	28	1.270	88.46	4.57		26	81.92	4.23	22	68.85	3.56		
75	30	1.905	94.99	4.91		27	85.19	4.4	23	72.12	3.73		
70.31	32	2.540	101.53	5.25	7.46%	28	88.46	4.57	24.4	76.69	3.96	5.64%	
125	34	3.175	108.06	5.58		29.5	93.36	4.82	25.4	79.96	4.13		
150	36	3.810	114.6	5.92		31	98.26	5.08	26.8	84.53	4.37		
105.46	41	5.080	130.94	6.77	6.42%	34	108.06	5.58	29	91.72	4.74	4.49%	
300	51	7.620	163.62	8.45		39	124.4	6.43	33	104.8	5.41		
400	63	10.160	202.84	10.48		43	137.48	7.1	36	114.6	5.92		
500	76	12.700	245.32	12.68		49	157.09	8.12	40	127.67	6.6		



Figura 76: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 9% Cemento

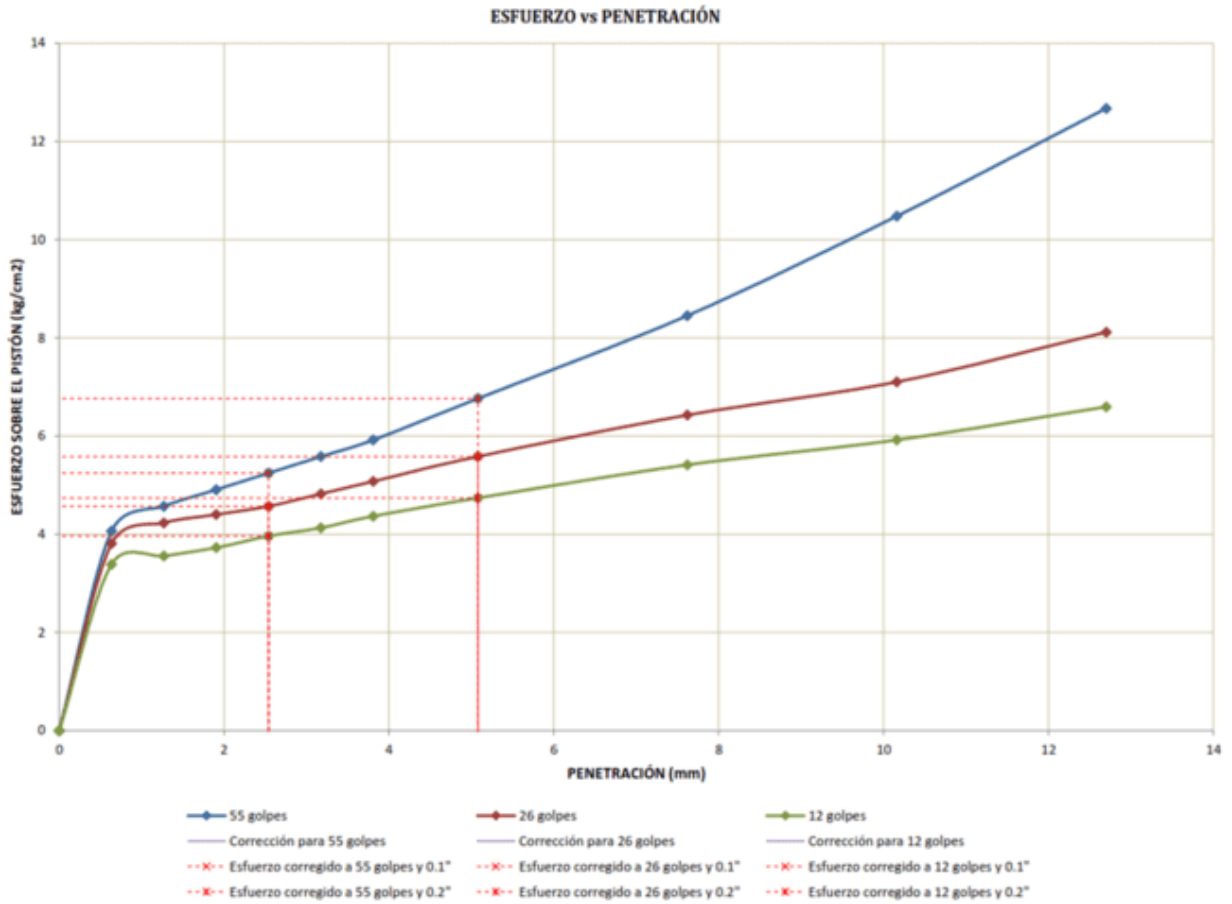
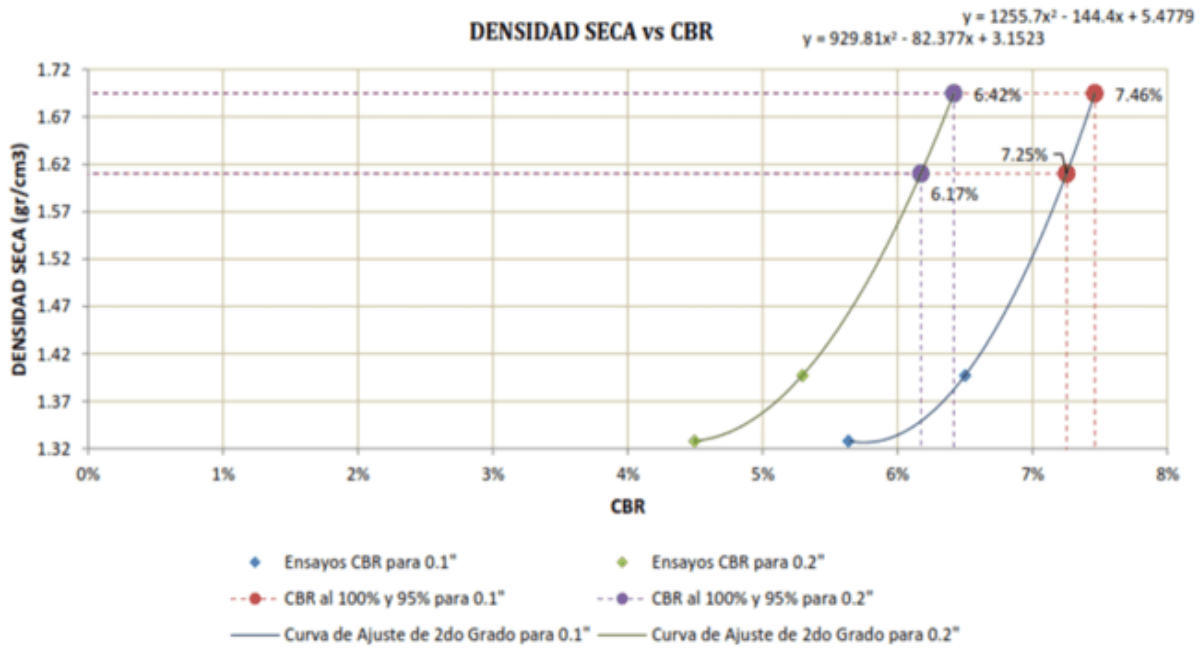


Tabla 62: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 9% de Cemento - MTC E 132.

CORRECCIONES	ESPÉCIMEN - 1			ESPÉCIMEN - 2			ESPÉCIMEN - 3			
	Carga Unitaria Patrón	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi
	kg/cm²	mm	kg/cm²	%	mm	kg/cm²	%	mm	kg/cm²	%
	70.31	2.54	5.25	7.46%	2.54	4.57	6.50%	2.54	3.96	5.64%
	105.46	5.08	6.77	6.42%	5.08	5.58	5.29%	5.08	4.74	4.49%



Figura 77: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 9% Cemento



N° de Golpes	CBR		Densidad Seca Máxima
	0.1"	0.2"	
55	7.46%	6.42%	1.69 gr/cm ³
26	6.50%	5.29%	1.40 gr/cm ³
12	5.64%	4.49%	1.33 gr/cm ³

Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)	1.69
95% de la DSM (gr/cm ³)	1.61

	0.1"	0.2"
CBR al 100% de la DSM	7.46%	6.42%
CBR al 95% de la DSM	7.25%	6.17%

Tabla 63: Ensayo de Compactación de Suelo Natural + 11% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN 1		ESPÉCIMEN 2		ESPÉCIMEN 3	
N° de Golpes por Capa	55		26		12	
Características de la Muestra	Conte. Hum ^o Óptimo	Saturada	Conte. Hum ^o Óptimo	Saturada	Conte. Hum ^o Óptimo	Saturada
Ubicación del Contend. de Humedad	Medio	Arriba	Medio	Arriba	Medio	Arriba
Masa de la lata (gr)	14.35	19.29	20.31	19.24	15.85	18.5
Masa de la lata + Espécimen Húmeda (gr)	82.94	74.88	115.49	84.92	94.23	80.45
Masa de la lata + Espécimen Seca (gr)	76.12	66.26	106.07	75.21	86.51	70.66
Masa del Agua (gr)	6.82	8.62	9.42	9.71	7.72	85.53
Masa del Espécimen Seca (gr)	61.77	46.97	85.76	55.97	70.66	52.16
Contenido de Humedad	11.04%	18.35%	10.98%	17.35%	10.93%	163.98%
Porcentaje (%) de Absorción	-	7.31%	-	6.36%	-	153.05%
Masa del cilindro (gr)	7242		7135		7823	
Masa del cilindro + Espécimen Húmedo (gr)	11085	11698	10658	11677	10965	12242
Masa de la Espécimen Húmeda (gr)	3843	4456	3523	4542	3142	4419
Masa de la Espécimen Seca (gr)	3460.89		3174.33		2832.53	
Masa del Agua Absorbida (gr)	-	613	-	1019	-	1277
Porcentaje (%) de Absorción	-	17.71%	-	32.10%	-	45.08%
Peso específico húmedo (gr/cm ³)	1.81	2.08	1.66	2.10	1.48	2.03
Peso específico Seco (gr/cm³)	1.63	1.62	1.49	1.47	1.33	1.30

Tabla 64: Ensayo de Expansión de Suelo Natural + 11% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE EXPANSIÓN												
ESPÉCIMEN	ESPÉCIMEN 1				ESPÉCIMEN 2				ESPÉCIMEN 3			
Tiempo Transcurrido	Dial	Deformac	% de	Expan.	Dial	Deformac	% de	Expan.	Dial	Deformac	% de	Expan.
Días HH:MM	*0.001"	Pulg. mm			*0.001"	Pulg. mm			*0.001"	Pulg. mm		
0 0 h 00 min	0	0	0.000	0.00%	0	0	0.000	0.00%	0	0	0.000	0.00%
0.06251 h 30 min	0	0	0	0.00%	6	0.006	0.152	0.13%	27	0.027	0.686	0.59%
0.125 3 h 00 min	5	0.005	0.127	0.11%	12	0.012	0.305	0.26%	54	0.054	1.372	1.18%
0.25 6 h 00 min	7	0.007	0.178	0.15%	28	0.028	0.711	0.61%	80	0.08	2.032	1.75%
0.5 12 h 00 min	11	0.011	0.279	0.24%	44	0.044	1.118	0.96%	94	0.094	2.388	2.05%
1 24 h 00 min	22	0.022	0.559	0.48%	64	0.064	1.626	1.40%	105	0.105	2.667	2.29%
2 48 h 00 min	29	0.029	0.737	0.63%	69	0.069	1.753	1.51%	110	0.11	2.794	2.40%
4 96 h 00 min	37	0.037	0.940	0.81%	74	0.074	1.880	1.61%	114	0.114	2.896	2.49%

Figura 78: Ensayo de Expansión - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 11% de Cemento

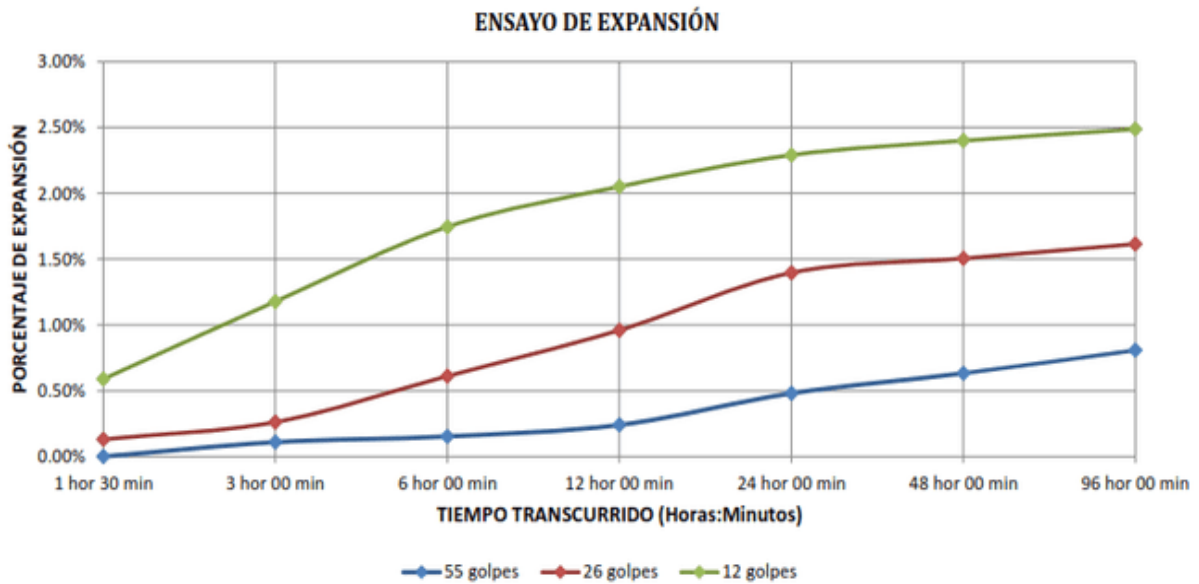


Tabla 65: Ensayo de Penetración de Suelo Natural + 11% de Cemento para CBR, MTC E 132, según AASHTO T – 193 y ASTM D – 1883

ENSAYO DE PENETRACIÓN

ESPÉCIMEN		ESPÉCIMEN 1					ESPÉCIMEN 2					ESPÉCIMEN 3				
Carga Unitaria Patrón (kg/cm ²)	Dial *0.001"	Penetración mm	Fuerza			Dial	Fuerza			Dial	Fuerza					
			kg	kg/cm ²	%		kg	kg/cm ²	%		kg	kg/cm ²	%			
	0	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00				
	25	0.635	40	127.67	6.6	38.5	122.77	6.34	36	114.6	5.92					
	50	1.270	43	137.48	7.1	41	130.94	6.77	37	117.87	6.09					
	75	1.905	45	144.01	7.44	42	134.21	6.93	38	121.14	6.26					
70.31	100	2.540	47	150.55	7.78	11.06%	43	137.48	7.1	10.10%	39.4	125.71	6.5	9.24%		
	125	3.175	49	157.09	8.12		44.5	142.38	7.36		40.4	128.98	6.66			
	150	3.810	51	163.62	8.45		46	147.28	7.61		41.8	133.56	6.9			
105.46	200	5.080	56	179.96	9.3	8.82%	49	157.09	8.12	7.70%	44	140.75	7.27	6.90%		
	300	7.620	66	212.64	10.99		54	173.43	8.96		48	153.82	7.95			
	400	10.160	78	251.86	13.01		58	186.5	9.64		51	163.62	8.45			
	500	12.700	91	294.35	15.21		64	206.11	10.65		55	176.69	9.13			



Figura 79: Relación Esfuerzo - Penetración de la Muestra Natural + 11% Cemento

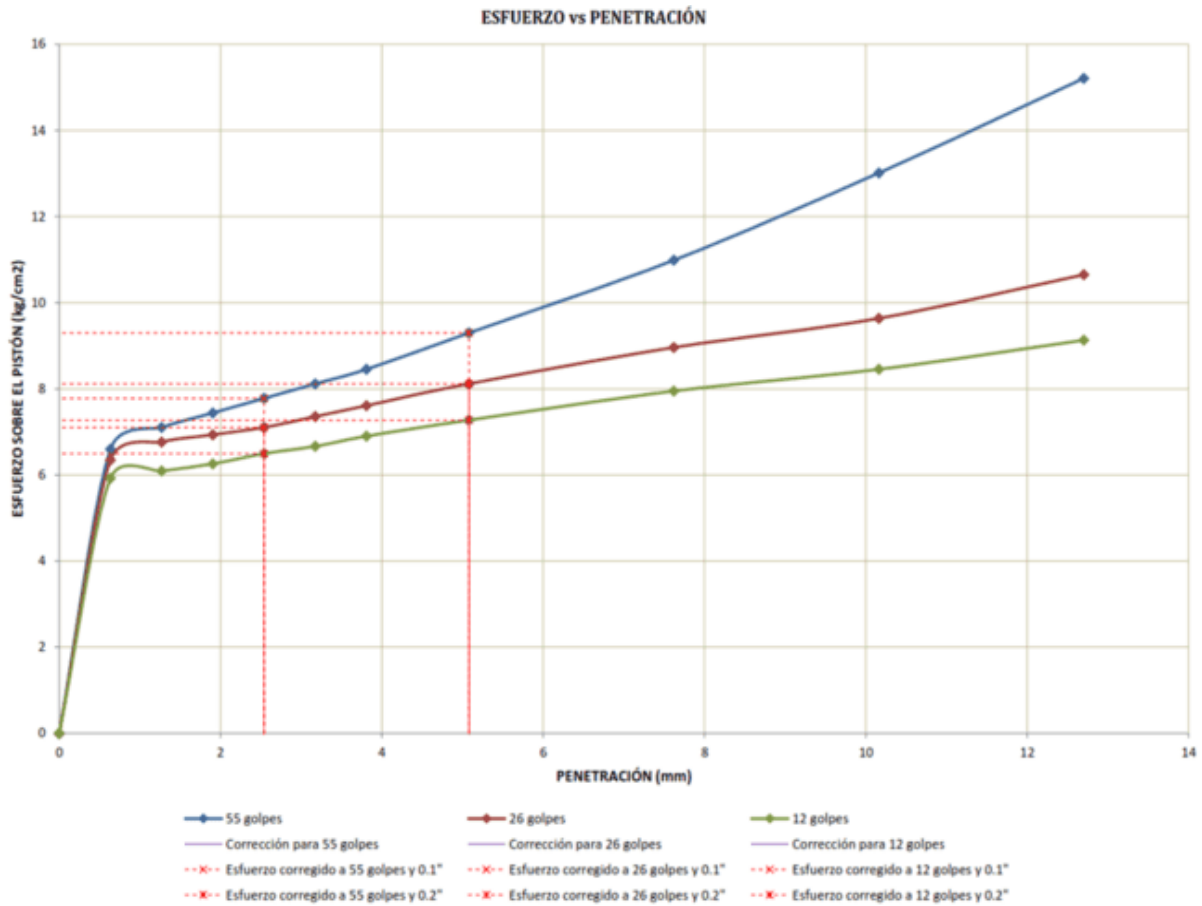
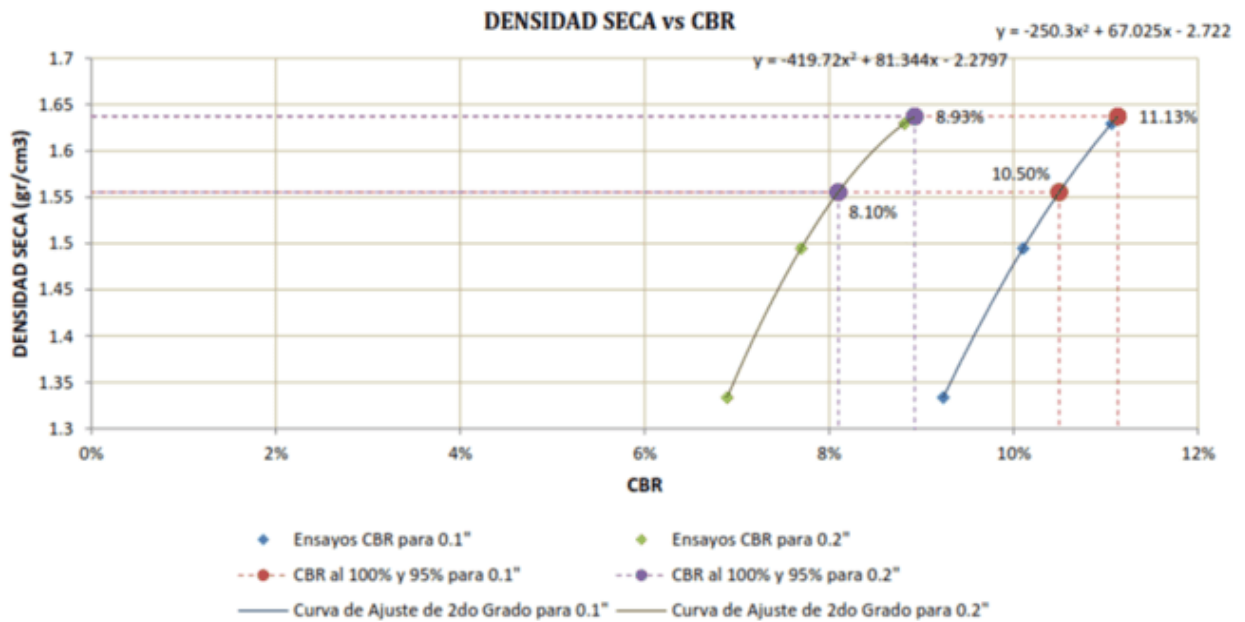


Tabla 66: Esfuerzo – Penetración de la Muestra Natural + 11% de Cemento - MTC E 132.

CORRECCIONES	ESPÉCIMEN - 1			ESPÉCIMEN - 2			ESPÉCIMEN - 3		
	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi	Penetrac Corregi	Esfuerzo Corregi	CBR Corregi
kg/cm ²	mm	kg/cm ²	%	mm	kg/cm ²	%	mm	kg/cm ²	%
70.31	2.54	7.78	11.06%	2.54	7.1	10.10%	2.54	6.5	9.24%
105.46	5.08	9.3	8.82%	5.08	8.12	7.70%	5.08	7.27	6.90%



Figura 80: Densidad Seca - California Bearing Ratio (CBR) de la Muestra Natural + 11% Cemento



N° de Golpes	CBR		Densidad Seca Máxima
	0.1"	0.2"	
55	11.06%	8.82%	1.63 gr/cm ³
26	10.10%	7.70%	1.49 gr/cm ³
12	9.24%	6.90%	1.33 gr/cm ³

		0.1"	0.2"
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)	1.64	11.13%	8.93%
95% de la DSM (gr/cm ³)	1.56	10.50%	8.10%

3.6.4.3. Análisis de la prueba de CBR del suelo

El ensayo de suelo CBR consiste principalmente en compactar el suelo mediante una carga que se debe aplicar a una prensa circular de 19,35 cm² para introducirla en la muestra de suelo hasta conseguir una penetración de 2,54 mm.

Del análisis del proceso de investigación, se puede destacar lo siguiente:

Para las compactaciones 12, 25 y 56 golpes, se muestra un incremento en el valor de la resistencia relativa de soporte (CBR), lo que indica que con la adición de la cal mejora la resistencia del suelo.



Para el análisis correspondiente a la prueba CBR se tomaron en cuenta valores absolutos. El valor de CBR del suelo ensayado tiene un índice muy bajo, inferior al 6%, debido a la falta de grava. En los siguientes ensayos se añadieron cal en 2 y 4% y en cuanto al cemento en 7; 9 y 11 % respectivamente, dando como resultado una mayor fricción, y por tanto una mayor resistencia al CBR.

De acuerdo a la norma ASTM D-1883 se establece que el ensayo de CBR estandarizado, nos señala que el valor del CBR del suelo se considera el menor valor de los niveles (diales) de penetración (0,1 o 0,2 pulgadas) del 95% de la densidad seca máxima.

Según los resultados mostrados en las tablas y graficas en el numeral 3.6.4.2. según la norma ASTM D-1883, para el análisis se debe tomar en consideración la gráfica de densidad seca máxima asociado a CBR. En la tabla de resumen se presenta los resultados de soporte CBR para el suelo natural y con adición de cal o cemento en distintas proporciones.

Tabla 67: Resumen de los Resultados de CBR en Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento

Ensayo	95% de la DSM (gr/cm ³)	CBR		CBR al 95% de la DSM
		0.1"	0.2"	
Suelo natural	1.77	3.10%	3.32%	3.10%
Suelo + 2% de cal	1.71	4.77%	4.25%	4.25%
Suelo + 4% de cal	1.66	6.76%	5.74%	5.74%
Suelo + 7% de cemento	1.71	5.02%	4.65%	4.65%
Suelo + 9% de cemento	1.61	7.25%	6.17%	6.17%
Suelo + 11% de cemento	1.56	10.50%	8.10%	8.10%

3.6.5. Prueba de laboratorio de compresión inconfiada del suelo

3.6.5.1. Procedimiento o cálculo de compresión inconfiada del suelo

Para proceder con los cálculos del ensayo de la compresión no confinada en concordancia con la Norma ASTM D-2166 y AASHTO T-208, primero consignamos las dimensiones de la muestra: el diámetro tiene un valor de 53,7 mm, la altura 137,7 mm, el área 22,65 cm² y el volumen 311.87 cm³; también se considera la densidad de la muestra, cuya masa es de 621,20 gr, el contenido porcentual de humedad es 9,36%, el peso unitario húmedo es de 1,99 gr/cm³ y el peso unitario seco 1,82 gr/cm³.



Para calcular los resultados del ensayo se aplicaron las siguientes ecuaciones:

La deformación unitaria (ε) se calcula, según la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde:

- ε : Deformación axial unitaria para una carga dada,
- ΔL : Variación de la longitud de la muestra, es la diferencia entre las medidas tensión final e inicial del indicador de deformación, mm (pulgada.), y
- L_0 : longitud inicial de la muestra, medida en mm (pulgada).

Calcule la sección transversal media de la muestra A, para una carga dada de la siguiente manera:

$$A = \frac{A_0}{(1 - \varepsilon)}$$

Donde:

- ε : Deformación axial unitaria para una carga dada,
- A_0 : Es el área inicial media de la probeta.

$$A_0 = \frac{(A_t + 2A_m + A_b)}{4}$$

- A_t : Es el área de la parte superior de la probeta,
- A_m : Es el área de la parte media de la probeta y
- A_b : Es el área de la parte inferior de la probeta.

Para el cálculo del esfuerzo normal (σ):

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde P es carga aplicada (kPa; kg/cm²), A es área de sección transversal media

Índice de Sensibilidad (S)

$$St = \frac{qu(\text{Material inalterado})}{qu(\text{Material Alterado})}$$



Los datos como resultado de los cálculos con el apoyo de la hoja de cálculo Excel, se recopila en el formato (instrumento) correspondiente y asimismo se representa gráficamente para su mejor visualización.

Los resultados de los cálculos hallados en cada una de las ecuaciones y para cada caso, los datos encontrados se registran en los formatos de compresión inconfiada, previamente presentado en el acápite de instrumentos de investigación. Y con ayuda de Microsoft Excel se procede a presentar en tablas y con sus respectivas gráficas, que permite una observación para su análisis correspondiente.

3.6.5.2. Diagramas, tablas de compresión inconfiada del suelo

En este apartado se presentan los resultados de compresión inconfiada del suelo natural y la adición de cal o cemento en diferentes proporciones para conocer las propiedades y características del suelo.

Tabla 68: Ensayo de la Compresión Inconfiada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo Natural

Deformímetro de longitud	Deformímetro de carga	Carga total sobre la muestra	Deformación de la muestra ΔL	Deformación unitaria $\Delta L/L_0$	Factor de corrección de área $1 - \Delta L/L_0$	Área corregida A'	Esfuerzo sobre la muestra
	M-01						M-01
* 0.01 mm	*0.419 kg	kg	mm			cm ²	kg/cm ²
10	2	0.84	0.1	0.001	0.999	22.66	0.04
20	3.5	1.47	0.2	0.001	0.999	22.68	0.06
30	6	2.51	0.3	0.002	0.998	22.7	0.11
40	8.5	3.56	0.4	0.003	0.997	22.71	0.16
50	10	4.19	0.5	0.004	0.996	22.73	0.18
60	12.5	5.23	0.6	0.004	0.996	22.75	0.23
70	15.5	6.49	0.7	0.005	0.995	22.76	0.29
80	18	7.53	0.8	0.006	0.994	22.78	0.33
90	22.4	9.38	0.9	0.007	0.993	22.8	0.41
100	25	10.46	1	0.007	0.993	22.81	0.46
125	28.6	11.97	1.25	0.009	0.991	22.86	0.52
150	31	12.98	1.5	0.011	0.989	22.9	0.57
175	34.5	14.44	1.75	0.013	0.987	22.94	0.63
200	37.5	15.7	2	0.015	0.985	22.98	0.68
250	40	16.74	2.5	0.018	0.982	23.07	0.73



300	43.3	18.12	3	0.022	0.978	23.15	0.78
350	46	19.25	3.5	0.025	0.975	23.24	0.83
400	49.4	20.68	4	0.029	0.971	23.33	0.89
450	52	21.77	4.5	0.033	0.967	23.41	0.93
500	55.5	23.23	5	0.036	0.964	23.5	0.99
600	58	24.28	6	0.044	0.956	23.68	1.03
700	61.2	25.62	7	0.051	0.949	23.86	1.07
800	64	26.79	8	0.058	0.942	24.05	1.11
900	67.6	28.3	9	0.065	0.935	24.23	1.17
1000	70	29.3	10	0.073	0.927	24.42	1.2
1100	73.5	30.77	11	0.08	0.92	24.61	1.25
1200	75.3	31.52	12	0.087	0.913	24.81	1.27
1300	77.4	32.4	13	0.094	0.906	25.01	1.3
1400	77.9	32.61	14	0.102	0.898	25.21	1.29
1500	78	32.65	15	0.109	0.891	25.42	1.28
1600	78	32.65	16	0.116	0.884	25.63	1.27
1700	78	32.65	17	0.123	0.877	25.84	1.26
1800	78	32.65	18	0.131	0.869	26.05	1.25

Figura 81: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo Natural

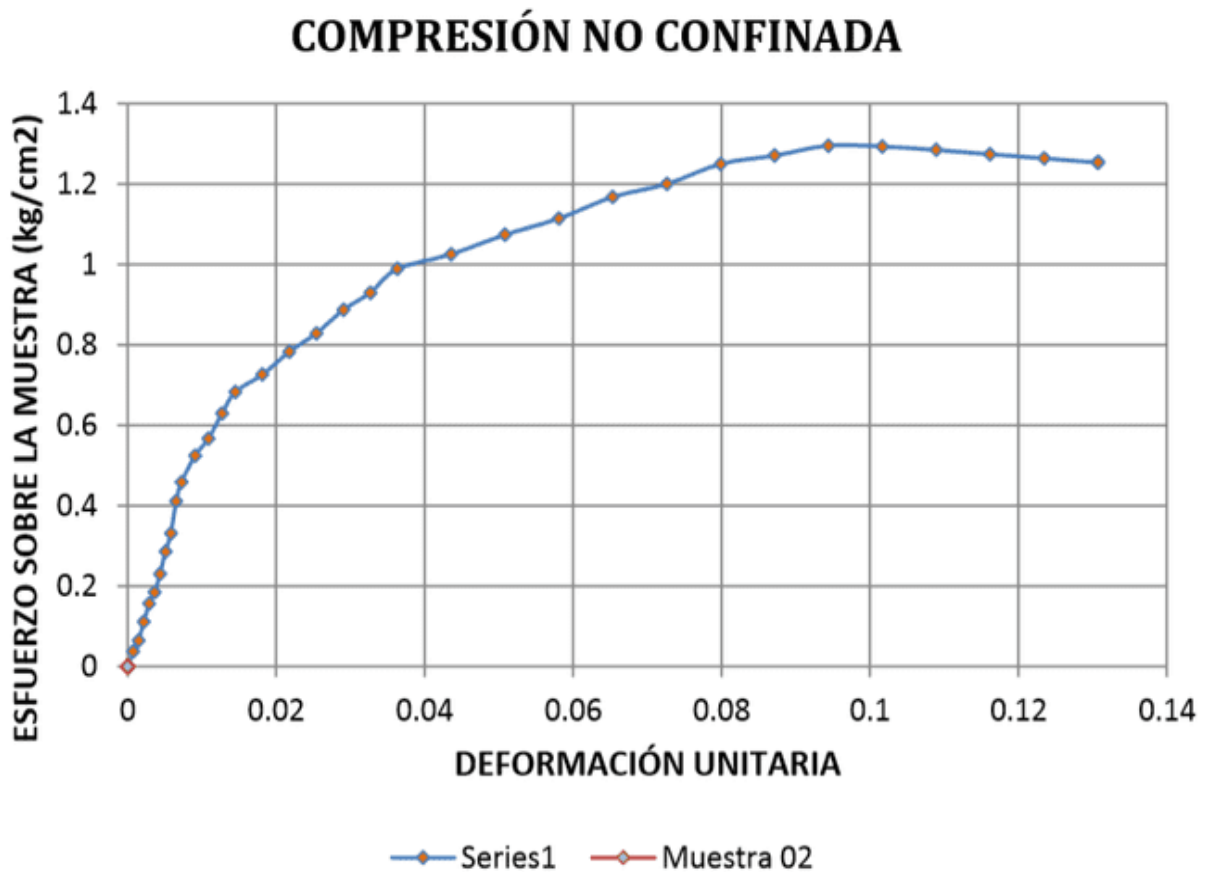




Tabla 69: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 2% Cal

Deformímetro de longitud	Deformímetro de carga	Carga total sobre la muestra	Deformación de la muestra ΔL	Deformación unitaria $\Delta L/L_0$	Factor de corrección de área $1 - \Delta L/L_0$	Área corregida A'	Esfuerzo sobre la muestra
	M-01	M-01					M-01
* 0.01 mm	*0.419 kg	kg	mm			cm2	kg/cm2
10	1.2	0.5	0.1	0.001	0.999	22.33	0.02
20	3.9	1.63	0.2	0.001	0.999	22.34	0.07
30	5.8	2.43	0.3	0.002	0.998	22.36	0.11
40	7.9	3.31	0.4	0.003	0.997	22.38	0.15
50	9.4	3.93	0.5	0.004	0.996	22.39	0.18
60	11.5	4.81	0.6	0.004	0.996	22.41	0.21
70	13.9	5.82	0.7	0.005	0.995	22.43	0.26
80	17	7.12	0.8	0.006	0.994	22.44	0.32
90	21	8.79	0.9	0.007	0.993	22.46	0.39
100	25	10.46	1	0.007	0.993	22.48	0.47
125	29.3	12.26	1.25	0.009	0.991	22.52	0.54
150	32	13.39	1.5	0.011	0.989	22.56	0.59
175	34.5	14.44	1.75	0.013	0.987	22.6	0.64
200	37.6	15.74	2	0.015	0.985	22.64	0.7
250	42.6	17.83	2.5	0.018	0.982	22.73	0.78
300	44.9	18.79	3	0.022	0.978	22.81	0.82
350	48.6	20.34	3.5	0.025	0.975	22.89	0.89
400	51.6	21.6	4	0.029	0.971	22.98	0.94
450	54.9	22.98	4.5	0.033	0.967	23.07	1
500	58	24.28	5	0.036	0.964	23.15	1.05
600	61	25.53	6	0.044	0.956	23.33	1.09
700	64.8	27.12	7	0.051	0.949	23.51	1.15
800	68	28.46	8	0.058	0.942	23.69	1.2
900	70.2	29.38	9	0.065	0.935	23.87	1.23
1000	73.8	30.89	10	0.073	0.927	24.06	1.28
1100	76	31.81	11	0.08	0.92	24.25	1.31
1200	79	33.07	12	0.087	0.913	24.44	1.35
1300	82.5	34.53	13	0.094	0.906	24.64	1.4
1400	82.5	34.53	14	0.102	0.898	24.84	1.39
1500	82.5	34.53	15	0.109	0.891	25.04	1.38



Figura 82: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con edición de cal 2%

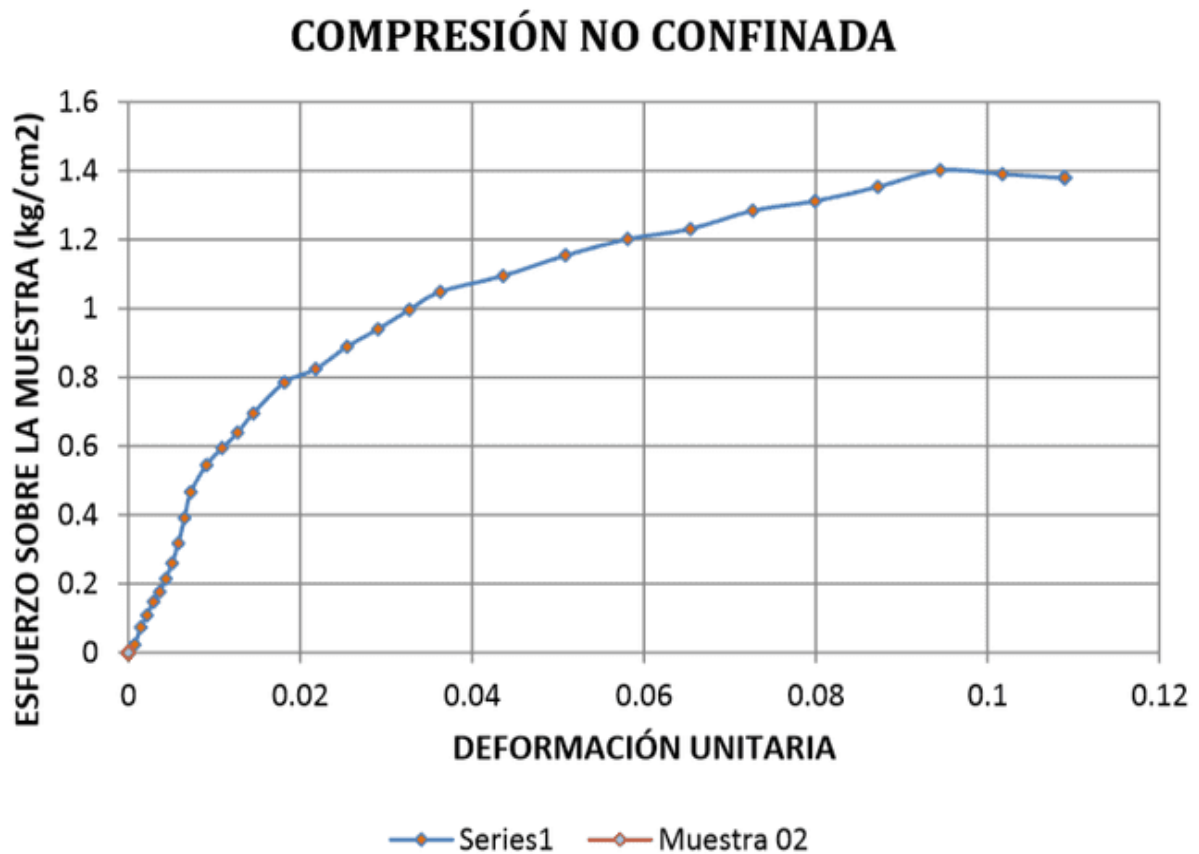


Tabla 70: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 4% Cal

Deformímetro de longitud	Deformímetro de carga	Carga total sobre la muestra	Deformación de la muestra ΔL	Deformación unitaria $\Delta L/L_0$	Factor de corrección de área $1 - \Delta L/L_0$	Área corregida A'	Esfuerzo sobre la muestra
	M-01						M-01
* 0.01 mm	*0.419 kg	kg	mm			cm2	kg/cm2
10	2	0.84	0.1	0.001	0.999	21.55	0.04
20	3	1.26	0.2	0.001	0.999	21.56	0.06
30	6.5	2.72	0.3	0.002	0.998	21.58	0.13
40	10	4.19	0.4	0.003	0.997	21.59	0.19
50	13.5	5.65	0.5	0.004	0.996	21.61	0.26
60	17	7.12	0.6	0.004	0.996	21.63	0.33
70	19.5	8.16	0.7	0.005	0.995	21.64	0.38
80	23	9.63	0.8	0.006	0.994	21.66	0.44
90	26.5	11.09	0.9	0.007	0.993	21.67	0.51
100	30	12.56	1	0.007	0.993	21.69	0.58
125	33	13.81	1.25	0.009	0.991	21.73	0.64
150	36.5	15.28	1.5	0.011	0.989	21.77	0.7



175	39.5	16.53	1.75	0.013	0.987	21.81	0.76
200	42	17.58	2	0.015	0.985	21.85	0.8
250	46.5	19.46	2.5	0.018	0.982	21.93	0.89
300	49	20.51	3	0.022	0.978	22.01	0.93
350	52.5	21.98	3.5	0.025	0.975	22.09	0.99
400	55.9	23.4	4	0.029	0.971	22.18	1.06
450	59.8	25.03	4.5	0.033	0.967	22.26	1.12
500	63	26.37	5	0.036	0.964	22.34	1.18
600	66.1	27.67	6	0.044	0.956	22.51	1.23
700	69.4	29.05	7	0.051	0.949	22.69	1.28
800	72.9	30.51	8	0.058	0.942	22.86	1.33
900	76.8	32.15	9	0.065	0.935	23.04	1.4
1000	80.1	33.53	10	0.073	0.927	23.22	1.44
1100	83	34.74	11	0.08	0.92	23.4	1.48
1200	86.9	36.37	12	0.087	0.913	23.59	1.54
1300	90.4	37.84	13	0.094	0.906	23.78	1.59
1400	90.4	37.84	14	0.102	0.898	23.97	1.58
1500	90.4	37.84	15	0.109	0.891	24.16	1.57

Figura 83: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con edición de cal 4%

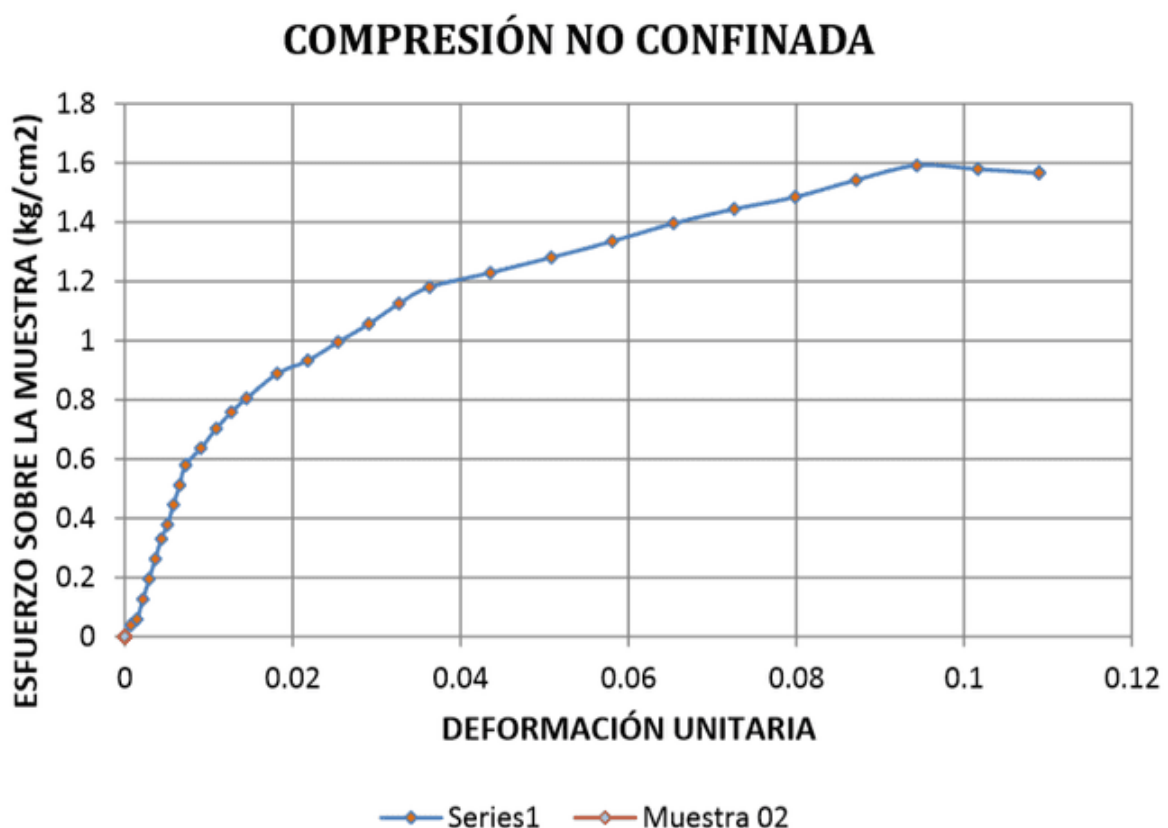




Tabla 71: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 7% Cemento

Deformímetro de longitud	Deformímetro de carga	Carga total sobre la muestra	Deformación de la muestra ΔL	Deformación unitaria $\Delta L/L_0$	Factor de corrección de área $1 - \Delta L/L_0$	Área corregida A'	Esfuerzo sobre la muestra
	M-01	M-01					M-01
* 0.01 mm	*0.419 kg	kg	mm			cm2	kg/cm2
10	1	0.42	0.1	0.001	0.999	22.33	0.02
20	3	1.26	0.2	0.001	0.999	22.34	0.06
30	6.5	2.72	0.3	0.002	0.998	22.36	0.12
40	10	4.19	0.4	0.003	0.997	22.38	0.19
50	13.5	5.65	0.5	0.004	0.996	22.39	0.25
60	17	7.12	0.6	0.004	0.996	22.41	0.32
70	19.5	8.16	0.7	0.005	0.995	22.43	0.36
80	23	9.63	0.8	0.006	0.994	22.44	0.43
90	26.5	11.09	0.9	0.007	0.993	22.46	0.49
100	30	12.56	1	0.007	0.993	22.48	0.56
125	33	13.81	1.25	0.009	0.991	22.52	0.61
150	36.5	15.28	1.5	0.011	0.989	22.56	0.68
175	39.5	16.53	1.75	0.013	0.987	22.6	0.73
200	42	17.58	2	0.015	0.985	22.64	0.78
250	46.5	19.46	2.5	0.018	0.982	22.72	0.86
300	49	20.51	3	0.022	0.978	22.81	0.9
350	52.5	21.98	3.5	0.025	0.975	22.89	0.96
400	55.9	23.4	4	0.029	0.971	22.98	1.02
450	59.8	25.03	4.5	0.033	0.967	23.07	1.09
500	62	25.95	5	0.036	0.964	23.15	1.12
600	65.5	27.42	6	0.044	0.956	23.33	1.18
700	68.9	28.84	7	0.051	0.949	23.51	1.23
800	72	30.14	8	0.058	0.942	23.69	1.27
900	76.5	32.02	9	0.065	0.935	23.87	1.34
1000	79.5	33.28	10	0.073	0.927	24.06	1.38
1100	81.5	34.11	11	0.08	0.92	24.25	1.41
1200	85	35.58	12	0.087	0.913	24.44	1.46
1300	87.5	36.63	13	0.094	0.906	24.64	1.49
1400	87.5	36.63	14	0.102	0.898	24.84	1.47
1500	87.5	36.63	15	0.109	0.891	25.04	1.46

Figura 84: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con edición de Cemento 7%

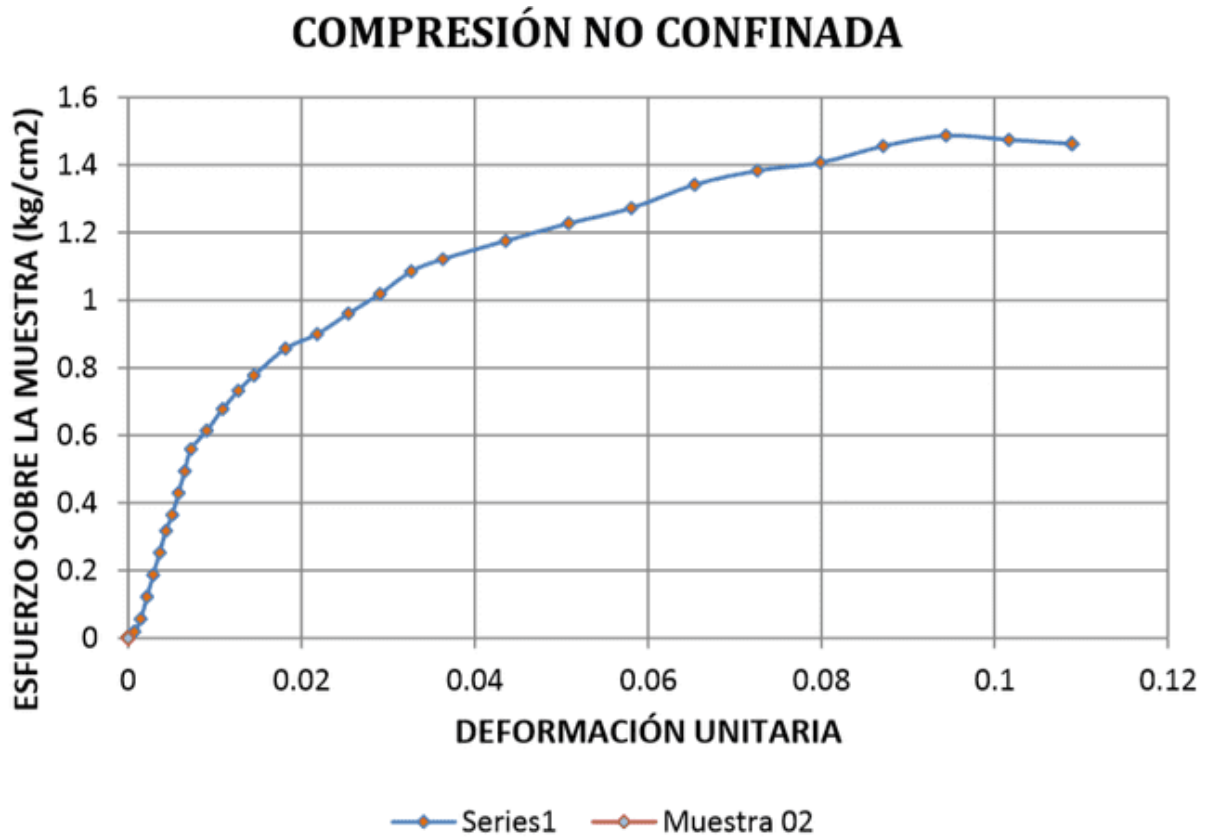


Tabla 72: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 9% Cemento

Deformímetro de longitud	Deformímetro de carga	Carga total sobre la muestra	Deformación de la muestra ΔL	Deformación unitaria $\Delta L/L_0$	Factor de corrección de área $1 - \Delta L/L_0$	Área corregida A'	Esfuerzo sobre la muestra
	M-01	M-01					M-01
* 0.01 mm	*0.419 kg	kg	mm			cm ²	kg/cm ²
10	3.4	1.42	0.1	0.001	0.999	22.33	0.06
20	4.5	1.88	0.2	0.001	0.999	22.34	0.08
30	6	2.51	0.3	0.002	0.998	22.36	0.11
40	9.5	3.98	0.4	0.003	0.997	22.38	0.18
50	13.5	5.65	0.5	0.004	0.996	22.39	0.25
60	17	7.12	0.6	0.004	0.996	22.41	0.32
70	19.5	8.16	0.7	0.005	0.995	22.43	0.36
80	23	9.63	0.8	0.006	0.994	22.44	0.43
90	26.5	11.09	0.9	0.007	0.993	22.46	0.49
100	30	12.56	1	0.007	0.993	22.48	0.56



125	33	13.81	1.25	0.009	0.991	22.52	0.61
150	36.5	15.28	1.5	0.011	0.989	22.56	0.68
175	39.5	16.53	1.75	0.013	0.987	22.6	0.73
200	43.5	18.21	2	0.015	0.985	22.64	0.8
250	46	19.25	2.5	0.018	0.982	22.72	0.85
300	49	20.51	3	0.022	0.978	22.81	0.9
350	53	22.18	3.5	0.025	0.975	22.89	0.97
400	56	23.44	4	0.029	0.971	22.98	1.02
450	59.8	25.03	4.5	0.033	0.967	23.07	1.09
500	62	25.95	5	0.036	0.964	23.15	1.12
600	65.5	27.42	6	0.044	0.956	23.33	1.18
700	68.9	28.84	7	0.051	0.949	23.51	1.23
800	71	29.72	8	0.058	0.942	23.69	1.25
900	75	31.39	9	0.065	0.935	23.87	1.32
1000	80	33.49	10	0.073	0.927	24.06	1.39
1100	85	35.58	11	0.08	0.92	24.25	1.47
1200	91	38.09	12	0.087	0.913	24.44	1.56
1300	93.5	39.14	13	0.094	0.906	24.64	1.59
1400	93.5	39.14	14	0.102	0.898	24.84	1.58
1500	94	39.35	15	0.109	0.891	25.04	1.57

Figura 85: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con edición de Cemento 9%

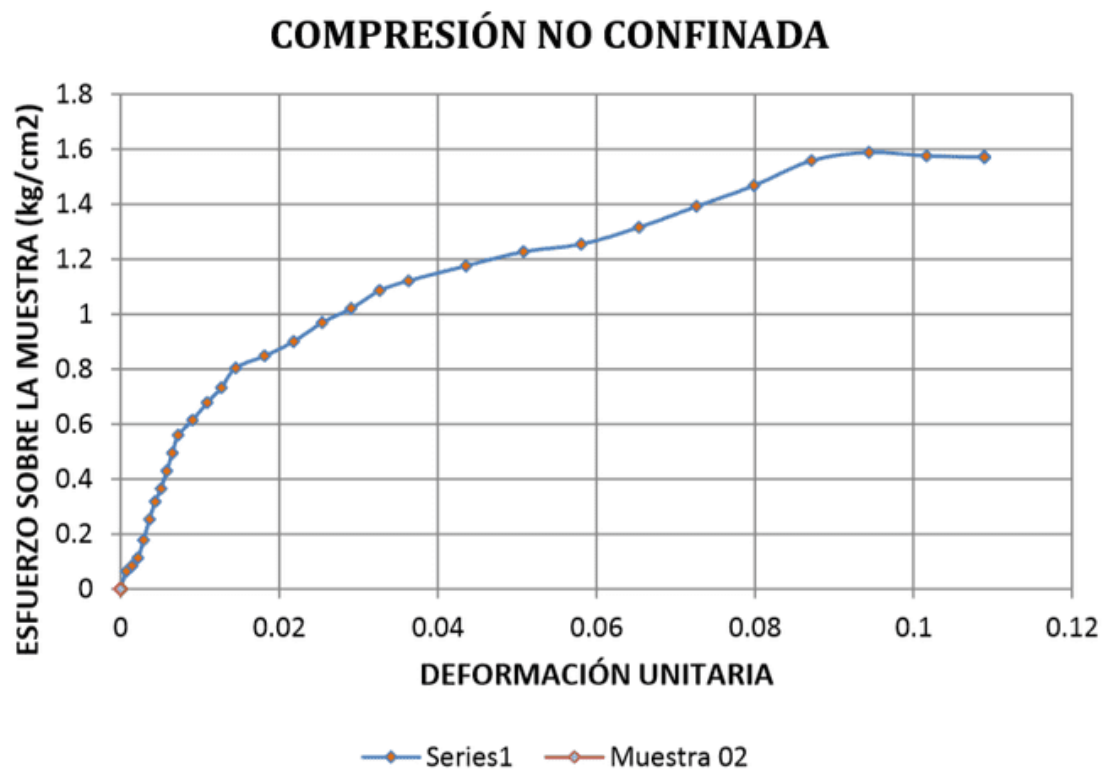
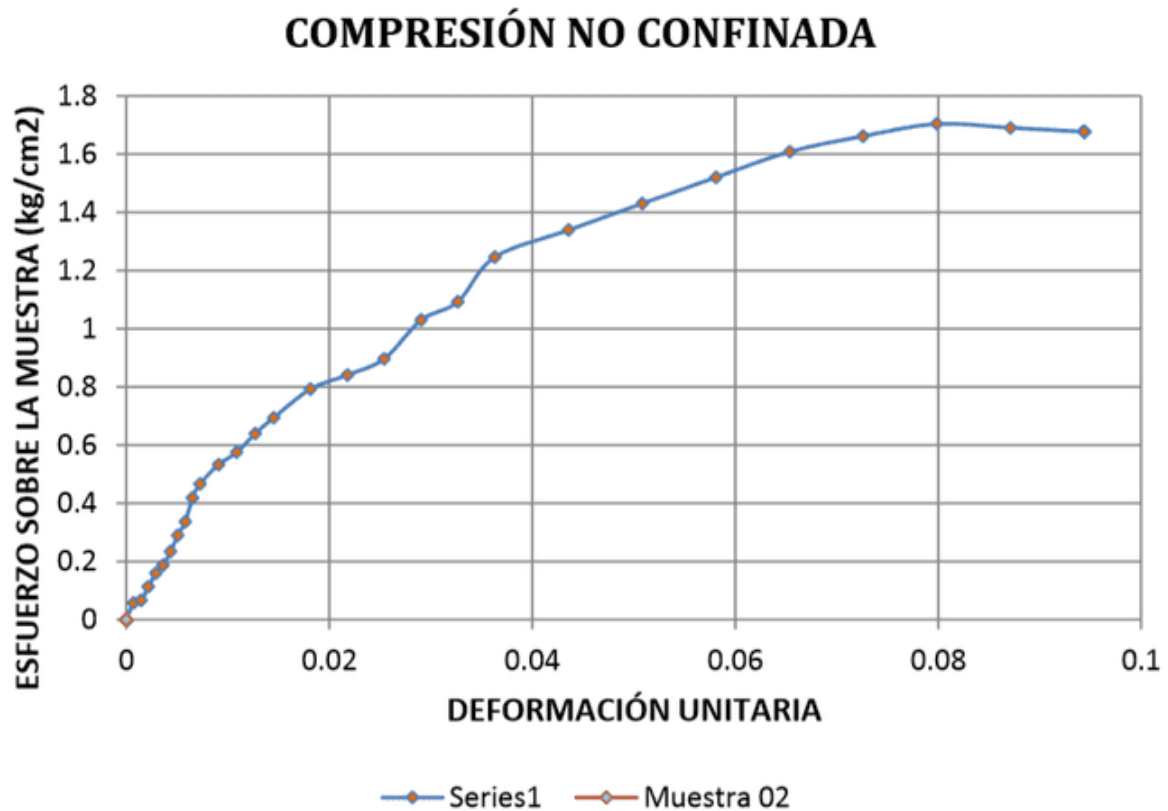




Tabla 73: Ensayo de la Compresión Inconfinada - Esfuerzo sobre la Muestra en relación con la Deformación Unitaria del Suelo + 11% Cemento

Deformímetro de longitud	Deformímetro de carga	Carga total sobre la muestra	Deformación de la muestra ΔL	Deformación unitaria $\Delta L/L_0$	Factor de corrección de área $1 - \Delta L/L_0$	Área corregida A'	Esfuerzo sobre la muestra
	M-01	M-01					M-01
* 0.01 mm	*0.419 kg	kg	mm			cm2	kg/cm2
10	3	1.26	0.1	0.001	0.999	22.33	0.06
20	3.5	1.47	0.2	0.001	0.999	22.34	0.07
30	6	2.51	0.3	0.002	0.998	22.36	0.11
40	8.5	3.56	0.4	0.003	0.997	22.38	0.16
50	10	4.19	0.5	0.004	0.996	22.39	0.19
60	12.5	5.23	0.6	0.004	0.996	22.41	0.23
70	15.5	6.49	0.7	0.005	0.995	22.43	0.29
80	18	7.53	0.8	0.006	0.994	22.44	0.34
90	22.4	9.38	0.9	0.007	0.993	22.46	0.42
100	25	10.46	1	0.007	0.993	22.48	0.47
125	28.6	11.97	1.25	0.009	0.991	22.52	0.53
150	31	12.98	1.5	0.011	0.989	22.56	0.58
175	34.5	14.44	1.75	0.013	0.987	22.6	0.64
200	37.5	15.7	2	0.015	0.985	22.64	0.69
250	43	18	2.5	0.018	0.982	22.72	0.79
300	45.8	19.17	3	0.022	0.978	22.81	0.84
350	49	20.51	3.5	0.025	0.975	22.89	0.9
400	56.5	23.65	4	0.029	0.971	22.98	1.03
450	60.2	25.2	4.5	0.033	0.967	23.07	1.09
500	68.9	28.84	5	0.036	0.964	23.15	1.25
600	74.6	31.23	6	0.044	0.956	23.33	1.34
700	80.3	33.61	7	0.051	0.949	23.51	1.43
800	86	36	8	0.058	0.942	23.69	1.52
900	91.7	38.38	9	0.065	0.935	23.87	1.61
1000	95.5	39.97	10	0.073	0.927	24.06	1.66
1100	98.7	41.31	11	0.08	0.92	24.25	1.70
1200	98.7	41.31	12	0.087	0.913	24.44	1.69
1300	98.7	41.31	13	0.094	0.906	24.64	1.68

Figura 86: Curva de Esfuerzo Normal - Deformación Unitaria del Suelo con adición de Cemento 11%



3.6.5.3. Análisis de la prueba de compresión inconfiada del suelo

La prueba de compresión inconfiada, denominado también compresión simple o uniaxial. Este ensayo es importante porque puede producir esfuerzo o resistencia del suelo cuando se somete a compresión inconfiada, mediante la aplicación de cargas axiales controladas por deformaciones y utilizando una muestra de suelo moldeada en forma cilíndrica, la relación entre la altura y el diámetro es de 2 a 1.

El procedimiento y el análisis de los ensayos de compresión inconfiada se realiza según la norma ASTM D 2166. El resumen de los resultados obtenidos y registrados en el formato respectivo, se presenta en la siguiente tabla.



Tabla 74: Resumen de los Resultados del Esfuerzo sobre la Muestra Asociado a la Deformación Unitaria en Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento

Ensayo	Deformación unitaria ($\Delta L/L_0$)	Esfuerzo sobre la muestra (kg/cm^2)	Cohesión (kg/cm^2)
Suelo natural	0.094	1.30	0.65
Suelo + 2% de cal	0.094	1.40	0.70
Suelo I + 4% de cal	0.094	1.59	0.80
Suelo + 7% de cemento	0.094	1.49	0.74
Suelo + 9% de cemento	0.094	1,59	0.79
Suelo + 11% de cemento	0.080	1.70	0.85

La resistencia del suelo o esfuerzo de compresión en su estado natural tiene una cohesión de $0,65 \text{ kg/cm}^2$, que por las características del suelo corresponde a un suelo de consistencia mediana. También se puede señalar que el esfuerzo o resistencia del suelo se logró una mejor cohesión con adición de cemento al 11%.



CAPITULO IV

Resultados

4.1. Resultados respecto a los objetivos específicos

Después de la recolección de la información y procesamiento de los datos, para su respectivo análisis, se presentan los resultados de los pruebas realizadas en el laboratorio de suelos y materiales PRO&CON S.C.R.L., del material extraído de la vía Agua Buena-Colegio La Salle con adición de cal (2 y 4%), y cemento (7; 9 y 11%) para subrasante, de acuerdo a las normas técnicas nacionales e internacionales.

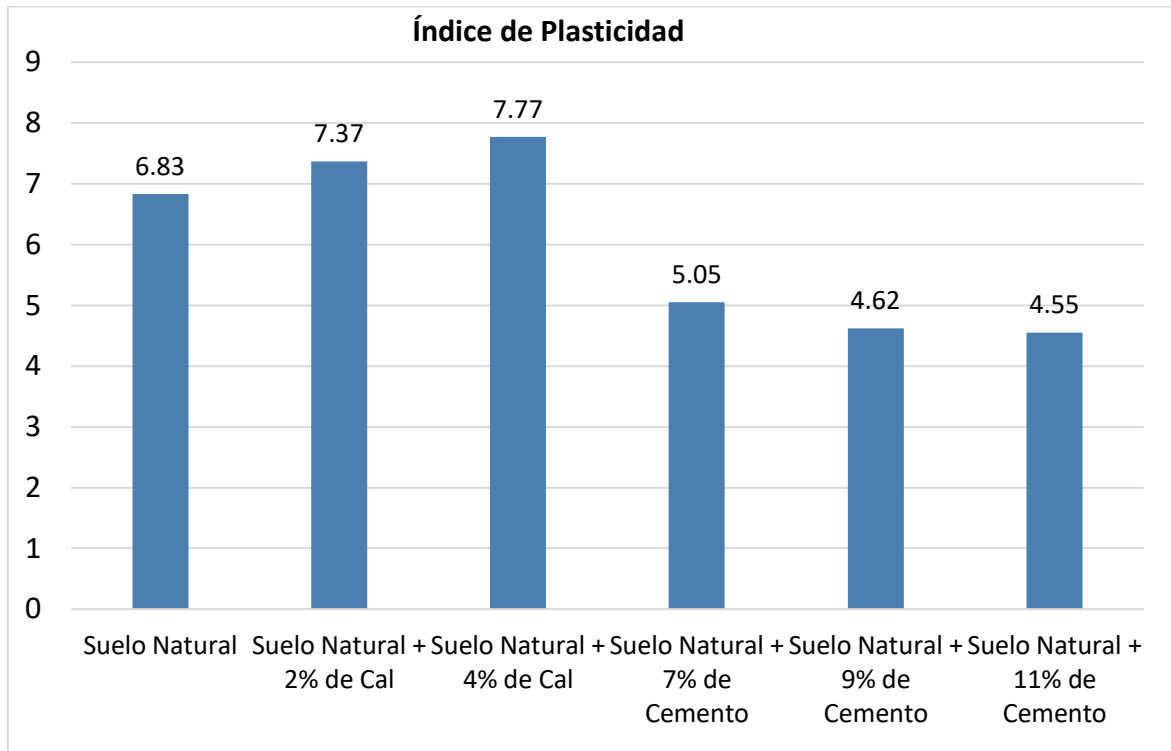
4.1.1. Propiedades de plasticidad.

En la materia de Ingeniería Civil uno de los aspectos es el estudio del comportamiento del suelo que constituye en el soporte de una obra civil. Y una de las propiedades del suelo se denomina plasticidad, que algunos suelos son susceptibles de modificar su consistencia en relación con la humedad.

En ese sentido, el límite plástico y el límite líquido de los suelos se les conoce como límites de Atterberg. Así como señala Graux (1975) los límites de Atterberg determinan los contenidos de humedad con que una muestra de suelo alcanza distintos estados de consistencia. Los límites de consistencia realizadas en el presente estudio, son el límite plástico y límite líquido.

Para facilitar la comprensión y visualización de la información, en la siguiente figura se resumen los resultados de ensayos realizados en laboratorio, sobre el índice de plasticidad de los suelos naturales y la adición de cal o cemento como estabilizadores en proporciones previamente establecidas, de acuerdo con las recomendaciones de las normas técnicas nacionales e internacionales.

Figura 87: Índice de plasticidad para el suelo natural y las diferentes dosificaciones de cal y cemento



Una vez determinados el límite plástico (LP) y límite líquido (LL) se calcula el índice de plasticidad (IP) que resulta de calcular la diferencia entre los valores de ambos líquidos. Para suelo natural el límite líquido es 26.63% y límite plástico resulta 19.80%, en consecuencia, el índice de plasticidad del suelo en estado natural es de 6.83%.

Con el añadido de cal al 2%, los resultados fueron los siguientes: límite líquido 26.34%, límite plástico 18.97%, entonces el índice de plasticidad es 7.37%. Mientras que con adición de cal al 4% se obtuvo los siguientes resultados: límite líquido 26.94% límite plástico 19.17% y el índice de plasticidad 7.77%.

Por su parte con la adición de cemento al 7% los resultados fueron los siguientes: límite líquido 24.86% límite plástico 19.81% y el índice de plasticidad 5.05%. Luego con adición de cemento al 9% se tiene las siguientes valoraciones: límite líquido 24.43% límite plástico 19.81% y el índice de plasticidad 4.62%. Por último, con adición de cemento al 11% se logro obtener los siguientes resultados: el límite plástico es de 19.08%, el límite líquido de 23.63% y el índice de plasticidad 4.55%.

Examinando los resultados expuestos en los párrafos precedentes y tomando en consideración el manual del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) la



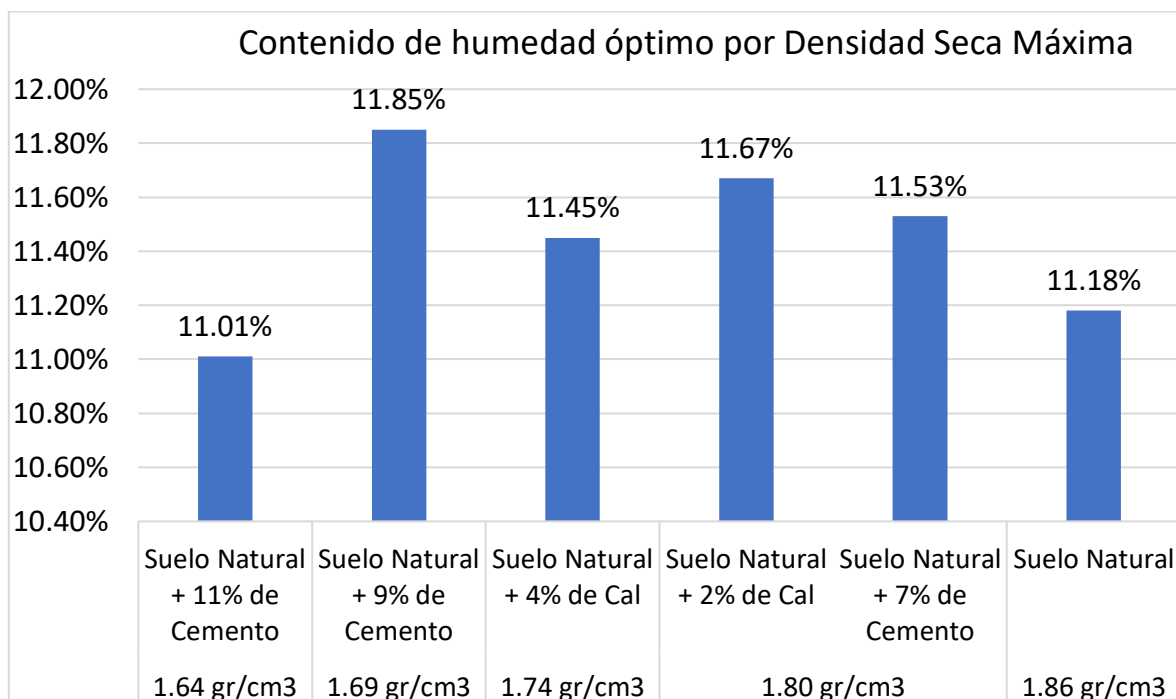
clasificación del suelo según el índice de plasticidad en el caso estudiado en suelo natural se cataloga como suelo de plasticidad baja que se caracteriza por suelos poco arcillosos, al adicionar con cementos al 7; 9 y 11% proporcionalmente se reduce su plasticidad hasta 4,55% y también se ubica en el mismo rango. Mientras que al adicionar cal al 2 y 4% respectivamente su plasticidad se incrementa hasta 7,77%, de manera que el suelo de plasticidad media se convierte en suelo arcilloso.

4.1.2. Peso específico seco máximo.

El peso específico de las partículas de una parte sólida del suelo es una propiedad física que se explica como el peso de una unidad de volumen del suelo, sin considerar el volumen ocupado por el aire o el agua. Para realizar el análisis de las partículas del suelo se determina su peso específico, en suelos arcillosos varía entre 2,5 y 2,9 kg/dm³.

Para determinar la densidad máxima, se realiza mediante el Proctor modificado. En tanto, para determinar la curva de compactación se toma al menos 4 valores del suelo con diferentes grados de humedad y con una energía modificada de compactación estándar, con el propósito de calcular la densidad seca alcanzada. Para una humedad optima existe una densidad máxima para el suelo estudiado utilizando energías de compactación.

Figura 88: Proctor Modificado del Suelo Natural y a Diferentes Dosificaciones de Cal y Cemento





En el estudio realizado, para el suelo sin adición el contenido de humedad óptima es de 11.18% que corresponde a una densidad seca máxima de 1.86 gr/cm^3 . Con adición de cal al 2% el porcentaje de humedad óptimo resultó 11.67% que constituye una densidad seca máxima de 1.80 gr/cm^3 . Luego con adición de cal al 4% el porcentaje de humedad óptimo alcanza 11.45% a una densidad seca máxima de 1.74 gr/cm^3 . Mientras que con adición de cemento al 7% el contenido de humedad óptimo resulta 11.53% a una densidad seca máxima de 1.80 gr/cm^3 . En seguida con adición de cemento al 9% el contenido porcentual de humedad óptimo es de 11.85% que equivale a una densidad seca máxima de 1.69 gr/cm^3 . Por último, con adición de cemento al 11% el contenido de humedad óptimo resulta 11.01% a una densidad seca máxima de 1.64 gr/cm^3 .

La curva máxima de compactación alcanza cuando el volumen de aire que contiene el suelo generalmente está al 5%, porque es difícil eliminar por completo todas las burbujas de aire que contiene el suelo.

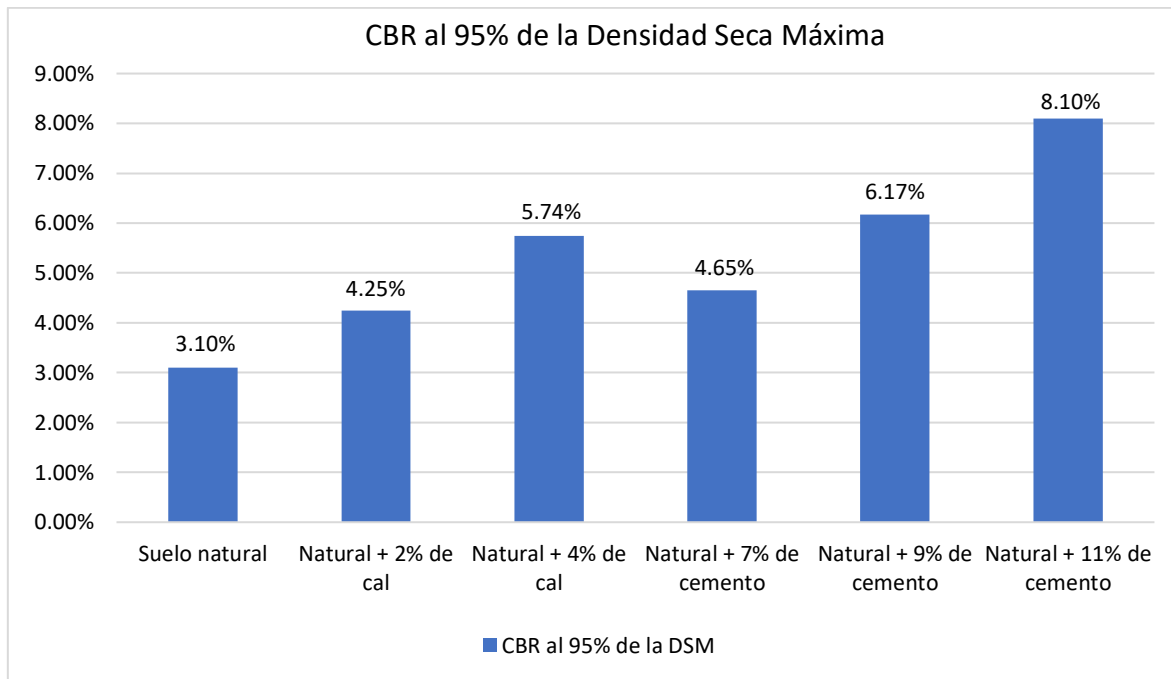
4.1.3. Índice de soporte de california (CBR)

El CBR (relación de soporte California) es un ensayo que se utiliza para determinar el índice de calidad del suelo orientado a su utilización en rellenos para estructuras y carreteras. se hace uso en diseños de pavimentos y en las especificaciones constructivas en obras de ingeniería. El método de prueba se lleva a cabo para evaluar las capacidades de carga de los materiales de la subrasante subbase y base.

El valor de CBR obtenido queda determinada como la relación que existe entre la carga necesaria para producir un nivel de deformación preestablecida en el suelo que se está estudiando y la carga que se necesitaría para producir la misma penetración en la piedra picada california (roca machacada).

En ese sentido, la relación de soporte de california (CBR) establecida en la norma del Ministerio de Transportes y Comunicaciones E 132, y sustentada en las normas AASHTO T-193 y ASTM D-1883, los resultados encontrados en las pruebas de laboratorio se considera el mínimo valor obtenido.

Figura 89: Resultados de CBR al 95% de la Densidad Seca Máxima en Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento



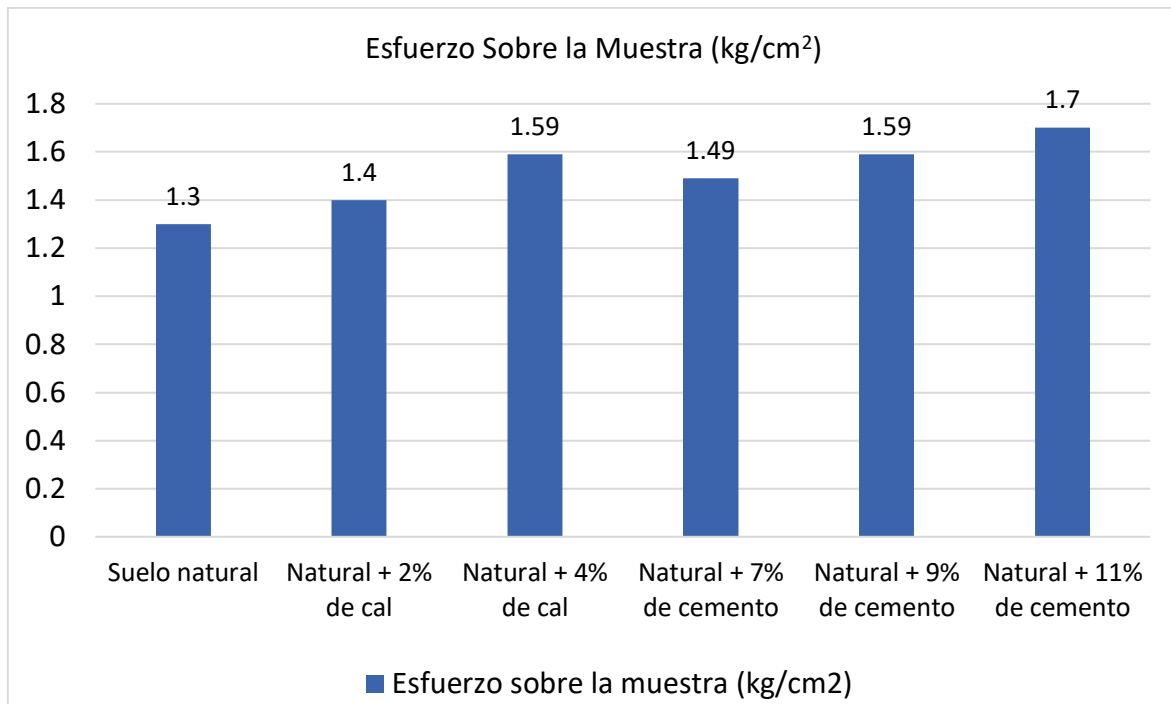
Para suelo en estado natural el valor de CBR al 95% de la densidad seca máxima 3.10% a 0,1”. En seguida para suelo con adición de cal al 2%, la estimación de CBR al 95% de la densidad seca máxima es 4.25% a 0,2”. Luego para suelo con adición de cal al 4%, la valoración de CBR al 95% de la densidad seca máxima es 5.74% a 0,2”.

Ahora para suelo con adición de cemento al 7%, la valoración de CBR al 95% de la densidad seca máxima es 4.65% a 0,2”. Para suelo con adición de cemento al 9%, la estimación de CBR al 95% de la densidad seca máxima es 6.17% a 0,2”. En último lugar, con adición de cemento al 11%, la medida de CBR al 95% de la densidad seca máxima es 8.10% a 0,2”

4.1.4. Resultado de la Compresión Inconfinada.

Como se sabe el ensayo de compresión inconfinada en muestras de suelo, consiste en aplicar un esfuerzo axial a una muestra de suelo. Este ensayo de compresión no confinada permite calcular la última carga a la que un suelo sometido a una carga de compresión empieza a fallar o deformarse. En el numeral 3.6.5.2 se presentó los resultados de la compresión inconfinada en tablas y figuras (esfuerzo versus deformación), donde se puede observar con detalladamente las deformaciones tanto de suelo natural como también con adición de cal o cemento.

Figura 90: Resultados del Esfuerzo Sobre la Muestra Asociado a la Deformación Unitaria en Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento



En tal sentido, la compresión no confinada según las normas del Ministerio de transportes y Comunicaciones E-121, y establecido en las normas ASTM D-2166 y AASHTO T-208, es como sigue: En el ensayo de muestra natural la falla se produjo a 0.094 de deformación unitaria, cuando el esfuerzo sobre el espécimen alcanza un valor de 1.30 kg/cm². Cuando se adiciona cal al 2% al suelo natural la falla ocurrió a 0.094 de deformación unitaria, cuando el esfuerzo sobre el espécimen alcanza 1.40 kg/cm². En seguida se adiciona cal al 4% al suelo natural la falla ocurrió a una deformación unitaria de 0.094, cuando el esfuerzo sobre el espécimen alcanza 1.59 kg/cm².

Posteriormente, cuando se agrega cemento al 7% al suelo natural la falla o la deformación se dio a 0.094 de deformación unitaria, cuando el esfuerzo sobre el espécimen alcanza 1.49 kg/cm². Asimismo, cuando se añade cemento al 9% al suelo natural la falla o la deformación se produjo a 0.094 de deformación unitaria, cuando el esfuerzo sobre el espécimen alcanza 1.59 kg/cm². Y, por último, al añadir cemento al 11% sobre el suelo natural la deformación se logró a 0.080 de deformación unitaria, cuando el esfuerzo sobre el espécimen alcanza 1.70 kg/cm².



4.2. Resultados respecto al objetivo general

Como se puede observar los resultados respecto de los objetivos específicos de la investigación, referente al objetivo general se puede manifestar al lograr los objetivos específicos, también se ha logrado el objetivo general.

Tabla 75: Cuadro Resumen de los resultados de las características físico-mecánicas del Suelo Natural y con Adición de Cal o Cemento

Ensayos de Laboratorio	Suelo Natural	Con Adición de Cal		Con Adición de Cemento		
		Suelo Natural+2%	Suelo Natural+4%	Suelo Natural+7%	Suelo Natural+9%	Suelo Natural+11%
Limite Líquido	26.63%	26.34%	26.94%	24.86%	24.43%	23.63%
Limite Plástico	19.80%	18.97%	19.17%	19.81%	19.81%	19.08%
Índice de Plasticidad	6.83%	7.37%	7.77%	5.05%	4.62%	4.55%
Densidad Seca Máxima	1,86 gr/cm ³	1.80 gr/cm ³	1,74 gr/cm ³	1,80 gr/cm ³	1,69 gr/cm ³	1,64 gr/cm ³
Contenido de Humedad Optimo	11.18%	11,67 %	11,45 %	11,53 %	11,85 %	11,01 %
Índice de CBR	3.10%	4.25%	5.74%	4.65%	6.17%	8.10%
Resistencia a la compresión inconfiada	1.30 kg/cm ²	1.40 kg/cm ²	1.59 kg/cm ²	1.49 kg/cm ²	1,59 kg/cm ²	1.70 kg/cm ²

De acuerdo a la tabla adjunta, se observan el resumen de los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio del suelo natural con adición de cal y cemento con diferentes proporciones, obteniéndose en el presente estudio los siguientes resultados: al 11% de adición de cemento se obtuvo una disminución del 33% con respecto al suelo natural; igualmente se consiguió un incremento en el CBR del 83.95% con respecto al CBR del suelo natural; así mismo se obtuvo un incremento de la resistencia a la compresión inconfiada del 23.53% con respecto al suelo natural. Por lo tanto, se obtuvieron mejores resultados al agregar 11% de cemento para estabilizar el suelo arcilloso de la vía Agua Buena-Colegio la Salle.



En este sentido, en el estudio se realizaron diversas pruebas sobre los parámetros físicos y mecánicos del suelo para la estabilidad del terreno subrasante, cambiando de hecho las propiedades físico - mecánicas del suelo cuando se le agrega cal al 2% y 4%, y cemento 7%, 9% y 11% respectivamente, en la vía Agua Buena Colegio la Salle donde presentan diferencias significativas. En conclusión, al agregar una proporción de 11% de cemento, el suelo brinda mejores condiciones que al agregar cal en un suelo normal.



CAPÍTULO V

Discusión

5.1. Contraste de resultados con referentes del marco teórico

Discusión N° 1: De acuerdo al manual de suelos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) y otros como Bauzá (2006) y las asociaciones españolas ANCADE, ANTER y ECA (2008) coinciden en señalar que los resultados más característicos de adición de cal en suelo natural es la de modificar su plasticidad, como consecuencia a una disminución del límite líquido y a un aumento del límite plástico; consecuentemente se reduce el índice de plasticidad. Mientras que, en el presente estudio los resultados de laboratorio en los ensayos con aditamento de la cal al 2 y 4% el índice de plasticidad se incrementa en 0,56 y 0,95% respectivamente en relación al suelo natural. Aparentemente existe una contradicción entre las teorías presentadas en el marco teórico y los resultados de laboratorio; lo que ocurre es que el suelo natural tiene alto contenido de limo como ML, MH u OH y un índice de plasticidad inferior a 10%; por consiguiente, los suelos con bajas proporciones de arcilla no son adecuados para estabilizarse con cal.

Discusión N° 2: El estudio realizado por Camargo & Duran (2018) con adición de cemento obtuvieron un índice de plasticidad de 15.19%, adicionando con tres proporciones de cemento: 10%, 12% y 14% así lográndose un porcentaje óptimo de suelo, a un porcentaje de 12% de cemento en peso, clasificando el suelo estudiado de acuerdo al ASSHTO como un suelo de tipo A-6 y considerando el sistema SUCS es un tipo de suelo CL, entretanto es un suelo arcilloso de baja plasticidad, por eso, para mejorar las propiedades del suelo recomienda como aditivo el cemento. Los resultados obtenidos son relativamente semejantes en la presente investigación, ya que con la adición de cemento al 7%, 9% y 11% sus índices de plasticidad son 5;05%, 4,62% y 4,55% respectivamente.

Discusión N° 3: Además, Castro & Navarro (2020) mostraron en sus investigaciones para optimizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, con adición de cemento al suelo natural en proporciones de 10%, 15% y 20% sufren un aumento de CBR entre un mínimo de 91.9% y máximo de 138.7%, lográndose así un suelo mejorado de subrasante para soportar la estructura del pavimento y también consiguió reducir de 7.18% en la expansión de las muestras. Mientras tanto, en los resultados obtenidos en el presente estudio, igualmente se registra un incremento significativo de CBR con adición de cal o cemento, en mayor



proporción se produjo con adición de cemento al 11%, alcanzando 10,50% y 8, 10% al 95 de la densidad seca máxima.

Discusión N° 4: Jara (2014), en su tesis “Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso”, arribó a los siguientes resultados: el índice de plasticidad con la adición de cal como estabilizante al 6% logró disminuir a un valor de 9.23. Sin embargo, en el presente estudio considerando los resultados hallados de los ensayos realizados se observa un incremento significativo en el índice de plasticidad (IP) con aditamento de cal al 4%; pero, con la adición de cemento al 9% y 11% disminuye a 4,62 y 4,55 respectivamente.

5.2. Interpretación de los resultados encontrados en la investigación

Discusión N° 5: Conforme al estudio realizado, los hallazgos encontrados en relación a las características físicas y mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena- Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento: (4 y 6%) para subrasante, se asumen las siguientes interpretaciones:

En los ensayos realizados con adición de cal al 2 y 4% el índice de plasticidad se incrementa en 0,56 y 0,95% respectivamente en relación al suelo natural. Mientras que, con adición de cemento al 7%, 9% y 11% el índice de plasticidad se reduce en 1,77%, 2,20% y 2,27% respectivamente.

Con adición de cal en 2% y 4% sobre el suelo natural, en cuanto a compactación del suelo, empleando el método A con 5 capas y 25 golpes por capa, en este caso al aumentar la energía de compactación del Proctor Modificado, la densidad seca máxima alcanzará su valor máximo al conseguir el máximo valor de la curva a una densidad seca máxima de 1.80 gr/cm³ y a un porcentaje de humedad óptimo de 11.67%; mientras tanto con adición de cemento la misma densidad seca máxima se logra a un contenido porcentual de humedad óptimo de 11.53%.

Referente a la Relación de Soporte de California (CBR), con adición de cal al 2 y 4% y al 95% de la densidad seca máxima existe un incremento hasta un 3,66% respecto del suelo natural. Sin embargo, con adición de cemento al 7%, 9% y 11% existe un incremento considerable entre 4,78% y 7,40% respecto al suelo natural, un aumento mayor se da con cemento 11% de peso.



5.3. Comentarios de la demostración de la hipótesis

Discusión N° 6: Con los resultados obtenidos se da conformidad de la hipótesis de investigación, en donde mejora significativamente las propiedades físico – mecánicas al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena-Colegio la Salle que serán usados para subrasante.

5.4. Aporte de la investigación

Discusión N° 7: Como resultado de la investigación, los efectos de agregar cal o cemento en diferentes proporciones se logra modificar las características y el comportamiento del suelo natural, es decir, mejorando las propiedades físicas y mecánicas del suelo para una buena estructura del pavimento, como son el índice de plasticidad, la densidad seca máxima, la Relación de Soporte de California (CBR) y la compresión inconfiada, que incluyen los factores de contenido de humedad optima.

5.5. Incorporación de temas nuevos que se han presentado durante el proceso de la investigación

Discusión N° 8: En el proceso de investigación se realizó el análisis granulométrico por tamizado, señalando que inicialmente no estuvo considerado en el estudio, principalmente por las características de la realización de diferentes ensayos necesariamente se tuvo realizar ensayos de granulometría.



Glosario

Aditivo: componentes que contienen ingredientes orgánicos o inorgánicos destinados a cambiar las propiedades físicas del ligante cuando es nuevo. Pueden estar en forma líquida como aditivos.

Agregado: la porción de suelo que atraviesa por la malla de $\frac{3}{4}$ " y queda retenido en la malla No. 4.

Capacidad portante: Presión máxima promedio de contacto entre el sustrato y el suelo que puede causar daño por corte o asentamiento excesivo.

Cohesión: capacidad de las partículas del suelo para mantener una calidad uniforme debido a sus fuerzas internas.

Compactación: este es el proceso de carga de ciertos materiales para aumentar la cohesión de las partículas y así eliminar de los poros el aire.

Densidad: Se refiere a la relación entre la masa y el volumen, es decir la masa por cada unidad cúbica de un material.

Energía modificada: Es la energía equivalente de compresión a la prueba de Proctor Modificado.

Estabilización: Se refiere al proceso de modificación de los elementos subyacentes con el material.

Granulometría: El proceso de selección de materiales de diferentes tamaños.

Humedad: el agua se filtra en el cuerpo o se evapora y se mezcla con el aire.

Material fino: parte del suelo que atraviesa por el tamiz número 4.

Material Heterogéneo: Son aquellos materiales que no tienen las mismas características elásticas que el módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

Peso seco: es el peso del material sin contenido de humedad.

Subrasante: Una parte de la estructura portante del suelo, que tiene el efecto de soportar las cargas externas creadas por el mundo exterior.

Tamizado: El proceso de comparar y seleccionar diferentes partículas según el tamaño de cada muestra.



Conclusiones

Primera: Al adicionar cal y cemento se pudo observar variaciones en el índice de plasticidad del suelo estudiado. Los valores del índice de plasticidad con adición de cal al 2 y 4% oscilan entre el 7.34 y el 7.77% respectivamente, lo que indica un aumento del índice de plasticidad con respecto del suelo sin aditivo. Mientras que con adición de cemento fluctúan entre 5.05, 4.62 y 4.55% respectivamente. Con adición de cemento existe una reducción de índice de plasticidad con respecto al suelo sin aditivo.

Segunda: Las pruebas de compactación se llevaron a cabo en suelos estabilizados utilizando energía modificada con cal y cemento como aditivos. Al realizar las pruebas de compactación de acuerdo con las normas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se concluye que en las pruebas de compactación utilizando energía modificada con cal al 2% se obtuvo una densidad seca máxima de 1.80 gr/cm³ y un contenido de humedad óptimos de 11.67%, lo que indica que aumento el contenido de humedad con respecto a la muestra patrón. Al adicionar 11% de cemento se obtuvo una densidad seca máxima de 1.64 gr/cm³ y un contenido de humedad óptimos de 11.01%, lo cual indica disminución del contenido de humedad óptimo y de la densidad seca máxima con respecto a la muestra patrón.

Tercera: El valor de CBR se determina correspondiente a la penetración de 2,54 mm y 5,08 mm y el mayor de los valores se utiliza para fines de diseño. Las muestras cilíndricas se han compactado en el molde CBR en Proctor máxima densidad seca y contenido óptimo de agua. Los valores de CBR se incrementan de acuerdo con el aumento de la densidad seca máxima para todos los tipos de estabilización de suelos. Con la adición de cal al 4% el valor del CBR al 95% densidad seca máxima es de 5.74%, observándose un incremento del 2.64%. Con la adición de cemento al 11% el valor del CBR al 95% densidad seca máxima es de 8.10 %, observándose un incremento del 5.00%.

Cuarta: Las pruebas de resistencia a la compresión inconfiada se realizaron en suelo natural, suelo arcilloso con adición de cal, suelo arcilloso con adición de cemento. Todas las muestras se prepararon mediante molde de tubo de plástico de compactación estática en sus respectivos contenidos óptimos de humedad y densidades secas máximas. Con la adición del 4% de cal el esfuerzo a la compresión



de la muestra es de 1.59 kg/cm², observándose un incremento con respecto a la muestra sin aditivo. Con la adición del 11% de cemento el esfuerzo a la compresión de la muestra es de 1.70 kg/cm², observándose un incremento con respecto a la muestra sin aditivo.

Quinta: Los resultados de la investigación han demostrado que, con la adición de cal y cemento, las propiedades físico- mecánicas del suelo arcilloso presentó variaciones en función al porcentaje de los estabilizantes utilizado para su análisis. Sin embargo, al comparar los resultados, se obtuvo mejores beneficios en el suelo con adición de cemento al 11%; por lo tanto, para la estabilización de los suelos arcillosos que serán usados para subrasantes desde el aspecto constructivo es mejor emplear el cemento como aditivo en porcentajes mayores a 10%.



Recomendaciones

Primera: Para posteriores investigaciones, en el análisis de los suelos arcillosos que serán estabilizados con cal que serán usados para subrasante. Utilizar porcentajes de 1% al 3% para que se pueda optimizar el valor del IP del suelo

Segunda: Para posteriores investigaciones, continuar realizando estudios del análisis de suelos arcillosos con respecto a la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad teniendo como referencia la energía de compactación Proctor modificado para poder encontrar un valor estándar con respecto a los parámetros de compactación en la densidad seca máxima y óptimo contenido de humedad.

Tercera: En futuras investigaciones se recomienda, realizar ensayos de muestras de suelo considerando el PH con las diferentes dosis de cal y cemento, en los distintos tramos o vías de la localidad.

Cuarta: Realizar el análisis de otros suelos existentes en otros tramos de la Ciudad del Cusco y realizar cálculos para determinar el porcentaje de cal y cemento óptimo, para aumentar la resistencia o estabilidad del suelo y reducir el costo de la construcción, asimismo la disminución en la expansión, y diferentes tipos de estabilizadores, de tal manera que pueda adaptarse a las características del tipo de suelo.

Quinta: Para futuras investigaciones donde se estudie las propiedades físicas y mecánicas del suelo para su uso como subrasante, se recomienda usar una combinación de cal y cemento como un solo aditivo para su respectivo análisis e interpretación. Para hacer posibles estas combinaciones es recomendable usar 3% de cal y proporciones de cemento de 11% y 13%.



Referencias

- Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (ANCADE); Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de Suelos y Reciclado de Firmes (ANTER); Instituto del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid España: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).
- Bauzá, J. (2003). *Mezclas con cemento en las infraestructuras de transporte. Estabilización de suelos con cal*. Madrid España.
- Bauzá, J. (2006). *El tratamiento de suelos arcillosos mediante cal*. Madrid España.
- Camargo, S., & Duran, J. (2018). *Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias*. Cartagena de Indias: Universidad de cartagena.
- Castro, M., & Navarro, J. (2020). *Propuesta de mejora de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante mediante la adición de cemento Portland para disminuir el cambio volumétrico provocado por las condiciones climáticas en la Av. Padre salas, Villa Rica, Oxapampa, Pasco*. Lima Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Chen, F. (1975). *Foundations on expansive soils*. Netherlands - U.S.A. : Elsevier Scientific Publishing Company.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (5ta edición ed.). México: Editorial Limusa S.A. de C.V.
- Cuadrado, S., & Lorenzo, L. (1980). *Estudio del suelo: Temas de divulgación*. Salamanca: Centro de Edafología y Biología Aplicada EXCMA. Diputación Provincial.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (Cuarta edición ed.). México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Das, B. (2019). *Advanced Soil Mechanics* (5th edition ed.). Boca Raton: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business.
- Das, B., & Sobhan, K. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering* (Eighth Edition, SI ed.). Stamford - USA: Cengage Learning.
- Díaz, J. (2014). *Mecánica de suelos : naturaleza y propiedades*. México: Editorial Trillas S.A. de C.V.
- Duque, G. (2017). *Manual de geología para ingenieros*. Manizales - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Duque, G., & Escobar, C. (2002). *Mecánica de los suelos*. Manizales - Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/1864/>



- Ghobadi, M., Abdilor, Y., & Babazadeh, R. (2014). Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 611–619.
- Graux, D. (1975). *Fundamentos de mecánica del suelo, proyecto de muros y cimentaciones* (Segunda Edición ed.). Barcelona España: Editores Técnicos Asociados, S.A.
- Gutiérrez, W. (2016). *Mecánica de suelos aplicada a vías de transportes*. Lima, Perú: Empresa Editora Macro EIRL.
- Heinemann, K. (2003). *Introducción a la metodología de la investigación empírica: El ejemplo de las ciencias del deporte* (Primera edición ed.). Barcelona España: Editorial Paidotribo.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta edición ed.). México D.F.: McGraw-Hill Interamericana editores, S.A. de C.V.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: McGRAW-HILL Interamericana Editores, S.A. de C. V. .
- Jara, R. (2014). *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Juarez, E., & Rico, A. (2005). *Mecánica de Suelos. Tomo 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Editorial Limusa S. A.
- Juárez, O., & Inzunza, M. (2011). *Guía práctica de estabilización y recuperación de pavimentos con cemento portland en México*. México, D. F.: Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A. C.
- Kerlinger, F., & Lee, H. (2002). *Investigación del comportamiento*. México: McGRAW_HILL Interamericana.
- Lambe, T., & Whitman, R. (2012). *Mecánica de suelos*. México: Editorial Limusa S.A.
- Lines, L., & Palomino, I. (2016). *Estabilización con sal, de bases y sub bases de pavimentos, con material de las canteras de Patapata, Saylla y Andahuaylillas*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- MINAM, M. (2016). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014*. Viceministerio de Gestión Ambiental, Lima. Retrieved from www.minam.gob.pe
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de Carreteras: suelos geología, geotecnia y pavimentos. sección suelos y pavimentos*. Lima Perú: R.D. N° 10-2014-MTC/14.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima, Perú: Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.



- Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC. (2018). *Red Vial Existente y Proyectada del Sistema Nacional de Carreteras por jerarquía, según Departamento: 2018*. Retrieved from Informes y publicaciones/Transportes. Infraestructura Vial: <https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/transportes.html>
- Montejo, A., Montejó, A., & Montejó, A. (2018). *Ingeniería civil. Estabilización de suelos* (1ra. edición ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.
- Neill, D., & Cortez, L. (2018). *Procesos y Fundamentos de la Investigación Científica*. Machala - Ecuador: Editorial UTMACH.
- OMS, O. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: Actualización mundial 2005*. Ginebra - Suiza: Ediciones de la OMS.
- Peck, R., Hanson, W., & Thornburn, T. (1983). *Ingeniería de cimentaciones*. México: Editorial Limusa S.A.
- Roux, R. (2010). *Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas*. México: Plaza y Valdés, S. A. de C. V.
- Sánchez, H., & Reyes, C. (2017). *Metodología y diseños de la investigación científica*. Lima Perú: Buseness Support Aneth S.R.L.
- Sánchez, H., Reyes, C., & Mejía, K. (2018). *Manual de términos en investigación científica, tecnológica y humanística*. Lima-Perú : Universidad Ricardo Palma.
- Sánchez, M. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del cantón Tosagua provincia de Manabí*. Quito - Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Retrieved 01 15, 2020, from <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11180>
- Sánchez-Leal, F. (2020, diciembre 29). *Geotechtips. ¿Qué es el CBR?* Retrieved from <https://www.geotechtips.com/post/que-es-el-cbr>
- Santos, C., & Sarmiento, G. (2018). *Incidencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en la estabilización de suelo arcilloso, propuesto como material de subrasante de la via fundo Molleray San Sebastián – Cusco*. Cusco: Universidad Andina del Cusco.
- Spangler, M., & Patel, O. (1950). Modification of a Gumbotil Soil by Lime and Portland Cement Admixtures. *Highway Research Board Proceedings*, 29, 561-566.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics* (1era edición ed.). New York, USA: Wiley.
- Velarde, A. (2015). *Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en la determinación de la resistencia a la compresión simple de suelos arcillosos estabilizados con cal y cemento*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.



Anexos

Anexo 01: Matriz de Consistencia

TITULO: “Análisis comparativo de las características físico-mecánicas de suelos arcillosos en la vía Agua Buena- Colegio La Salle con la adición de cal (2 y 4%), y cemento: (7; 9 y 11%) para subrasante”

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	HIPOTESIS DE INVESTIGACIÓN	VARIABLES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL ¿En qué medida variará las propiedades físico- mecánicas con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán utilizados para subrasante?	OBJETIVOS GENERAL Determinar la variación de las propiedades físico- mecánicas con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán utilizados para subrasante.	HIPOTESIS GENERAL Las propiedades físico – mecánicas mejora significativamente al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.	VARIABLE DEPENDIENTE: Propiedades físico- mecánicas del suelo. Dimensiones/Indicadores: - Índice de Plasticidad (%) - Densidad máxima (Kg/m ³) - CBR (%) - Compresión inconfiada (KN/m ²)	Método de Investigación: Hipotético deductivo, con enfoque cuantitativa. Tipo de Investigación: Por su finalidad es una investigación aplicada. Por su fuente de datos, es una investigación de gabinete (laboratorio y campo)
PROBLEMAS ESPECIFICOS ¿En qué medida variará las propiedades de plasticidad con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante?	OBJETIVOS ESPECIFICOS Determinar la variación las propiedades de plasticidad con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.	HIPOTESIS ESPECIFICOS Disminuye las propiedades de plasticidad del suelo al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.		
¿En qué medida variará el peso específico seco máximo con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena-	Determinar la variación el peso específico seco máximo con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena-	Aumenta el peso específico seco máximo del suelo al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la	VARIABLE INDEPENDIENTE: Proporciones de adición de cal y cemento.	



Colegio La Salle que serán usados para subrasante?	Colegio La Salle que serán usados para subrasante.	vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.		Alcance de la Investigación:
¿En qué medida variará el índice de soporte de California (CBR) con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante?	Determinar la variación el índice de soporte de california (CBR) con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.	Aumenta el índice de soporte de California (CBR) del suelo al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.	Dimensiones/Indicadores:	Descriptivo explicativo Diseño de Investigación:
¿En qué medida variará la compresión inconfiada con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente, en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante?	Determinar la variación de la compresión inconfiada con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente en suelos arcillosos procedentes de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.	Aumenta la compresión inconfiada del suelo al estabilizar suelos arcillosos con la adición de cal (2, 4%) y cemento (7; 9 y 11%) respectivamente adicionado al material proveniente de la vía Agua Buena- Colegio La Salle que serán usados para subrasante.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Porcentaje de cal en peso en proporciones de 2 y 4 % con respecto al peso de la muestra de suelo arcilloso ▪ Porcentaje de cemento en peso en proporciones de 7; 9 y 11% con respecto al peso de la muestra de suelo arcilloso 	Es una investigación experimental Población y Muestra: Vía Agua Buena- Colegio La Salle.



Anexo 02: Panel Fotográfico









Anexo 03: Certificado de Calibración



PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.
LABORATORIO DE CALIBRACIÓN

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LFP - 545 - 2020

Página 1 de 5

Expiración	: 08-2021
Fecha de Emisión	: 2021-01-04
1. Solicitante	: PROYECTOS & CONSTRUCCIONES SILVER S.C.R.L.
Dirección	: BARRIO PROFESIONAL LOTE C-1 - CUSCO - CUSCO
2. Descripción del Equipo	: ANILLO DE CARGA PARA PRENNA CBE
Marca de Presión	: PRESTAR
Modelo de Presión	: PS-8
Tipo de Presión	: EST
Código de Identificación	: 158013
Marca de Anillo	: ELE
Modelo de Anillo	: 15550009
Serie de Anillo	: 1355-34-18018
Capacidad del Anillo	: 25 kN
Código de Identificación	: NO INDICA
Marca del Dial	: BAKER
Modelo del Dial	: J62A
Serie del Dial	: NO INDICA
Procedencia	: NO INDICA
Código de Identificación	: NO INDICA

El Equipo de medición con el modelo y número de serie abajo indicados ha sido cuidadosamente probado y verificado usando patrones certificados con trazabilidad a la División de Métros del BIPM y otros.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le correspondió disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función de uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o de reglamentaciones aplicables.

Punto de Precisión S.A.C. no es responsable de los errores que pueda cometer el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí presentados.

3. Lugar y fecha de Calibración
BARRIO PROFESIONAL LOTE C-1 - CUSCO - CUSCO
29 - DICIEMBRE - 2020

4. Método de Calibración
La calibración se realizó por el método de comparación del dial del orden y la lectura de escala patrón.

5. Trazabilidad

INSTRUMENTO	MARCA	CERTIFICADO	TRAZABILIDAD
CELDA DE CARGA	NAVY	CCP - 6042 - 805 - 20	EUCROM
INDICADOR	MCC		

6. Condiciones Ambientales

	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	15,5	15,5
Humedad %	68	68

7. Observaciones
Con fines de identificación se le colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde, con el número de certificado y fecha de calibración de la empresa PUNTO DE PRECISIÓN S.A.C.



Jefe de Laboratorio
Ing. Lisseth Capcha
Reg. CIP N° 152031



4/4/22, 11:55

SUNAT - Consulta RUC

Consulta RUC

Resultado de la Búsqueda
Número de RUC: 20528085530 - PROYECTOS & CONSTRUCCIONES SILVER SOCIEDAD COMERCIAL DE RESPONSABILIDAD LIMITADA
Tipo Contribuyente: SOC.COM.RESPONS. LTDA
Nombre Comercial: PRO&CON SILVER S.C.R.L.
Fecha de Inscripción: 13/03/2008 Fecha de Inicio de Actividades: 20/03/2008
Estado del Contribuyente: ACTIVO
Condición del Contribuyente: HABIDO
Domicilio Fiscal: CAL.MARIANO SANTOS CHOCANO LOTE. L-3 CUSCO - CUSCO - SAN SEBASTIAN
Sistema Emisión de Comprobante: MANUAL Actividad Comercio Exterior: SIN ACTIVIDAD
Sistema Contabilidad: MANUAL/COMPUTARIZADO
Actividad(es) Económica(s): <hr/> Principal - 7120 - ENSAYOS Y ANÁLISIS TÉCNICOS <hr/> Secundaria 1 - 7110 - ACTIVIDADES DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA Y ACTIVIDADES CONEXAS DE CONSULTORÍA TÉCNICA <hr/> Secundaria 2 - 4100 - CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS
Comprobantes de Pago c/aut. de impresión (F. 806 u 816):

<https://e-consultaruc.sunat.gob.pe/ct-d-llenarconsultaruc/cr500A.htm>



Anexo 04: Análisis de costos unitarios con adición de cal (2% y 4%) y cemento (7%, 9% y 11%)

ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON ADICIÓN DE CAL AL 2%

NOMBRE DEL PROPONENTE: HUBER MISAEL NAVARRO GAMBARINI						
PARTIDA: MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE DE LA VIA AGUA BUENA-COLEGIO LA SALLE, CON CAL AL 2%						
RENDIMIENTO: m²/DIA		Costo Unitario directo por: m²			11.39	
DESCRIPCION DEL RECURSO	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
MANO DE OBRA						
Operario	hh	1.0000	0.0080	23.44	0.19	
Peón	hh	4.0000	0.0320	16.76	2.15	
					2.33	
MATERIALES						
Agente estabilizante cal	kg		30.00	0.11	3.3	
Agua	m3		0.0100	5.00	0.05	
					3.35	
EQUIPOS						
Cargador sobre llantas 125 HP	hm	1.0000	0.0080	220.00	1.76	
Rodillo liso Vibr. Autop. 70-100 hp 7-9t	hm	1.0000	0.0080	190.00	1.52	
Motoniveladora de 125 HP	hm	1.0000	0.0080	250.00	2.00	
Cisterna 4x2 (agua) 1,500 gal.	hm	0.5000	0.0040	180.00	0.36	
Herramientas manuales	% mo		3.0000	2.33	0.07	
					5.71	

ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON ADICIÓN DE CAL AL 4%

NOMBRE DEL PROPONENTE: HUBER MISAEL NAVARRO GAMBARINI						
PARTIDA: MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE DE LA VIA AGUA BUENA-COLEGIO LA SALLE, CON CAL AL 4%						
RENDIMIENTO: m²/DIA		Costo Unitario directo por: m²			14.69	
DESCRIPCION DEL RECURSO	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
MANO DE OBRA						
Operario	hh	1.0000	0.0080	23.44	0.19	
Peón	hh	4.0000	0.0320	16.76	2.15	
					2.33	
MATERIALES						
Agente estabilizante cal	kg		60.00	0.11	6.6	
Agua	m3		0.0100	5.00	0.05	
					6.65	
EQUIPOS						
Cargador sobre llantas 125 hp	hm	1.0000	0.0080	220.00	1.76	
Rodillo liso Vibr. Autop. 70-100 hp 7-9t	hm	1.0000	0.0080	190.00	1.52	
Motoniveladora de 125 hp	hm	1.0000	0.0080	250.00	2.00	
Cisterna 4x2 (agua) 1,500 gal.	hm	0.5000	0.0040	180.00	0.36	
Herramientas manuales	% mo		3.0000	2.33	0.07	
					5.71	



ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON ADICIÓN DE CEMENTO AL 7%

NOMBRE DEL PROPONENTE: HUBER MISAEL NAVARRO GAMBARINI						
PARTIDA: MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE DE LA VIA AGUA BUENA-COLEGIO LA SALLE, CON CEMENTO AL 7%						
RENDIMIENTO:	m²/DIA	Costo Unitario directo por: m²				18.43
DESCRIPCION DEL RECURSO	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
MANO DE OBRA						
Operario	hh	1.0000	0.0080	23.44	0.19	
Peón	hh	4.0000	0.0320	16.76	2.15	
						2.33
MATERIALES						
Agente estabilizante cal	kg		94.00	0.11	10.34	
Agua	m3		0.0100	5.00	0.05	
						10.39
EQUIPOS						
Cargador sobre llantas 125 hp	hm	1.0000	0.0080	220.00	1.76	
Rodillo liso Vibr. Autop. 70-100 hp 7-9t	hm	1.0000	0.0080	190.00	1.52	
Motoniveladora de 125 hp	hm	1.0000	0.0080	250.00	2.00	
Cisterna 4x2 (agua) 1,500 gal.	hm	0.5000	0.0040	180.00	0.36	
Herramientas manuales	% mo		3.0000	2.33	0.07	
						5.71

ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON ADICIÓN DE CEMENTO AL 9%

NOMBRE DEL PROPONENTE: HUBER MISAEL NAVARRO GAMBARINI						
PARTIDA: MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE DE LA VIA AGUA BUENA-COLEGIO LA SALLE, CON CEMENTO AL 9%						
RENDIMIENTO:	m²/DIA	Costo Unitario directo por: m²				21.40
DESCRIPCION DEL RECURSO	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.	
MANO DE OBRA						
Operario	hh	1.0000	0.0080	23.44	0.19	
Peón	hh	4.0000	0.0320	16.76	2.15	
						2.33
MATERIALES						
Agente estabilizante cal	kg		121.00	0.11	13.31	
Agua	m ³		0.0100	5.00	0.05	
						13.36
EQUIPOS						
Cargador sobre llantas 125 hp	hm	1.0000	0.0080	220.00	1.76	
Rodillo liso Vibr. Autop. 70-100 hp 7-9t	hm	1.0000	0.0080	190.00	1.52	
Motoniveladora de 125 hp	hm	1.0000	0.0080	250.00	2.00	
Cisterna 4x2 (agua) 1,500 gal.	hm	0.5000	0.0040	180.00	0.36	
Herramientas manuales	% mo		3.0000	2.33	0.07	
						5.71



ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS CON ADICIÓN DE CEMENTO AL 11%

NOMBRE DEL PROPONENTE: HUBER MISAEL NAVARRO GAMBARINI

PARTIDA: MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE DE LA VIA AGUA BUENA-COLEGIO LA SALLE, CON CEMENTO AL 11%

RENDIMIENTO:	m²/DIA	Costo Unitario directo por: m²			24.37
DESCRIPCION DEL RECURSO	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO S/.	PARCIAL S/.
MANO DE OBRA					
Operario	hh	1.0000	0.0080	23.44	0.19
Peón	hh	4.0000	0.0320	16.76	2.15
					2.33
MATERIALES					
Agente estabilizante cal	kg		148.00	0.11	16.28
Agua	m ³		0.0100	5.00	0.05
					16.33
EQUIPOS					
Cargador sobre llantas 125 hp	hm	1.0000	0.0080	220.00	1.76
Rodillo liso Vibr. Autop. 70-100 hp 7-9t	hm	1.0000	0.0080	190.00	1.52
Motoniveladora de 125 hp	hm	1.0000	0.0080	250.00	2.00
Cisterna 4x2 (agua) 1,500 gal.	hm	0.5000	0.0040	180.00	0.36
Herramientas manuales	% mo		3.0000	2.33	0.07
					5.71

A continuación, se presenta un cuadro resumen del costo por m² de la estabilización del suelo arcilloso de la vía Agua Buena-Colegio la Salle para subrasante para cada porcentaje de cal y cemento.

Costo por m² de estabilización del suelo arcilloso para subrasante con cal y cemento

	CAL		CEMENTO		
	2%	4%	7%	9%	11%
Costo Unitario por m ²	S/. 11.39	S/. 14.69	S/. 18.43	S/. 21.41	S/. 24.37

Se presenta un cuadro comparativo entre el índice de CBR obtenido con cada porcentaje de cal, así como también cemento y sus costos por m² de estabilización del suelo arcilloso de la vía Agua Buena-Colegio la Salle para subrasante.



Comparación entre el costo por m² de estabilización de suelo y el índice de CBR

	PORCENTAJE DE ADITIVO				
	CAL		CEMENTO		
	2%	4%	7%	9%	11%
Costo Unitario por m ²	S/. 11.39	S/. 14.69	S/. 18.43	S/. 21.41	S/. 24.37
Índice de CBR	4.25%	5.74%	4.65%	6.17%	8.10%
Categoría de Subrasante	Pobre	Pobre	Pobre	Regular	Regular

Al analizar el índice de CBR y el costo por m² de estabilización del suelo, con la adición de cal al 2 y 4% se obtuvo un índice de CBR de 4.25% y 5.74% respectivamente, estos resultados nos indican que para ambas proporciones de cal la subrasante es categorizada como pobre, por lo que desde el punto de vista constructivo no sería recomendado usar estos porcentajes porque a la larga produciría diferentes fallas en el pavimento (piel de cocodrilo, bufamiento, deformaciones) que con el paso del tiempo el bajo costo de la cal a comparación de usar cemento, será excedido por el costo de reparación que se tendrá que realizar cuando se presente dichas fallas.

Con la adición de cemento al 7% el CBR es de 4.65%, lo que nos indica que se obtiene una subrasante pobre. Por el contrario, con la adición de cemento al 9 y 11% se obtuvo un índice de CBR de 6.17% y 8.10% respectivamente, estos resultados nos indican que para ambas proporciones de cemento la subrasante es categorizada como regular, por lo que desde el punto de vista constructivo sería más recomendable usar como estabilizante del suelo arcilloso con cemento al 11%, ya que se obtienen mejores resultados respecto de la adición con cal. Sin embargo, desde el punto de vista económico es más costoso usar cemento que cal; pero esto se ve compensado con el tiempo ya que nos va asegurar la durabilidad y funcionalidad de la vía y eso también se verá reflejado en el bajo costo por reparaciones y mantenimiento.