

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Fibras de agave americana tratada con óxido de calcio
en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante
de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco**

Edwin Luna Baca
Gandy Quispe Herhuay

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Cusco, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios por permitirme vivir y disfrutar cada día, por ayudarme en cada momento de mi vida.

Gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto que emprendo. El camino no ha sido sencillo, pero gracias a su amor, apoyo y consejos lo he logrado.

Gandy Quispe Herhuay

Gracias a Dios y la Virgen María por darme mucha Salud y permitirme poder disfrutar cada momento de la vida con mucha felicidad.

Gracias a mi familia por apoyarme siempre en cada instante de la vida, en las decisiones y proyectos que emprendo para tener un futuro venidero. Todo esfuerzo tiene su recompensa y sé que ahora he concluido lo trazado.

Edwin Luna Baca

DEDICATORIA

A mis padres Jesús Quispe Ccente y Rufina Herhuay Olivera por su amor, comprensión, ayuda en los momentos difíciles, por su sacrificio y esfuerzo en ayudarme a cumplir mis metas.

A mis hermanos Yossimar Quispe Herhuay y Carla Manila Quispe Herhuay, por sus consejos, palabras de aliento y ayuda en los momentos difíciles.

A mi novia Rocio Human Ayala por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme día a día y así luchar por un futuro mejor.

Gandy Quispe Herhuay

A mis Padres Gregorio Luna Huamán y Rosario Baca Huamán, por su perseverancia, confianza, comprensión, enseñanza y mucho sacrificio para poder cumplir mi meta.

A mi esposa Naida Huallpa Peralta y mi hija Qori Nayara Luna Huallpa por ser motores que siempre están a mi lado para poder incentivar me a crecer en lo académico y siempre están presentes en todos los momentos difíciles.

A mis Hermanos Nancy Luna Baca, Yuri Roger Luna Baca y Enaida Luna Baca por ser las personas que están constantemente dando ánimos de superación para mi crecimiento profesional.

Edwin Luna Baca

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	2
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.1.1 Formulación del problema.....	3
1.1.1.1 Problema general.....	3
1.1.1.2 Problemas específicos.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Justificación e importancia.....	4
1.4 Hipótesis	5
1.4.1 Hipótesis General.....	5
1.4.2 Hipótesis Específicas	5
1.5 Variables.....	6
1.5.1 Variable independiente.....	6
1.5.2 Variable dependiente	6

CAPÍTULO II

2.2.4.1	Extracción de la fibra de Agave americana.....	27
2.2.4.2	Propiedades físico mecánicas de la fibra de Agave americana	28
2.2.5	Proctor modificado	29
2.2.5.1	Peso específico.....	30
2.2.5.2	Contenido de humedad.....	30
2.2.5.3	Peso específico seco	31
2.2.6	Ensayo de CBR.....	32
2.2.6.1	Método del pistón en laboratorio	32
2.2.6.1.1	Muestra	32
2.2.6.1.2	Equipos y materiales.....	32
2.2.6.2	Ensayo del Cono de Penetración Dinámico (DCP)	34
2.2.6.2.1	DCP según la norma ASTM D 6951-03	34
2.2.6.2.1.1	Usos del DCP:.....	35
2.2.6.2.1.2	Descripción del equipo	35
2.2.6.3	NORMA ASTM: D1883	36
2.2.7	Permeabilidad de suelos	37
2.2.7.1	Ascensión capilar	38
2.2.8	Análisis de regresión y correlación.....	38
2.2.8.1	Tipos de variables.....	38
2.2.8.2	Correlación.....	38
2.2.8.2.1	Métodos de Correlación	38
2.2.8.3	Coeficiente de correlación de Pearson	39
2.2.8.4	Coeficiente de correlación de Spearman (Rho de Spearman).....	39
2.2.8.4.1	Tipos de correlación.....	40
2.2.8.5	Coeficiente de correlación.....	41
2.2.8.6	Coeficiente de Determinación	42
2.2.8.7	Análisis de Regresión	42

2.2.8.7.1	Regresión Lineal.....	43
2.2.8.7.1.1	Estimación de parámetros.....	43
2.2.8.7.1.2	Gráficos residuales	43
2.2.8.7.1.3	Valor-P (P – Valué)	44
2.2.8.7.1.3.1	Cálculo	44
2.2.8.7.1.3.2	Regla de rechazo	45
2.2.8.7.2	Regresión lineal múltiple.....	45
2.2.8.7.3	Regresión lineal múltiple para “m” variables independientes.....	45
2.2.8.7.3.1	Coefficiente de determinación múltiple	46
2.2.9	Norma CE010 de pavimentos	46
2.2.9.1	Contenido de humedad.....	47
2.2.9.2	Técnicas de investigación de campo	47
2.2.9.3	Número de puntos de investigación de acuerdo al tipo de vía.....	47
2.2.9.4	Ensayos de laboratorio	48
2.2.10	Análisis granulométrico de suelos.....	48
2.2.10.1	Procedimiento de análisis.....	48
2.2.11	Límites de Atherberg.....	49
2.2.11.1	Límite líquido (LL).....	49
2.2.11.2	Límite plástico.....	50
2.2.11.3	Límite de contracción.....	51
2.3	Definición de Términos Básicos.....	51
2.3.1	Agave americana	51
2.3.2	Oxido de calcio.....	51
2.3.3	Estabilización de suelos	51
2.3.4	CBR (California Bearing Ratio).....	51
2.3.5	Suelo cohesivo	52
2.3.6	Granulometría	52

2.3.7	Pavimento	52
2.3.8	Pavimento rígido	52
2.3.9	Permeabilidad	52
2.3.10	Ph.....	52
2.3.11	Subrasante.....	52
2.3.12	Subbase.....	53
2.3.13	Suelo arcilloso.....	53
2.3.14	Superficie de rodadura.....	53
2.3.15	Vía urbana	53
2.3.16	Rasante.....	53
2.3.17	Napa freática.....	53
2.3.18	Muestreo	53
2.3.19	Mejoramiento	53
2.3.20	Densidad máxima seca.....	54
2.3.21	Limos	54
2.3.22	Limite liquido	54
2.3.23	Limite plástico	54
2.3.24	Cuarteo	54
2.3.25	Contenido de humedad.....	54
2.3.26	Compactación	54
2.3.27	Arcillas	55
2.3.28	Aglomerante.....	55

CAPÍTULO III

METODOLOGIA	56
3.1 Método de investigación	56
3.2 Tipo de investigación	56
3.3 Nivel de investigación	57

3.4	Diseño de la investigación	57
3.5	Población muestra	58
3.5.1	Población	58
3.5.2	Muestra	58
3.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	60
3.6.1	De campo:.....	61
3.6.1.1	Excavación de calicatas.....	61
3.6.2	Ensayos de laboratorio.....	63
3.6.2.1	Corte y tratamiento de la fibra de Agave America.....	63
3.6.2.1.1	Corte	63
3.6.2.1.2	Tratamiento del Agave americano	64
3.6.2.2	Determinación del tipo de suelo.....	65
3.6.2.2.1	Granulometría	65
3.6.2.3	Ensayo Proctor modificado	65
3.6.2.3.1	Pesaje de las muestras.....	66
3.6.2.3.2	Mezclado de muestras.....	68
3.6.2.3.3	Ensayo de compactación	68
3.6.2.3.4	Secado de muestras de suelo compactado	69
3.6.2.3.5	Pesaje de muestras secas de suelo compactado	70
3.6.2.4	Ensayo CBR mediante el método PDC.....	72
3.6.2.4.1	Pesaje de muestras	72
3.6.2.4.2	Mezclado de muestras.....	73
3.6.2.4.3	Compactación de las muestras.....	74
3.6.2.4.4	Ensayo de penetración PDC.....	74
3.6.2.5	Ensayo de ascensión capilar	76
3.6.2.5.1	Pesaje de muestras	76
3.6.2.5.2	Mezclado de muestras.....	77

3.6.2.5.3 Compactación de muestras para el ensayo de ascensión capilar	77
3.6.2.5.4 Desmolde de las muestras compactadas	78
3.6.2.5.5 Ensayo de ascensión capilar	78
3.6.3 Procesamiento de datos.....	80

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	81
4.1 Resultados.....	81
4.1.1 Clasificación de suelo.....	81
4.1.1.1 Granulometría.....	81
4.1.1.2 Límites de consistencia.....	82
4.1.1.3 Clasificación del suelo.....	83
4.1.2 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con oxido de calcio en la máxima densidad máxima seca y en el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco 84	
4.1.2.1 Proctor modificado	85
4.1.2.1.1 Obtención de la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad.....	85
4.1.2.1.2 Densidad máxima seca y humedad óptima resultante.....	99
4.1.3 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.....	100
4.1.3.1 Obtención del índice de soporte de California mediante el método PDC 100	
4.1.3.2 Resultados del CBR mediante el método PDC.....	102
4.1.3.3 Resultados del CBR sumergido	103
4.1.4 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio	

en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.....	104
4.2 Constatación de hipótesis.....	105
4.2.1 La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en el contenido de humedad óptima y en la densidad máxima seca de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco	105
4.2.1.1 Contenido óptimo de humedad (COH).....	106
4.2.1.1.1 Análisis de regresión lineal múltiple del COH	107
4.2.1.1.1.1 Gráficos residuales del COH.....	107
4.2.1.1.1.2 Coeficiente de determinación.....	108
4.2.1.2 Densidad máxima seca (DMS)	110
4.2.1.2.1 Análisis de regresión lineal múltiple de la DSM	110
4.2.1.2.1.1 Gráficos residuales de la DSM.....	110
4.2.1.2.1.2 Coeficiente de determinación DMS.....	114
4.2.2 La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en el CBR de los suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco	115
4.2.2.1 Índice Soporte de California (CBR).....	115
4.2.2.1.1 Análisis de regresión lineal múltiple del CBR.....	116
4.2.2.1.1.1 Gráficos residuales del CBR	116
4.2.2.1.1.2 Coeficiente de determinación del CBR	119
4.2.3 La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco	120
4.2.3.1 Análisis de regresión lineal múltiple de la permeabilidad del suelo	120
4.2.3.1.1 Gráficos residuales de la permeabilidad del suelo.....	120

4.2.3.1.2 Coeficiente de determinación de la ascensión capilar	123
4.3 Discusión	124
4.3.1 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la densidad máxima seca y en el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco ...	124
4.3.2 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.....	126
4.3.3 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.....	127
CONCLUSIONES	129
RECOMENDACIONES	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
ANEXOS.....	136
Anexo I: Operacionalización de variables.....	136
Anexo II: Matriz de consistencia.....	138
Anexo III: Tabla t-Student.....	140
Anexo IV: Resultados de los ensayos de laboratorio	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de materiales de carreteras subrasantes	16
Tabla 2: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	21
Tabla 3: Requisito de suelos para la estabilización de la subrasante	23
Tabla 4: Requisitos del agua no potable para la estabilización de subrasantes con óxido de calcio	23
Tabla 5: Resistencia a la tracción de la fibra de Agave americana.	28
Tabla 6: Propiedades físico mecánicas de la fibra de Agave americana	29
Tabla 7: Correlaciones entre el índice PDC (mm/golpe) y el CBR	36
Tabla 8: Grado de relación según coeficiente de correlación	40
Tabla 9: Número de puntos de investigación	48
Tabla 10: Determinación de la constante de suelos	48
Tabla 11: Tratamientos del suelo arcilloso	59
Tabla 12: Tabla de muestras aleatorias con peso en %	60
Tabla 13: Tabla de muestras aleatorias con peso en kg	60
Tabla 14: Coordenadas UTM de las calicatas	61
Tabla 15: Longitud de la fibra de Agave americana	64
Tabla 16: Numero de ensayos de Proctor modificado	66
Tabla 17: Resumen de los datos obtenidos en laboratorio	71
Tabla 18: Tabla de ensayos de CBR	72
Tabla 19: Resumen de datos obtenidos del ensayo PDC	75
Tabla 20: Tabla de ensayos para la ascensión capilar	76
Tabla 21: Resumen de datos del ensayo de ascensión capilar	80
Tabla 22: Granulometría del suelo	81
Tabla 23: Curva granulométrica	82
Tabla 24: Limite líquido	82
Tabla 25: Limite plástico	83
Tabla 26: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N11	85
Tabla 27: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N13	86
Tabla 28: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N4	87
Tabla 29: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N7	88
Tabla 30: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N10	89

Tabla 31: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N12	90
Tabla 32: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N2	91
Tabla 33: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N3	92
Tabla 34: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N8	93
Tabla 35: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N6	94
Tabla 36: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N5	95
Tabla 37: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N9	96
Tabla 38: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N1	97
Tabla 39: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N14	98
Tabla 40: Cuadro resumen de humedad óptima y densidad máxima seca	99
Tabla 41: Tabla de dosificación para el ensayo de CBR mediante el método PDC	100
Tabla 42: Resultados del ensayo de penetración	101
Tabla 43: Penetración promedio mediante el método PDC	102
Tabla 44: Valor de CBR mediante el método PDC	103
Tabla 45: Valor del CBR sumergido mediante la norma ASTM D 1883.....	104
Tabla 46: Resultados del ensayo de ascensión capilar	105
Tabla 47: Datos para el análisis de regresión lineal múltiple de la DSM y COH ..	106
Tabla 48: Tabla de resultados de contenido óptimo de humedad (COH)	106
Tabla 49: Tablas estadísticas de la regresión del COH	109
Tabla 50: Tabla de resultados de la densidad máxima seca (DSM)	110
Tabla 51: Tabla definitiva de resultados de la densidad máxima seca (DMS)	112
Tabla 52: Tablas estadísticas de la regresión del DMS	114
Tabla 53: Tabla de resultados del CBR	115
Tabla 54: Tabla definitiva de resultados del CBR	118
Tabla 55: Tablas estadísticas de la regresión del DMS	119
Tabla 56: Tablas estadísticas de la regresión de la ascensión capilar	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos en los grupos: A2, A-4, A-5, A-6 y A-7.....	16
Figura 2: Gráfica de elasticidad	19
Figura 3: Floculación y aglomeración de partículas	25
Figura 4: Agave americana.....	27
Figura 5: Extracción de la fibra de Agave americana.....	28
Figura 6: Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada.....	30
Figura 7: Gráfica de determinación del contenido óptimo de humedad y la densidad máxima seca	31
Figura 8: Equipos y materiales para el ensayo CBR.....	33
Figura 9: Curva DCP para diferentes capas de suelo.....	34
Figura 10: Esquema del dispositivo DCP.....	35
Figura 11: Curva penetración versus esfuerzo del CBR	37
Figura 12: Tipos de correlación.....	41
Figura 13: Ejemplo de Diagrama de dispersión	44
Figura 14: Límites de Atherberg.....	49
Figura 15: Dispositivo de límite líquido y herramienta de ranurado	50
Figura 16: Prueba de límite plástico.....	50
Figura 17: Ubicación de las calicatas.....	62
Figura 18: Calicata C-1	62
Figura 19: Calicata C-2	63
Figura 20: Calicata C-3.....	63
Figura 21: Fibra de Agave Americana cortada en diferentes longitudes.....	64
Figura 22: Tratamiento de la agave americana.....	65
Figura 23: Pesaje de muestras de suelo.....	66
Figura 24: Pesaje de las muestras de Agave americana	67
Figura 25: Pesaje del óxido de calcio	67
Figura 26: Mezclado de muestras.....	68
Figura 27: Ensayo de compactación.....	69
Figura 28: Pesaje de muestras de suelo compactado	69
Figura 29: Secado de muestras de suelo compactado	70

Figura 30: Pesaje de muestras secas de suelo compactado	70
Figura 31: Pesaje de muestras	73
Figura 32: Mezclado de muestras del CBR.....	73
Figura 33: Molde compactado para el CBR	74
Figura 34: Ensayo de penetración PDC.....	75
Figura 35: Peaje de muestras para el ensayo de ascensión capilar	76
Figura 36: Mezclado de muestras para el ensayo de ascensión capilar	77
Figura 37: Muestra compactada para el ensayo de ascensión capilar	77
Figura 38: Muestras de suelo compactado para el ensayo de ascensión capilar ..	78
Figura 39: Colocación de las muestras en la bandeja con agua.....	79
Figura 40: Medición de la ascensión capilar	79
Figura 41: Diagrama de fluidez	83
Figura 42: Tipo de suelo de acuerdo a la carta de plasticidad	84
Figura 43: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N11	86
Figura 44: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N13	87
Figura 45: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N4	88
Figura 46: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N7	89
Figura 47: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N10	90
Figura 48: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N12	91
Figura 49: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N2	92
Figura 50: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N3	93
Figura 51: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N8	94
Figura 52: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N6	95
Figura 53: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N5	96
Figura 54: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N9	97
Figura 55: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N1	98
Figura 56: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N14	99
Figura 57: Gráfico de los residuales de longitud de fibra para COH	107
Figura 58: Gráfica de los residuales de la dosis de fibra para COH	108
Figura 59: Gráfico de los residuales de dosis de óxido de calcio.....	108
Figura 60: Gráfico preliminar de los residuales de la longitud de fibra para DSM	111
Figura 61: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para DSM....	111
Figura 62: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para DSM....	112

Figura 63: Gráfico definitivo de los residuales de longitud de fibra para DSM.....	113
Figura 64: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para DSM	113
Figura 65: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para DSM	114
Figura 66: Gráfico preliminar de los residuales de la longitud de fibra para CBR	116
Figura 67: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para CBR	117
Figura 68: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para CBR	117
Figura 69: Gráfico definitivo de los residuales de longitud de fibra para CBR	118
Figura 70: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para CBR.....	118
Figura 71: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para CBR.....	119
Figura 72: Gráfico preliminar de los residuales de longitud de fibra para la ascensión capilar	121
Figura 73: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para la ascensión capilar	121
Figura 74: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para la ascensión capilar	122
Figura 75: Gráfico definitivo de los residuales de la longitud de fibra para la ascensión capilar	122
Figura 76: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para la ascensión capilar	123
Figura 77: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de óxido de calcio para la ascensión capilar	123

RESUMEN

Fibras de agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de cusco, esta investigación se realizó con el objetivo determinar la influencia de la fibra de Agave Americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos, mediante el análisis de la densidad máxima seca, contenido óptimo de humedad, CBR y la permeabilidad, para lo cual se realizó tres calicatas de los cuales se extrajeron muestras de suelo a los cuales se les dio diferentes tratamientos agregando diferentes dosis de fibra de agave americana tratada con óxido en sus diferentes longitudes y dosis de óxido de calcio. Los cuales fueron sometidos a los ensayos de laboratorio, los datos obtenidos fueron sometidos al análisis estadístico de regresión lineal múltiple. Los resultados de la investigación nos indican que la dosis de fibra de agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en al COH, DMS, CBR menos en la permeabilidad del suelo. Se llegó a la conclusión de que la utilización de la fibra de agave americana tratada con óxido de calcio no ayuda en la estabilización de suelos arcillosos ya que por cada 1% en peso de la fibra de agave americana que se añade el CBR disminuye en 0.130%.

Palabras clave: Óxido de calcio, Agave americana, estabilización de suelos, cal, maguey.

ABSTRACT

Agave americana fibers treated with calcium oxide in the stabilization of clay soils in the subgrade of rigid pavements in the city of Cusco, this research was conducted with the objective of determining the influence of Agave americana fiber treated with calcium oxide in the stabilization of clay soils, by analyzing the maximum dry density, optimum moisture content, CBR and permeability, for which three pits were made from which soil samples were extracted to which were given different treatments by adding different doses of American agave fiber treated with oxide in different lengths and doses of calcium oxide. These were subjected to laboratory tests, and the data obtained were subjected to multiple linear regression statistical analysis. The results of the research indicate that the dose of agave americana fiber treated with calcium oxide has a significant influence on COH, DMS, CBR less on soil permeability. It was concluded that the use of American agave fiber treated with calcium oxide does not help in the stabilization of clay soils since for every 1% by weight of American agave fiber added, the CBR decreases by 0.130%.

Key words: Calcium oxide, agave americana, soil stabilization, lime, maguey.

INTRODUCCIÓN

La estabilización consiste en mezclar un suelo cohesivo o arcilloso con una sustancia y/o aditivo para producirse una reacción química que cementan las partículas de un suelo, para la estabilización de suelos con cal se deben preparar especímenes para el ensayo de compresión no confinada a la humedad óptima, densidad máxima seca y se debe determinar el % de óxido de calcio por peso seco de suelo, además se debe realizar ensayos de CBR para evidenciar las mejoras, en la presente investigación se utiliza la fibra de agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco, la cual tiene un impacto positivo en el medio ambiente ya que se utiliza fibras naturales envés de las fibras sintéticas y un impacto positivo a la sociedad ya que la construcción del pavimento rígido eleva la calidad de vida de los habitantes que residen en el ámbito de la vía.

Esta investigación tiene por objetivo determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos, mediante las realizaciones de ensayos de laboratorio para determinar la densidad máxima seca, contenido óptimo de humedad, CBR y la ascensión capilar. La influencia se ha determinado mediante ensayos de laboratorio cuyos resultados fueron sometidos al análisis estadístico de regresión lineal múltiple.

La hipótesis de esta investigación es que la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye de manera significativa en la estabilización de suelos arcillosos y del mismo modo en la densidad seca máxima, contenido óptimo de humedad, CBR y la permeabilidad de los suelos arcillosos.

La presente investigación consta de 4 capítulos:

En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema de investigación, objetivos, justificación, hipótesis y variables.

El Capítulo II consta de marco teórico, antecedentes del problema, bases teóricas y la definición de términos básicos.

El Capítulo III consta de la metodología de investigación, tipo de investigación, nivel de investigación, diseño de investigación, población, muestra y técnica e instrumentos de recolección de datos.

El capítulo IV consta de resultados y discusión en el cual se muestran las tablas y gráficos resultantes de los ensayos de laboratorio, así como los resultados del procesamiento estadístico para verificar la influencia de la fibra de agave americana en la estabilización de suelos arcillosos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento del Problema

Alrededor del mundo y en nuestro país nuestras vías que tenemos a nivel del territorio peruano son muy importantes para el desarrollo de las provincias, regiones y por ende el desarrollo de los países. De ahí es que emana la necesidad de concretar proyectos de infraestructura vial de acuerdo a los requerimientos de seguridad y capacidad. Es así que en la zona Noroccidental de la ciudad del Cusco existe un desarrollo vial en expansión, la cual cuenta con un suelo arcilloso que no es adecuado para la subrasante, de ahí parte la necesidad de estabilizar el suelo arcilloso utilizando óxido de calcio y el Agave americana que es un recurso abundante en esta zona y de la cual no se tiene ningún antecedente en el empleo de estos recursos en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante de un pavimento rígido.

El proyecto vial es la calle Pachacutec el cual se encuentra en el sector denominado Tica Tica del distrito, provincia y región del Cusco. El suelo de esta vía es del tipo arcilloso, que no es apta para la construcción de pavimento dirigido ya no cumple los requisitos para hacer este tipo de construcciones. Es así mediante esta investigación se va a verificar el comportamiento físico - químico de la fibra tratada de Agave americana y del óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante, ya que no se ha encontrado ningún estudio previo sobre en la utilización de Agave americana en la estabilización de suelos arcillosos.

Es en este sentido que la presente tesis trata de aplicar una fibra natural abundante en la zona como lo es el Agave americana, planta de la familia de los agaves conformada de hojas en roseta, gruesas y carnosas.

Se le conoce más como el árbol de las maravillas, porque de él puede obtenerse "agua y vino, aceite, miel, arrope e hilo, agujas y otras cien cosas", como lo redactó el jesuita José de Acosta en su Historia Natural y Moral de las Indias. De las pencas del Agave americana se obtienen hilos para aprovechar en el tejido de costales, tapetes, morrales, ceñidores, redes de pesca y cordeles. (1) (p.18)

Estas fibras de Agave americana serán dotadas de un tratamiento con óxido de calcio para mejorar su comportamiento mecánico como refuerzo del suelo de subrasante de la mencionada avenida.

La utilización de Agave americana tratada con el óxido de calcio desde el punto de vista socio ambiental eleva la calidad de vida de los pobladores que habitan en el ámbito de la vía y de la misma manera al utilizar fibras naturales apoya en la conservación del medio ambiente ya que se deja de utilizar productos químicos que no son amigables con el medio ambiente. Del mismo modo se deja de depredar canteras ya que se utiliza el mismo suelo natural.

Esta investigación desarrolla temas teóricos y prácticos que darán a conocer las bondades del Agave Americana en la estabilización de suelos arcillosos, que servirán como base para futuros trabajos de investigaciones y como base de un nuevo método de estabilización de suelos arcillosos.

1.1.1 Formulación del problema

1.1.1.1 Problema general

¿En qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco?

1.1.1.2 Problemas específicos

¿En qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco?

¿En qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco?

¿En qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.

Determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.

Determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.

1.3 Justificación e importancia

Justificación social

La justificación desde el punto de vista socio ambiental al mejorar una vía de tránsito urbano es elevar la calidad de vida de los pobladores que residen en el ámbito de la vía, la aplicación de fibras naturales mejora el suelo y reduce la contaminación al medio ambiente,

dejándose de lado la utilización de otros productos químicos, así también se deja de depredar las canteras pues se utiliza el suelo que se encuentra in situ mejorándolo con fibras naturales y óxido de calcio.

Justificación teórica

La presente tesis servirá como referente teórico para futuras investigaciones que traten este tema, ya que en esta investigación se desarrollará temas teóricos y prácticos que darán a conocer las bondades de la Agave americana y el óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante de la calle Pachacutec.

Justificación metodológica

La presente tesis se aprovechará como un ejemplo metodológico para que otros investigadores puedan indagar el comportamiento de las fibras de Agave americana y el óxido de calcio en la estabilización de suelos para ser probadas o tratada con otras sustancias, como por ejemplo asfalto u otros.

Justificación técnica

La presente tesis será de mucha utilidad ya que permitirá la construcción de obras de ingeniería civil, mediante la generación de conocimientos en base al estudio del comportamiento de la fibra de Agave americana y el óxido de calcio aplicado en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante en la construcción de pavimentos rígidos.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis General

La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la Ciudad de Cusco.

1.4.2 Hipótesis Específicas

La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.

La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad

de Cusco.

La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.

1.5 Variables

1.5.1 Variable independiente

- Fibra de Agave americana.
- Óxido de calcio.

1.5.2 Variable dependiente

- Estabilización de la subrasante del pavimento rígido.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

2.1.1 Antecedente Internacional

Para optar el título de ingeniero civil, sustentó su trabajo de investigación en la Universidad Católica de Colombia, la tesis “Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante”. Con el objetivo de efectuar la estabilización química de un suelo (caolín), a través de la añadidura de cal y ceniza en distintos porcentajes para detallar la dosificación óptima de estabilizante. Por medio de la resistencia a la compresión y a la fuerza de tracción, a través del análisis de la resistencia a la compresión y tracción del caolín con añadidura de cal y ceniza volante, para determinar el mejor comportamiento mecánico, características físico-mecánicas de suelo tipo caolín para su utilización en pavimentos y cotejar el comportamiento mecánico a la compresión y tracción del suelo estabilizado con añadidura de cal y ceniza volante. Obtuvo como resultado una estabilización óptima del suelo mediante la utilización de cal y ceniza. Llegando a las conclusiones que a través del análisis de los ensayos de compresión y tracción fue asequible plantear comparaciones con ambos materiales estabilizantes, en donde, se pudo ver que independientemente del porcentaje de añadidura de cal viva, fue notorio el progreso de la resistencia en dichos cuerpos de prueba, lo que permite refrendar la versatilidad de este material en la estabilización de tipo química en los suelos con altos contenidos de marga. No obstante, los parámetros de ahínco máximo y rigidez tienen una tendencia creciente para la cal viva, debido a la reacción que se genera con el líquido

disuelta (secado), lo que podemos afirmar que apoya la idea de que este material irrefutablemente es una buena opción para el tratamiento de suelos, especialmente por el costo económico y facilidad en cuanto a su uso, De semejante forma, a tracción, la cal demostró un excelente comportamiento mecánico especialmente para la añadidura del 8%, de acuerdo a esto, se puede culinar que respecto a la muestra de control, la resistencia a la tracción aumentó, así podemos decir que mejoró el comportamiento de la muestra. (2)

Para optar el título de ingeniero civil, sustentó en la Universidad Católica del Ecuador, la tesis “Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del Cantón Tosagua provincia de Manabí”. Con el objetivo de estabilizar el suelo expansivo del sector Calcical del Cantón Tosagua, por medio de la aplicación de cal y cemento, para disminuir su potencial de expansión. Se realizó mediante el análisis de las propiedades de los suelos expansivos del sector en el laboratorio, la determinación de las propiedades mecánicas de los suelos, la determinación del porcentaje óptimo de cal y cemento y mediante el análisis del costo de estabilización de suelos con cal y cemento. Se obtuvo como resultado que con el 3% de cemento se reduce el porcentaje de hinchamiento en un 57%, por medio de la adhesión de 5% de cemento esta reducción es del 74%, y haciendo uso del 7% se logra una disminución de 87%. Usando un 3% de cemento se reduce el potencial de hinchamiento de alto a medio, en el 5% se alcanza una reducción de alto a bajo y con el 7% se disminuye el potencial de expansión de alto a muy bajo. Llegando a la conclusión de que la densidad máxima seca que alcanza el suelo se puede indicar que es menor a medida que se aumenta el porcentaje de estabilizante y la humedad óptima de compactación se incrementa, esto nos indica que con una energía de compactación menor se puede indicar que se llegará a alcanzar la densidad máxima seca que puede ofrecer el suelo, se logra entonces no solo disminuir el potencial de expansión, sino también el grado de compactación, utilizando la cal viva como agente estabilizador se logra reducir el porcentaje de hinchamiento de los suelos, con un 3% esta disminución es del 20%, con 5% de cal el porcentaje de hinchamiento se disminuye en un 40% y con el uso del 7% de estabilizante se alcanza reducciones de 57%. Por medio del uso de cal se logra disminuir el potencial de hinchamiento de alto a medio con 3 y 5% de estabilizante, y se alcanza un potencial de hinchamiento bajo con el 7% de cal. (3)

Para optar el título de ingeniero civil, sustentó en la Universidad Autónoma de Nicaragua, la tesis “Estabilización de suelos cohesivos por medio de cal en las vías de la comunidad de San Isidro del pegón, municipio Potosí- Rivas”. Con la finalidad de estabilizar los suelos cohesivos de las vías en la comunidad San Isidro del Pegón, municipio de Potosí

departamento Rivas, con una mezcla de cal hidratada. Su investigación se basó en determinar porcentajes de los materiales estabilizantes a usar y mediante los resultados de las pruebas de laboratorio obtuvo una mejora en las características de los suelos cohesivos. Llegando a dar una conclusión de que con un 9% de cal se conseguían las mejores condiciones de suelo cumpliendo con la mayor parte de las propiedades propuestas y que la expansión o hinchamiento es la propiedad con mayor repercusión en estos suelos, logrando una disminución del 61 por ciento con la adición óptima de cal. (4)

Para optar el título de ingeniero civil, sustentó en la Universidad Técnica de Ambato, la tesis “Estudio del comportamiento de un suelo arcilloso estabilizado por dos métodos químicos (cal y cloruro de sodio)”. Con el objetivo de analizar el comportamiento de un suelo arcilloso estabilizado con componentes químicos (cal y cloruro de sodio) en el laboratorio. El estudio se desarrolló mediante la identificación de las características del suelo natural, con cal y cloruro de sodio (resistencia máxima y resistencia admisible), determinación del porcentaje óptimo de cal y cloruro de sodio para la estabilización de suelos. Obteniéndose como resultado un suelo estabilizado con cal, arroja mejores resultados que el suelo estabilizado con cloruro de sodio. De esta manera llegó a la culminación de que porcentaje óptimo de Cal se evidenció que conserva mejor comportamiento que el porcentaje óptimo de Cloruro de Sodio, en todo su análisis la Cal demostró acatar casi con todos los parámetros para su aplicación de una subrasante, no obstante, otros parámetros como el Límite líquido y el Ph se aproximaron a sus valores máximos y mínimos de cada uno de ellos, mientras tanto que el porcentaje de Cloruro de Sodio no demostró ser aplicado para una subrasante debido a que no cumplió con los parámetros necesarios y se concluyó que el CBR del suelo estabilizado con Cal para los siguientes porcentajes de 7,5% y 12,5% con valores de 20,8% y 26% cumplen con lo fijado por las Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes del Ministerio de Obras Públicas de la República del Ecuador de la sección 402 (Mejoramiento de la subrasante) y son mayores que el CBR mínimo que es de 20%. Mientras tanto se puede indicar que para el suelo estabilizado con Cloruro de Sodio no cumple con la especificación. (5)

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Para optar el título de ingeniero civil, sustentó en la Universidad Nacional de Cajamarca, la tesis “Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso”. Con el objetivo de evaluar el efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso. Esta investigación se pudo desarrollar mediante la evaluación del efecto de la cal

en el límite líquido y límite plástico, el efecto de la cal en la densidad máxima seca y la evaluación del efecto de la cal en el valor relativo de soporte (CBR) del suelo arcilloso. Se llegó al resultado de que al adicionar cal en las muestras el CBR aumenta en un 421.57%. se concluye que para este tipo de suelo perteneciente a la subrasante la dosis de cal al 4% es la óptima para estabilizarla; con la adición de cal de 0%, 2%, 4% y 6% el comportamiento del límite líquido disminuye, teniendo su máxima disminución la muestra con cal al 4% con un 57.15. La muestra con cal al 0% tiene un límite líquido de 67.57; El límite plástico aumenta de acuerdo a la adición de cal logrando su máximo límite plástico de 47.60 con cal al 4%, el límite plástico menor es de 30.70 con cal al 0%; El CBR de diseño al 95% máximo se consigue con un porcentaje de cal de 4% con un valor de 11.48%. El CBR mínimo es de 2.55% sin incrementat cal a la muestra, el cual está por debajo de 6 exigido para subrasantes según norma (MTC EM115). Este aumento del CBR de un 421.57%. (6)

Para optar el título de ingeniero civil, sustentó en la Universidad Andina Nestor Cáceres, la tesis “Análisis experimental de suelos estabilizados con ceniza volante, cemento y cal para subrasante mejorada de pavimentos en la ciudad de puno”. Con el objetivo de evaluar el comportamiento de la aplicación de ceniza volante, cemento y cal para la estabilización de suelos y su empleo como material de subrasante mejorada. Llegando al resultado que la combinación de ceniza volante, cemento y cal con el suelo material de cantera es un método nuevo de estabilización mixta logra que un estabilizador compense la carencia del otro, la ceniza tiene propiedades de puzolana que ayuda a mejorar las propiedades mecánicas, el cemento ayuda al incremento de la resistencia y la cal tiene como propósito mejorara las características de trabajabilidad, reduciendo principalmente la plasticidad del suelo. Por lo tanto, mejora las propiedades físico mecánicas del material de cantera, entonces es factible su empleo como material estabilizador de suelos Grava Limosa (GM) para su uso como material de sub rasante y sub base mejorada. Llegó a definir una conclusión de que la mezcla de ceniza volante, cemento y cal con el material de cantera (GM) funciona como un material estabilizador reduciendo los efectos de plasticidad; teniendo una pérdida del Índice de Plasticidad para la M-03 en 7.63% y para la M-04 en 8.81%, con el proceso de estabilización, el material de cantera (GM) con la mezcla de ceniza volante – cemento - cal mejora las propiedades de resistencia, teniendo un aumento en el CBR del suelo para la M-02 en, 38.3%, para la M-03 en 45.7% y para la M-04 en 51.1% e incrementa su densidad máxima seca para la M-02 en 0.025 kg/m³, para la M-03 en 0.029 kg/m³ y para la M-04 en 0.031 kg/m³. (7)

Para optar el título de ingeniero civil, sustentó en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, la tesis “propuesta de estabilización con cal para subrasantes con presencia de suelos arcillosos en bofedales y su influencia en el pavimento rígido bajo la metodología de diseño AASHTO 93 aplicado al segmento 1 de la carretera Oyón-ambo”. Con el objetivo de determinar a través de un análisis comparativo las mejoras en el comportamiento de un suelo arcilloso de baja plasticidad a través de la explotación de cal como agente estabilizador para ser empleado en la carretera Oyón-ambo. El estudio se desarrolló efectuando ensayos al suelo natural para determinar el porcentaje excelente de cal que hace que el suelo arcilloso cumpla con las propiedades necesarias para que pueda ser utilizado en la construcción de subrasante de pavimentos rígidos, llevar a cabo los respectivos ensayos de laboratorio a las mezclas suelo-estabilizante (suelo-cal) siguiendo los métodos de las normas necesarias y definiendo la calidad de la subrasante a través de los resultados obtenidos en la prueba de valor de soporte de california (CBR) y diseñar el paquete estructural del pavimento rígido bajo la metodología AASHTO 93. Este estudio dio como resultado que los valores CBR de la mezcla suelo-cal obtenidos en esta investigación podrán servir como parámetro de comparación para estabilizar suelos con características similares, la aceptabilidad o rechazo de estos dependerá de las especificaciones para cada proyecto. Cabe subrayar que el CBR que se propone en la investigación ha tenido un curado solo de 7 días por probidades de tiempo, no obstante lo óptimo sería que se trabaje con un Cbr a 28 días para saber la máxima capacidad que la cal podría otorgar al suelo. Llegando a las subsiguientes conclusiones: Los ensayos de CBR realizados al suelo atrás y luego de estabilizar con 10% de cal en peso demuestran que utilizar Cal como metodología de estabilización de suelos arcillosos de baja plasticidad incrementa la capacidad de soporte del suelo; se ha pasado de CBR= 6% a CBR= 43.3% y de la misma manera se llegó a la conclusión de que un punto importante a decidir en el diseño es la optimización del material que conforma la capa de subbase la cual según la norma peruana del MTC recomienda un CBR mínimo de 60% para el nivel de servicio que tiene la vía en estudio y no 40% como la empresa encargada de llevar a cabo el expediente definitivo toma para el diseño. Por lo en el mejor de lo casos al conservar un CBR mayor se puede elegir por incrementar el espesor de la capa en alusión la cual influye directamente con la disminución del espesor del pavimento. Bajo este concepto se ha elaborado el tercer diseño respetando el CBR mínimo incrementando así el módulo de reacción de la subrasante. (8)

Para optar el título de ingeniero civil, sustentó en la Universidad Tecnológica de los Andes, la tesis “Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización san luis de la ciudad de Abancay”. Con el objetivo de estabilizar

el suelo existente de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la urbanización San Luis, adicionando un porcentaje de cal y que este posteriormente pueda ser usado como capa de subrasante de un pavimento según las especificaciones y normas vigentes en nuestro país. El estudio se realizó en base a los siguientes métodos: Determinar las propiedades físico - mecánicas del suelo ya estabilizado, obtener un porcentaje de cal en base a dos métodos los cuales son el método de Eades & Grim para determinar el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo y porcentaje de cal óptimo el cual será obtenido mediante los ensayos de laboratorio y mediante la determinación de las propiedades físico - mecánicas del suelo ya estabilizado. Obteniéndose como resultado de que las muestras que se analizaron de la Urbanización San Luis Baja por ser vías urbanas se rigen al Reglamento Nacional de Edificaciones específicamente a la norma CE.010 pavimentos urbanos en la que indica que el CBR para una capa de Subbase es de 80% y el CBR para una base es de 100%, Por lo tanto, los CBR del suelo natural no cumplen ya que su valor de CBR no es el adecuado para ser utilizado como Subbase o base. Fue por ello que mediante el uso de cal, se estabilizó químicamente el suelo con la finalidad de incrementar su capacidad de soporte CBR. Llegando a las siguientes conclusiones basado en los resultados obtenidos del laboratorio de suelos, se concluye que para la muestra 01 se debe de añadir 8% de cal al suelo para incrementar para alcanzar un índice de CBR de 145.00 y así ser utilizado como base para un pavimento. Mientras que en la muestra 02 por ser un suelo arena limosa el suelo no adquiere mayores capacidades portantes ya que al añadirle 8% de cal solo se incrementó el índice de CBR hasta 68.00 no cumpliendo con lo señalado en la norma CE.010. Cabe indicar que de acuerdo a las recomendaciones de la norma y de la bibliografía estudiada este tipo de suelos reaccionan de mejor manera con el cemento y La estabilización con cal provoca una mejora significativa en la textura y estructura del suelo mediante la reducción de la plasticidad y proporcionando ganancia de resistencia puzolánica. (9)

En la revista técnica de la Asociación Española de la carretera. "Estabilización de suelos con cal: actuaciones previas a su ejecución". Con el objetivo de sintetizar los cuatro elementos esenciales que constituyen el sistema: la cal, el suelo, la mezcla cal con suelo, de la misma manera las condiciones que debe cumplir el estudio previo a la formulación y administración de la cal para poder conseguir resultados deseables en la obra, en los materiales y de esta manera optimizar el consumo de cal. Los suelos son materiales naturales que podemos encontrar en el medio, que pueden estar constituido por diferentes partículas o granos que se podemos separarlos sencillamente por simple trituración o eventualmente por la acción de una corriente de agua. La cal es una sustancia química que

se pueden utilizar en la estabilización de suelos, la ventaja principal podemos indicar es la reducción del contenido de humedad de los suelos, la mezcla de la cal y suelo en la estabilización de suelos podemos verificar que los suelos excesivamente húmedos pueden secarse. Podemos llegar a una conclusión que una vez incorporada la cal a suelos arcillosos podemos comprobar en laboratorio que disminuye la humedad natural del suelo, disminuye el índice de plasticidad, un aumento del CBR. Y también indicar que la estabilización de suelos arcillosos con cal se ha convertido en una alternativa muy ventajosa a los métodos tradicionales de construcción de pavimentos y otras infraestructuras, tanto desde el punto de vista técnico como económico, de esta manera el término de la ejecución de obras es rápida. (10)

En la 117th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Industry, Innovation, And Infrastructure for Sustainable Cities and Communities. “Método de estabilización con cal en subrasantes para pavimentos rígidos diseñados por AASHTO 93 en proyectos viales con presencia de bofedales”. Con el objetivo de la presente investigación está orientada en la proposición de un método para mejorar la capacidad portante de los suelos en bofedales utilizando como agente estabilizador la cal. Esto fue estudiada en el Tramo I del proyecto Mejoramiento de la carretera Oyón- Ambo, con el propósito de estudiar la influencia que puede tener en el espesor del pavimento rígido; los suelos más convenientes para estabilización con cal son aquellos suelos que presentan mayor proporción de arcilla y con índice de plasticidad mayores a 10 y los bofedales son humedales que se originan a más de 3500 msnm producto de las lluvias, deshielo de glaciares e infiltraciones de aguas subterráneas en las mesetas andinas. En el tramo I de la carretera antes mencionada de 49km de pavimento rígido, se han identificado 23 zonas de bofedales que deben ser mejoradas las cuales abarcan un total de 12247.38 m³. De estas 23 zonas se ha identificado la progresiva con mayor volumen de mejoramiento que comprende un total de 1800 m³ de suelo inadecuado para ser subrasante. Se extrajo aproximadamente una muestra de material de 0.25 m³ a los cuales se le realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Potencial de hidrógeno y California Bearing Ratio. Conclusión De los ensayos realizados a la muestra extraída de un bofedal del tramo I del proyecto se puede indicar que es una arcilla de alta plasticidad (IP> 10) y alto contenido orgánico (CMO=4.8%), también se puede indicar que el 10% en peso seco es la adecuada para esta investigación ya que se vieron que al estabilizar con cal la subrasante del bofedal se obtiene un incremento de hasta siete veces la capacidad portante inicial. (11) (pp.1-7)

En el Informe. “estabilización de suelos con cal y ceniza volante”. Con el objetivo de determinar la resistencia a una tracción indirecta y compresión. Este trabajo se evaluó en laboratorio utilizando un suelo tipo caolín modificado con añadiduras de cal y ceniza volcánica al 2%, 4%, 6% y 8% con respecto a la masa total de la muestra y se realizó ensayos de caracterización de suelos. Dando como resultado demostrado que la incorporación del 4% de cal otorga una mejor resistencia al caolín en lo referente a esfuerzos y deformaciones máximas, mientras tanto la ceniza se presenta mejoramiento del suelo con porcentajes superiores al 2% e incluso podemos indicar que las muestras con ceniza volante se evidenciaron un mejor comportamiento a tracción. (12) (pp.2-7)

En la Revista Ingenierías Universidad de Medellín. “Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo”. Con el objetivo central del estudio, es el comportamiento de mezclas con varias proporciones de cal y suelos residuales de diorita con desiguales granulometrías, En total se ensayaron 576 probetas cilíndricas de 9.95 cm de diámetro y 20.5 cm de altura las cuales se conformaron a través de la mezcla de un suelo fino granular Mh con otro granular mezclados en proporciones fino/ grueso de 0%/100%, 10%/90%, 20%/80%, 30%/ 70%, 40%/60% y 50%/50%, en peso seco y asimismo se analizaron el comportamiento bajo sollicitaciones estáticas por medio de ensayos de compresión simple, tracción indirecta (ensayo brasilero) y CBR (Índice de Soporte de California), realizados a probetas con varios contenidos de cal (3%, 6%, 9% y 12% respectivamente), y el efecto de la edad de curado, fallándolas a los 7, 30, 60 y 90 días. Dando como resultado de los ensayos de compresión simple y de tracción indirecta se aprecia que el contenido óptimo de cal para estos suelos se encuentra entre el 6% y el 9% en peso y podemos indicar incluso que a pesar de haber tenido un reducido número de ensayos realizados de los ensayos de C.B.R se puede concluir que la capacidad de soporte del suelo estabilizado con cal, aumenta aproximadamente en un 200%. (13) (pp.1-13)

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Suelo

2.2.1.1 Origen de los suelos

Los granos minerales que constituyen la fase sólida de un agregado del suelo son el producto de la intemperización y la erosión de las rocas que podemos indicar que son de tres tipos básicos (Ígneas, sedimentarias y metamórficas), y materia orgánica. (14) (p.16)

2.2.1.2 Clasificación de los suelos

En la actualidad se utilizan dos sistemas de clasificación que utilizan la distribución granulométrica y la plasticidad de los suelos los cuales son comúnmente utilizados para aplicaciones ingenieriles. Se trata del American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El sistema AASHTO es utilizado principalmente en carreteras, mientras tanto los ingenieros geotécnicos normalmente optan por utilizar el Sistema Unificado.

2.2.1.2.1 Sistema de clasificación AASHTO

El sistema de clasificación AASHTO clasifican los suelos en siete grupos principales: de A-1 a A-7, los suelos que se clasifican entre los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz número 200, los suelos donde más del 35% pasa a través del tamiz Nro. 200 se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7, estos son principalmente limos y materiales del tipo de arcilla. Este sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios: (14) (p.78)

1. Tamaño de grano

Grava: fracción que pasa el tamiz de 75 mm y es retenida en el tamiz núm. 10 (2mm).

Arena: fracción que pasa el tamiz núm. 10 (2 mm) y es retenida en el tamiz núm.200 (0.075 mm).

Limo y arcilla: fracción que pasa el tamiz núm. 200

2. Plasticidad

Limoso: se aplica cuando las fracciones finas del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menos.

Arcilloso: se aplica cuando las fracciones finas tienen un índice de plasticidad de 11 o más.

3. Si se encuentran cantos y guijarros (tamaño mayor a 75 mm), se excluyen de la porción de la muestra de suelo en el que se hizo la clasificación. Sin embargo, se registra el porcentaje de este tipo de material.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO

Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
	A-1		A-3	A-2-4			A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6	
Grupo:	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6					A-2-7
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0,425mm) N° 200 (0,075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máx			- -	36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40 Límite líquido Índice de plasticidad	-		-	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín (2) 11 mín
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, gravay arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo				

(1): No plástico

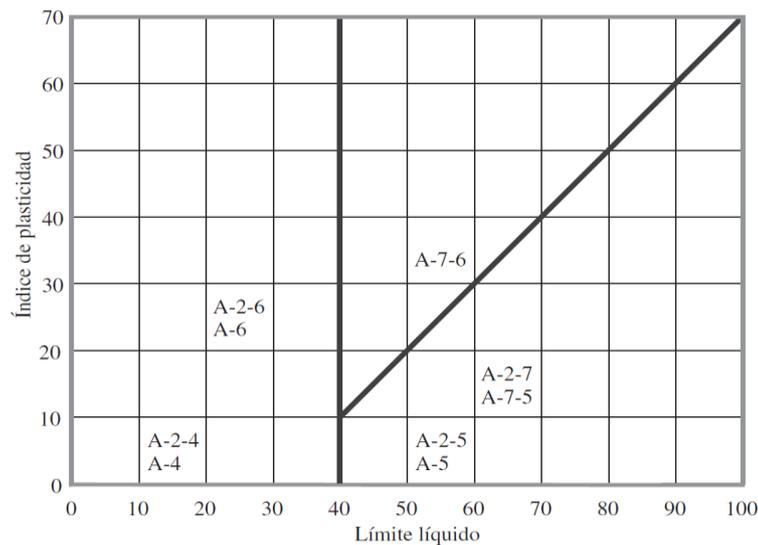
(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

Tabla 1: Clasificación de materiales de carreteras subrasantes

Fuente: (15)

Para clasificar un suelo de acuerdo a la tabla anterior, los datos de las pruebas se aplican de izquierda hacia la derecha, el primer grupo de la izquierda en la que quepan los datos de prueba es la clasificación correcta. Se muestra un dibujo del rango del límite líquido y el índice de plasticidad de los suelos que se dividen en los grupos: A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7. Para la estimación de la calidad de un suelo como un material de subrasante carretera, igualmente se incorpora un número llamado índice de grupo (IG) a los grupos y subgrupos del suelo.



Fuente: (14)

Figura 1: Rango del límite líquido y del índice de plasticidad para suelos en los grupos: A2,

A-4, A-5, A-6 y A-7

El índice de grupo viene dado por la siguiente ecuación:

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

Donde:

F = porcentaje pasado por el tamiz Nro. 200

LL = límite líquido

PI = índice de plasticidad

El primer término de la ecuación $(F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40))$, es el índice de grupo parcial determinado por el límite líquido y el segundo término, $0.01(F - 15)(PI - 10)$, es el índice de grupo parcial determinado a partir del índice de plasticidad.

1. Si la ecuación anterior da un valor negativo se tomará el valor de 0.
2. El índice de grupo se redondea al número entero inmediato próximo.
3. El índice de grupo de los suelos que pertenecen a los grupos: A-1-a, A- 1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3 siempre es 0.
4. Al calcular el índice de grupo para suelos que pertenecen a los grupos: A-2-6 y A-2-7, utilice el índice de grupo parcial para PI, o

$$IG = 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

2.2.1.2.2 Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) deriva de un sistema desarrollado por A. Casagrande para identificar y agrupar suelos en forma rápida en obras militares durante la guerra. Este sistema de clasificación divide a los suelos en dos grandes grupos suelos de granos gruesos y suelos de granos finos.

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

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

otros suelos altamente orgánicos. (14) (p.82)

Otros símbolos que también se utilizan para la clasificación son:

- W: bien clasificado
- P: mal clasificado
- L: baja plasticidad (límite líquido menor de 50)
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor de 50)

2.2.1.2.2.1 Procedimiento de clasificación de suelos de granos gruesos

Se debe determinar la distribución de partículas, clasificarlos como grava (G) si el 50% o más es retenida por el tamiz 5 mm (N°4) y se clasifica como arena (S), si más del 50% de la fracción gruesa (> 0,08 mm) pasa por tamiz 5 mm (N°4).

Y si menos del 5% en peso de la muestra pasa por tamiz 0,08 mm (N°200), se calcula mediante la siguiente ecuación:

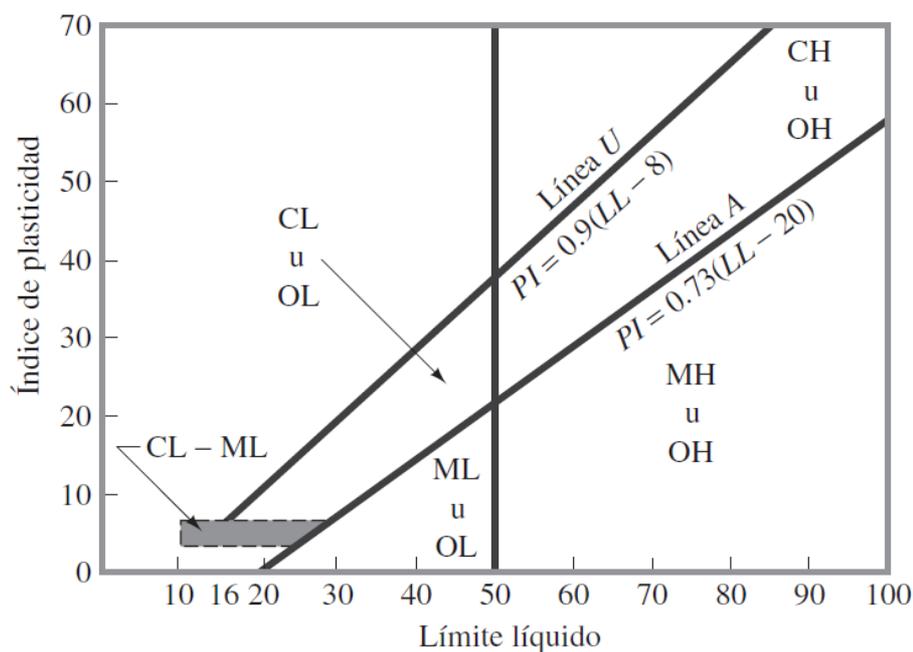
$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad Y \quad Cu = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} + D_{60}}$$

Seguidamente se clasifica la muestra como grava adecuadamente graduada (GW) o arena aceptablemente graduada (SW) y si Cu es mayor que 4 es para las gravas y su Cu es mayor que 6 para las arenas y Ci está incluido entre 1 y 3. Seguidamente se clasifica la muestra como grava pobremente graduada (GP) o como arena pobremente graduada (SP) y si no se satisfacen los criterios de Cu y Ci para perfectamente graduada. Si más que el 12%, en peso, de la muestra de ensayo pasa por 0,08 mm (N°200), analice los valores del límite líquido (L.L) e índice de plasticidad (IP) a través de la línea "A" de la carta de plasticidad. Clasifique la muestra como grava limosa (GM) o arena limosa (Sm), si los resultados de los límites de consistencia muestran que los finos son limosos, en otras palabras, si al dibujar L.L versus Ip, este punto cae bajo la línea "A" o el IP es pequeño que 4, luego clasifique la muestra como grava arcillosa (GC), o arena arcillosa (Sc), si los finos son arcillosos, es decir, si al dibujar el w, versus IP, cae sobre la línea "A" y el IP es mayor que 7. Si el punto del límite líquido versus índice de plasticidad cae prácticamente en la línea "A" o está sobre esta línea, sin embargo, el índice de plasticidad está comprendido entre 4 y 7, dé clasificación doble tal como GM-GC o SM-SC. Si pasa por tamiz 0,08 mm (N°200) del 5 al 12% de la muestra, el suelo llevará clasificación doble, basada en los criterios de graduación

y límites de consistencia, equivalentes como GW-GC o SP-SM. En casos indecisos, la regla es preferir a la clasificación de menos plasticidad. Por ejemplo, una grava con 10% de finos, un C_u de 20, C_u de 2,0 y un índice de plasticidad de 6, será clasificado como GW-GM en vez de GW-CG. (16) (p.39)

2.2.1.2.2 Procedimiento de clasificación de suelos de granos finos

El suelo se define su clasificación como una arcilla inorgánica (C) si al dibujar el punto de intersección del límite líquido frente al índice de plasticidad éste cae sobre la línea "A" y el índice de plasticidad es mayor que 7 de acuerdo a la siguiente figura. (16) (p.39)



Fuente: (14)

Figura 2: Gráfica de elasticidad

Podemos indicar que si el límite líquido es menor que 50 y el punto L.L versus IP cae sobre la línea "A" y el IP es mayor que 7, se debe clasificar como arcilla inorgánica de baja a media plasticidad (CL) y definir también como arcilla de alta plasticidad (CH) si el Límite Líquido es mayor que 50 y el punto L.L versus IP cae sobre la línea A (Carta de plasticidad figura 10). En caso que el límite líquido exceda a 100 o el IP exceda a 60, expanda la carta de plasticidad preservando las mismas escalas y pendiente de la línea "A". El suelo se clasifica como limo inorgánico (M), si al dibujar el punto L.L versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor que 4, a menos que se sospeche que hay materia orgánica presente en cantidades suficientes como para influir en las propiedades del suelo (suelo de color oscuro y olor

orgánico cuando está húmedo y tibio), en cuyo caso se debe efectuar un segundo límite líquido con la muestra de ensayo secado al horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Se clasifica como limo o arcilla orgánicos (O), si el límite líquido después del secado al horno, es menor que 75% del límite líquido de la muestra inicial determinado antes del secado. Clasifique el suelo como limo inorgánico de baja plasticidad (ML), o como limo o limo arcilla orgánicos de baja plasticidad (OL), si el límite líquido es menor que 50 y al dibujar L.L versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor a 4. Se puede Clasificar el suelo como limo inorgánico de media a alta plasticidad (MH), o como una arcilla u limo arcilla orgánico de media a alta plasticidad (OH), sí el L.L. Es mayor que 50 y el punto dibujado de L.L versus IP cae bajo la línea "A" o el IP es menor a 4. Con la finalidad de indicar sus características de borde algunos suelos de grano fino deben clasificarse mediante simbología doble. Si el punto dibujado del L.L versus IP cae prácticamente en la línea "A" o sobre la línea "A" donde el Índice de Plasticidad tiene un rango de 4 a 7, el suelo debe tener clasificación doble tales como CL-ML o CH-OH. Si el punto dibujado de L.L versus IP cae prácticamente en la línea del límite líquido igual a 50, el suelo deberá tener clasificación doble tales como CL-CH o ML-MH. En casos inciertos la regla de clasificación favorece al más plástico. Por ejemplo, un suelo fino con un $w = 50$ y un índice de plasticidad de 22 se deberá clasificar como CH-MH en lugar de CL-ML. (16) (pp.40-44)

Tabla 2: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

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

Fuente: (15)

2.2.2 Estabilización de suelos

La estabilización consiste en mezclar un suelo cohesivo o arcilloso con un aditivo para producir reacciones químicas que cementan las partículas de suelo, de tal manera que la resistencia del suelo aumenta de forma significativa, se dice que un suelo es estable cuando en estado seco o húmedo muestra una resistencia marcada y sostenida a la deformación cuando se le aplica cargas repetidas o continuas la resistencia se mide a través de valores cuantitativos como la resistencia a la compresión, resistencia al esfuerzo cortante y la

capacidad de soporte o flexión bajo carga. (17) (p.14)

Para la estabilización de suelos con cal se deben elaborar especímenes para el ensayo de compresión no confinada al contenido óptimo de humedad y densidad máxima seca, se determinara el % de óxido de calcio por peso seco de suelo y elaborar una gráfica de resistencia y % de cal, los suelos que se usen para la construcción de suelo-óxido de calcio deben estar limpias no deben tener más del 3% de materia orgánica y además se debe de reportar resultados de la capacidad de soporte según la metodología "California Bearing Ratio – CBR" (Relación de soporte de California) para evidenciar las mejoras. (18) (p.9)

2.2.2.1 Estabilización de suelos con Óxido de Calcio

El uso de la cal como corrector o estabilizador de suelos, ha alcanzado en los últimos años un papel preponderante. Ha evolucionado paulatinamente hasta alcanzar en la actualidad, a través de las constantes investigaciones un conocimiento más científico.

El objetivo fundamental es mejorar las características viales de algunas subrasantes que no son aptas para la fundación de estructuras, mediante la adición de pequeños porcentajes de óxido de calcio, distribución uniforme en la masa del suelo, adecuada densificación y un efectivo curado.

El uso del óxido de calcio contribuye notoriamente a aumentar su resistencia a los esfuerzos deformantes.

El óxido de calcio provoca en los suelos arcillosos una notable disminución de plasticidad, una mayor trabajabilidad además provee buenas superficies de trabajo para la operación de los equipos, con lo que se pueden disminuir los plazos constructivos.

Se puede concluir que el óxido de calcio se aplica en el campo vial en el mejoramiento de subrasantes y sub-bases de pavimentos, modificando las características perjudiciales e indeseables de los suelos arcillosos, reduciendo su plasticidad, el óxido de calcio produce una acción cementante adicional que se traduce en una mayor resistencia y una mayor durabilidad ante las cargas y los agentes climáticos.

Las cantidades de óxido de calcio necesarias para la estabilización de suelos varía entre el 1 % y de 8 a 10% en función del tipo de suelo y las solicitaciones de la estructura del pavimento.

Por su buena impermeabilidad las mezclas de suelo y óxido de calcio constituyen excelentes superficies de trabajo, son poco afectadas por el agua, hecho que afecta notoriamente la economía de la construcción al aumentar el número de días útiles de trabajo y al permitir reiniciar los trabajos inmediatamente después de lluvias copiosas y

prolongadas. (17) (p.121)

2.2.2.2 Requisitos de los suelos de subrasante para su estabilización con óxido de calcio

Para la estabilización los suelos deben cumplir los siguientes requisitos. (17) (p.136)

Tabla 3: Requisito de suelos para la estabilización de la subrasante

CARACTERÍSTICA	REQUISITO
Composición	
Material que pasa el tamiz de 4,75 mm (No. 4), mínimo (%)	50
Material que pasa el tamiz de 0,075 mm (No. 200), mínimo (%)	25
Limpieza	
Limite líquido, mínimo (%)	40
Índice de plasticidad, mínimo (%)	10
Contenido de materia orgánica máximo (%)	0.1
Características químicas	
Proporción de sulfatos, expresada como $SO_4^{=}$, máximo (%)	0.3
Reactividad Alkali-Agregado: concentración SiO_2 y reducción de alcalinidad R	$SiO_2 \leq R$ cuando $R \geq 70$ $SiO_2 \leq 35 + 0,5 R$ cuando $R < 70$

Fuente: (17)

2.2.2.3 Requisitos que debe cumplir el agua

El agua deberá ser limpia y libre de materia orgánica, álcalis y otras sustancias, puede ser agua potable; si no lo es, deberá cumplir los siguientes requisitos. (17) (p.136)

Tabla 4: Requisitos del agua no potable para la estabilización de subrasantes con óxido de calcio

CARACTERÍSTICAS	NORMAS DE ENSAYO ASTM	REQUISITO
PH	D-1293	5.5 - 8.0
Contenido de sulfatos, expresado como $SO_4^{=}$, máximo	D-516	1

Fuente: (17)

2.2.2.4 Pasos constructivos para la estabilización de subrasantes

Según (17) la estabilización de suelos con óxido de calcio consta de los siguientes pasos.

(17) (p.154)

1. Escarificación y pulverización inicial.
2. Aplicación del óxido de calcio.
3. Mezcla preliminar y adición de agua.
4. Periodo de fraguado.
5. Mezclado final y pulverización.
6. Compactación.
7. Curado final.

2.2.2.5 La modificación de los suelos arcillosos con óxido de calcio

La adición de óxido de calcio a un suelo modifica su comportamiento por una conjunción de sus propiedades, entre ellas se tienen las siguientes manifestaciones

- a) Una modificación de la textura del suelo.
- b) Un incremento de su resistencia.

Estos se producen según el tipo de suelos, su granulometría y mineralogía y del óxido de calcio utilizado. (19) (p.14)

2.2.2.6 Mecanismos de interacción del óxido de calcio sobre un suelo

Las mezclas de suelo arcilloso con óxido de calcio producen dos tipos de reacciones: (19) (p.4)

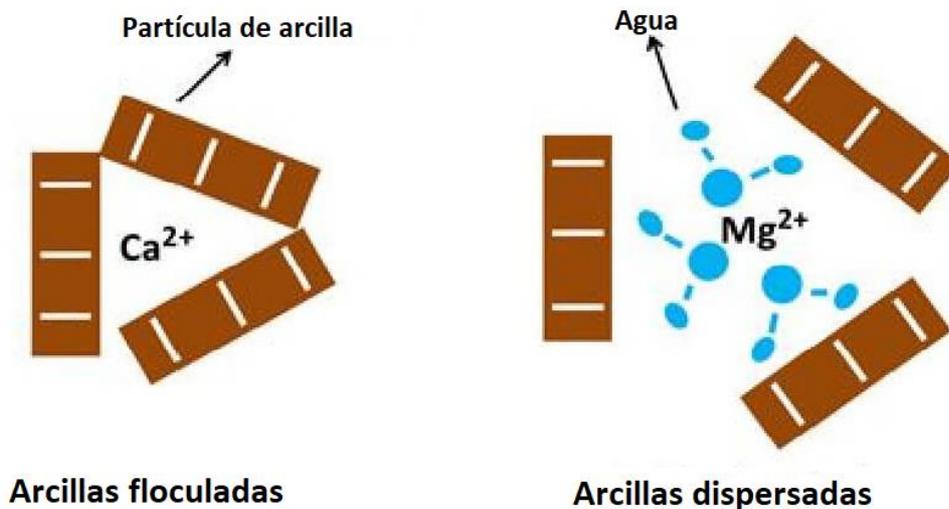
- a) Una modificación "inmediata"
 - Intercambio de iones entre la arcilla y la cal
 - Floculación de las partículas de arcilla
 - Reducción de la cantidad de agua absorbida por la arcilla
- b) Una mejora de las características resistentes del suelo a medio y largo plazo
 - Reacción puzolánica de cementación
 - Carbonatación

2.2.2.6.1.1 El intercambio iónico

Cuando el óxido de calcio entra en contacto con las arcillas los cationes de calcio tienden a reemplazar a aquéllos que están absorbidos en la superficie de sus partículas, dispersos en lo que se ha llamado la capa doble, desplazan así a cationes monovalentes usuales en las arcillas naturales, como los de sodio, potasio o magnesio. (19) (p.5)

2.2.2.6.1.2 Floculación y aglomeración de partículas

El fenómeno del intercambio iónico por cationes de mayor valencia reduce el espesor de la capa doble de la arcilla. Ello genera que se reduzca pues la zona de alta presencia de cationes que separa una partícula de otra, tanto por concentración como por repulsión eléctrica; por tanto, se consigue que se aproximen las partículas y esto da lugar a nuevas fuerzas de atracción entre ellas. El hecho de que se pongan en contacto nuevas partículas de arcilla generan fuerzas de atracción entre ellas originando unas nuevas agrupaciones de partículas que antes estaban dispersas o separadas formando flóculos o conjuntos de partículas. (19) (p.6)



Fuente: (20)

Figura 3: Floculación y aglomeración de partículas

2.2.2.6.1.3 Modificación de la textura y consistencia

Este conjunto de mecanismos de alteración de la forma y distribución de las partículas se obtiene cuando un suelo arcilloso de comportamiento característico plástico, ante la adición de cal experimenta los siguientes fenómenos descritos: (19) (p.6)

- a) Estabilización del desequilibrio eléctrico de las partículas que elimina la propensión a modificaciones en el suelo.
- b) Reducción de la importancia de la capa doble y del contenido de agua absorbida en torno a las partículas que reduce su susceptibilidad a los cambios de humedad;
- c) Aumento de los huecos en la masa suelo-cal con respecto al volumen inicial del suelo.
- d) Desorden de las partículas que le lleva a un comportamiento menos cohesivo basado en el rozamiento de las partículas del suelo.

2.2.2.6.1.4 La reacción puzolánica

Las arcillas son minerales que contienen en su estructura importantes cantidades de sílice y alúmina entre otros elementos de sustitución como: el hierro, magnesio, etc. En estas circunstancias es posible decir que las arcillas son productos naturales con propiedades puzolánicas. Estas propiedades se basan en que, bajo condiciones de pH altos pueden provocar un efecto consistente en la reacción de la cal con la sílice y alúmina para producir productos cementantes. (19) (p.7)

2.2.3 Oxido de calcio

Llamado también cal viva es un producto de color blanco, de apariencia amorfa, con un peso específico que varía entre 3, 18 y 3,40. Es una sustancia inestable, por tener gran avidez de agua, con la cual reacciona de la siguiente manera:



Esta reacción produce el Hidróxido de Calcio $\mathbf{Ca(OH)_2}$ también llamada Cal Apagada, es tal la avidez con el agua que absorbe vapor de agua de la atmósfera y de las sustancias orgánicas cercanas produciendo efectos cáusticos, tal motivo hace que el manejo de la cal viva se haga peligrosa, ya que puede producir quemaduras. (17) (p.127)

2.2.4 Agave americana

El Agave americana posee es una fibra natural áspera, dura y resistente que se obtiene al procesar su materia prima conocida como penco de acuerdo a la región donde crece puede

adoptar la siguiente denominación: Fique, Agave, Sisal, Mezcal, Pita y Agave americana. El Agave americana es una planta perteneciente a la familia de los agavaceae, originaria de América Tropical, aunque se presenta, específicamente en las regiones andinas. Crece de manera natural o cultivada en zonas áridas y semiáridas, en terrenos arenosos, pedregosos y de baja productividad agrícola. Las fibras de Agave americana se localizan de manera longitudinal en las hojas del penco y son consideradas como una de las fibras naturales más resistentes. (21) (p.6)



Figura 4: Agave americana

2.2.4.1 Extracción de la fibra de Agave americana

Las fibras vegetales se pueden extraer de diferentes partes de las plantas, como hojas, tallos, semillas y frutos de acuerdo a la localización de la fibra en la planta, las fibras vegetales se clasifican en dos grandes grupos: Fibras blandas y fibras duras. Se extrae principalmente a partir de dos métodos: El primero de ellos se denomina enriado que consiste en poner la materia prima a remojo en unas balsas con agua estancada, o bien directamente en el curso de los ríos con poca corriente, este proceso puede durar entre 1-3 semanas, dependiendo de la cantidad de materia, mediante este se consigue el efecto de la degradación microbiana que descompone los tejidos dejando las hebras o hilos libres, luego estas fibras son lavadas y secadas al sol. El segundo método se denomina descortización, que consiste en separar la corteza de los tejidos vegetales a mano o mediante la utilización de maquinaria, posteriormente es secado al sol y finalmente la fibra se suele extraer por un proceso

químico, para ello se introduce la fibra en agua con soda caustica fosfatos u otros químicos, después se sacan del agua, se lavan y son secados al sol (22).



Figura 5: Extracción de la fibra de Agave americana

2.2.4.2 Propiedades físico mecánicas de la fibra de Agave americana

Según (23 pág. 35) señala que las fibras obtenidas de las plantas del Agave americana al ser sometidos a pruebas de tracción presentan una buena resistencia, esta resistencia es relativamente superior con respecto a otras fibras como el benote (fibras de coco). A continuación, se muestra la tabla de la prueba resistencia a la tracción en diferentes tipos de fibra.

Tabla 5: Resistencia a la tracción de la fibra de Agave americana.

Fibra	Resistencia a la tracción	Elongación
Fibra de Coco	112.6 N/g.m.	20.43%
Abacá	215.9 N/g.m.	2.59%
Agave americana	232.3 N/g.m.	2.59%

Fuente: (23)

Las propiedades mecánicas (Módulo de elasticidad, esfuerzo a la ruptura) de la Agave americana, posee un módulo de tracción son de 7-22 GPa y la resistencia a la tracción 340-700 MPa. Estas dependen de las condiciones de medición como son (temperatura, humedad, dimensión de las fibras, cumplimiento, etc.). (23) (p.35)

Tabla 6: Propiedades físico mecánicas de la fibra de Agave americana

Radio de fibras de Agave (μm)	σ (Mpa)	ϵ (%)	E (Gpa)
60 - 80	54 \pm 47	16.4 \pm 8.2	2.9 \pm 1.2
80 -100	65 \pm 42	13.6 \pm 11.9	1.9 \pm 0.6
100 - 120	80 \pm 12	22.3 \pm 6.0	1.3 \pm 0.2
120 - 140	70 \pm 21	19.1 \pm 10.7	1.4 \pm 0.3
60 - 140	100 \pm 32	19.3 \pm 8.2	1.7 \pm 1.1

Fuente: (23)

2.2.5 Proctor modificado

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación en campo, la prueba Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. Esto se refiere a veces como la prueba Proctor modificada (Norma ASTM D-1557 y Norma AASHTO T 180). Para la realización de la prueba Proctor modificada se utiliza el mismo molde, con un volumen de 943.3 cm³, como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un martillo que pesa 44.5 N (masa = 4.536 kg) y tiene una caída de 457.2 mm. (14) (p.99)



Fuente: (14)

Figura 6: Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada
Se utilizaron los siguientes datos para realizar cada uno de los cálculos.

- Peso del molde = 1745 g
- Volumen del molde = 348 cm³

Del mismo modo se utiliza las siguientes ecuaciones:

2.2.5.1 Peso específico

- Peso de la muestra húmeda.

$$W. \text{ muestra húmeda} = (W. \text{ muestra húmeda} + \text{molde}) - (W. \text{molde})$$

- Densidad húmeda

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_{md})}{V}$$

Donde:

M_t = Masa del espécimen húmedo y molde

M_{md} = Masa del molde de compactación

V = Volumen del molde de compactación

2.2.5.2 Contenido de humedad

- Peso del agua.

$$W. \text{ del agua} = (W. \text{ muestra húmeda} + \text{tara}) - (W. \text{ muestra seca} + \text{tara})$$

- Peso de la muestra seca

$$W. \text{ muestra seca} = (W. \text{ muestra seca} + \text{tara}) - W. \text{ de la tara}$$

- Contenido de humedad

$$\text{Contenido de humedad } (W) = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso de muestra seca}} \times 100\%$$

2.2.5.3 Peso específico seco

- Densidad seca

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{W}{100}}$$

Donde:

ρ_d = Densidad seca.

ρ_m = Densidad húmeda.

W = Contenido de humedad.

Utilizando estas ecuaciones se determina el contenido de humedad y la densidad seca de cada uno de los ensayos, mediante la obtención de estos datos se ha determinado la densidad seca máxima y el contenido óptimo de humedad de compactación, para lo cual se ha graficado una curva con los datos obtenidos, identificándose la DMS y el COH en el punto más alto de la curva graficada.

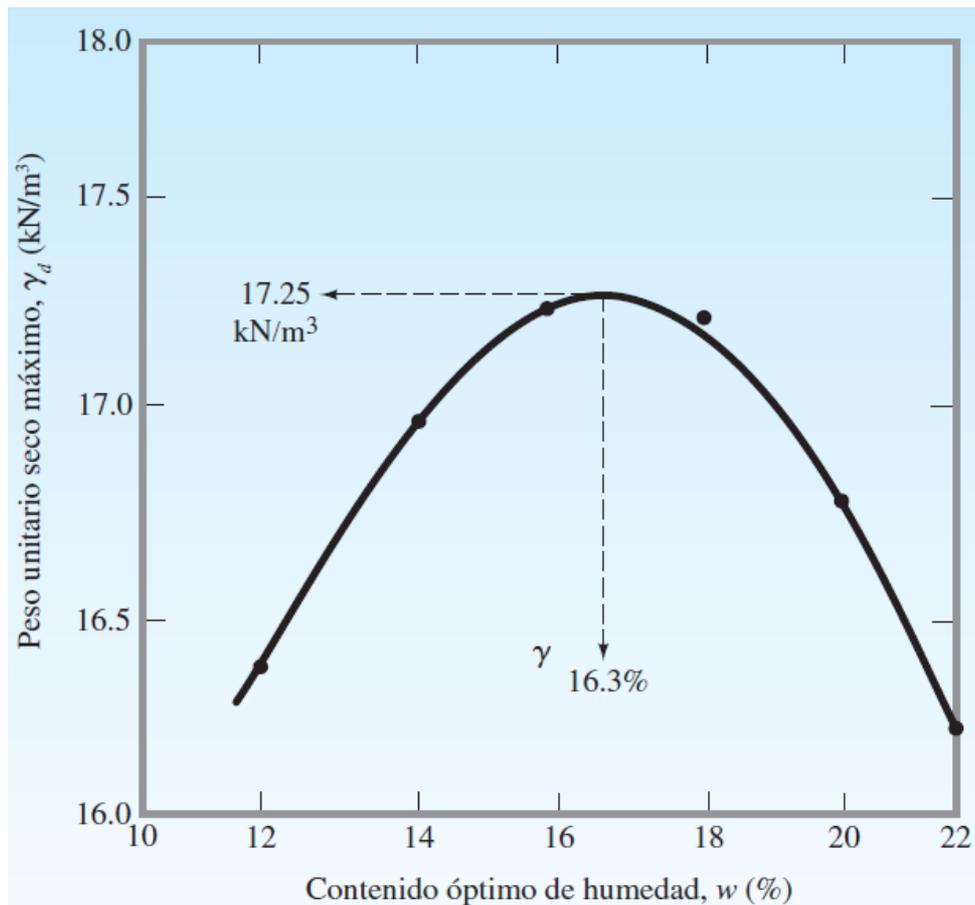


Figura 7: Gráfica de determinación del contenido óptimo de humedad y la densidad máxima seca

2.2.6 Ensayo de CBR

En CBR es un ensayo para determinar el índice de resistencia de los suelos denominado relación de soporte, que comúnmente es conocido como CBR. El ensayo se desarrolla en una muestra de suelo trabajado en el laboratorio de acuerdo a su humedad y densidad; pero también puede realizarse los ensayos en muestras inalteradas tomadas directamente del terreno. Este tipo de ensayo es utilizado para verificar la resistencia de la subrasante, subbase y material de base. (24) (p.248)

2.2.6.1 Método del pistón en laboratorio

Este método es utilizado para evaluar la resistencia de los suelos de la subrasante, base, subbase de pavimentos rígidos.

2.2.6.1.1 Muestra

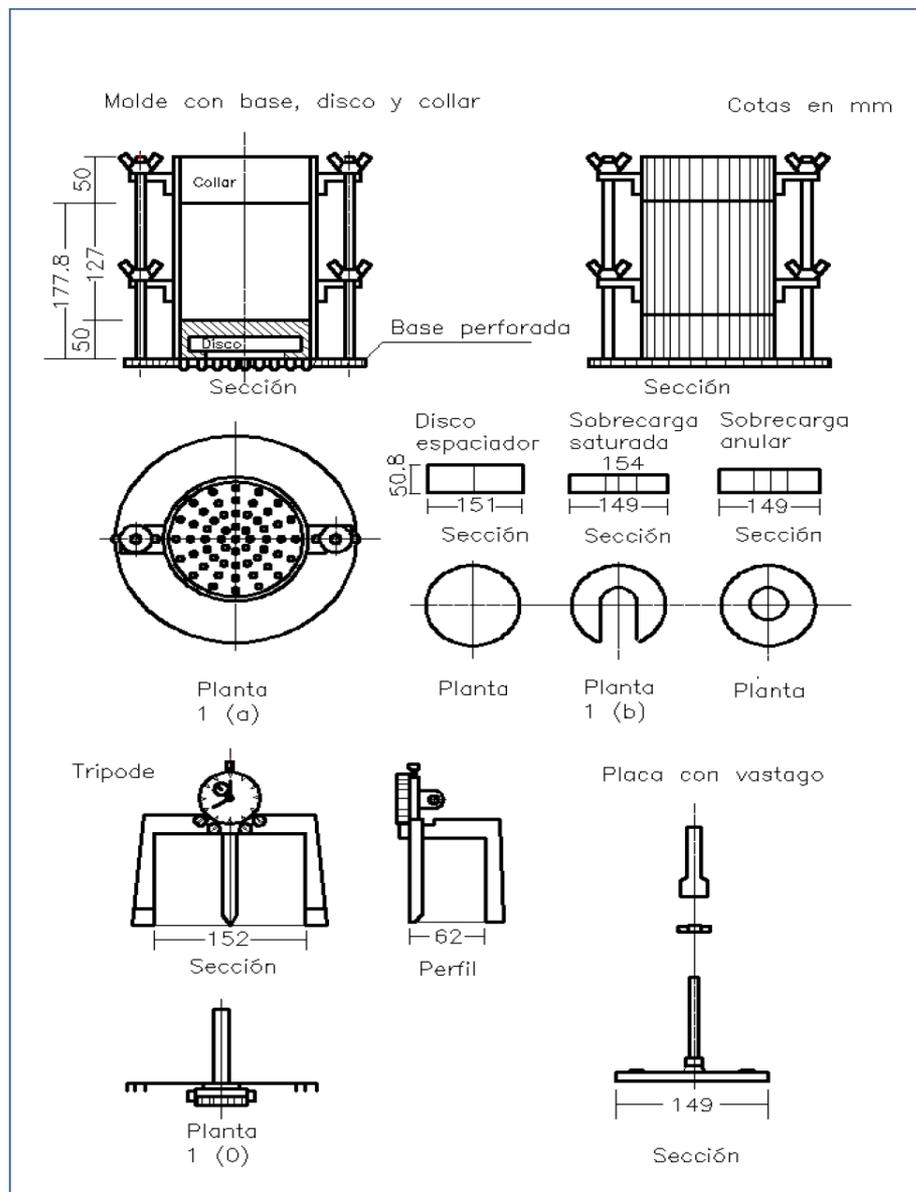
“La muestra debe prepararse de acuerdo a los procedimientos indicados en la NTP 339.141 ó NTP 339.142. Si toda la muestra pasa el tamiz de 19mm (3/4”) esta deberá usarse para preparar las muestras a compactar. Si existe material retenido en el tamiz de 19 mm (3/4”), debe ser reemplazado por una cantidad igual de muestra que pase el tamiz de (3/4”) y que sea retenido en el tamiz N°4” (24) (p.250)

2.2.6.1.2 Equipos y materiales

Los equipos y materiales que se utilizan en este ensayo son: (24) (p.248)

- a) Prensa que se utilizará para forzar la penetración del pistón.
- b) Molde de metal cilíndrico de 152,4mm \pm 0,66 mm de diámetro interior y de 177,8 \pm 0,46 mm de altura, con un collar de metal de 50,8 mm (2,0”) de altura y una placa de de 9,53 mm (3/8”) de espesor.
- c) Disco circular como espaciador de 150,8 mm (5 15/16”) de diámetro exterior.
- d) Pisón de compactación.
- e) Aparato medidor compuesto por una placa de metal.
- f) Pesas que tengan una masa total de 4,54 kg y pesas ranuradas de metal cada una con masas de 2,27 kg.

- g) Pistón metálico de penetración de sección circular.
- h) Dos diales con recorrido
- i) Tanque para la inmersión de los moldes.
- j) Estufa.
- k) Balanzas.
- l) Tamices.



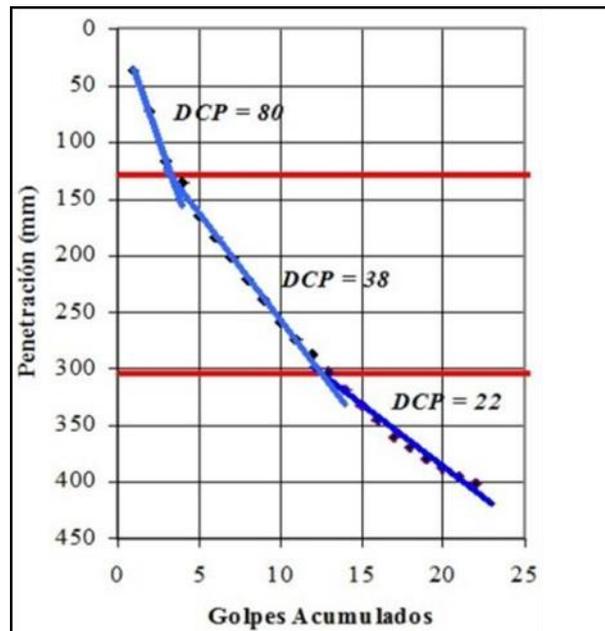
Fuente: (24)

Figura 8: Equipos y materiales para el ensayo CBR

2.2.6.2 Ensayo del Cono de Penetración Dinámico (DCP)

Mediante este ensayo se evalúa la resistencia del suelo en el lugar donde se va realizar un proyecto con muestras inalterados. Este ensayo se realiza siguiendo la norma ASTM D 6951-03. (25)

DCP es un equipo usado en el diseño de pavimentos para poder identificar las diferentes capas de suelo, en la figura 9 se puede verificar el cambio de pendiente que indica que cuanto más pronunciada sea indica una menor resistencia del suelo. Con la ayuda de este equipo se obtienen resultados inmediatos en el mismo lugar del proyecto. (26)



Fuente: (26)

Figura 9: Curva DCP para diferentes capas de suelo.

2.2.6.2.1 DCP según la norma ASTM D 6951-03

Este instrumento mide la penetración de la varilla de 1 m de longitud como producto de los golpes producidos por un martillo de 8 kg en un suelo inalterado.

Esta prueba proporciona una medida de la resistencia a la penetración en el mismo lugar del proyecto.

Esta prueba se utiliza para determinar la resistencia del suelo a la penetración en el lugar del proyecto de un material para el control en la etapa de construcción de pavimentos.

La profundidad de penetración del cono se mide después de realizar cada golpe y esta es registrada.

La suma de la penetración es determinado de acuerdo al número de golpes registrada en milímetros por golpe mediante estos se pueden determinar el valor de CBR "in situ" del suelo (25)

2.2.6.2.1.1 Usos del DCP:

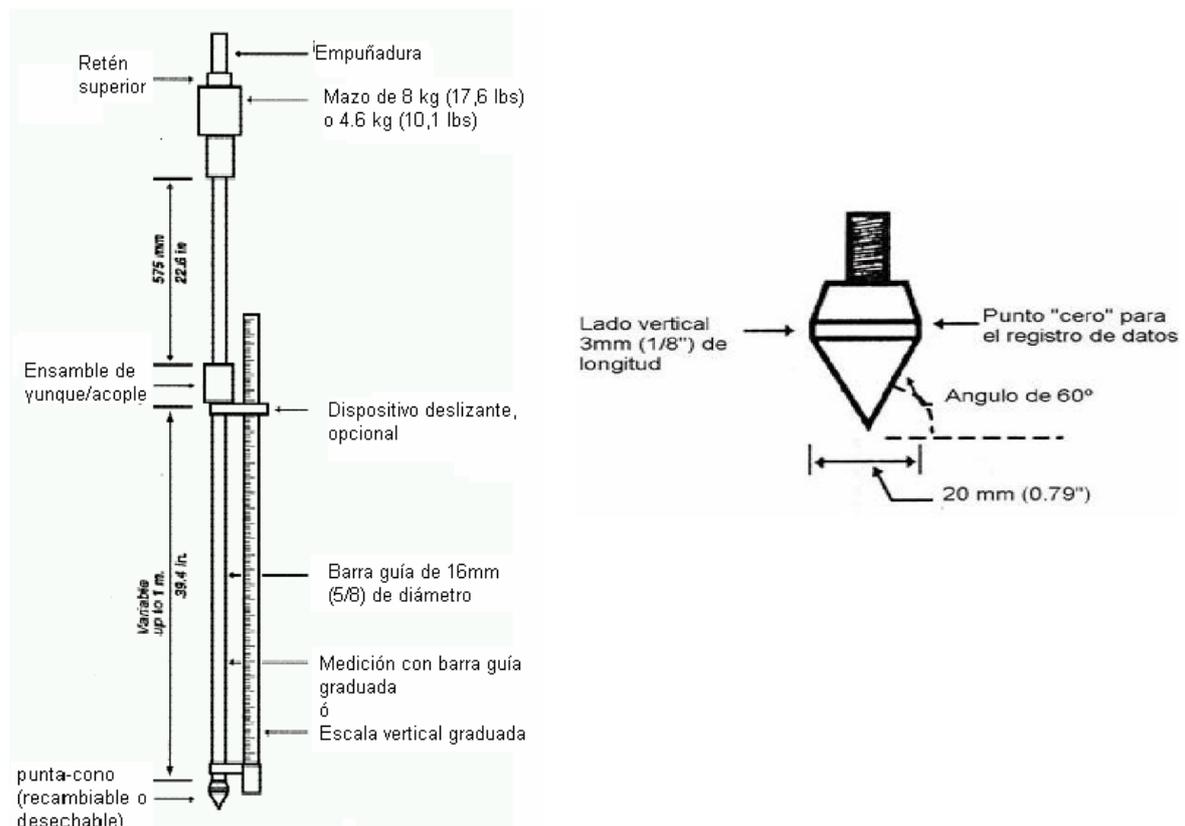
- a) Obtención del % CBR en el mismo lugar del proyecto.
- b) Es aplicado en construcciones como pavimentos.
- c) Se puede determinar la resistencia en suelos de grano fino y grueso.
- d) Determina la resistencia en el mismo lugar de suelos que se encuentran por debajo de la capa estabilizada

Los datos se calculan de acuerdo a la cantidad de golpes y la penetración de la varilla, que varían de acuerdo a la resistencia del suelo (27)

2.2.6.2.1.2 Descripción del equipo

Está compuesto de un martillo de 8 kg, el cual se suelta desde una altura fija de 575 mm.

El accesorio diseñado para medir la penetración se encuentra sujeta a la barra (0.79").



Fuente: Norma (25).

Figura 10: Esquema del dispositivo DCP

Según (28), este método de ensayo también nos indica la resistencia de los suelos inalterados o en materiales compactados, el promedio de penetración se puede determinar los valores de resistencia in-situ, así como el CBR, basado en la norma ASTM D6951, donde podemos verificar:

Tabla 7: Correlaciones entre el índice PDC (mm/golpe) y el CBR

AUTOR	CORRELACIÓN ^A	OBSERVACIONES
Kleyn y Van Heerden	$CBR = 428.5(PDC)^{-1.28}$	No aplica a suelos CL con CBR < 10, ni a suelos CH Aplica a suelos CL con CBR < 10 Aplica a suelos CH
TRL Overseas Road Note 8	$CBR = 302(PDC)^{-1.057}$	
Cuerpo de Ingenieros (USA)	$CBR = 292(PDC)^{-1.12}$	
	$CBR = 58.8(PDC)^{-2.0}$	
	$CBR = 348.3(PDC)^{-1.0}$	
MOPT Colombia (1992)	$CBR = 567.0(PDC)^{-1.40}$	

En las correlaciones, el término PDC significa “índice PDC”

Fuente: Norma Invias (28).

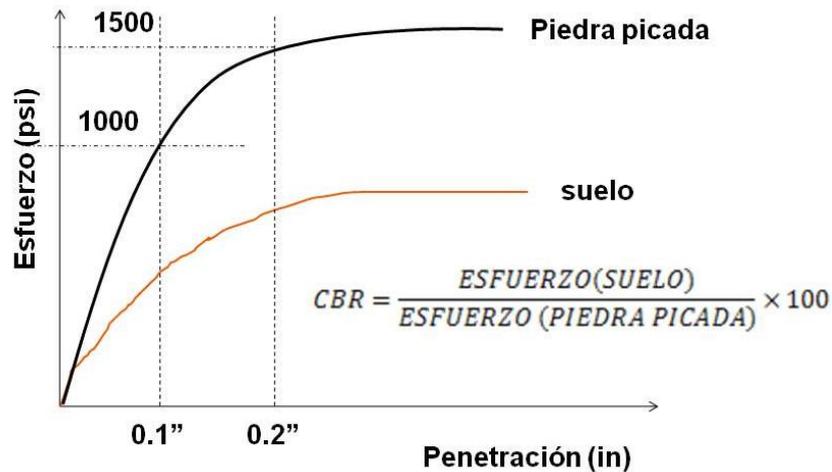
En la presente investigación se aplica la siguiente ecuación:

$$CBR = 292 * (PDC)^{-1.12}$$

2.2.6.3 NORMA ASTM: D1883

Este ensayo tiene por objetivo determinar la resistencia que tiene el suelo compacto a la penetración se expresa como una relación entre la carga unitaria del suelo y la carga unitaria (29).

Según la norma ASTM D 1883-07, el CBR es un ensayo de carga mediante un pistón metálico, para penetrar en un suelo compactado en un molde metálico a una velocidad de penetración compacto. Se define CBR como la relación entre la carga del pistón requerida en el suelo ensayado, y la carga unitaria requerida para penetrar la misma cantidad en el suelo.



Fuente: (30)

Figura 11: Curva penetración versus esfuerzo del CBR

En el CBR determinado en laboratorio indica que los especímenes de suelo se compactan con el equipamiento del ensayo Proctor, utilizando moldes de 6" de diámetro y martillo grande. La velocidad de penetración del pistón durante el ensayo es constante e igual a 1.27 mm/min.

Para determinar el CBR Sumergido en gabinete sin realizar el ensayo de sumergir el suelo compactado en agua se ha realizado según a la Norma ASTM D1883 (%) Ref. 1, la cual indica que se puede realizar ese cálculo mediante el índice de cono de penetración dinámico mediante la siguiente ecuación:

$$CBR_{SUM} = 10^{\left(\frac{500 \cdot \log_{10} PDC - 12198}{825}\right)}$$

Donde:

CBR_{SUM} = CBR sumergido.

PDC = índice de Cono de Penetración Dinámico.

2.2.7 Permeabilidad de suelos

La permeabilidad de los suelos es la propiedad con la que el agua pasa a través de los poros, un determinado espécimen es considerado permeable cuando tiene vacíos

continuos, estos vacíos existen en todos los suelos a pesar que han sido compactadas.

2.2.7.1 Ascensión capilar

Se le denomina a la altura que sube el agua en el suelo, debido a que el suelo es una gran red de vacíos que existen en su masa. Los vacíos en el suelo se comunican entre sí, cuando estos vacíos entran en contacto con el agua este se satura en la parte inferior y en la parte superior el agua ocupa los vacíos pequeños y los vacíos más grandes se quedan con aire. El agua ocupa los microporos que se mantienen en el suelo por la propiedad de la tensión superficial del agua, el agua se eleva por encima de su nivel hasta la zona no saturada. La capilaridad del agua en un suelo produce esfuerzos de tensión. Para que se presente capilaridad del agua del nivel freático, el suelo debe ser de grano fino, que permita que los poros sean tan pequeños como un tubo capilar, en un suelo grueso como la grava no se producirá el fenómeno de la capilaridad. (31) (pp.1-5)

2.2.8 Análisis de regresión y correlación

La regresión y la correlación son dos métodos que podemos indicar que están relacionadas mediante el cual se puede estimar un resultado.

El análisis de correlación determina el grado de la relación entre dos variables y el análisis de regresión determina una ecuación describe dicho fenómeno. (32)

2.2.8.1 Tipos de variables

Variables independientes: Son aquellas variables que podemos manipular y decidir.

Variables dependientes: Son aquellas variables que no se pueden manipular.

2.2.8.2 Correlación

La correlación se refiere al grado de variación que existente entre dos o más variables. Se dice que cuando se estudian dos o tres variables es de vital importancia determinar la medida de la dependencia entre esas variables (33).

2.2.8.2.1 Métodos de Correlación

Los métodos de correlación de Pearson y Spearman son técnicas que aplica el investigador quiere establecer similitudes o diferencias entre las variables.

2.2.8.3 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es el mejor método y el más utilizado para estudiar el grado de relación lineal existente entre dos variables cuantitativas. Se le representa por “r”.

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n S_x S_y}$$

Donde:

x_i e y_i : se refieren a las puntuaciones diferenciales de cada par.

n: al número de casos.

S_x y S_y : a las desviaciones típicas de cada variable.

El coeficiente de correlación de Pearson varía entre los valores -1 y 1: un valor de 1 indica relación lineal perfecta positiva; un valor de -1 indica relación lineal perfecta negativa (en ambos casos los puntos se encuentran dispuestos en una línea recta); un valor de 0 indica relación lineal nula.

Los valores de la correlación de Pearson van desde -1 hasta 1, siendo los valores extremos los que indican mayor correlación entre variables, y siendo el 0 el punto que indica la no existencia de correlación.

2.2.8.4 Coeficiente de correlación de Spearman (Rho de Spearman)

Es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, este coeficiente es muy útil cuando el número de pares es pequeño (menor de 30). Mediante el Rho de Spearman es posible determinar la dependencia o independencia de dos variables. (34)

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde:

n = la cantidad de sujetos que se clasifican.

x_i = el rango de sujetos i con respecto a una variable.

y_i = el rango de sujetos i con respecto a una segunda variable.

$d_i = x_i - y_i$

d_i es la diferencia entre los rangos de X e Y

El coeficiente de correlación varía desde -1 hasta +1, los valores cercanos a +1, indican que existe una fuerte relación entre variables, mientras los valores cercanos a -1 señalan que hay una fuerte relación negativa entre las variables. Cuando el valor es 0, no hay correlación.

Tabla 8: Grado de relación según coeficiente de correlación

RANGO	RELACIÓN
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0	No existe correlación
+0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

Fuente: (35)

2.2.8.4.1 Tipos de correlación

a) Correlación directa

La correlación directa se produce cuando se aumenta a una de las variables la otra aumenta y a recta que le corresponde a la nube de puntos de la distribución es una recta creciente.

b) Correlación inversa

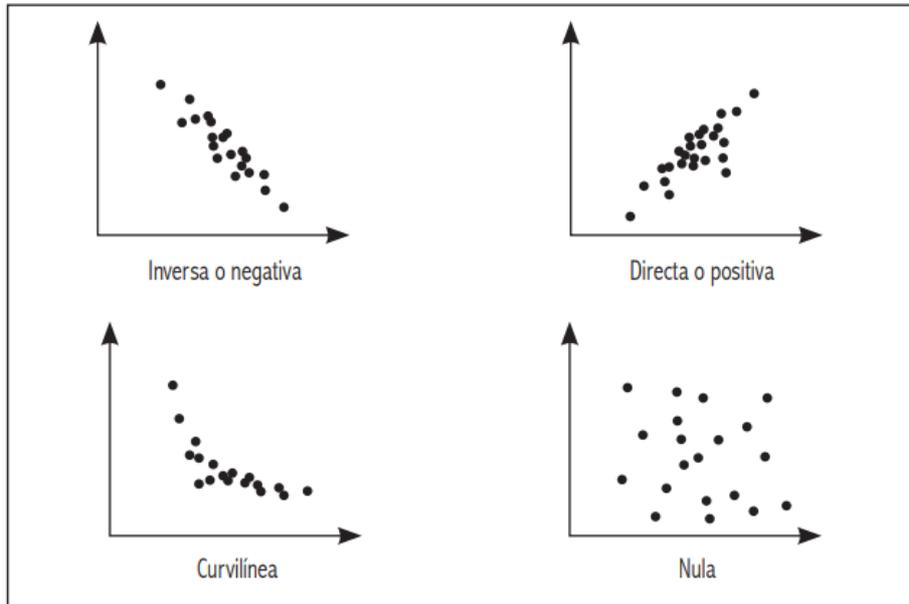
La correlación inversa se da cuando se aumenta una de las variables la otra disminuye y la recta que le correspondiente a la nube de puntos de la distribución es una recta decreciente.

c) Correlación nula

La correlación nula se da cuando no hay dependencia entre las por lo tanto no hay correlación y la nube de puntos tiene una forma redondeada.

d) **Correlación curvilínea**

Cuando los puntos están situados alrededor de una línea curva.



Fuente: (36)

Figura 12: Tipos de correlación

2.2.8.5 Coeficiente de correlación

Permite medir el grado de relación entre dos variables linealmente relacionados.

- Para población:

$$r = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{(n\sum x^2 - (\sum x)^2)(n\sum y^2 - (\sum y)^2)}}$$

- Para una muestra:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{n S_x S_y} = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{n S_x S_y}$$

n: número de pares de datos

Siendo:

Desviación típica en x:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}}$$

Desviación típica en y:

$$S_y = \sqrt{\frac{\Sigma(y - \bar{y})^2}{n}}$$

Media en x:

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x}{n}$$

Media en y:

$$\bar{y} = \frac{\Sigma y}{n}$$

Características

- a) La correlación se encuentra entre $(-1 \leq X \leq 1)$
- b) La correlación puede ser positiva.
- c) La correlación puede ser negativa.
- d) La correlación puede ser nula.

2.2.8.6 Coeficiente de Determinación

Es el porcentaje de la variación total de la variable dependiente es explicada por la variable independiente.

2.2.8.7 Análisis de Regresión

Permite verificar la relación entre entre dos o más variables que nos señala la facilidad de ajuste del modelo lineal que mejor describe la relación y la mayor cantidad de puntos que están cerca de la línea de ajuste.

Pasos:

- a) Selección de una función de relación correlativa.
 - b) Estimación del grado de correlación r , r^2**
 - c) Análisis de significancia, prueba t., y podemos decir que mide asociación correlativa
- Mediante el coeficiente de correlación (r) podemos determinar la relación entre las variables. Pero esto no indica si la relación entre las variables es significativa desde el punto estadístico.

Por tal razón se aplica la prueba de hipótesis, la hipótesis nula H_0 señala que no existe una relación, por ende el coeficiente de correlación r es igual a 0. Mientras que la hipótesis alternativa H_a señala que sí existe una relación significativa.

Cálculo del t calculado (t_c) donde:

$$t_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Cálculo de t tabular (tt) el cual se obtiene de tablas de **Tabla t-Student**. Ver Anexo I.

$V = n - 2$; V =grado de libertad, $\alpha = 1 - \text{Probabilidad}$

Decisión:

$|t_c| \leq t_t$ **Entonces** $r = 0$ **no hay correlación**

$|t_c| > t_t$ **Entonces** $r \neq 0$ **existe correlación**

2.2.8.7.1 Regresión Lineal

Según (37) indica que una regresión lineal simple es cuando hay una sola variable de independiente una sola variable dependiente. Este es el modelo más sencillo y está basado en la suposición las dos variables se relacionan linealmente siguiendo la ecuación general de una recta.

$$y = a + bx$$

Donde:

Donde:

X = Variable independiente.

Y = Variable dependiente.

a = Valor de Y cuando X = 0

b = Variación de Y asociada a una variación de X.

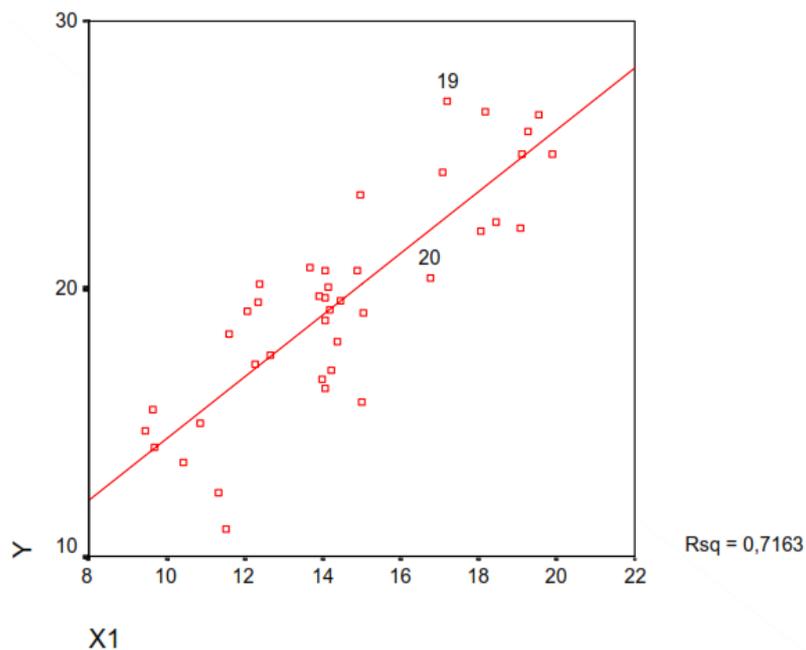
2.2.8.7.1.1 Estimación de parámetros

Los parámetros a y b de la ecuación se calcula utilizando la ecuación de mínimos cuadrados.

$$a = \frac{\Sigma y_i \Sigma x_i^2 - \Sigma x_i y_i \Sigma x_i}{n \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2}$$
$$b = \frac{n \Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i}{n \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2}$$

2.2.8.7.1.2 Gráficos residuales

Dentro del proceso de regresión lineal, se les conoce como residuos a las diferencias entre los valores de la variable dependiente que no se ajustan a la gráfica de la recta de regresión.



Fuente: (38)

Figura 13: Ejemplo de Diagrama de dispersión

Por ejemplo, en el diagrama de dispersión mostrado se han identificado dos puntos que son el 19 y el 20. En el punto número 20 podemos observar que tiene un residuo negativo, ya que su valor en Y es menor que el valor en Y que se predijo, en el caso del punto número 19 podemos observar que tiene un residuo positivo ya que el valor observado es mayor que el Y que se predijo.

2.2.8.7.1.3 Valor-P (P – Valué)

Se trata de un valor no arbitrario utilizado para rechazar una hipótesis nula (H_0).

Podemos conceptualizar que el valor-p, es un valor estadístico con la que podemos rechazar o aceptar la hipótesis nula (H_0). (39).

2.2.8.7.1.3.1 Cálculo

Es posible calcular el valor-p a manualmente para ello se tiene que disponer de tablas de distribuciones que sean lo más precisas posibles.

Gran parte de los programas estadísticos ya tienen el valor-p y del mismo modo los resultados de Mínimos Cuadrados Ordinarios.

Para el cálculo del valor-p es necesario lo siguiente:

- Es necesario tener el estadístico de contraste.

$$\sum x_m y = a_0 \sum x_m + a_1 \sum x_1 x_m + a_2 \sum x_2 x_m + a_3 \sum x_3 x_m + \dots + a_m \sum x_m^2$$

Al solucionar estas ecuaciones se obtienen los parámetros requeridos.

Error estándar del estimado para regresión múltiple

Se denomina así a la medida de dispersión:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n-p}} = \sqrt{\frac{\sum e^2}{n-p}}; \bar{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m$$

Donde:

Se = Es el error estándar del estimado

y = Los valores muestrales de la variable dependiente

$\bar{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m$ = Valores aproximados de la variable dependiente.

$e = y - \bar{y}$ = Error entre el valor real y el determinado de la variable dependiente.

n = Número de grupos.

p = m+1 = Número de parámetros a estimar.

n - p = Los grados de libertad.

2.2.8.7.3.1 Coeficiente de determinación múltiple

Es la que representa la proporción de la variación que es explicada por las variables involucradas en la ecuación múltiple.

$$R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S^2 y}$$

$$R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{\frac{1}{n-1} (\sum y^2 - n\bar{y}^2)}$$

Coeficiente de correlación múltiple

$$R = \left(1 - \frac{S_e^2}{S^2 y}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$R = \left(1 - \frac{S_e^2}{\frac{1}{n-1} (\sum y^2 - n\bar{y}^2)}\right)^{\frac{1}{2}}$$

2.2.9 Norma CE010 de pavimentos

La Norma CE010 es aquella que establece todos los requisitos para el diseño, construcción, rehabilitación, mantenimientos y restauración de pavimentos rígidos. Desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos y de la Ingeniería de Pavimentos cuyo objetivo es asegurar

su la vida de servicio. (40) (p.2)

2.2.9.1 Contenido de humedad

“El contenido de humedad (w) denominado también como contenido de agua, se define como la relación del peso de agua que contiene un determinado material entre el peso del sólido exento de agua”. (14) (p.51)

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

$W_s =$ *Peso de sólidos del suelo*

$W_w =$ *Peso de sólidos del agua*

2.2.9.2 Técnicas de investigación de campo

Las técnicas de campo que se deben aplicar son los siguientes:

- a) Realización de calicatas.
- b) Determinación del Contenido de Humedad del Suelo.
- c) Determinación de la Densidad y el Peso Unitario del Suelo, mediante el Cono de Arena.
- d) Clasificación de Suelos mediante el método Visual y Manual.
- e) Ensayo para el uso del Penetrómetro Dinámico de Cono para determinar la resistencia del suelo para la construcción de pavimentos.

Estas son las pruebas a las que se debe someter el suelo en el campo para asegurar la durabilidad de los pavimentos urbanos. (40) (p.4)

2.2.9.3 Número de puntos de investigación de acuerdo al tipo de vía

El número de puntos de investigación será de acuerdo con el tipo de vía según se indica en la siguiente tabla, con un mínimo de tres (03).

Tabla 9: Número de puntos de investigación

TIPO DE VÍA	NÚMERO DE PUNTOS DE INVESTIGACIÓN	ÁREA (m2)
Expresas	1 Cada	1000
Arteriales	2 Cada	1200
Colectoras	3 Cada	1500
Locales	4 Cada	1800

Fuente: (40)

2.2.9.4 Ensayos de laboratorio

Resumen que dice la norma donde se aplica y cuáles son los ensayos mínimos que pide en una calle.

2.2.10 Análisis granulométrico de suelos

Mediante este procedimiento las muestras obtenidas en campo son secados seguidamente estas muestras se desmenuzan, de este se extrae una muestra representativa mediante el cuarteo manual, para suelos arenosos la cantidad mínima requerida es de 115 g de un suelo que pase o no por el tamiz N° 10 (2,000 mm), en suelos limosos una cantidad mínima de 65 g. (24) (p.41)

Tabla 10: Determinación de la constante de suelos

Ensayo	Cantidad en gramos
Límite Líquido	100
Límite Plástico	15
Límite de Contracción	30
Ensayos de Verificación	65

Fuente: (24)

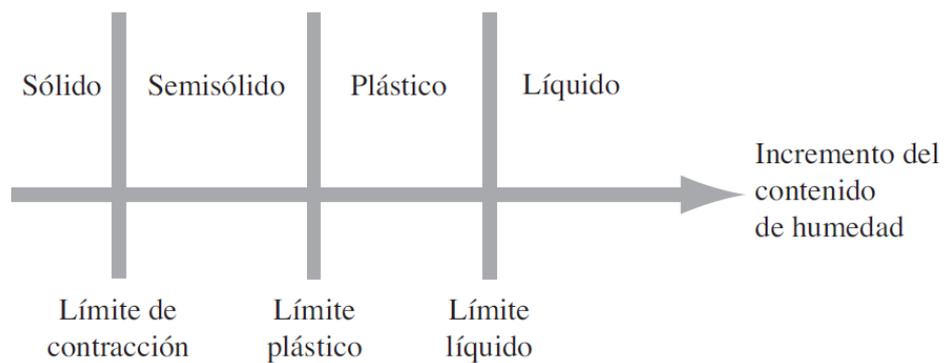
2.2.10.1 Procedimiento de análisis

En primer lugar, se realiza el pesaje de la muestra de suelo secada que pasa a través de un tamiz N° 10 (2,00 mm). Las porciones de material que pasan el tamiz N° 10 (12,00 mm) se combinan completamente y por el método del cuarteo se separa aproximadamente 115 g para suelos arenosos y 65 g para suelos limosos o arcillosos. Para determinar las constantes del suelo tiene que ser un material que pasa el tamiz N° 10 (2,00 mm) se separa

en dos partes utilizando el tamiz N° 40 (425 mm) la fracción que pasa se usa para las determinaciones de las constantes de los suelos. (24) (p.42)

2.2.11 Límites de Atherberg

En el año de 1900 un científico de Suecia llamado Albert Mauritz Atterberg inventó un método para describir la consistencia de los suelos finos añadiéndolo diferentes contenidos de humedad. El descubrió que el suelo con un contenido de humedad muy bajo es muy quebradizo y cuando tiene un alto contenido de agua el suelo y el agua fluye. Llegando a la conclusión que dependiente del contenido de agua, el suelo se le puede dividir en cuatro estados: sólido, semisólido, plástico y líquido. (14) (p.64)



Fuente: (14)

Figura 14: Límites de Atherberg.

2.2.11.1 Límite líquido (LL)

Este valor es determinado mediante un aparato que consta en una copa de latón con una base de goma dura la copa de latón es operada por una manivela para esta prueba se coloca una muestra de suelo en la copa de latón seguidamente se realiza un corte en el centro de la muestra de suelo, usando la herramienta de ranurado. En el ensayo copa de latón se eleva por la manivela y cae una altura de 10 mm. El límite líquido se obtiene como el % de humedad necesario para cerrar la abertura de 12.7 mm a lo largo de la parte inferior de la ranura después de 25 golpes. (14) (p.65)



Fuente: (14)

Figura 15: Dispositivo de límite líquido y herramienta de ranurado

2.2.11.2 Límite plástico

Se define como EL % de humedad con la que el suelo al enrollarse en hilos de 3.2 mm de diámetro se quiebra. Esta prueba es muy simple de realizar mediante rodados repetidos de una masa de tierra sobre una placa de vidrio. (14) (p.65)



Fuente: (14)

Figura 16: Prueba de límite plástico

2.2.11.3 Límite de contracción

Es definido cuando el suelo se contrae cuando se pierde agua gradualmente. A medida que pierde agua este alcanza un estado de equilibrio hasta el punto ya no dará lugar a ningún cambio de volumen adicional. El contenido de agua en % en el que el cambio de volumen cesa se define como límite de contracción. (14) (p.68)

2.3 Definición de Términos Básicos

2.3.1 Agave americana

El Agave americana también conocido como Cabuya o Maguey, es una planta de hojas gruesas y carnosas que están dispuestas sobre un tallo corto cuya piña inferior no sobresale de la tierra, las hojas del Agave americana están cubiertas de espinas, se utiliza principalmente en la fabricación de sogas, para la elaboración de papel, filtros, colchones, tapetes y tapicería. (23) (p.34)

2.3.2 Oxido de calcio

Llamado también "Cal" que generalmente es relacionada a la construcción. Este compuesto es resultado de la piedra caliza pulverizada que es una roca compuesta por carbonato de calcio y magnesio las cuales poseen propiedades diferentes a la Cal, es fabricado en hornos a temperaturas de 1.000°C. El producto resultante de esta cocción se denomina cal viva, este producto es usado como Mortero, al mezclar con agua se convierte en cal hidratada" (41).

2.3.3 Estabilización de suelos

Se le denomina al mejoramiento de las propiedades físicas como la resistencia del suelo a través, esto se logra a través de la adición de productos químicos que pueden ser naturales o sintéticos. La estabilización generalmente se realiza para superficies rodadura de una carretera. (42) (p.12)

2.3.4 CBR (California Bearing Ratio)

"Es el valor de la resistencia del suelo que generalmente se mide por la penetración dentro

de una masa de suelo” (42 pág. 7).

2.3.5 Suelo cohesivo

Es aquel suelo que contiene pequeñas partículas y arcilla de tal manera que se adhiera a sí mismo. Un suelo es más cohesivo cuando tiene mayor cantidad de arcilla (43).

2.3.6 Granulometría

La granulometría es una medida de cada uno de los tamaños normados en una escala granulométrica, es el proceso de hacer pasar las partículas por una serie de mallas de distintos diámetros (44).

2.3.7 Pavimento

Es una estructura construida sobre la subrasante de la vía diseñada para resistir y distribuir los esfuerzos provocados por los vehículos. (42) (p.17)

2.3.8 Pavimento rígido

“Es la estructura construida utilizando cemento, agregados” (42) (p.17)

2.3.9 Permeabilidad

“Es la capacidad que posee un determinado material de permitir el paso del agua a través de ella”. (42) (p.17)

2.3.10 Ph

“Es una medida de la acidez o basicidad de una determinada solución. Los valores varían entre 0 y 14”. (42) (p.17)

2.3.11 Subrasante

“Superficie sobre el cual se coloca la estructura del pavimento”. (42) (p.21)

2.3.12 Subbase

“Es una de las capas de la estructura del pavimento esta se encuentra debajo de la capa de conocida como Base”. (42) (p.21)

2.3.13 Suelo arcilloso

“Es aquel suelo en el cual hay predominancia de arcilla”. (42) (p.21)

2.3.14 Superficie de rodadura

“Es la capa superficial de la estructura del pavimento que soporta directamente las cargas producidas por el tráfico”. (42) (p.21)

2.3.15 Vía urbana

“Es el conjunto de calles y arteria que posee una zona urbana”. (42) (p.23)

2.3.16 Rasante

“Se le conoce así al nivel de la superficie de rodadura”. (42) (p.19)

2.3.17 Napa freática

“Nivel superior del agua subterránea en el momento de la exploración. El nivel se puede dar respecto a la superficie del terreno o a una cota de referencia”. (42) (p.17)

2.3.18 Muestreo

“Toma de muestra que constituye la etapa inicial y fundamental para la adecuada interpretación de los resultados obtenidos en el laboratorio”. (42) (p.16)

2.3.19 Mejoramiento

Ejecución de las obras necesarias para elevar el estándar de la vía mediante actividades

que implican la modificación sustancial de la geometría y de la estructura del pavimento; así como la construcción y/o adecuación de los puentes, túneles, obras de drenaje, muros, y señalizaciones necesarias. (42) (p.16)

2.3.20 Densidad máxima seca

“Máximo valor de densidad seca definido por la curva de compactación para un esfuerzo especificado (estándar o modificado)”. (42) (p.42)

2.3.21 Limos

“Partículas de roca o minerales cuyas dimensiones están entre 0.02 y 0.002 mm”. (42) (p.15)

2.3.22 Limite liquido

“Contenido de agua del suelo entre el estado plástico y el líquido de un suelo”. (42) (p.15)

2.3.23 Limite plástico

“Contenido de agua de un suelo entre el estado plástico y el semi-sólido”. (42) (p.15)

2.3.24 Cuarteo

“Procedimiento de reducción del tamaño de una muestra”. (42) (p.9)

2.3.25 Contenido de humedad

“Volumen de agua de un material determinado bajo ciertas condiciones y expresado como porcentaje de la masa del elemento húmedo, es decir, la masa original incluyendo la sustancia seca y cualquier humedad presente”. (42) (p.8)

2.3.26 Compactación

“Proceso manual o mecánico que tiende a reducir el volumen total de vacíos de suelos, mezclas bituminosas, morteros y concretos frescos de cemento Portland”. (42) (p.8)

2.3.27 Arcillas

“Partículas finas con tamaño de grano menor a 2 μm (0,002 mm) provenientes de la alteración física y química de rocas y minerales”. (42) (p.4)

2.3.28 Aglomerante

“Material capaz de unir partículas de material inerte por efectos físicos o transformaciones químicas o ambas”. (42) (p.3)

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1 Método de investigación

La metodología de la esta investigación es científica. El método científico es un conjunto de procedimientos por los cuales se plantean los problemas científicos y se ponen a prueba las hipótesis y los instrumentos de trabajo investigativo.

El método científico es un procedimiento para descubrir las condiciones en que se presentan sucesos específicos, caracterizado generalmente por ser tentativo, verificable, de razonamiento riguroso y observación empírica. (45) (p.28)

3.2 Tipo de investigación

Se trata de una investigación aplicada.

A la investigación aplicada se le denomina también activa o dinámica, y se encuentra íntimamente ligada a la anterior, ya que depende de sus descubrimientos y aportes teóricos. Busca confrontar la teoría con la realidad.

Es el estudio y aplicación de la investigación a problemas concretos, en circunstancias y características concretas. Esta forma de investigación se dirige a su aplicación inmediata y no al desarrollo de teorías. (45) (p.43)

3.3 Nivel de investigación

El nivel de investigación de la presente tesis es explicativo, según el nivel de investigación explicativa va más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales, se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas.

Se va a determinar el efecto que tiene el uso de la fibra de Agave Americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos, se explicará el mecanismo de interacción del óxido de calcio sobre un suelo arcillosos. (46)

3.4 Diseño de la investigación

Se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas antecedentes), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos consecuentes), dentro de una situación de control para el investigador. (46) (p.129)

El diseño es experimental debido ya que se aplicarán distintos tratamientos a los suelos y los tratamientos serán diferentes entre las muestras, algunas muestras se aplicarán longitudes de fibra distintas con tiempos de tratamiento de óxido de calcio distintos y en distintas dosis, luego se procederá a realizar los ensayos en el laboratorio de mecánica de suelos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de cada muestra, con la finalidad de obtener el porcentaje óptimo de Agave americana y Óxido de calcio para la estabilización del suelo de la subrasante.

Por lo tal la gráfica del diseño de investigación es:



Donde:

M: Es la muestra de suelo arcilloso obtenido de las calicatas.

PA: Propuesta de mejoramiento adicionando Agave Americana y Óxido de calcio.

R: Resultado obtenidos de las diferentes pruebas de laboratorio.

DR: Discusión de resultados.

3.5 Población muestra

3.5.1 Población

Conforme lo definen los autores de investigación en ciencias sociales la población es un conjunto de personas o elementos que tienen características comunes, sin embargo, en la construcción de vías terrestres y especialmente en la geotecnia no es posible delimitar individuos u objetos como si fueran pacientes o entes sociales porque el suelo es altamente heterogéneo y viene en mezclas muy distintas a distancias cortas por lo que hablar de población en el área de geotecnia especialmente en bases y subrasantes carece de sentido. Sin embargo, podemos forzar el concepto de población para la presente investigación diciendo que la población es todo el suelo de la calle Pachacutec de la provincia del Cusco, que tiene una longitud de 450 m y un ancho de 6 m hasta la profundidad de 1.50 m esa sería la población si se quiere definir así.

La población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones. (46) (p.174)

3.5.2 Muestra

La muestra es un subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de ésta. (46) (p.173)

La norma de pavimentos urbanos CE 010 determina que como mínimo en una vía se hagan tres puntos de investigación, como es de esperas extraer el suelo de tres puntos en un material tan variable como es la sub rasante no es estadísticamente representativo no tiene fundamento estadístico para poder generalizar los resultados sin embargo, se pueden mejorar las precisiones de los cálculos si en lugar de excavar tres calicatas se extraen muestras con métodos menos destructivos en más puntos de la vía, en todo caso las muestras de suelo ya sea proveniente de tres calicatas o varios puntos deberán sumar en total unos 150 kilogramos de suelo.

El máximo número de ensayos que se pretende realizar con esta tesis es el siguiente, número de longitudes de fibra (20 mm, 60 mm y 100 mm) por tiempo (1 día y 4 días) por dosis de fibra (2%, 10% y 25%) por tres réplicas, incluyendo a este el ensayo de la muestra control, hace un total de 55 ensayos.

Tabla 11: Tratamientos del suelo arcilloso

Longitud de las fibras de Agave Americana tratada	Dosis de fibra tratada (% de peso del suelo seco)	Dosis de óxido de calcio (% de peso del suelo seco)
20 mm	2%	0,50%
		1,50%
		5,00%
	6%	0,50%
		1,50%
		5,00%
	15%	0,50%
		1,50%
		5,00%
60 mm	2%	0,50%
		1,50%
		5,00%
	6%	0,50%
		1,50%
		5,00%
	15%	0,50%
		1,50%
		5,00%
100 mm	2%	0,50%
		1,50%
		5,00%
	6%	0,50%
		1,50%
		5,00%
	15%	0,50%
		1,50%
		5,00%

Tabla 12: Tabla de muestras aleatorias con peso en %

Nombre	Orden	Longitud de fibra tratada (mm)	Peso del suelo (Gr)	Dosis de fibra tratada (% de peso del suelo seco)	Dosis de óxido de calcio (% de peso del suelo seco)
N1	13	100	2700	0	0
N2	7	20	2700	2	0
N3	8	100	2700	6	0,5
N4	3	60	2700	15	0,5
N5	11	20	2700	0	1,5
N6	10	60	2700	2	5
N7	4	60	2700	15	0,5
N8	9	100	2700	0	0
N9	12	20	2700	2	0
N10	5	100	2700	6	0,5
N11	1	60	2700	15	0,5
N12	6	20	2700	0	1,5
N13	2	60	2700	2	5
N14	14	60	2700	15	0,5

Tabla 13: Tabla de muestras aleatorias con peso en kg

Nombre	Orden	Longitud de fibra tratada (mm)	Peso del suelo (Gr)	Dosis de fibra tratada (% de peso del suelo seco)	Dosis de óxido de calcio (% de peso del suelo seco)
N1	13	100	2700	0	0
N2	7	20	2700	54	0
N3	8	100	2700	162	13,5
N4	3	60	2700	405	13,5
N5	11	20	2700	0	40,5
N6	10	60	2700	54	135
N7	4	60	2700	405	13,5
N8	9	100	2700	0	0
N9	12	20	2700	54	0
N10	5	100	2700	162	13,5
N11	1	60	2700	405	13,5
N12	6	20	2700	0	40,5
N13	2	60	2700	54	135
N14	14	60	2700	405	13,5

3.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- Método: La observación
- Técnicas: Los formatos

3.6.1 De campo:

3.6.1.1 Excavación de calicatas

Se realizaron calicatas de manera cuidadosa en tres diferentes puntos, cada una con 1.20m de altura y a una distancia de 70.0 m una de la otra. Este suelo servirá para realizar el análisis de laboratorio de mecánica de suelos, con el objetivo de determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso y el tratamiento que se le debe dar para obtener un suelo adecuado para la construcción de la subrasante del pavimento rígido.

Tabla 14: Coordenadas UTM de las calicatas

CALICATA	UBICACIÓN	PROFUNDIDAD	PROGRESIVA	COORDENADAS UTM	
				E	N
C-1	Calle Pachacutec	1,5 m	0 + 070	824257,365	8505298,350
C-2	Calle Pachacutec	1,5 m	0 + 140	824326,387	8505310,010
C-3	Calle Pachacutec	1,5 m	0 + 210	824395,410	8505321,670



Figura 17: Ubicación de las calicatas



Figura 18: Calicata C-1



Figura 19: Calicata C-2



Figura 20: Calicata C-3

3.6.2 Ensayos de laboratorio

Se realiza el ensayo de Proctor modificado para determinar el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima seca de compactación, el ensayo CBR para determinar la capacidad portante del suelo y el ensayo de permeabilidad.

3.6.2.1 Corte y tratamiento de la fibra de Agave America

3.6.2.1.1 Corte

Después de la obtención de la fibra de Agave americana se procede a cortar en diferentes longitudes como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 15: Longitud de la fibra de Agave americana

N°	Longitud de la fibra de Agave Americana
L-1	20 mm
L-2	60 mm
L-3	100 mm



Figura 21: Fibra de Agave Americana cortada en diferentes longitudes

3.6.2.1.2 Tratamiento del Agave americano

El Agave americana en sus diferentes longitudes fue remojado en agua durante dos días, luego fue mezclado con el óxido de calcio como tratamiento para mejorar su comportamiento mecánico y dotarle de mayor vida útil al utilizarlo como refuerzo en la estabilización de suelos arcillosos.



Figura 22: Tratamiento de la agave americana

3.6.2.2 Determinación del tipo de suelo

3.6.2.2.1 Granulometría

Para determinar el tipo de suelo mediante el sistema SUCS se realizó el tamizado del suelo de la calicata 3 (C-3) de la progresiva 0 + 210 perteneciente a la calle Pachacutec.

3.6.2.3 Ensayo Proctor modificado

El objetivo de este ensayo es el determinar la máxima compacidad mediante la obtención de la densidad seca máxima y su humedad correspondiente, denominada óptima, que se puede conseguir con ese suelo en el laboratorio.

El ensayo de Proctor modificado se realizó con la muestra de la calicata C-3, el cual fue mezclado con diferentes proporciones de fibra de Agave americana tratada, diferentes proporciones de óxido de calcio y diferentes proporciones de agua las cuales hacen un total de 14 ensayos las cuales fueron elegidas aleatoriamente de un total de 55 ensayos tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 16: Numero de ensayos de Proctor modificado

Nombre de ensayo	Orden	Longitud de fibra tratada (mm)	Peso del suelo (g)	Dosis de fibra tratada (g)	Dosis de óxido de calcio (g)
N0	15	0	2700	0	0
N1	13	100	2700	0	0
N2	7	20	2700	54	0
N3	8	100	2700	162	13,5
N4	3	60	2700	405	13,5
N5	11	20	2700	0	40,5
N6	10	60	2700	54	135
N7	4	60	2700	405	13,5
N8	9	100	2700	0	0
N9	12	20	2700	54	0
N10	5	100	2700	162	13,5
N11	1	60	2700	405	13,5
N12	6	20	2700	0	40,5
N13	2	60	2700	54	135
N14	14	60	2700	405	13,5

3.6.2.3.1 Pesaje de las muestras

El pesaje de las muestras se hizo de acuerdo a la anterior tabla para cada ensayo por ejemplo para el ensayo N10 se realizó el pesaje de 2700 gramos de la muestra de suelo tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura 23: Pesaje de muestras de suelo

Del mismo modo se realizaron los pesajes de la fibra de Agave americana de acuerdo a las proporciones indicadas para cada ensayo tal como se muestra en la siguiente figura:

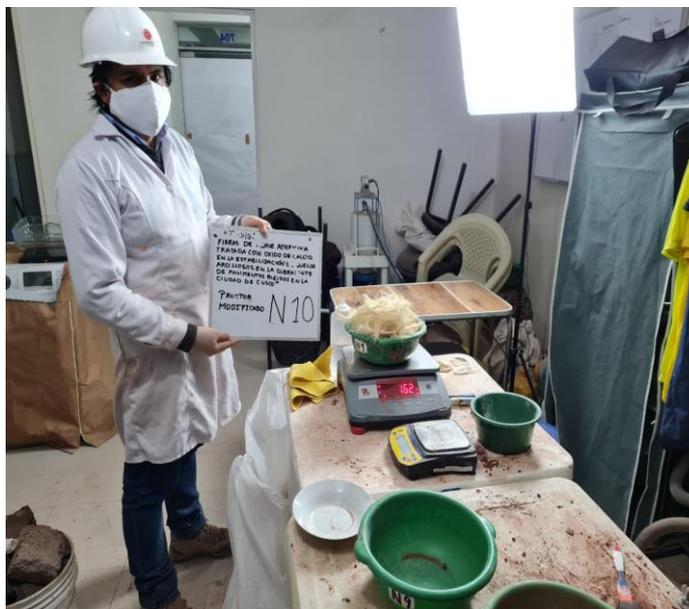


Figura 24: Pesaje de las muestras de Agave americana

También se realizaron los pesajes del óxido de calcio de acuerdo a las proporciones que se necesitan para cada ensayo como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 25: Pesaje del óxido de calcio

3.6.2.3.2 Mezclado de muestras

Una vez que se haya pesado las muestras se procedieron a ser mezcladas entre el suelo arcilloso, fibra de agave americana, óxido de calcio y el agua.



Figura 26: Mezclado de muestras

3.6.2.3.3 Ensayo de compactación

Se realizaron tres ensayos de compactación de la siguiente manera:

- El primer ensayo se realiza con la mezcla exenta de agua.
- El segundo ensayo se realiza con una mezcla añadida 100 gramos de agua.
- El tercer ensayo se realiza con una mezcla añadida de 100 gramos más de agua.

Una vez que se realiza cada una de las mezclas, el suelo resultante fue compactado en cinco capas por un martillo.



Figura 27: Ensayo de compactación

Después de realizar la compactación se desarma el molde de compactación y se extrae el collar, luego se determinó el peso del molde más el suelo compactado, seguidamente se extrae una porción de suelo compactado y se procede al pesaje.



Figura 28: Pesaje de muestras de suelo compactado

3.6.2.3.4 Secado de muestras de suelo compactado

Las muestras de suelo compactado fueron llevadas al horno de secado para su respectivo secado.



Figura 29: Secado de muestras de suelo compactado

3.6.2.3.5 Pesaje de muestras secas de suelo compactado

Una vez que el suelo se puso a secar durante 24 horas se procedió al pesaje de cada una de ellas como se puede apreciar en la siguiente imagen:



Figura 30: Pesaje de muestras secas de suelo compactado

Tabla 17: Resumen de los datos obtenidos en laboratorio

NOMBRE	PESO DEL MOLDE MAS SUELO HUMEDO (g)	CODIGO DE LA CAPSULA	PESO DE LA CAPSULA (g)	PESO DE LA CAPSULA MAS SUELO HUMEDO (g)	PESO DE LA CAPSULA MAS SUELO SECO (g)
N11	2276.00	10	21.00	138.50	122.50
N11	2397.00	27	21.30	120.70	106.20
N11	2362.00	01	21.30	54.70	46.60
N13	2355.00	B2	21.60	92.80	86.30
N13	2432.00	703	21.50	77.40	69.90
N13	2448.00	26	20.90	134.60	112.20
N4	2296.00	12	21.00	85.30	76.80
N4	2325.00	28	21.80	113.40	98.70
N4	2390.00	23	20.50	106.70	89.80
N7	2286.00	14	20.50	66.80	61.20
N7	2297.00	32	22.10	111.40	96.50
N7	2416.00	06	20.70	88.90	72.40
N10	2336.00	21	21.60	83.80	75.10
N10	2383.00	31	21.20	97.10	87.50
N10	2424.00	30	20.90	90.90	76.40
N12	2351.00	09	20.30	75.70	70.60
N12	2484.00	07	20.70	88.60	78.50
N12	2429.00	34	21.00	89.20	75.40
N2	2344.00	37	21.30	76.80	71.50
N2	2482.00	24	20.40	94.20	83.60
N2	2439.00	22	20.90	99.40	84.10
N3	2279.00	M1	11.90	57.00	52.20
N3	2357.00	35	21.80	74.50	66.70
N3	2397.00	B4	12.20	93.70	76.70
N8	2422.00	M03	21.20	71.90	67.40
N8	2510.00	29	21.30	95.00	84.80
N8	2437.00	04	20.50	111.70	94.10
N6	2366.00	LL2	21.20	55.40	52.10
N6	2395.00	107	47.50	97.20	91.20
N6	2425.00	38	21.10	92.40	79.30
N5	2411.00	20	21.90	71.40	67.20
N5	2495.00	03	20.70	68.10	61.70
N5	2438.00	08	20.80	108.60	90.70
N9	2352.00	18	21.30	60.80	57.10
N9	2489.00	B3	11.60	48.00	43.00
N9	2444.00	25	21.00	104.20	88.10
N1	2429.00	LL1	21.30	58.10	54.70
N1	2500.00	19	21.30	91.80	82.30
N1	2449.00	15	21.10	121.00	101.20
N14	2266.00	33	21.20	85.80	78.40

3.6.2.4 Ensayo CBR mediante el método PDC

El ensayo del CBR se realizó por el método Penetrómetro dinámico de Cono (PDC) siguiendo los siguientes procedimientos.

3.6.2.4.1 Pesaje de muestras

Se realiza el pesado de los materiales como son: Suelo arcilloso, agua, óxido de calcio y fibra Agave americana tratada según dimensiones de acuerdo a la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad (COH), tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 18: Tabla de ensayos de CBR

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Suelo húmedo (g)	Peso fibra (g)	Peso Cal (g)	Agua COH (g)
N1	100	800	0	0	23
N2	20	800	16	0	37
N3	100	800	48	4	66
N4	60	800	120	4	87
N5	20	800	0	12	23
N6	60	800	16	40	30
N7	60	800	120	4	145
N8	100	800	0	0	30
N9	20	800	16	0	37
N10	100	800	48	4	23
N11	60	800	120	4	87
N12	20	800	0	12	37
N13	60	800	16	40	44
N14	60	800	120	4	87



Figura 31: Pesaje de muestras

3.6.2.4.2 Mezclado de muestras

Se realiza el mezclado de suelo arcilloso con fibra de agave americana tratada durante 60 segundos, seguidamente se incrementa oxido de calcio y se vuelve a mezclar durante 60 segundos y por último se incrementa la cantidad de agua optima y se culmina el mezclado nuevamente durante 60 segundos.



Figura 32: Mezclado de muestras del CBR

3.6.2.4.3 Compactación de las muestras

Se utiliza el molde y el mazo para el proceso de compactación, para lo cual se coloca en la quinta parte del molde la mezcla realizada en el paso anterior y compactar mediante 02 golpes con el mazo, seguidamente se coloca las otras 2/5 partes con la mezcla y se da 02 golpes con el mazo y sucesivamente hasta compactar las 05 capas.



Figura 33: Molde compactado para el CBR

3.6.2.4.4 Ensayo de penetración PDC

Este ensayo se realiza mediante el siguiente procedimiento.

- a) El modelo consta de una varilla de acero de penetración de 16mm. de diámetro.
- b) En su extremo inferior un cono de acero templado de 60 grados y 20mm. de diámetro.
- c) El PDC es introducido en el suelo por un martillo deslizante de 8Kg que cae desde una altura de 575mm.
- d) Para realizar las lecturas posee una regla de medición sujeta al instrumento por dos soportes, un soporte superior unido al yunque que sirve de referencia para las lecturas y un soporte inferior fijo a la regla y unido a la barra de penetración.
- e) Después de haber realizado la compactación con el mazo en un total de 5 capas procedemos a utilizar este instrumento, colocamos dentro del molde el cono de penetración para luego soltar de una altura de 575mm un martillo de 8kg para luego realizar la lectura nro. 01 de penetración y seguidamente procedemos con el mismo procedimiento por segunda vez y así obtenemos los datos de la profundidad de

penetración utilizando de la longitud inicial (L0), L1 y L2.



Figura 34: Ensayo de penetración PDC

Tabla 19: Resumen de datos obtenidos del ensayo PDC

NOMBRE	LECTURA INICIAL (cm)	L1 (cm)	L2 (cm)
N11	6.90	7.85	8.55
N13	5.80	6.75	7.30
N4	4.65	5.20	5.70
N7	5.40	6.50	7.55
N10	5.40	5.85	6.15
N12	7.80	8.40	8.85
N2	7.45	8.00	8.50
N3	6.95	7.70	8.40
N8	7.60	8.25	8.75
N6	7.50	8.20	8.65
N5	7.95	8.55	8.90
N9	7.80	8.40	8.80
N1	7.85	8.40	8.85
N14	5.65	6.30	6.90

3.6.2.5 Ensayo de ascensión capilar

3.6.2.5.1 Pesaje de muestras

Se realiza el pesado de los materiales como son: Suelo arcilloso, agua, óxido de calcio y fibra de agave americana tratada según dimensiones de acuerdo a la DSM y la COH.

Tabla 20: Tabla de ensayos para la ascensión capilar

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Suelo húmedo (g)	Peso fibra (g)	Peso Cal (g)	Agua COH (g)
N1	100	800	0	0	23
N2	20	800	16	0	37
N3	100	800	48	4	66
N4	60	800	120	4	87
N5	20	800	0	12	23
N6	60	800	16	40	30
N7	60	800	120	4	145
N8	100	800	0	0	30
N9	20	800	16	0	37
N10	100	800	48	4	23
N11	60	800	120	4	87
N12	20	800	0	12	37
N13	60	800	16	40	44
N14	60	800	120	4	87



Figura 35: Peaje de muestras para el ensayo de ascensión capilar

3.6.2.5.2 Mezclado de muestras

Se realiza el mezclado de suelo arcilloso con fibra de agave americana tratada durante 60 segundos, seguidamente se incrementa oxido de calcio y se mezcla durante 60 segundos y por último se incrementa la cantidad de agua optima y se culmina el mezclado nuevamente durante 60 segundos.



Figura 36: Mezclado de muestras para el ensayo de ascensión capilar

3.6.2.5.3 Compactación de muestras para el ensayo de ascensión capilar

Para la compactación se utiliza el molde y el mazo para lo cual se coloca la quinta parte del molde la mezcla realizada en el paso anterior y se compacta dándole 02 golpes con el mazo, seguidamente se coloca las otras 2/5 partes con la mezcla y se da 02 golpes con el mazo y sucesivamente hasta llegar hasta 05 capas.



Figura 37: Muestra compactada para el ensayo de ascensión capilar

3.6.2.5.4 Desmolde de las muestras compactadas

Se realiza el desmolde de las muestras compactadas utilizando una prensa o gata, luego se obtiene un molde cilíndrico de muestra compactada, seguidamente esta muestra es colocada al horno de secado durante 72 horas a 250 °C.



Figura 38: Muestras de suelo compactado para el ensayo de ascensión capilar

3.6.2.5.5 Ensayo de ascensión capilar

Se retiró los moldes cilíndricos del horno y se colocaron en una bandeja contenida con agua de 1 cm de altura, se colocaron todas las muestras al mismo tiempo, durante 1 hora para verificar la ascensión capilar, pasado el tiempo de 1 hora se procede a medir en diferentes partes del cilindro la altura de la ascensión capilar.



Figura 39: Colocación de las muestras en la bandeja con agua



Figura 40: Medición de la ascensión capilar

Tabla 21: Resumen de datos del ensayo de ascensión capilar

Nombre	AC-1 (mm)	AC-2 (mm)	AC PROMEDIO (mm)
N1	41.91	39.56	40.74
N2	71.72	81.09	76.41
N3	67.38	57.28	62.33
N4	61.22	68.03	64.63
N5	64.18	68.62	66.40
N6	75.00	83.28	79.14
N7	63.25	60.40	61.83
N8	47.10	44.80	45.95
N9	60.15	63.89	62.02
N10	85.60	78.95	82.28
N11	43.56	39.26	41.41
N12	57.87	64.62	61.25
N13	49.09	50.25	49.67
N14	41.25	42.90	42.08

3.6.3 Procesamiento de datos

- Procesamiento de la información recolectada
- Procesamiento de resultados obtenidos
- Procesamiento de la información y presentación de resultados

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Clasificación de suelo

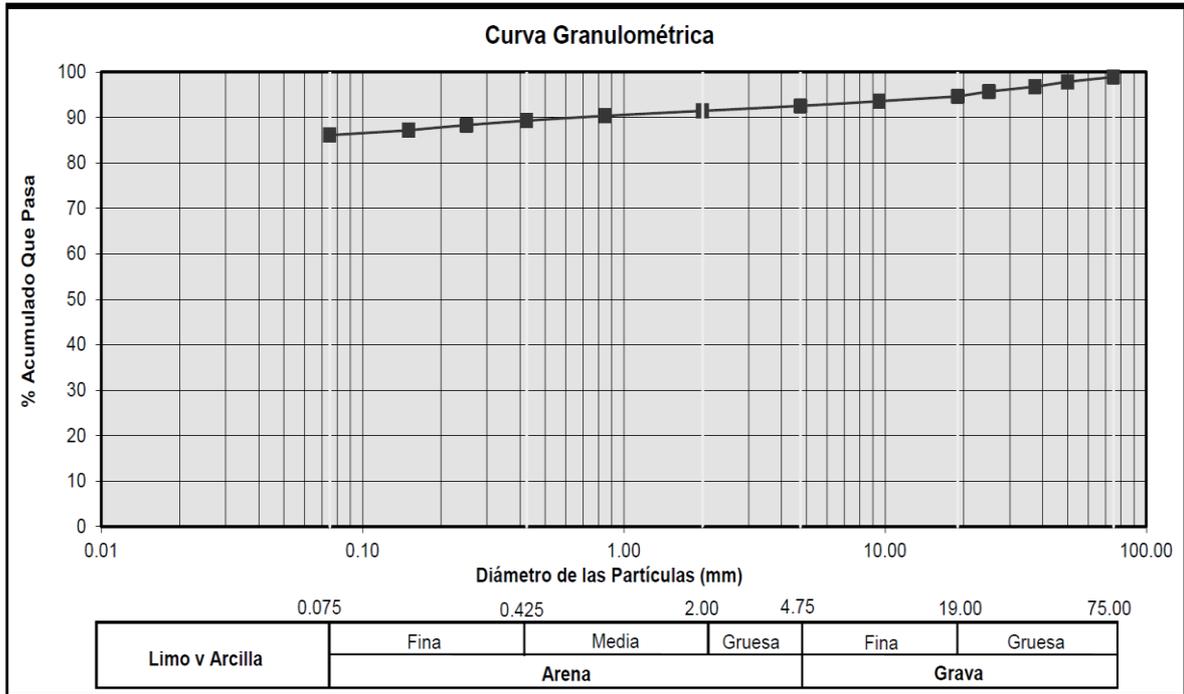
4.1.1.1 Granulometría

La granulometría nos va a servir para la clasificación de suelo mediante el sistema de clasificación SUCS.

Tabla 22: Granulometría del suelo

Tamiz		Peso Parcial Retenido	Peso Parcial Retenido Corregido	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado Que Pasa
-	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)	(%)
3"	75.000	0.00	3.00	1.07	1.07	98.93
2"	50.000	0.00	3.00	1.07	2.14	97.86
1 1/2"	37.500	0.00	3.00	1.07	3.20	96.80
1"	25.000	0.00	3.00	1.07	4.27	95.73
3/4"	19.000	0.00	3.00	1.07	5.34	94.66
3/8"	9.500	0.00	3.00	1.07	6.41	93.59
No 004	4.750	0.00	3.00	1.07	7.47	92.53
No 010	2.000	0.00	3.00	1.07	8.54	91.46
No 020	850	0.00	3.00	1.07	9.61	90.39
No 040	425	0.00	3.00	1.07	10.68	89.32
No 060	250	0.00	3.00	1.07	11.74	88.26
No 100	150	0.00	3.00	1.07	12.81	87.19
No 200	75	0.00	3.00	1.07	13.88	86.12
Platillo		242.00	242.00	86.12	100.00	0.00
Total		242.00	281.00	100.00	-	-

Tabla 23: Curva granulométrica



4.1.1.2 Límites de consistencia

Mediante los límites de consistencia se ha determinado el límite (LL) y el límite plástico (LP) para encontrar el valor del índice plástico (IP).

Tabla 24: Limite líquido

N° DE ENSAYO		1	2	3	4
1	N° recipiente	100	119	108	43
2	N° golpes	51	33	21	8
3	W recipiente	(gr) 47.30	46.60	47.40	46.90
4	W recipiente sw	(gr) 66.80	63.70	67.70	77.50
5	W recipiente s	(gr) 63.30	60.40	63.10	70.20
6	W w : 4-5	(gr) 3.50	3.30	4.60	7.30
7	W s : 5-3	(gr) 16.00	13.80	15.70	23.30
8	w : 100*6/7	(%) 21.88	23.91	29.30	31.33
9	LL	(%)	27.37		

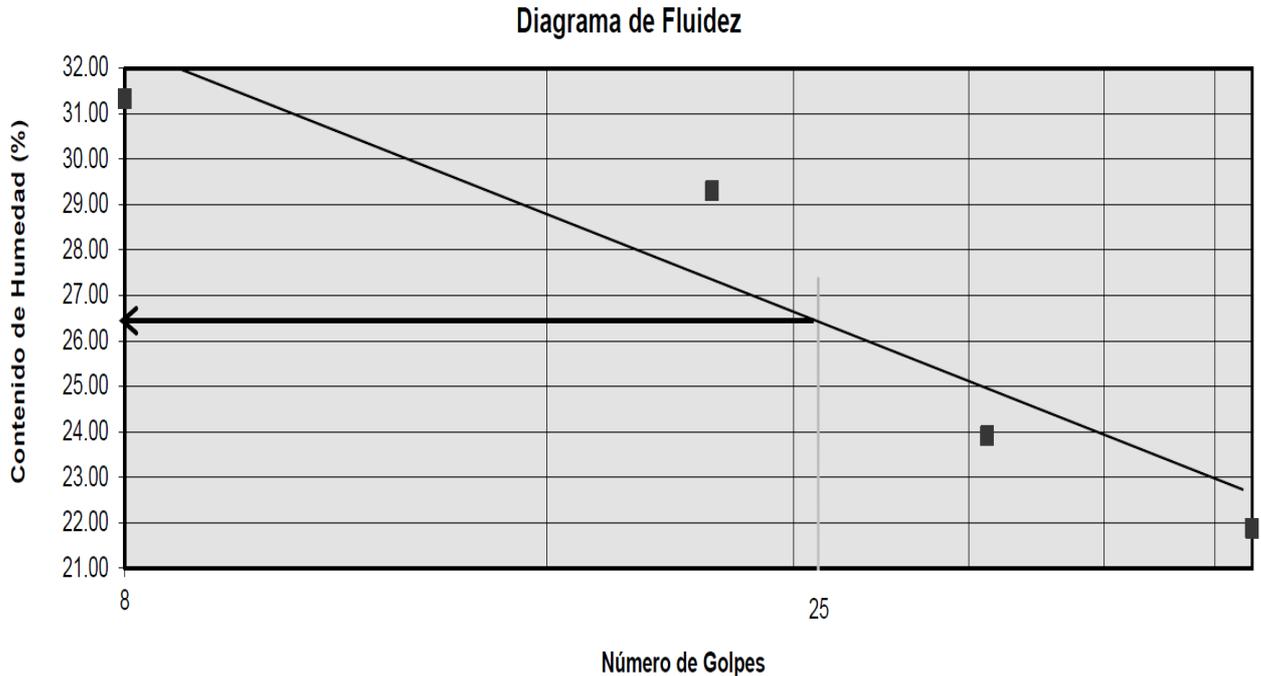


Figura 41: Diagrama de fluidez

Tabla 25: Limite plástico

LIMITE PLÁSTICO (LP)						
1	No recipiente		Q3	Q3	Q3	Q3
2	W recipiente	(gr)	10.80	10.80	10.80	10.80
3	W recipiente sw	(gr)	17.20	17.20	17.20	17.20
4	W recipiente s	(gr)	16.60	16.60	16.60	16.60
5	W w : 3-4	(gr)	0.60	0.60	0.60	0.60
6	W s : 4-2	(gr)	5.80	5.80	5.80	5.80
7	LP : 100*5/6	(%)	10.34	10.34	10.34	10.34
8	LP promedio	(%)	10.34			

4.1.1.3 Clasificación del suelo

La clasificación del suelo por el sistema SUCS se realizó mediante la utilización de la granulometría del suelo, en nuestro caso la tabla de granulometría del suelo nos muestra que el porcentaje de suelo que pasa por el Tamiz N° 200 es igual 86.12%, esto significa que más del 50% pasa por el tamiz N° 200, lo que indica que de acuerdo a la granulometría se trata de un suelo fino.

Los resultados de los límites de consistencia son los siguientes:

$$LL=27.37\%$$

$$LP=10.34\%$$

Con los resultados de los límites de consistencia se determinó el índice de plasticidad la cual arrojó el siguiente resultado:

$$IP = LL - LP = 27.37 - 10.34 = 17.03\%$$

Obtenido este resultado determinamos el tipo de suelo de acuerdo a la carta de plasticidad, como se aprecia en la siguiente figura:

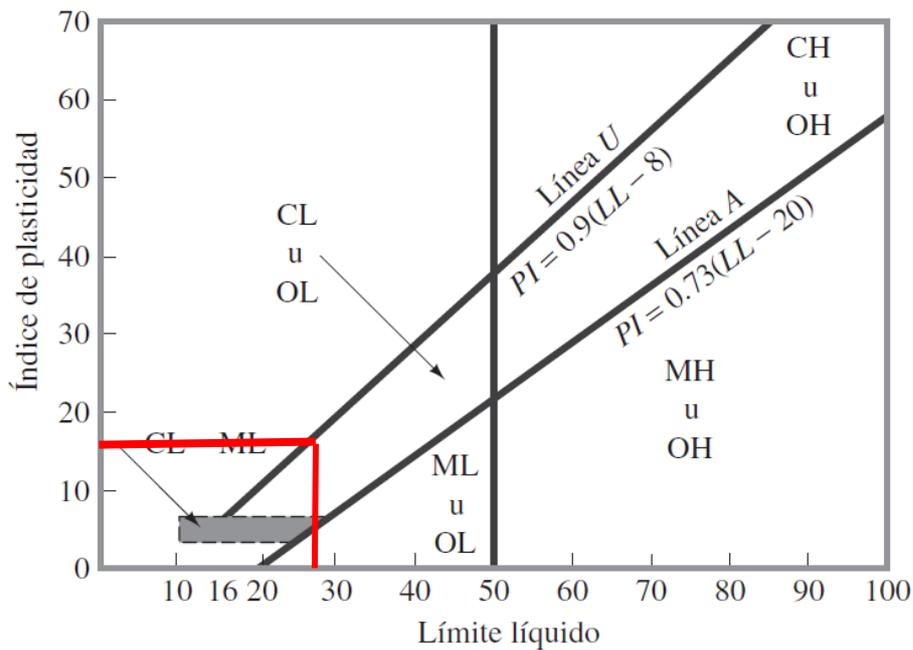


Figura 42: Tipo de suelo de acuerdo a la carta de plasticidad

Según a la carta de plasticidad del sistema de clasificación SUCS se clasifica como Arcilla Limpia (CL) de baja plasticidad.

4.1.2 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con oxido de calcio en la máxima densidad máxima seca y en el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

Para la determinación de la Densidad máxima seca el Contenido Óptimo de Humedad se realizó el ensayo Proctor modificado a cada una de las combinaciones de muestras, cuyos resultados se muestran a continuación.

4.1.2.1 Proctor modificado

Después de haber realizado cada uno de los ensayos se obtuvieron los resultados, estos datos fueron procesados siguiendo cada uno de los procesos de acuerdo a la norma ASTM D-1557.

Utilizando estas ecuaciones de esta norma se ha podido determinar el contenido de humedad y la densidad seca de cada uno de los ensayos, mediante la obtención de estos datos se ha determinado la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de compactación.

4.1.2.1.1 Obtención de la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad

a) Muestra N11

Tabla 26: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N11

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECIFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2276	2397	2362
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	531	652	617
Volumen del molde	cm ³	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm ³	1,526	1,874	1,773
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	10	27	1
Peso muestra húmeda + tara	g	138,50	120,70	54,70
Peso muestra seca + tara	g	122,50	106,20	46,60
Peso del agua	g	16,00	14,50	8,10
Peso de la tara	g	21	21,3	21,3
Peso de la muestra seca	g	101,5	84,9	25,3
Contenido de humedad	%	15,8	17,1	32,0
PESO ESPECIFICO SECO				
Densidad seca	g/cm ³	1,32	1,60	1,34

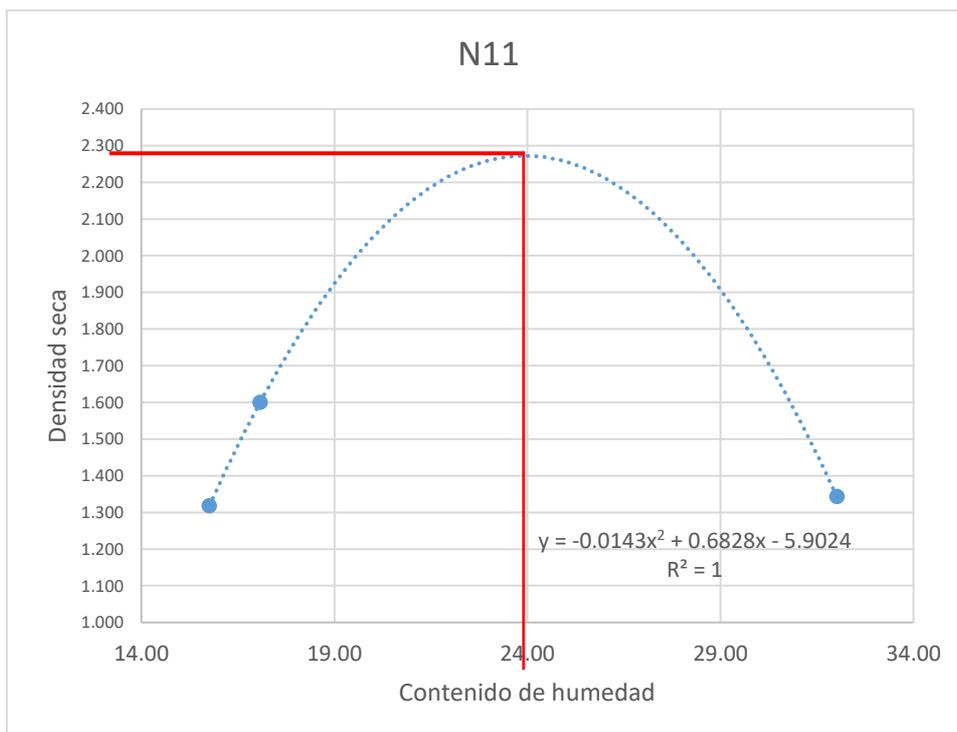


Figura 43: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N11

b) Muestra N13

Tabla 27: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N13

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECIFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2355	2432	2445
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	610	687	700
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,753	1,974	2,011
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	B2	703	26
Peso muestra húmeda + tara	g	92,80	77,40	134,60
Peso muestra seca + tara	g	86,30	69,90	112,20
Peso del agua	g	6,50	7,50	22,40
Peso de la tara	g	21,6	21,5	20,9
Peso de la muestra seca	g	64,7	48,4	91,3
Contenido de humedad	%	10,0	15,5	24,5
PESO ESPECIFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,59	1,71	1,62

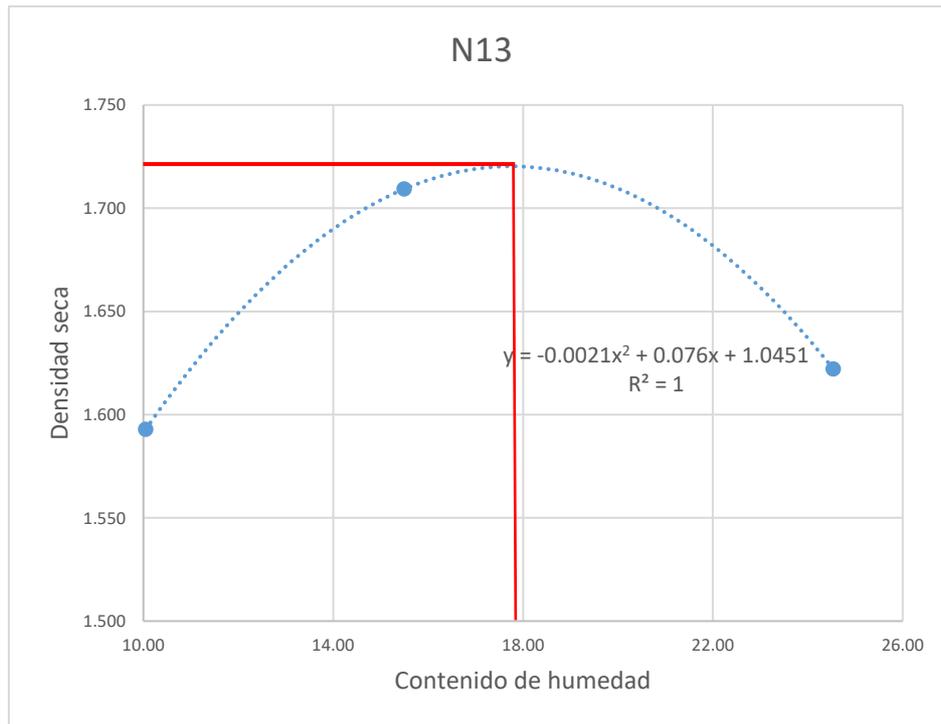


Figura 44: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N13

c) Muestra N4

Tabla 28: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N4

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECIFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2296	2325	2390
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	551	580	645
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,583	1,667	1,853
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	12	28	23
Peso muestra húmeda + tara	g	85,30	113,40	106,70
Peso muestra seca + tara	g	76,80	98,70	89,80
Peso del agua	g	8,50	14,70	16,90
Peso de la tara	g	21	21,8	20,5
Peso de la muestra seca	g	55,8	76,9	69,3
Contenido de humedad	%	15,2	19,1	24,4
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,37	1,40	1,49

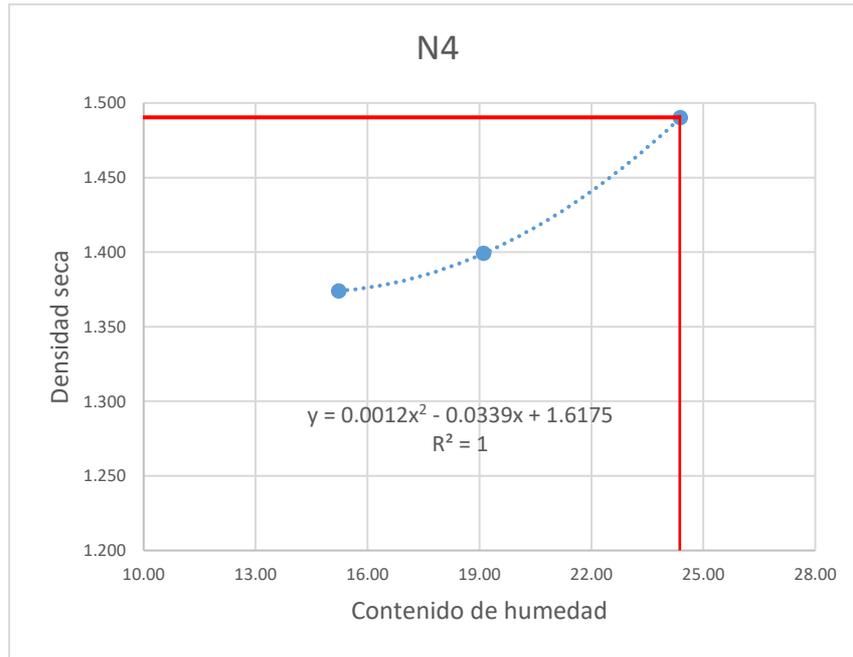


Figura 45: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N4

d) Muestra N7

Tabla 29: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N7

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2286	2297	2416
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	541	552	671
Volúmen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,555	1,586	1,928
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	14	32	06
Peso muestra húmeda + tara	g	66,80	111,40	88,90
Peso muestra seca + tara	g	61,20	96,50	72,40
Peso del agua	g	5,60	14,90	16,50
Peso de la tara	g	20,5	22,1	20,7
Peso de la muestra seca	g	40,7	74,4	51,7
Contenido de humedad	%	13,8	20,0	31,9
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,37	1,32	1,46

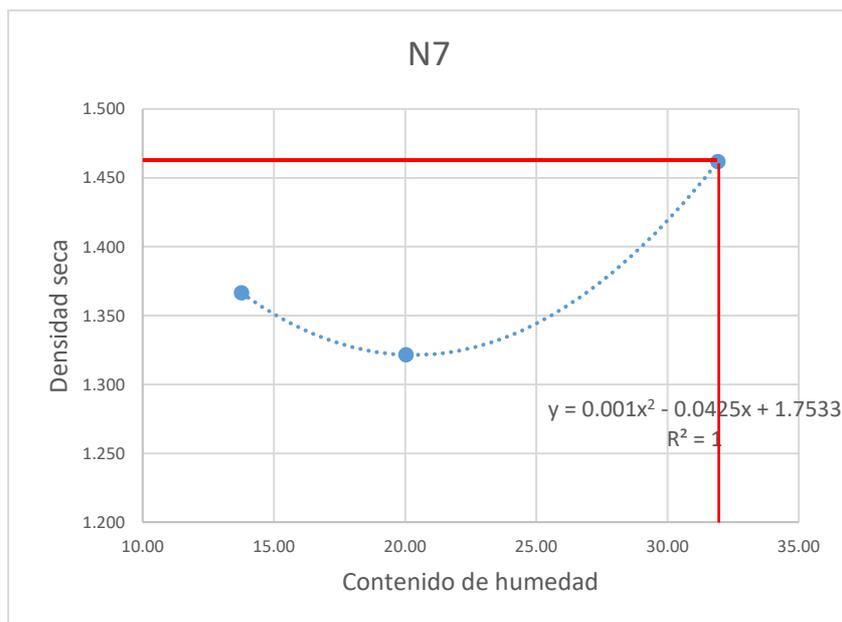


Figura 46: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N7

e) Muestra N10

Tabla 30: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N10

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2336	2383	2424
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	591	638	679
Volumen del molde	cm ³	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm ³	1,698	1,833	1,951
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	21	31	30
Peso muestra húmeda + tara	g	83,80	97,10	90,90
Peso muestra seca + tara	g	75,10	87,50	76,40
Peso del agua	g	8,70	9,60	14,50
Peso de la tara	g	21,6	21,2	20,9
Peso de la muestra seca	g	53,5	66,3	55,5
Contenido de humedad	%	16,3	14,5	26,1
PESO ESPECIFICO SECO				
Densidad seca	g/cm ³	1,46	1,60	1,55

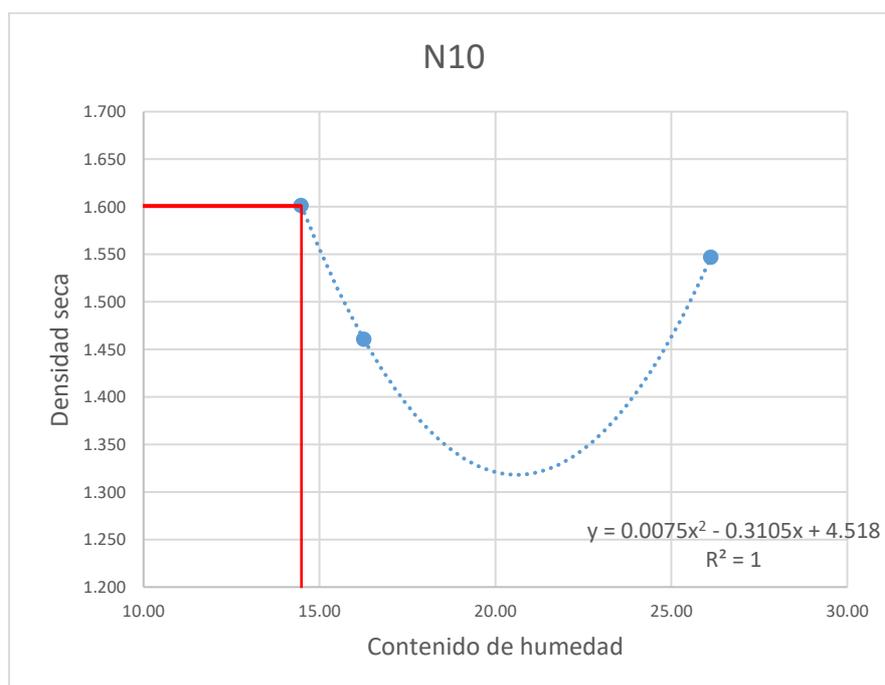


Figura 47: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N10

f) Muestra N12

Tabla 31: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N12

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECIFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2351	2484	2429
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	606	739	684
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,741	2,124	1,966
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	9	7	34
Peso muestra húmeda + tara	g	75,70	88,60	89,20
Peso muestra seca + tara	g	70,60	78,50	75,40
Peso del agua	g	5,10	10,10	13,80
Peso de la tara	g	20,3	20,7	21
Peso de la muestra seca	g	50,3	57,8	54,4
Contenido de humedad	%	10,1	17,5	25,4
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,58	1,81	1,57

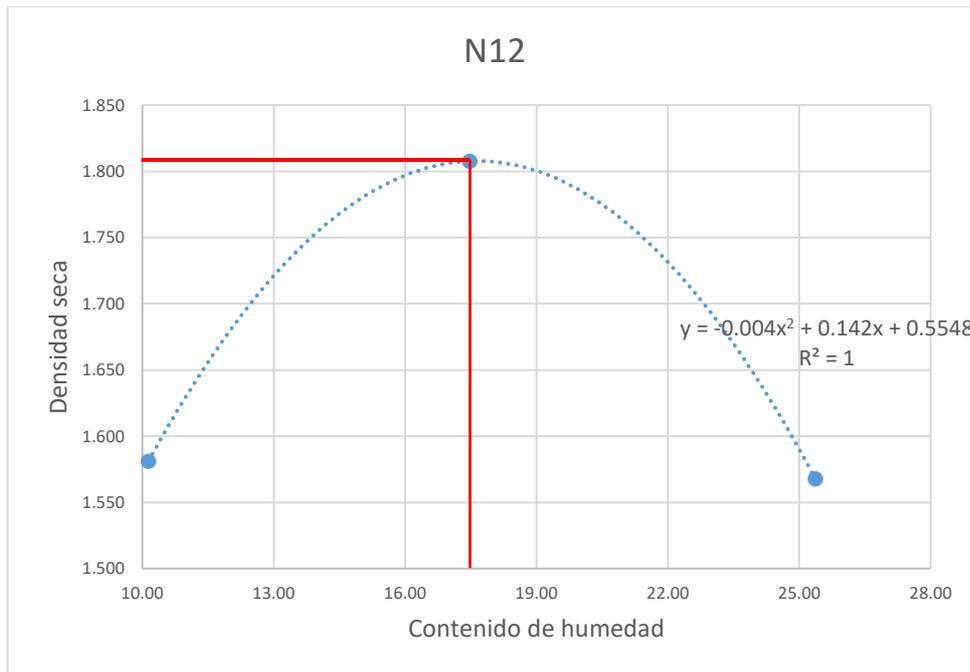


Figura 48: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N12

g) Muestra N2

Tabla 32: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N2

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2344	2482	2439
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	599	737	694
Volúmen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,721	2,118	1,994
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	37	24	22
Peso muestra húmeda + tara	g	76,80	94,20	99,40
Peso muestra seca + tara	g	71,50	83,60	84,10
Peso del agua	g	5,30	10,60	15,30
Peso de la tara	g	21,3	20,4	20,9
Peso de la muestra seca	g	50,2	63,2	63,2
Contenido de humedad	%	10,6	16,8	24,2
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,56	1,81	1,61

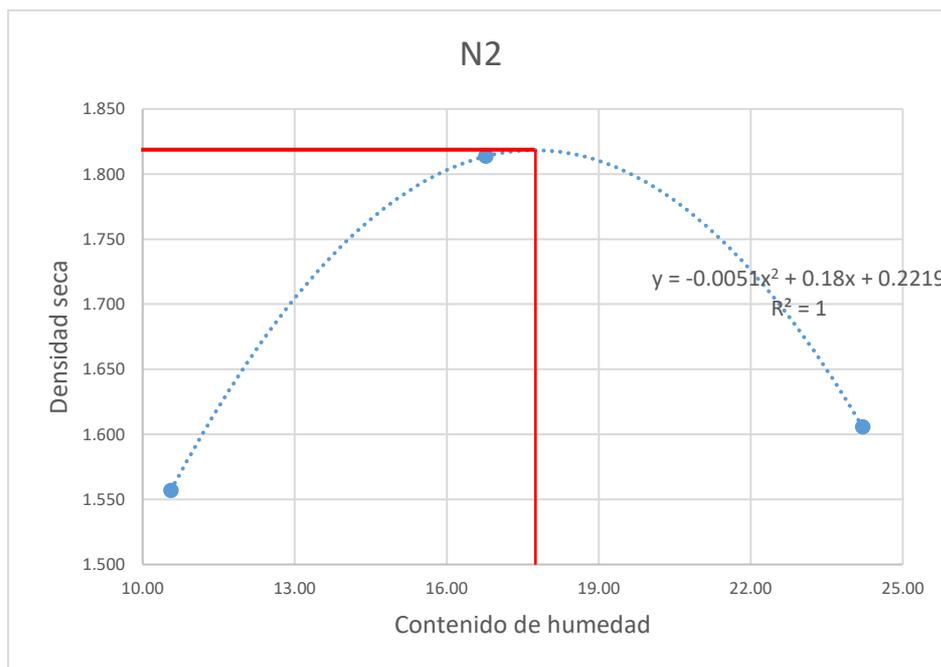


Figura 49: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N2

h) Muestra N3

Tabla 33: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N3

ENSAYO		Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO					
Peso de muestra húmeda + molde	g		2279	2357	2397
Peso del molde	g		1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g		534	612	652
Volumen del molde	cm3		348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3		1,534	1,759	1,874
CONTENIDO DE HUMEDAD					
Tara	Nº		M1	35	B4
Peso muestra húmeda + tara	g		57,00	74,50	93,70
Peso muestra seca + tara	g		52,20	66,70	76,70
Peso del agua	g		4,80	7,80	17,00
Peso de la tara	g		11,9	21,8	12,2
Peso de la muestra seca	g		40,3	44,9	64,5
Contenido de humedad	%		11,9	17,4	26,4
PESO ESPECÍFICO SECO					
Densidad seca	g/cm3		1,37	1,50	1,48

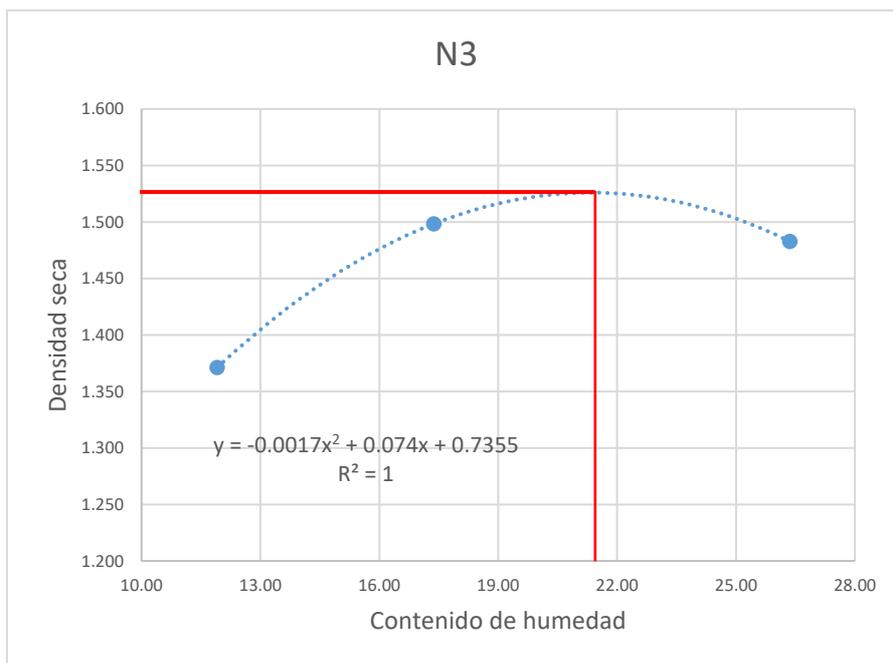


Figura 50: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N3

i) Muestra N8

Tabla 34: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N8

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2422	2510	2437
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	677	765	692
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,945	2,198	1,989
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	M03	29	4
Peso muestra húmeda + tara	g	71,90	95,00	111,70
Peso muestra seca + tara	g	67,40	84,80	94,10
Peso del agua	g	4,50	10,20	17,60
Peso de la tara	g	21,2	21,3	20,5
Peso de la muestra seca	g	46,2	63,5	73,6
Contenido de humedad	%	9,7	16,1	23,9
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,77	1,89	1,60

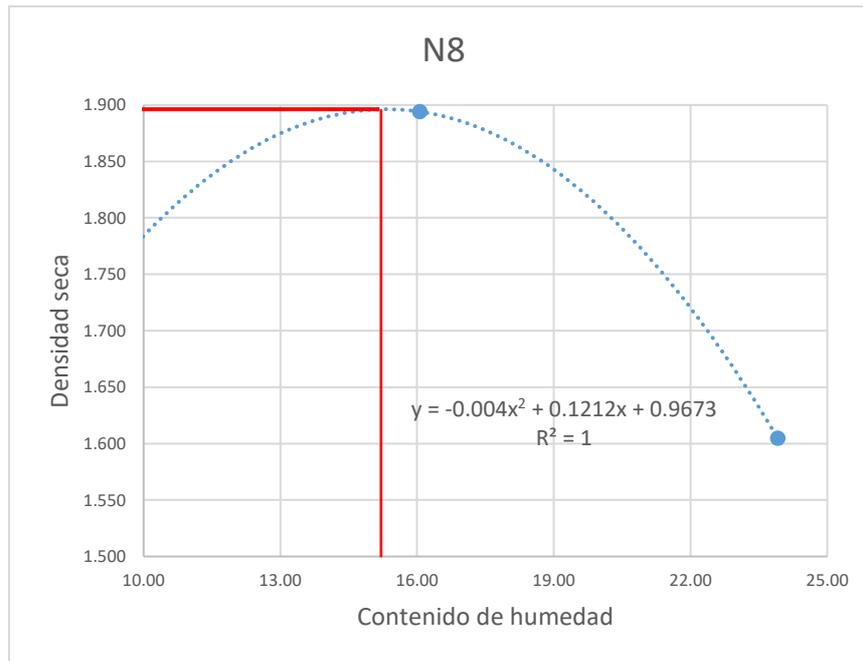


Figura 51: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N8

j) Muestra N6

Tabla 35: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N6

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2366	2395	2425
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	621	650	680
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,784	1,868	1,954
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	LL2	107	38
Peso muestra húmeda + tara	g	55,40	97,20	92,40
Peso muestra seca + tara	g	52,10	91,20	79,30
Peso del agua	g	3,30	6,00	13,10
Peso de la tara	g	21,2	47,5	21,1
Peso de la muestra seca	g	30,9	43,7	58,2
Contenido de humedad	%	10,7	13,7	22,5
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,61	1,64	1,60

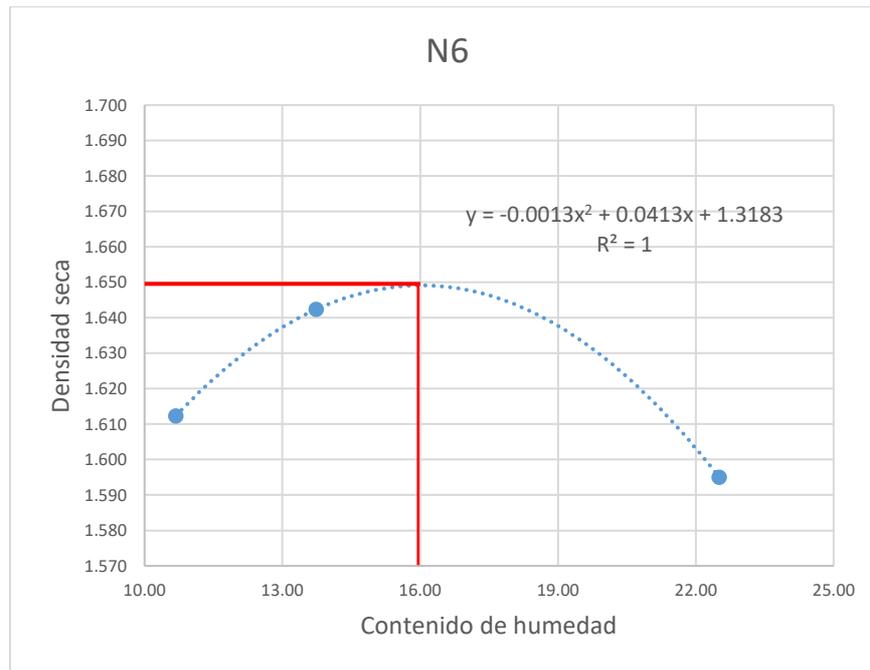


Figura 52: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N6

k) Muestra N5

Tabla 36: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N5

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2411	2495	2438
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	666	750	693
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,914	2,155	1,991
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	20	3	8
Peso muestra húmeda + tara	g	71,40	68,10	108,60
Peso muestra seca + tara	g	67,20	61,70	90,70
Peso del agua	g	4,20	6,40	17,90
Peso de la tara	g	21,9	20,7	20,8
Peso de la muestra seca	g	45,3	41	69,9
Contenido de humedad	%	9,3	15,6	25,6
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,75	1,86	1,59

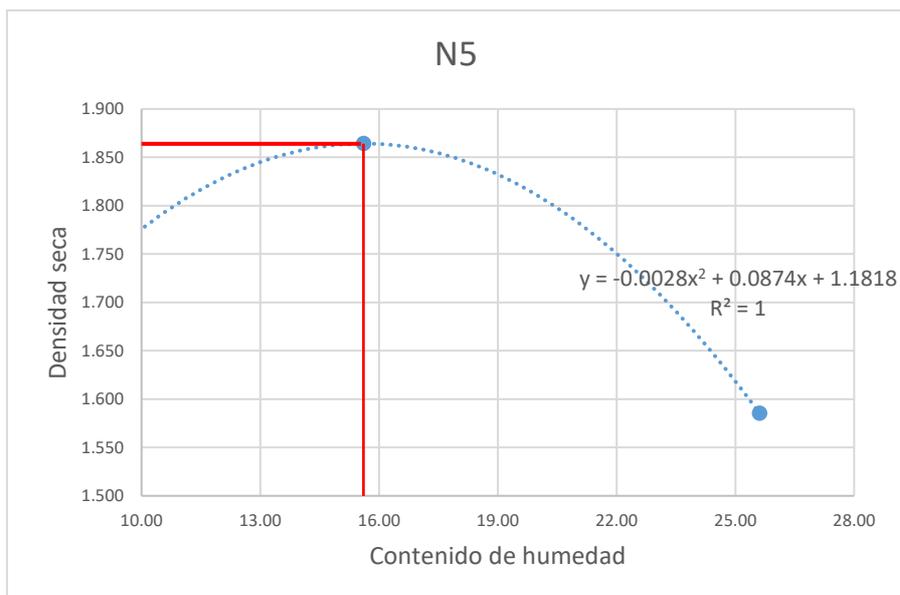


Figura 53: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N5

I) Muestra N9

Tabla 37: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N9

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECIFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2352	2489	2444
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	607	744	699
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,744	2,138	2,009
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	18	B3	25
Peso muestra húmeda + tara	g	60,80	48,00	104,20
Peso muestra seca + tara	g	57,10	43,00	88,10
Peso del agua	g	3,70	5,00	16,10
Peso de la tara	g	21,3	11,6	21
Peso de la muestra seca	g	35,8	31,4	67,1
Contenido de humedad	%	10,3	15,9	24,0
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,58	1,84	1,62

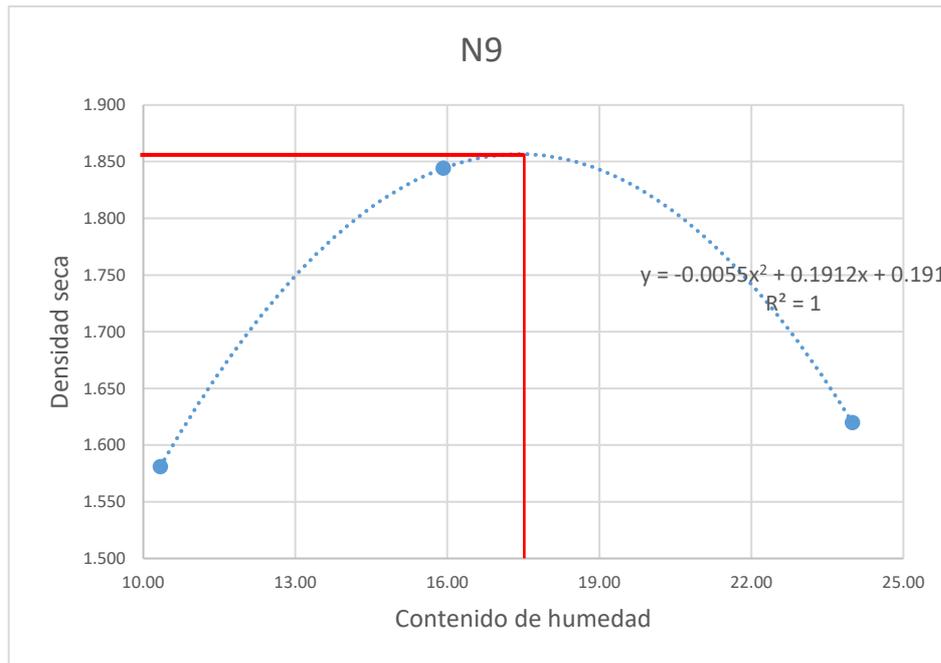


Figura 54: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N9

m) Muestra M1

Tabla 38: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N1

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2429	2500	2449
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	684	755	704
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,966	2,170	2,023
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	LL1	19	15
Peso muestra húmeda + tara	g	58,10	91,80	121,00
Peso muestra seca + tara	g	54,70	82,30	101,20
Peso del agua	g	3,40	9,50	19,80
Peso de la tara	g	21,3	21,3	21,1
Peso de la muestra seca	g	33,4	61	80,1
Contenido de humedad	%	10,2	15,6	24,7
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,78	1,88	1,62

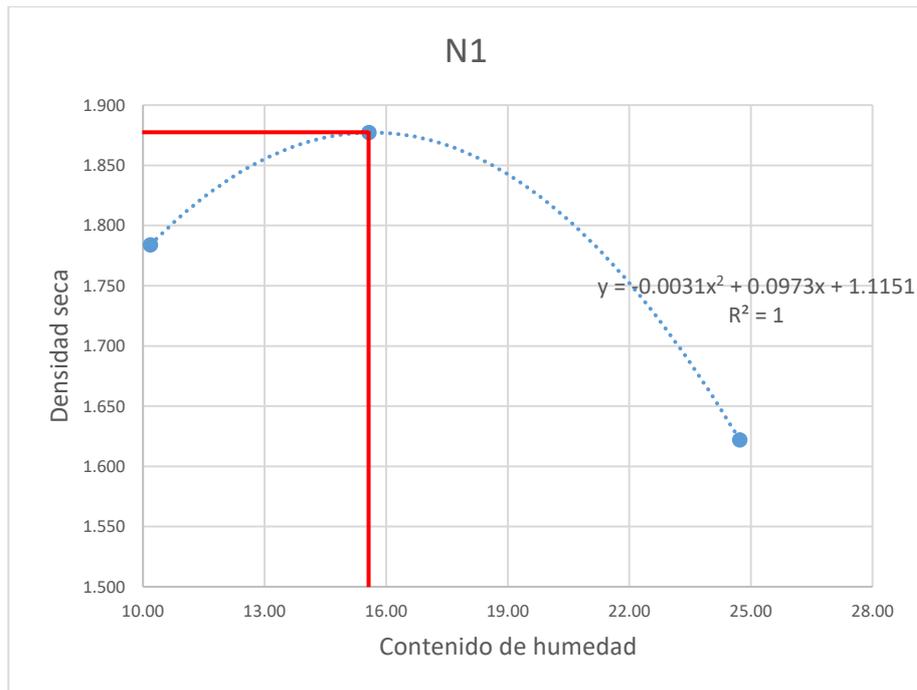


Figura 55: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N1

n) Muestra N14

Tabla 39: Resultados del ensayo Proctor modificado de la muestra N14

ENSAYO	Nº	1	2	3
PESO ESPECÍFICO				
Peso de muestra húmeda + molde	g	2266	2328	2420
Peso del molde	g	1745	1745	1745
Peso de la muestra húmeda	g	521	583	675
Volumen del molde	cm3	348	348	348
Densidad húmeda	g/cm3	1,497	1,675	1,940
CONTENIDO DE HUMEDAD				
Tara	Nº	33	2	W3
Peso muestra húmeda + tara	g	85,80	73,20	63,20
Peso muestra seca + tara	g	78,40	64,60	53,60
Peso del agua	g	7,40	8,60	9,60
Peso de la tara	g	21,2	20,4	14,3
Peso de la muestra seca	g	57,2	44,2	39,3
Contenido de humedad	%	12,9	19,5	24,4
PESO ESPECÍFICO SECO				
Densidad seca	g/cm3	1,33	1,40	1,56

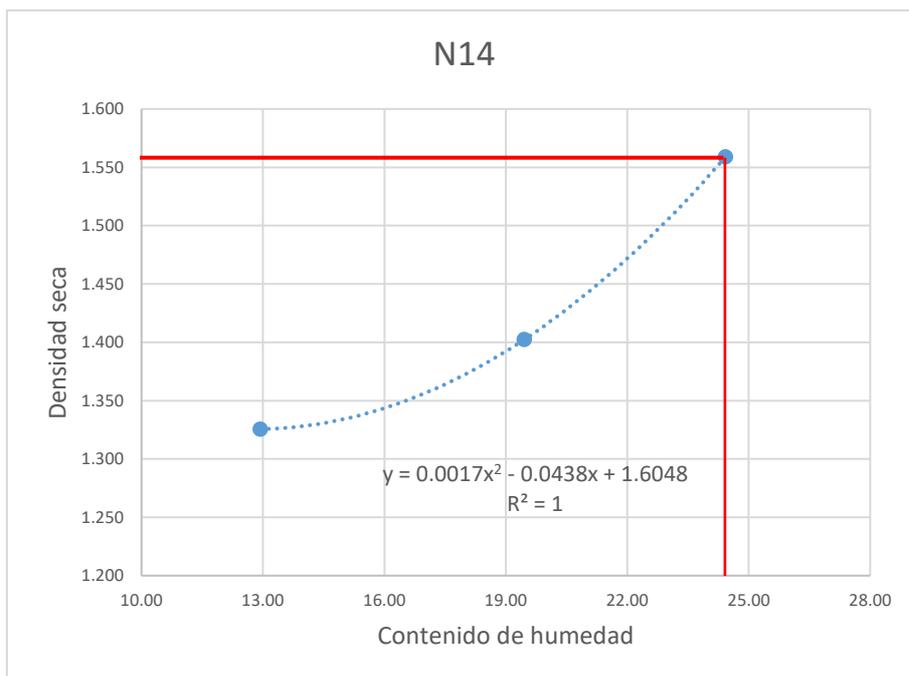


Figura 56: Gráfica del ensayo Proctor modificado de la muestra N14

4.1.2.1.2 Densidad máxima seca y humedad óptima resultante

En el siguiente cuadro se muestra la densidad máxima seca y la humedad óptima que se obtuvo de cada una de las gráficas mostradas anteriormente.

Tabla 40: Cuadro resumen de humedad óptima y densidad máxima seca

N	HUMEDAD ÓPTIMA (%)	DMS (g/cm³)
1	15	1,87
2	17	1,82
3	21	1,52
4	24	1,5
5	15	1,86
6	16	1,65
7	32	1,45
8	16	1,9
9	17	1,85
10	15	1,6
11	24	2,25
12	17	1,8
13	18	1,72
14	24	1,55

4.1.3 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

La obtención del CBR se realizó mediante el método PDC (Penetrómetro dinámico de Cono), cuyos resultados fueron los siguientes.

4.1.3.1 Obtención del índice de soporte de California mediante el método PDC

Se realizó la compactación con un total de 05 capas de cada una de las muestras dosificadas con determinadas cantidades en peso de suelo húmedo, dosis de fibra en peso, dosis de óxido de calcio en peso y el Contenido Optimo de Humedad la cual se determinó anteriormente en los ensayos de Proctor modificado detallados en el siguiente cuadro:

Tabla 41: Tabla de dosificación para el ensayo de CBR mediante el método PDC

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Suelo húmedo (g)	Dosis de fibra (g)	Dosis de óxido de calcio (g)	Agua (COH) (g)
N1	100	800	0	0	23
N2	20	800	16	0	37
N3	100	800	48	4	66
N4	60	800	120	4	87
N5	20	800	0	12	23
N6	60	800	16	40	30
N7	60	800	120	4	145
N8	100	800	0	0	30
N9	20	800	16	0	37
N10	100	800	48	4	23
N11	60	800	120	4	87
N12	20	800	0	12	37
N13	60	800	16	40	44
N14	60	800	120	4	87

Una vez realizada la compactación se procedió a realizar el ensayo de penetración utilizando el método PDC, para lo cual se realizó la lectura inicial (Li) antes de realizar en ensayo, seguidamente se suelta el martillo de un peso de 8 kg desde una altura 575mm y se realiza la segunda lectura (L1), siguiendo el mismo procedimiento después de soltar el martillo se realiza la segunda lectura (L2), cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 42: Resultados del ensayo de penetración

Nombre	Li (cm)	L1 (cm)	L2 (cm)
N1	7,85	8,4	8,85
N2	7,45	8	8,5
N3	6,95	7,7	8,4
N4	4,65	5,2	5,7
N5	7,95	8,55	8,9
N6	7,5	8,2	8,65
N7	5,4	6,5	7,55
N8	7,6	8,25	8,75
N9	7,8	8,4	8,8
N10	5,4	5,85	6,15
N11	6,9	7,85	8,55
N12	7,8	8,4	8,85
N13	5,8	6,75	7,3
N14	5,65	6,3	6,9

Obtenido los resultados se procedieron a procesarlos para determinar la profundidad promedio de penetración utilizando el siguiente procedimiento.

$$DPI1 = L1 - Li$$

$$DPI2 = L2 - L1$$

Seguidamente se obtuvo el índice PDC que es la relación entre la penetración y el número de golpes mediante la siguiente fórmula.

$$PDC = \frac{(DPI1 + DPI2)}{\# \text{ de Golpes}}$$

Donde:

PDC: Índice PDC

DPI1: Profundidad de penetración con el primer golpe.

DPI2: Profundidad de penetración con el primer golpe.

Mediante el procesamiento de estos datos se obtiene la siguiente tabla donde se muestra los resultados del índice PDC, cuyo dato nos servirá para determinar el CBR mediante el método PDC de la norma ASTM D6951.

Tabla 43: Penetración promedio mediante el método PDC

Nombre	Li (cm)	L1 (cm)	L2 (cm)	DPI1 (cm)	DPI2 (cm)	PDC (mm/golpe)
N1	7,85	8,4	8,85	5,50	4,50	5,00
N2	7,45	8	8,5	5,50	5,00	5,25
N3	6,95	7,7	8,4	7,50	7,00	7,25
N4	4,65	5,2	5,7	5,50	5,00	5,25
N5	7,95	8,55	8,9	6,00	3,50	4,75
N6	7,5	8,2	8,65	7,00	4,50	5,75
N7	5,4	6,5	7,55	11,00	10,50	10,75
N8	7,6	8,25	8,75	6,50	5,00	5,75
N9	7,8	8,4	8,8	6,00	4,00	5,00
N10	5,4	5,85	6,15	4,50	3,00	3,75
N11	6,9	7,85	8,55	9,50	7,00	8,25
N12	7,8	8,4	8,85	6,00	4,50	5,25
N13	5,8	6,75	7,3	9,50	5,50	7,50
N14	5,65	6,3	6,9	6,50	6,00	6,25

4.1.3.2 Resultados del CBR mediante el método PDC

El ensayo del cono de penetración dinámica se define como el índice PDC la cual es una relación entre la profundidad de penetración y el número de golpes, una vez obtenido este dato se procede a determinar el CBR basándonos en la norma ASTM D6951 el cual nos recomienda la siguiente ecuación para suelos cohesivos.

$$CBR = \frac{292}{PDC^{1.12}}$$

Donde:

CBR: índice de soporte de California.

PDC: índice de cono de penetración dinámica.

Los resultados obtenidos del valor de CBR mediante esta fórmula se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 44: Valor de CBR mediante el método PDC

Nombre	Li (cm)	L1 (cm)	L2 (cm)	DPI1 (cm)	DPI2 (cm)	PDC (mm/golpe)	CBR PDC ASTM D6951 (USACE) (%)
N1	7,85	8,4	8,85	5,50	4,50	5,00	48,1
N2	7,45	8	8,5	5,50	5,00	5,25	45,6
N3	6,95	7,7	8,4	7,50	7,00	7,25	31,8
N4	4,65	5,2	5,7	5,50	5,00	5,25	45,6
N5	7,95	8,55	8,9	6,00	3,50	4,75	51,0
N6	7,5	8,2	8,65	7,00	4,50	5,75	41,2
N7	5,4	6,5	7,55	11,00	10,50	10,75	20,4
N8	7,6	8,25	8,75	6,50	5,00	5,75	41,2
N9	7,8	8,4	8,8	6,00	4,00	5,00	48,1
N10	5,4	5,85	6,15	4,50	3,00	3,75	66,4
N11	6,9	7,85	8,55	9,50	7,00	8,25	27,5
N12	7,8	8,4	8,85	6,00	4,50	5,25	45,6
N13	5,8	6,75	7,3	9,50	5,50	7,50	30,6
N14	5,65	6,3	6,9	6,50	6,00	6,25	37,5

4.1.3.3 Resultados del CBR sumergido

Para determinar el resultado del CBR sumergido se siguió el procedimiento de la norma ASTM D 1883, mediante la siguiente fórmula:

$$CBR_{SUM} = 10^{\frac{500 \log_{10} PDC - 12198}{825}}$$

Donde:

CBR_{SUM} : CBR sumergido.

PDC: Índice PDC

Aplicando esta fórmula se determinó el CBR sumergido de cada una de las muestras sin la necesidad de sumergir las muestras en agua.

Tabla 45: Valor del CBR sumergido mediante la norma ASTM D 1883

Nombre	Li (cm)	L1 (cm)	L2 (cm)	DPI1 (cm)	DPI2 (cm)	PDC (mm/golpe)	CBR PDC ASTM D6951 (USACE) (%)	CBR LAB SUMERGIDO ASTM D1883 (%) Ref. 1
N1	7,85	8,4	8,85	5,50	4,50	5,00	48,1	11,3
N2	7,45	8	8,5	5,50	5,00	5,25	45,6	11,0
N3	6,95	7,7	8,4	7,50	7,00	7,25	31,8	9,0
N4	4,65	5,2	5,7	5,50	5,00	5,25	45,6	11,0
N5	7,95	8,55	8,9	6,00	3,50	4,75	51,0	11,7
N6	7,5	8,2	8,65	7,00	4,50	5,75	41,2	10,4
N7	5,4	6,5	7,55	11,00	10,50	10,75	20,4	7,1
N8	7,6	8,25	8,75	6,50	5,00	5,75	41,2	10,4
N9	7,8	8,4	8,8	6,00	4,00	5,00	48,1	11,3
N10	5,4	5,85	6,15	4,50	3,00	3,75	66,4	13,5
N11	6,9	7,85	8,55	9,50	7,00	8,25	27,5	8,4
N12	7,8	8,4	8,85	6,00	4,50	5,25	45,6	11,0
N13	5,8	6,75	7,3	9,50	5,50	7,50	30,6	8,9
N14	5,65	6,3	6,9	6,50	6,00	6,25	37,5	9,9

4.1.4 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

Se realizó la compactación de cada una de las muestras de suelo arcilloso con su respectiva dosificación de Agave americana tratada con óxido de calcio y el contenido óptimo de humedad (COH), seguidamente estas muestras fueron desmoldadas y puestos en el horno de secado, después del secado se realizó el ensayo de ascensión capilar a cada uno de los moldes colocándolos en un recipiente con agua de una profundidad de 1cm. Cada una de estas muestras permanecieron en el recipiente con agua durante 30 minutos, pasado este tiempo se midió en cada una de estas muestras la altura de ascensión capilar en dos secciones de la muestra, para determinar la altura de ascensión capilar promedio, los cuales se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 46: Resultados del ensayo de ascensión capilar

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Dosis de fibra (g)	Dosis de óxido de calcio (g)	AC-1 (mm)	AC-2 (mm)	AC PROMEDIO (mm)
N1	100	0	0	41,91	39,56	40,74
N2	20	2	0	71,72	81,09	76,41
N3	100	6	0,5	67,38	57,28	62,33
N4	60	15	0,5	61,22	68,03	64,63
N5	20	0	1,5	64,18	68,62	66,40
N6	60	2	5	75,00	83,28	79,14
N7	60	15	0,5	63,25	60,40	61,83
N8	100	0	0	47,10	44,80	45,95
N9	20	2	0	60,15	63,89	62,02
N10	100	6	0,5	85,60	78,95	82,28
N11	60	15	0,5	43,56	39,26	41,41
N12	20	0	1,5	57,87	64,62	61,25
N13	60	2	5	49,09	50,25	49,67
N14	60	15	0,5	41,25	42,90	42,08

4.2 Constatación de hipótesis

4.2.1 La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en el contenido de humedad óptima y en la densidad máxima seca de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

Para la contratación de esta hipótesis se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple a partir de los siguientes datos:

Tabla 47: Datos para el análisis de regresión lineal múltiple de la DSM y COH

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Dosis de fibra (%)	Dosis de óxido de calcio (%)	Humedad óptima (%)	DMS (g/cm ³)
N1	100	0,00	0,00	15	1,87
N2	20	2,00	0,00	17	1,82
N3	100	6,00	0,50	21	1,52
N4	60	15,00	0,50	24	1,5
N5	20	0,00	1,50	15	1,86
N6	60	2,00	5,00	16	1,65
N7	60	15,00	0,50	32	1,45
N8	100	0,00	0,00	16	1,9
N9	20	2,00	0,00	17	1,85
N10	100	6,00	0,50	15	1.6
N11	60	15,00	0,50	24	2,25
N12	20	0,00	1,50	17	1,8
N13	60	2,00	5,00	18	1,72
N14	60	15,00	0,50	24	1,55

4.2.1.1 Contenido óptimo de humedad (COH)

La validación de hipótesis se realizó mediante el análisis de regresión lineal múltiple con la finalidad de verificar en qué medida afectan a la humedad óptima (Variable dependiente) las variables independientes (longitud de fibra expresada en milímetros, dosis de fibra expresada en % y la dosis del óxido de calcio).

Para lo cual se utilizó la herramienta análisis de regresión lineal múltiple del software Microsoft Excel, con los siguientes datos:

Tabla 48: Tabla de resultados de contenido óptimo de humedad (COH)

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Dosis de fibra (%)	Dosis de óxido de calcio (%)	COH (%)
N1	100	0,00	0,00	15
N2	20	2,00	0,00	17
N3	100	6,00	0,50	21
N4	60	15,00	0,50	24
N5	20	0,00	1,50	15
N6	60	2,00	5,00	16
N7	60	15,00	0,50	32
N8	100	0,00	0,00	16
N9	20	2,00	0,00	17
N10	100	6,00	0,50	15
N11	60	15,00	0,50	24
N12	20	0,00	1,50	17
N13	60	2,00	5,00	18
N14	60	15,00	0,50	24

4.2.1.1.1 Análisis de regresión lineal múltiple del COH

Se utiliza el análisis de regresión lineal múltiple para determinar la relación que existe entre las variables independientes y la variable dependiente (COH).

Mediante este análisis se podrá entender como el valor de la variable dependiente varia al cambiar el valor de una de las variables independientes.

4.2.1.1.1.1 Gráficos residuales del COH

Al ajustar toda la nube de puntos a una recta se puede visualizar que algunos puntos que representan a cada uno de los ensayos están muy lejos de la recta, estos puntos alejados hacen que el coeficiente de determinación (R^2) sea menor, este coeficiente debe tener un mínimo de 0.45, si se quiere elevar el valor del coeficiente de determinación se puede eliminar uno de los puntos que representa un ensayo mal ejecutado.

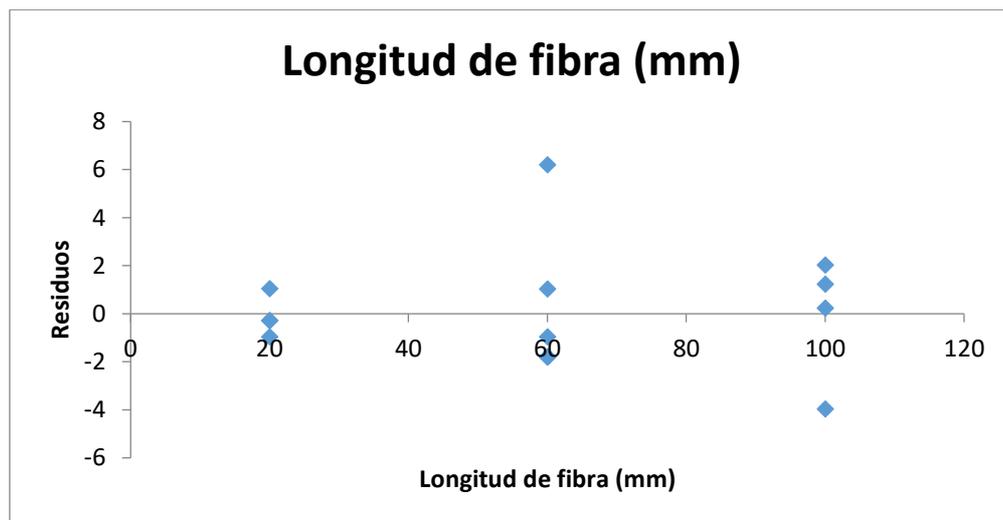


Figura 57: Gráfico de los residuales de longitud de fibra para COH

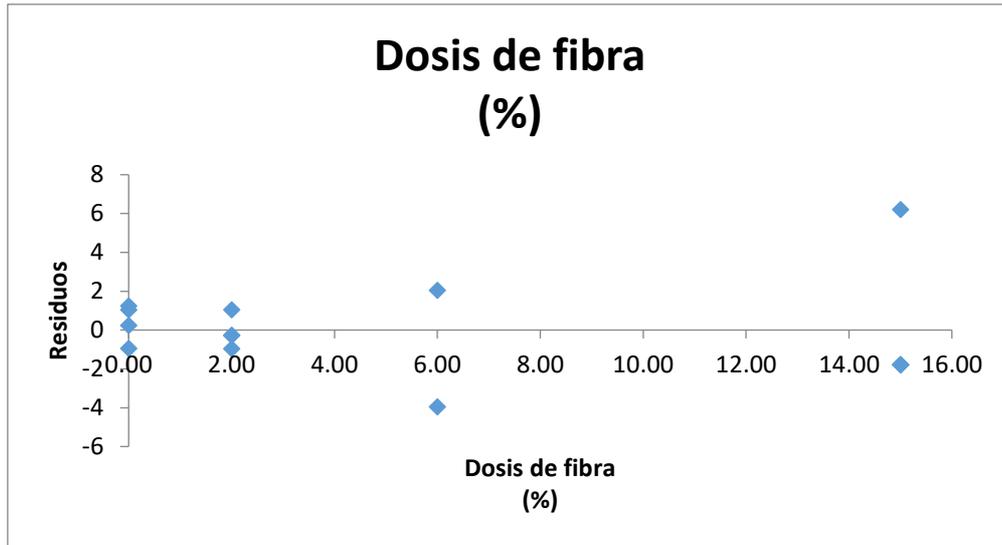


Figura 58: Gráfica de los residuales de la dosis de fibra para COH

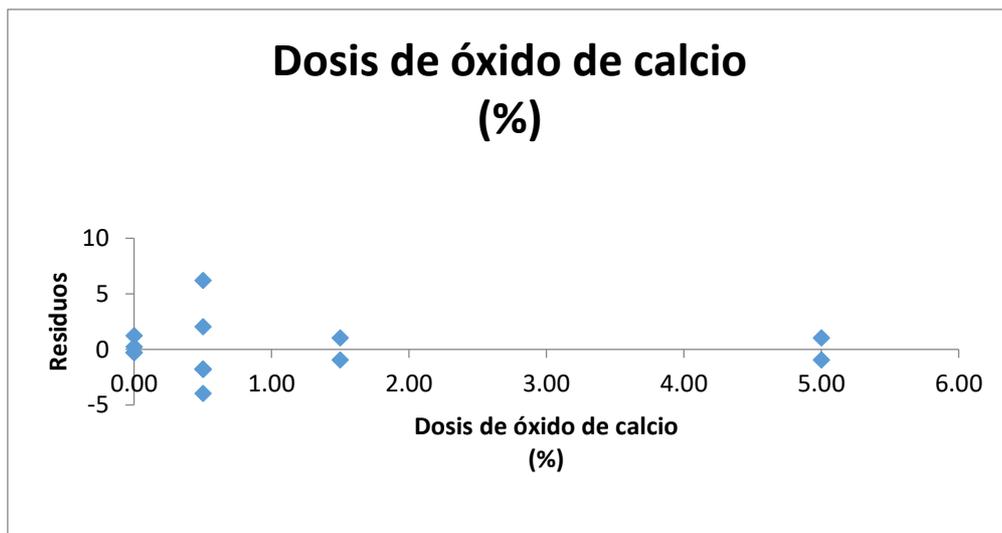


Figura 59: Gráfico de los residuales de dosis de óxido de calcio

4.2.1.1.1.2 Coeficiente de determinación

Este coeficiente determina la proporción de la varianza total producto del análisis de regresión lineal múltiple que se realizó. Este coeficiente oscila entre 0 y 1, cuanto más se acerca al valor de 1 es mayor el ajuste de las variables que estamos analizando, el valor mínimo admisible de R^2 es de 0.45.

El valor de R^2 para el análisis de regresión lineal múltiple del contenido óptimo de humedad es 0.77312871.

Tabla 49: Tablas estadísticas de la regresión del COH

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de determinación R ²	0,77312871

	Coeficientes	P-valor
Intercepción	16,1614323	0,0000062
Longitud de fibra (mm)	-0,01397782	0,577634
Dosis de fibra (%)	0,69628141	0,0002009
Dosis de óxido de calcio (%)	0,04867505	0,9175771

Interpretación:

- a) La longitud de la fibra de Agave americana estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.577634 es mucho mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.
- b) La dosis de la fibra de Agave americana estadísticamente es significativa ya que su P-Valor es 0.000201 es mucho menor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.
- c) La dosis de óxido de calcio estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.917577 es mucho mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.

Por ende, la ecuación resultante de la regresión lineal que pueda predecir el comportamiento del contenido óptimo de humedad es la siguiente:

$$COH = 16.16 + 0.696(Dosis\ de\ Fibra)$$

Esta ecuación nos indica que la dosis de la fibra de Agave americana influye en el contenido óptimo de humedad, siendo que por cada 1% aumenta en 0.696% el contenido óptimo de humedad (COH).

El modelo matemático encontrado explica el 77.31% el cambio en el COH.

4.2.1.2 Densidad máxima seca (DMS)

Tabla 50: Tabla de resultados de la densidad máxima seca (DSM)

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Dosis de fibra (%)	Dosis de óxido de calcio (%)	DMS (g/cm ³)
N1	100	0,00	0,00	1,87
N2	20	2,00	0,00	1,82
N3	100	6,00	0,50	1,52
N4	60	15,00	0,50	1,50
N5	20	0,00	1,50	1,86
N6	60	2,00	5,00	1,65
N7	60	15,00	0,50	1,45
N8	100	0,00	0,00	1,90
N9	20	2,00	0,00	1,85
N10	100	6,00	0,50	1,60
N11	60	15,00	0,50	2,25
N12	20	0,00	1,50	1,80
N13	60	2,00	5,00	1,72
N14	60	15,00	0,50	1,55

4.2.1.2.1 Análisis de regresión lineal múltiple de la DSM

Se utiliza el análisis de regresión lineal múltiple para determinar la relación que existe entre las variables independientes (Longitud de la fibra, dosis de la fibra y dosis de óxido de calcio) y la variable dependiente densidad máxima seca (DMS).

4.2.1.2.1.1 Gráficos residuales de la DSM

a) Gráfico residual preliminar

En el gráfico residual de la longitud de fibra se puede observar que un punto se aleja demasiado de los demás puntos, esto nos indica que el ensayo de laboratorio que se N11 no se realizó adecuadamente ya que sus resultados se alejan del resto de los ensayos de laboratorio.

Por tal motivo se debe de eliminar la prueba N11 para mejorar el valor del coeficiente de determinación ya que resulta 0.151854 y esta es mucho menor que el aceptable que es 0.45, una vez eliminado este ensayo se realizó de nuevo el análisis de regresión.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de determinación R ²	0,15185373

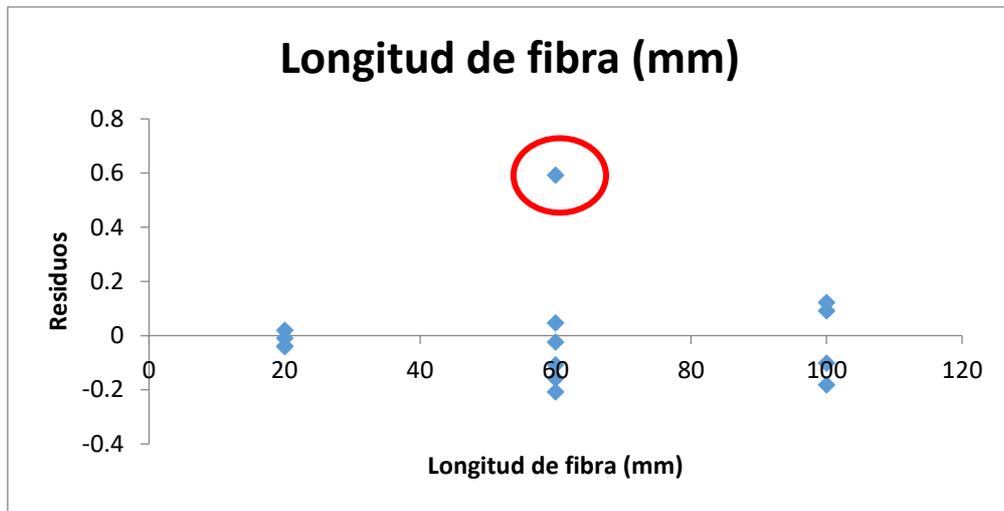


Figura 60: Gráfico preliminar de los residuales de la longitud de fibra para DSM

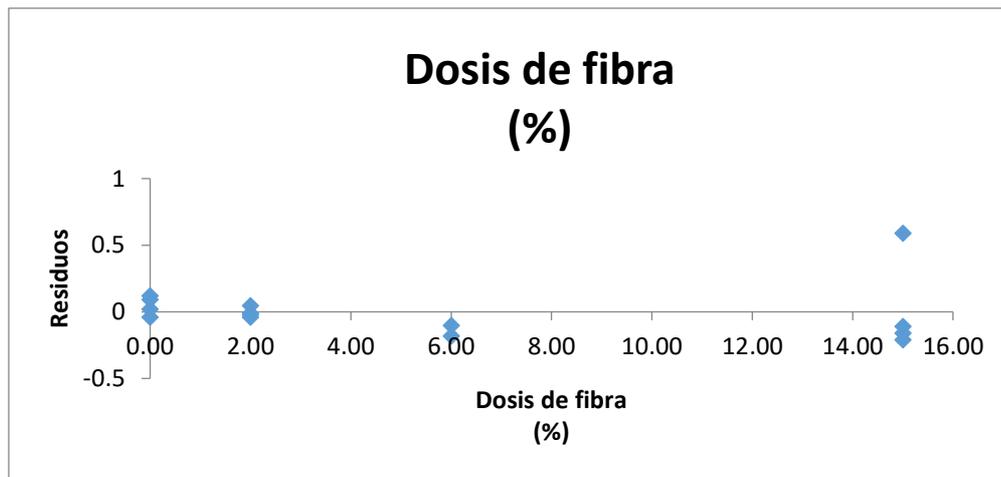


Figura 61: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para DSM

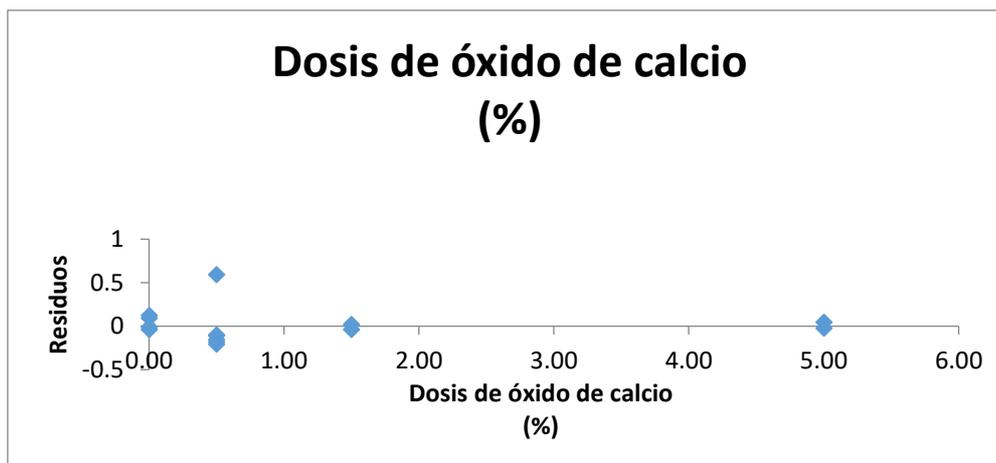


Figura 62: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para DSM

b) Gráfico residual definitivo

Para mejorar el coeficiente de determinación que resultó 0.151854 que es mucho menor al requerido $R^2 = 0.45$, se tuvo que eliminar la prueba N11 ya que sus resultados difieren mucho del resto de los ensayos.

Por ende, se realizó el análisis de regresión con los resultados de la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 51: Tabla definitiva de resultados de la densidad máxima seca (DMS)

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Dosis de fibra (%)	Dosis de óxido de calcio (%)	DMS (g/cm ³)
N1	100	0,00	0,00	1,87
N2	20	2,00	0,00	1,82
N3	100	6,00	0,50	1,52
N4	60	15,00	0,50	1,50
N5	20	0,00	1,50	1,86
N6	60	2,00	5,00	1,65
N7	60	15,00	0,50	1,45
N8	100	0,00	0,00	1,90
N9	20	2,00	0,00	1,85
N10	100	6,00	0,50	1,60
N12	20	0,00	1,50	1,80
N13	60	2,00	5,00	1,72
N14	60	15,00	0,50	1,55

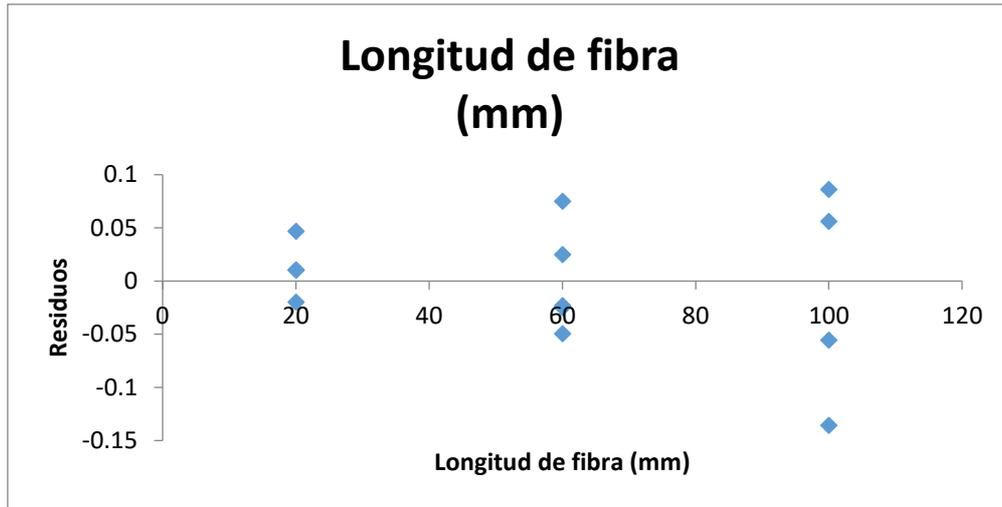


Figura 63: Gráfico definitivo de los residuales de longitud de fibra para DSM

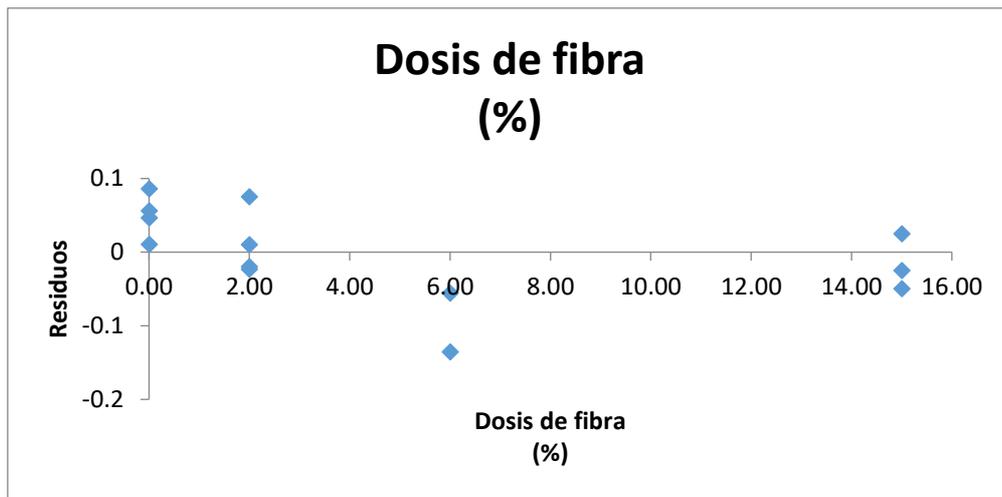


Figura 64: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para DSM

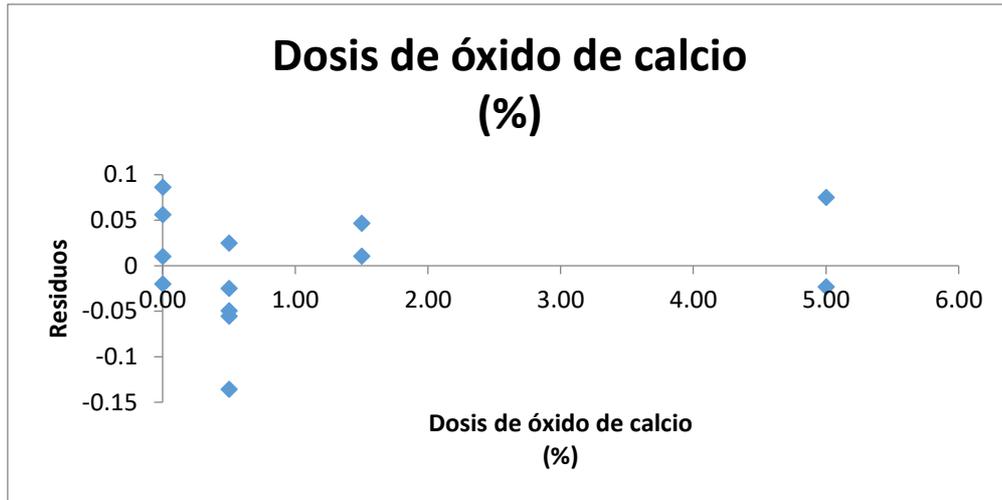


Figura 65: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para DSM

4.2.1.2.1.2 Coeficiente de determinación DMS

Al eliminar el ensayo N11 mejora el coeficiente de determinación, por lo tanto, el modelo matemático encontrado explica el 85.65% el cambio en el DSM.

Tabla 52: Tablas estadísticas de la regresión del DMS

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de determinación R ²	0,85648624

	Coefficientes	P-valor
Intercepción	1,90701834	0,000000000023
Longitud de fibra (mm)	-0,0009316	0,174178807656
Dosis de fibra (%)	-0,02420653	0,000066558086
Dosis de óxido de calcio (%)	-0,02588178	0,057718203613

Interpretación:

- La longitud de la fibra de Agave americana estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.174179 es mucho mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.
- La dosis de la fibra de Agave americana estadísticamente es significativa ya que su P-Valor es 0.000067 es mucho menor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.
- La dosis de óxido de calcio estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor

es 0.057718 es ligeramente mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.

Por ende, la ecuación resultante de la regresión lineal que pueda predecir el comportamiento de la Densidad Máxima Seca es la siguiente:

$$DSM = 1.91 - 0.024(Dosis\ de\ Fibra)$$

Esta ecuación nos indica que la dosis de la fibra de Agave americana influye en la Densidad Máxima Seca, siendo que por cada 1% disminuye en 0.024% la densidad máxima seca (DMS).

El modelo matemático encontrado explica el 85.65% el cambio en la densidad máxima seca.

4.2.2 La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en el CBR de los suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

La constatación de esta hipótesis se realizó mediante el análisis de regresión lineal múltiple.

4.2.2.1 Índice Soporte de California (CBR)

Tabla 53: Tabla de resultados del CBR

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Dosis de fibra (%)	Dosis de óxido de calcio (%)	CBR
N1	100	0,00	0,00	11,3
N2	20	2,00	0,00	11
N3	100	6,00	0,50	9
N4	60	15,00	0,50	11
N5	20	0,00	1,50	11,7
N6	60	2,00	5,00	10,4
N7	60	15,00	0,50	7,1
N8	100	0,00	0,00	10,4
N9	20	2,00	0,00	11,3
N10	100	6,00	0,50	13,5
N11	60	15,00	0,50	8,4
N12	20	0,00	1,50	11
N13	60	2,00	5,00	8,9
N14	60	15,00	0,50	9,9

4.2.2.1.1 Análisis de regresión lineal múltiple del CBR

Se utiliza el análisis de regresión para determinar la relación que existe entre las variables independientes (Longitud de la fibra, dosis de la fibra y dosis de óxido de calcio) y la variable índice de soporte de california (CBR).

4.2.2.1.1.1 Gráficos residuales del CBR

a) Gráfico residual preliminar

En el gráfico residual de la longitud de fibra se puede observar que un punto se aleja demasiado de los demás puntos, esto nos indica que el ensayo de laboratorio que se N10 no se realizó adecuadamente ya que sus resultados se alejan del resto de los ensayos de laboratorio.

Por tal motivo se debe de eliminar la prueba N10 para mejorar el valor del coeficiente de determinación ya que resulta 0.312909 y esta es mucho menor que el aceptable que es 0.45, una vez eliminado este ensayo se realizó de nuevo el análisis de regresión.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de determinación R ²	0,31290862

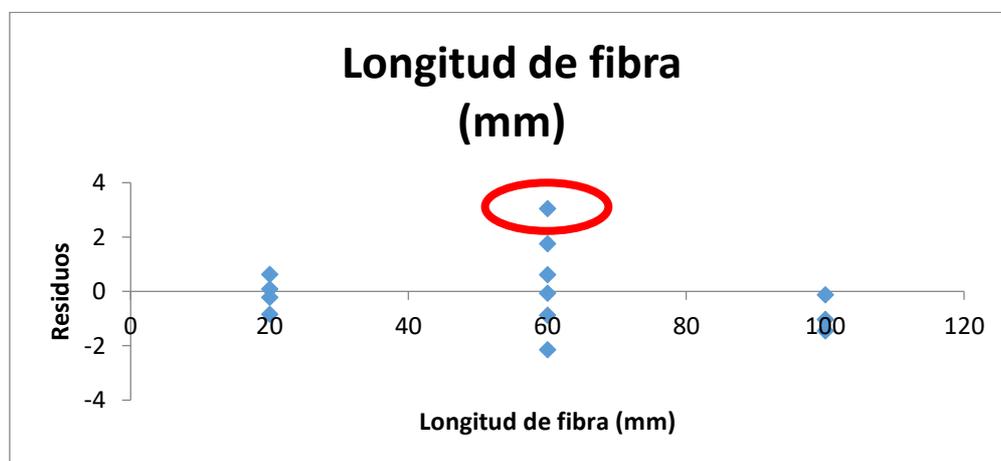


Figura 66: Gráfico preliminar de los residuales de la longitud de fibra para CBR

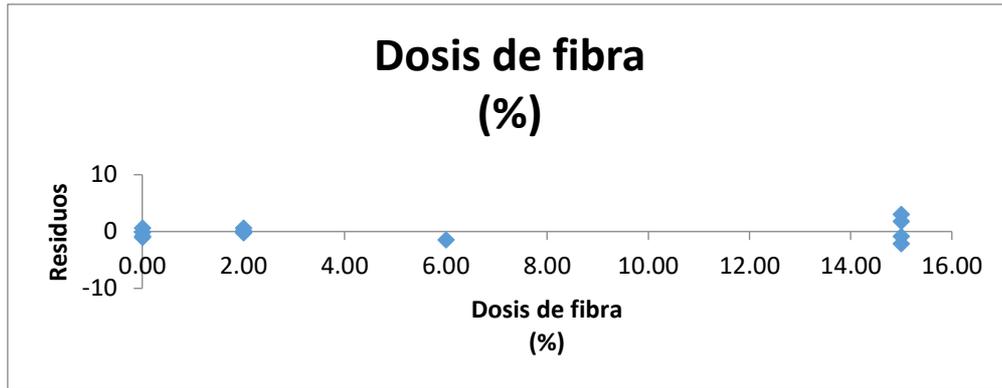


Figura 67: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para CBR

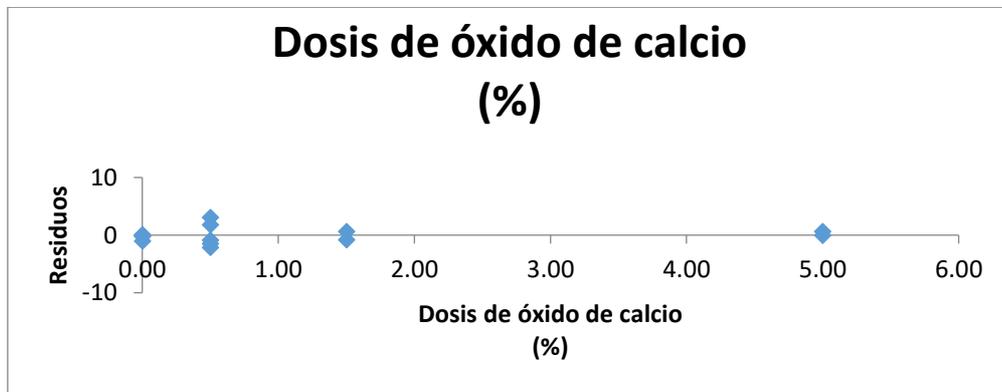


Figura 68: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para CBR

b) Gráfico residual definitivo

Para mejorar el coeficiente de determinación que resultó 0.312909 que es mucho menor al requerido $R^2 = 0.45$, se tuvo que eliminar la prueba N11 ya que sus resultados difieren mucho del resto de los ensayos.

Por ende, se realizó el análisis de regresión con los resultados de la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 54: Tabla definitiva de resultados del CBR

Nombre	Longitud de fibra (mm)	Dosis de fibra (%)	Dosis de óxido de calcio (%)	CBR
N1	100	0,00	0,00	11,3
N2	20	2,00	0,00	11
N3	100	6,00	0,50	9
N4	60	15,00	0,50	11
N5	20	0,00	1,50	11,7
N6	60	2,00	5,00	10,4
N7	60	15,00	0,50	7,1
N8	100	0,00	0,00	10,4
N9	20	2,00	0,00	11,3
N11	60	15,00	0,50	8,4
N12	20	0,00	1,50	11
N13	60	2,00	5,00	8,9
N14	60	15,00	0,50	9,9

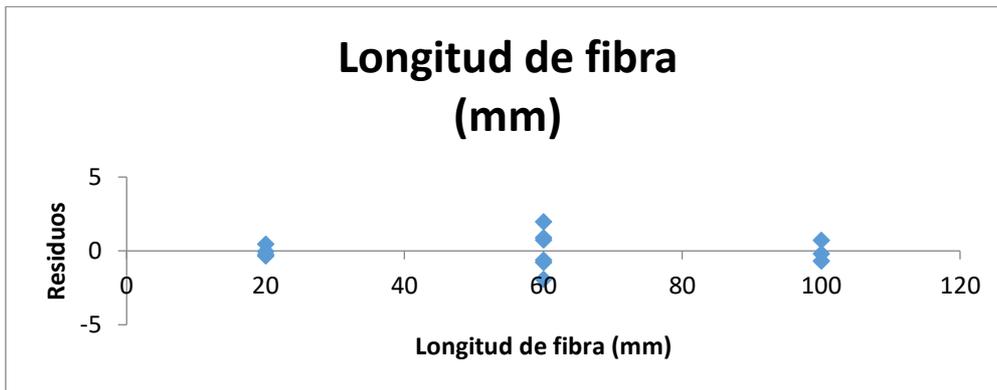


Figura 69: Gráfico definitivo de los residuales de longitud de fibra para CBR

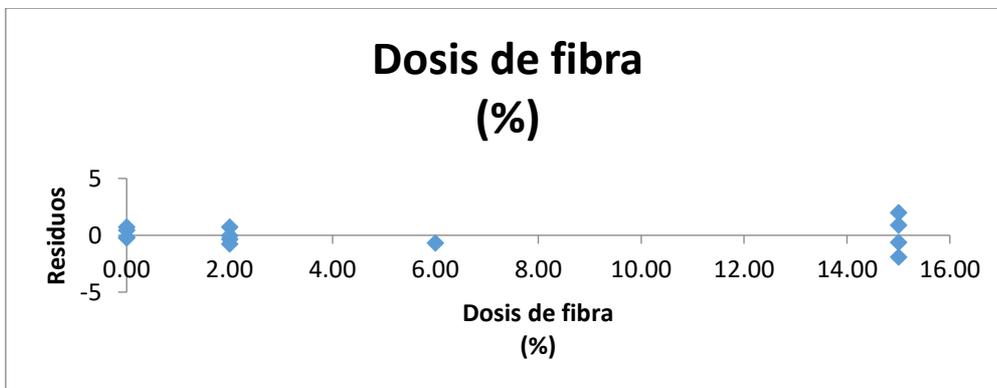


Figura 70: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para CBR

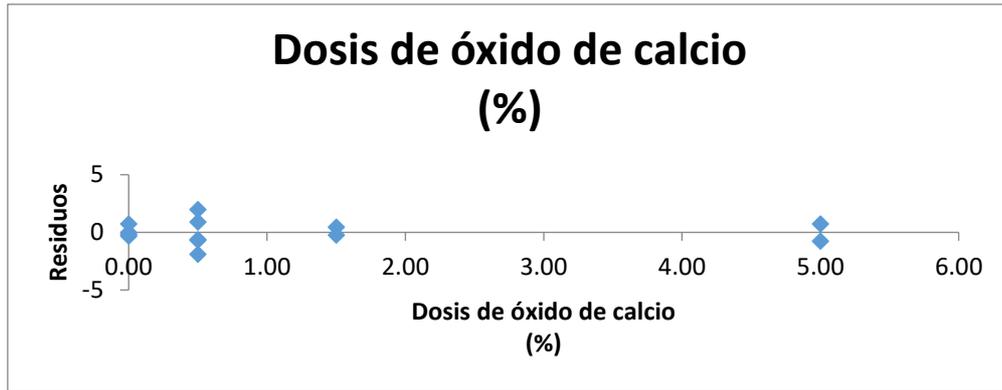


Figura 71: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para CBR

4.2.2.1.1.2 Coeficiente de determinación del CBR

Al eliminar el ensayo N10 mejora el coeficiente de determinación, por lo tanto, el modelo matemático encontrado explica el 50.11% el cambio en el CBR.

Tabla 55: Tablas estadísticas de la regresión del DMS

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de determinación R ²	0,5011558

	Coeficientes	P-valor
Intercepción	11,8441644	0,00000010
Longitud de fibra (mm)	-0,0126216	0,27015919
Dosis de fibra (%)	-0,1301436	0,02989195
Dosis de óxido de calcio (%)	-0,232484	0,25158280

Interpretación:

- La longitud de la fibra de Agave americana estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.270159 es mucho mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.
- La dosis de la fibra de Agave americana estadísticamente es significativa ya que su P-Valor es 0.029892 es mucho menor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.
- La dosis de óxido de calcio estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.251583 es ligeramente mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.

Por ende, la ecuación resultante de la regresión lineal que pueda predecir el

comportamiento del CBR es la siguiente:

$$CBR = 11.84 - 0.130(Dosis\ de\ Fibra)$$

Esta ecuación nos indica que la dosis de la fibra de Agave americana influye en CBR, siendo que por cada 1% disminuye en 0.130% el Índice de Soporte de California (CBR).

El modelo matemático encontrado explica el 50.12% el cambio del CBR.

4.2.3 La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

Para determinar si las variables independientes (Longitud de fibra tratada, dosis de fibra tratada y la dosis de óxido de calcio) influyen en la permeabilidad de suelo, se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple.

4.2.3.1 Análisis de regresión lineal múltiple de la permeabilidad del suelo

Para la constatación de esta hipótesis el análisis de regresión lineal múltiple, para así determinar la relación que existe entre las variables independientes (Longitud de la fibra, dosis de la fibra y dosis de óxido de calcio) y la variable dependiente (permeabilidad de suelo).

4.2.3.1.1 Gráficos residuales de la permeabilidad del suelo

a) Gráfico residual preliminar

En el gráfico residual de la longitud de fibra se puede observar que un punto se aleja demasiado de los demás puntos, esto nos indica que el ensayo de laboratorio N10 y N3 tiene algunos errores en la realización del ensayo, ya que sus resultados se alejan del resto de los ensayos de laboratorio.

Por tal motivo se debe de eliminar la prueba N3 y N10 para mejorar el valor del coeficiente de determinación ya que resulta 0,101636 y es mucho menor que el aceptable que es 0.45, una vez eliminado este ensayo se realizó de nuevo el análisis de regresión lineal múltiple.

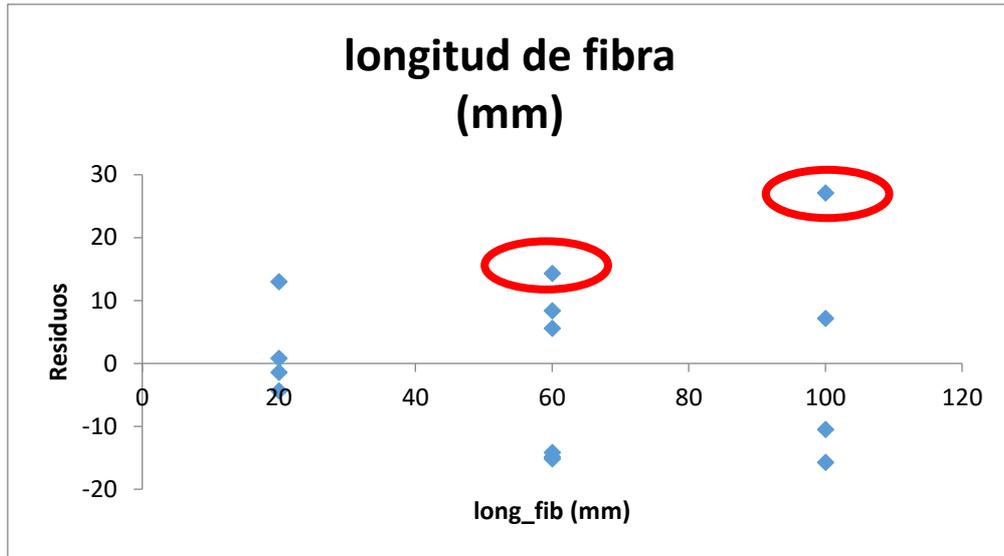


Figura 72: Gráfico preliminar de los residuales de longitud de fibra para la ascensión capilar

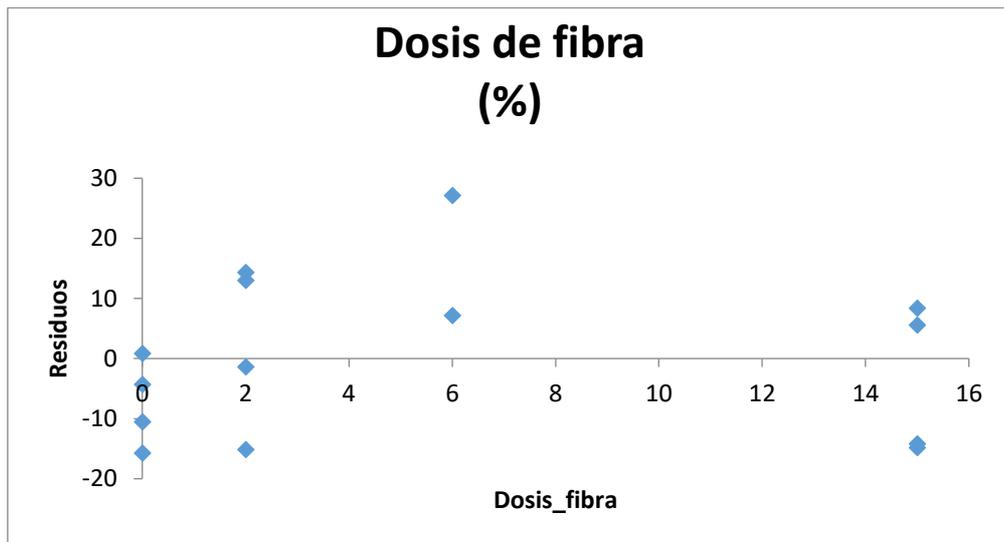


Figura 73: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para la ascensión capilar

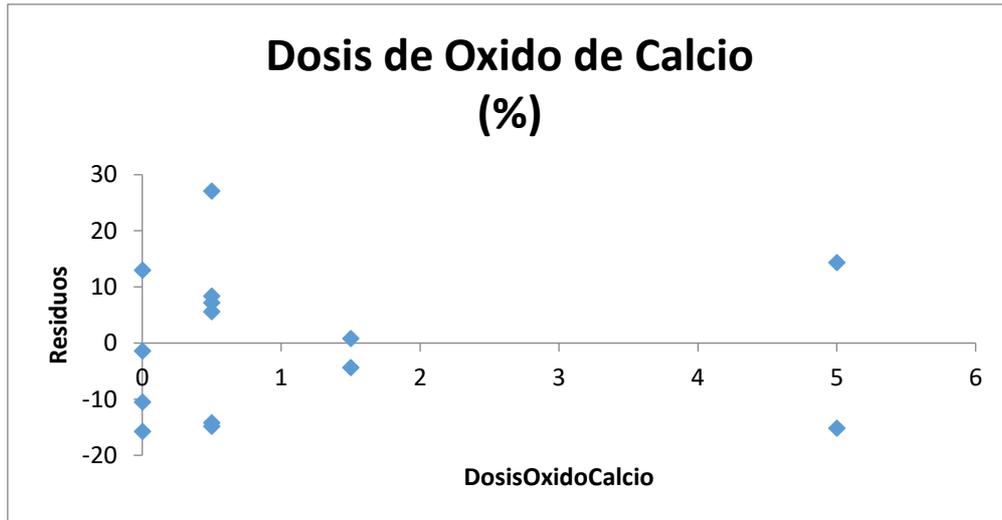


Figura 74: Gráfico preliminar de los residuales de la dosis de fibra para la ascensión capilar

b) Gráfico residual definitivo

Para mejorar el coeficiente de determinación que resultó 0,101636 que es mucho menor al requerido $R^2 = 0.45$, se tuvo que eliminar la prueba N3 y N10 ya que sus resultados difieren mucho del resto de los ensayos.

Por ende, se realizó el análisis de regresión lineal múltiple con los resultados de la tabla que se muestra a continuación.

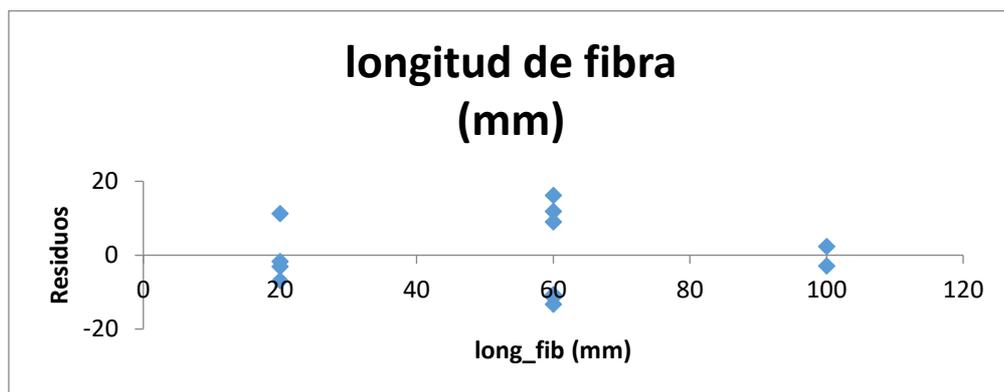


Figura 75: Gráfico definitivo de los residuales de la longitud de fibra para la ascensión capilar

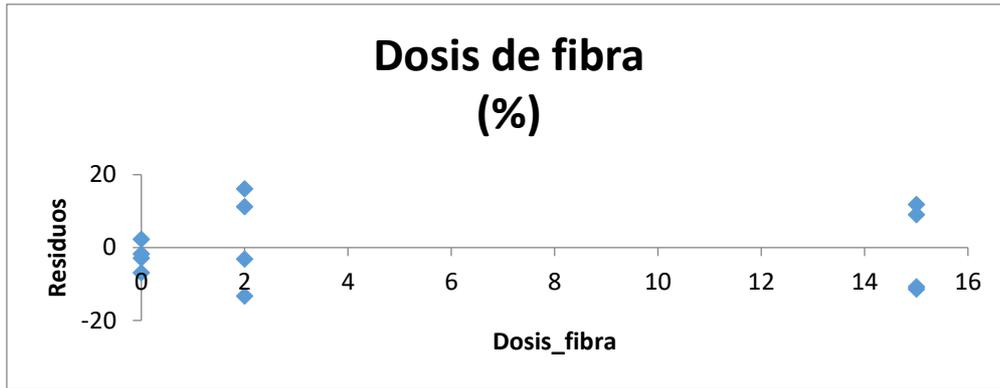


Figura 76: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de fibra para la ascensión capilar

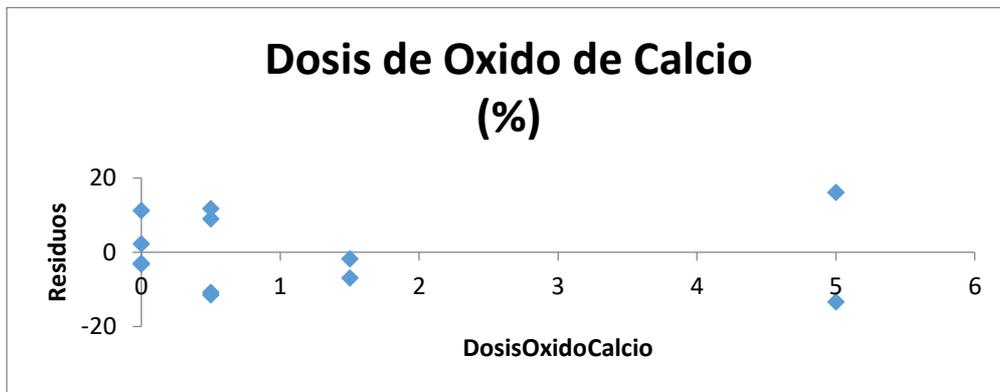


Figura 77: Gráfico definitivo de los residuales de la dosis de óxido de calcio para la ascensión capilar

4.2.3.1.2 Coeficiente de determinación de la ascensión capilar

Al eliminar el ensayo N3 Y N10 mejora el coeficiente de determinación, por lo tanto, el modelo matemático encontrado explica el 46.23% el cambio en la ascensión capilar.

Tabla 56: Tablas estadísticas de la regresión de la ascensión capilar

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de determinación R ²	0,4622724

	<i>Coeficientes</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	71,0095684	0,00002785
Longitud de fibra (mm)	-0,27338372	0,05945131
Dosis de fibra (%)	-0,17600678	0,74901829
Dosis de óxido de calcio (%)	1,75461465	0,40647522

Interpretación:

- a) La longitud de la fibra de Agave americana estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.059451 es mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.
- b) La dosis de la fibra de Agave americana estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.749018 es mucho mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.
- c) La dosis de óxido de calcio estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.406475 es ligeramente mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.

Por ende, la ecuación resultante del análisis de regresión lineal múltiple que pueda predecir el comportamiento de la ascensión capilar es la siguiente:

$$AC = 74.01$$

Esta ecuación nos indica que estadísticamente la fibra de Agave americana no es significativa para la permeabilidad de los suelos arcillosos.

4.3 Discusión

4.3.1 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la densidad máxima seca y en el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

El objetivo es determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco. La influencia se determinó mediante diversos tratamientos que se ha realizado a las muestras de suelo obtenidos de las calicatas, a cada muestra se le añadió diferentes porcentajes en peso de fibra de Agave americana en diferentes longitudes, diferentes porcentajes de óxido de calcio y agua. Estas muestras tratadas fueron sometidos al ensayo de Proctor modificado, en el cual se obtuvieron los resultados del contenido óptimo de humedad (COH) y la densidad máxima seca (DMS).

La determinación de la influencia de la agave americana tratada con óxido de calcio se realizó mediante el método estadístico, mediante la utilización del análisis de regresión lineal múltiple en el Software Excel.

El análisis de regresión lineal múltiple en la tabla N°48 nos indica en base al nivel de significancia que la dosis en peso de la fibra de agave americana influye en el contenido de óptimo de humedad (COH), ya que el p-valor (Nivel de significancia) 0.000201 arrojado del análisis de regresión lineal múltiple es mucho menor a $\alpha=0.05$. Esto nos indica que la adición en % de la dosis de la fibra de agave americana influye en el contenido óptimo de humedad, siendo que por cada 1% de dosis de fibra el Contenido óptimo de humedad (COH) aumenta en 0.696%.

Mientras que la longitud de fibra y la dosis de óxido de calcio no influyen en el contenido óptimo de humedad ya que el p-valor es superior a $\alpha=0.05$.

Los datos, los procedimientos y los instrumentos utilizados en esta investigación pueden servir de base para futuras investigaciones acerca de la utilización de la fibra de agave americana en la estabilización de suelos arcillosos u otras aplicaciones geotécnicas.

El contenido óptimo de humedad (COH) aumenta dando como valor máximo 22.20% con en la muestra con contenido de cal del 6%.

En esta investigación se obtuvo el mismo resultado con la diferencia de que se adiciono cal y fibra de agave americana, esto nos da a entender que con la adición de estos dos componentes el COH aumenta del mismo modo que cuando solo se adiciona cal. (6) (p.60)

El análisis regresión lineal múltiple dio como resultado en la tabla N°51 que la dosis de la fibra de Agave americana influye en la densidad máxima seca (DMS), ya que el p-valor (Nivel de significancia) 0.000067 resultado del análisis de regresión lineal múltiple es mucho menor a $\alpha=0.05$. Este es indicador de que la adición en % de la dosis de la fibra de Agave americana influye en la densidad máxima seca (DMS), siendo que por cada 1% de dosis de fibra de Agave americana la densidad máxima seca (DMS) disminuye en 0.024%.

Mientras que la longitud de fibra y la adición de óxido de calcio no influyen en la densidad máxima seca (DSM) ya que el p-valor es superior a $\alpha=0.05$.

La densidad máxima seca (DMS) disminuye con la adición de diferentes porcentajes de cal, indica que el mínimo es de 1.55 en la muestra con cal al 6%.

En esta investigación se obtuvo el mismo resultado con la diferencia de que se adiciono cal y fibra de Agave americana, esto nos indica que con la adición de estos dos componentes

la DMS disminuye del mismo modo que cuando solo se adiciona cal. (6) (p.60)

En lo que corresponde a la hipótesis, la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la densidad máxima seca (DMS) y el contenido óptimo de humedad (COH) de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos, esta hipótesis fue comprobada y aceptada como válida, ya que la fibra de agave americana aumenta el COH disminuye la DMS.

4.3.2 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

El objetivo es determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco. Para determinar la influencia se realizó la compactación de las muestras tratadas con fibra de Agave americana, óxido de calcio y el contenido óptimo de humedad (COH), seguidamente se le realizó el ensayo de penetración a las muestras compactadas utilizando el método PDC, en el cual se mide la profundidad de penetración del cono en cada golpe, con los datos de la profundidad de penetración se determina el CBR utilizando la ecuación que nos indica la norma ASTM D 6951-03.

Para determinar la influencia de la Agave americana tratada con óxido de calcio se utilizó el método estadístico, mediante la utilización del análisis de regresión lineal múltiple en el Software Excel.

El análisis regresión lineal múltiple dio como resultado en la tabla N°60 que la dosis de la fibra de Agave americana influye en el CBR, ya que el p-valor (Nivel de significancia) 0.029892 arrojado del análisis de regresión lineal múltiple es menor a $\alpha=0.05$. Esto nos indica que la adición de un % de dosis de la fibra de Agave americana influye en el CBR, siendo que por cada 1% de dosis de fibra el índice de Soporte de California (CBR) disminuye 0.130%, Mientras que la longitud de fibra y la adición de óxido de calcio no influyen significativamente en el CBR ya que el p-valor es superior a $\alpha=0.05$.

El CBR de diseño al 95% se logra con la adición de 4% de cal, la cual resulta un valor de CBR igual a 11.48%; el CBR sin adicionar cal a la muestra es de 2.55%, lo cual nos indica que en CBR aumenta en un 421.57% con 4% de cal. (6) (P.60)

Los ensayos de CBR realizados antes de estabilizar el suelo resultó 6% y después de emplear cal como metodología de estabilización de suelos arcillosos de baja plasticidad incrementa la capacidad de soporte del suelo a un CBR igual a 43.3%. (8) (p.97)

En la presente investigación los resultados nos indican que por cada 1% de dosis de fibra el índice de Soporte de California (CBR) disminuye 0.130%, el resultado obtenido es contrario a los resultados de las investigaciones citadas, esto debido a que en esta investigación se usó la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio y óxido de calcio, mientras que en las otras investigaciones citadas solo se utilizó la cal.

En tal sentido podemos afirmar que la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio no ayuda en la estabilización de suelos arcillosos.

En lo que corresponde a la hipótesis de que la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en el CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos, esta hipótesis fue comprobada y aceptada como válida, ya que la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio disminuye en CBR.

4.3.3 Influencia de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco

El objetivo es determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco, con la finalidad de evaluar si la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio reduce la permeabilidad del suelo de la subrasante. Para lo cual se realizó la compactación de las diferentes muestras con sus respectivos tratamientos (Dosis de fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio, dosis de óxido de calcio y el contenido óptimo de humedad), las cuales después de su compactación fueron desmoldadas y colocadas en el horno para su respectivo secado por 24 horas, seguidamente estas fueron colocadas a una bandeja con agua de una profundidad de 1cm durante una hora para realizar el ensayo de ascensión capilar, al finalizar este tiempo se midió la altura de la ascensión capilar con el pie de rey.

Para determinar la influencia de la Agave americana tratada con óxido de calcio se utilizó el método estadístico, mediante la utilización del análisis de regresión lineal múltiple en el Software Excel.

El análisis de regresión múltiple dio como resultado en la tabla N°61 que la longitud de fibra

de Agave americana estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.059451 es mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$, la dosis de la fibra de Agave americana estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.749018 es mucho mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$ y la dosis de óxido de calcio estadísticamente no es significativa ya que su P-Valor es 0.406475 es ligeramente mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$.

El análisis de regresión lineal múltiple nos indica que estadísticamente la longitud de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio, la dosis de la fibra de Agave americana tratada y la dosis de óxido de calcio no son significativas en la permeabilidad del suelo, por lo tanto, no reducen, pero aumentan la permeabilidad del suelo arcilloso.

En lo que corresponde a la hipótesis de que la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio no influye significativamente en la permeabilidad de los suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos, por lo tanto, la hipótesis planteada es rechazada ya que la fibra de agave americana tratada con óxido de calcio no reduce ni aumenta la permeabilidad.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo a los resultados obtenidos la utilización de la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio estadísticamente no ayuda en la estabilización de suelos ya que cuando fue sometido al análisis de regresión lineal múltiple del CBR, la ecuación resultante nos indica que por cada 1% en peso de la fibra de agave americana que se añade, el CBR disminuye en 0.130%.
2. La dosis de fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio estadísticamente influye en el contenido óptimo de humedad ya que el P-valor (Nivel de significancia) obtenido del análisis de regresión lineal múltiple es igual a 0.000201 que es mucho menor a $\alpha=0.05$, mientras que longitud de fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio estadísticamente no influye significativamente en el contenido óptimo de humedad ya que el P-valor de 0.577634 que es mayor a $\alpha=0.05$ y del mismo modo la dosis de óxido de calcio no influye en el contenido óptimo de humedad ya que el P-valor de 0.917577 que es mayor a $\alpha=0.05$.
De acuerdo a los resultados obtenidos por cada 1% en peso de la dosis de fibra de Agave americana el contenido óptimo de humedad aumenta (COH) en 0.696%.
3. La dosis de fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio estadísticamente influye en la densidad máxima seca del suelo arcilloso (DMS) ya que el P-valor obtenido del análisis de regresión lineal múltiple es igual a 0.000067 que es mucho menor $\alpha=0.05$, mientras que la longitud de fibra tratada con de óxido de calcio no influye significativamente en la densidad máxima seca ya que el P-valor es igual a 0.174179 es mayor a $\alpha=0.05$ al igual de la dosis de óxido de calcio no influye significativamente en la DMS ya que tiene un P-valor igual a 0.057718 que es mayor a $\alpha=0.05$.
De acuerdo a los resultados obtenidos por cada 1% de dosis de Agave americana la densidad máxima seca (DMS) disminuye en 0.024%.
4. La dosis de Agave americana tratada con óxido de calcio estadísticamente influye en el CBR del suelo arcilloso ya que el P-valor obtenido del análisis de regresión lineal múltiple es igual a 0.029892 que es menor a $\alpha=0.05$, a diferencia de las otras variables independientes como la longitud de fibra no influyen significativamente en el CBR ya que el P-valor es igual 0.270159 es mucho mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$ y del mismo modo la dosis de óxido de calcio no influye significativamente

en el CBR ya que el P-valor es igual 0.251583 es mayor a $\alpha=0.05$.

De acuerdo a los resultados obtenidos por cada 1% de dosis de Agave americana el Índice de Soporte de California (CBR). disminuye en 0.130%.

5. La dosis de Agave americana tratada con óxido de calcio estadísticamente no aumenta ni disminuye la permeabilidad de suelos arcillosos ya que el P-valor obtenido del análisis de regresión lineal múltiple es 0.059451 que es mayor a $\alpha=0.05$, al igual que la longitud de la libra de Agave americana no influye significativamente en la permeabilidad de suelos arcillosos ya que el P-valor es igual a 0.749018 que es mucho mayor al nivel de significancia $\alpha=0.05$, del mismo modo la dosis de óxido de calcio no influye significativamente ya que el P-valor es igual a 0.406475 que es mayor a $\alpha=0.05$.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda adicionar al suelo arcilloso fibra de Agave americana y un aditivo cementante como por ejemplo en cemento y hacer un estudio de investigación para determinar si la Agave americana tiene un mejor comportamiento en la estabilización de suelos cuando se le añade un cementante.
2. Se recomienda utilizar fibras de Agave americana tratada con óxido de calcio con una longitud de 2 cm – 5 cm ya que cuando se utilizan mayores longitudes no se puede conseguir una mezcla homogénea para el tratamiento suelos arcillosos.
3. Se recomienda no realizar el mezclado con suelo húmedo ya que no se consigue el mezclado adecuado y homogéneo entre el suelo y la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio.
4. Se recomienda no utilizar la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio para reducir la permeabilidad de los suelos arcillosos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **De la Torre, María Fernanda y Estrella, Karina Tatiana.** *Estudio de factibilidad para determinar la viabilidad de exportación de accesorios de cabuya a Holanda y los países bajos.* Quito : Universidad Politécnica Salesiana, 2014.
2. **Parra Gomez, Manuel Gerardo.** *Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante.* Bogotá : Universidad Católica de Colombia, 2018.
3. **Sánchez Albán, Maria Angélica.** *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del Cantón Tosagua provincia de Mnaví.* Quito : Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2014.
4. **Altamirano Navarro, Genaro José y Díaz Sandino, Axell Exequiel .** *Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí- Rivas.* Nicaragua : Universidad Autonoma de Nicaragua, 2015.
5. **Guamán Iler, Israel Isaías.** *Estudio del comportamiento de un suelo arcilloso estabilizado por dos métodos químicos (Cal y Cloruro de Sodio).* Ambato : Universidad Técnica de Ambato, 2016.
6. **Jara Anyaypoma, Robinson.** *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso.* Cajamarca : Universidad Nacional de Cajamarca, 2014.
7. **Gonzales Carpio, Flor Marilia.** *Análisis experimental de suelos estabilizados con ceniza volante, cemento y cal para subrasante mejorada de pavimentos en la ciudad de Puno.* Puno : Universidad Andina Nestor Cáceres, 2018.
8. **Chávez Arbayza, Diego y Odar Yabar, Gabriela.** *Propuesta de estabilización con cal para subrasantes con presencia de suelos arcillosos en bofedales y su influencia en el pavimento rígido bajo la metodología de diseño AASHTO 93 aplicado al tramo 1 de la carretera Oyón-Ambo.* Lima : Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2019.
9. **López Suamarriva, José Johel y Ortiz Pinares, Grely.** *Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la organización de San Luis de la ciudad de Abancay.* Abancay : Universidad Tecnológica de los Andes, 2018.
10. **Fernandez Aller, Rafael.** *Estabilización de suelos con cal: Actuaciones*

previas a su ejecución. 2010.

11. **Odar, Gabriela, Chavez, Diego y Silvera, Manuel.** *Método de estabilización con cal en subrasantes para pavimentos rígidos diseñados por AASHTO 93 en proyectos viales con presencia de bofedales.* Peru -Jamaica : s.n., 2019. págs. 2-7. 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, And.

12. **Parra Gomez, Gerardo, Bastidas Martinez, Juan Gabriel y Ruge Cardenas, Juan Carlos.** *Estabilización de suelos con cal y ceniza volante.* octubre de 2019. *Estabilización de suelos con cal y ceniza Conference Paper* · October 2019.

13. **Rodriguez Moreno, Mario Alberto y Hidalgo Montoya, Cesar Augusto.** *Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo.* 2005.

14. **Das, Braja M.** *Fundamentos de Ingenieria Geotecnia.* México : Ediciones OVA, 2013.

15. **González Boada, Jordi.** ACADEMIA. [En línea] 23 de Agosto de 2005.

[Citado el: 16 de Julio de 2021.]

https://www.academia.edu/35092613/Clasificar_suelos_de_acuerdo_al_SUCS_Y_AASHTO_sin_contrasena.

16. **Huancoillo Humpiri, Yunior José.** *Mejoramiento de suelo arcilloso con ceniza volante y cal para su uso como pavimento a nivel de afirmado en la carretera desvío Huancané – Chupa – Puno.* Puno : UNA, 2017.

17. **Montejo Fonseca, Alfonso, Montejo Piratova, Alejandro y Montejo Piratova, Alberto.** *Estabilización de suelos.* Bogotá : Ediciones de la U, 2018.

18. **RNE.** *CE.020 Estabilización de Suelos y Taludes.* Lima : El peruano, 2012.

19. **Bauzá Castelló, Juan Diego .** *Estabilización de suelos con Cal.* Madrid : s.n., 2003.

20. **Rodriguez Neave, Francisco.** Intagri. [En línea] 2006. [Citado el: 17 de Julio de 2021.] <https://www.intagri.com/articulos/suelos/manual-de-uso-del-yeso-agricola>.

21. **Briseño Sanchez, Daniela Yajaira.** *Análisis del comportamiento a flexión de vigas reforzadas con fibra de cabuya.* Ambato - Ecuador : Universidad técnica de

Ambato, 2016.

22. **Vidal, Gladys y Hormazábal, Sujei.** *Las fibras vegetales y sus aplicaciones.* Concepción-Chile : Sello Editorial Universidad de Concepción, 2016.

23. **Aliaga Campos, Susana y Gonzales Orihuela, Eugenia María.** *Propuesta de malla de fibras de maguey para mejorar la resistencia de muros de adobe del distrito de Colcabamba - Huancavelica.* Huancavelica : Universidad peruana de ciencias aplicadas, 2020.

24. **MTC.** *Manual de ensayo de materiales.* Lima : Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016.

25. **ASTM-D6951.** Sociedad americana para pruebas y materiales. 2003.

26. **Viscarra Agreda, Fabiana.** *EL CONO DINÁMICO DE PENETRACIÓN Y SU APLICACIÓN.* 2006.

27. **Gordillo Granada Sara, Pedro Agustin y Navaz Muñoz, Fernanda.** Análisis de la aplicación de la Norma ASTM D 6951-03 para estimar el índice del CBR en un suelo de la ciudad de Cuenca. Cuenca, Ecuador : s.n., 2018.

28. **INV E - 172 - 13.** Normas de Ensayo de materiales para carreteras - Colombia. Bogota : s.n., 2002.

29. **ASTM-D1883.** Sociedad americana para pruebas y materiales. 2009.

30. **Sanchez, Fredy J.** ASTM D1883. 10 de AGOSTO de 2012.

31. **UPN.** *Propiedades hidraulicas de los suelos.* Cjamarca : LAUREATE, 2011.

32. **Amat Rodrigo, Joaquín.** *Correlación lineal y Regresión lineal simple.* 2016.

33. **Martínez Bencardino, Ciro.** *Estadística y Muestreo.* 2012.

34. **Onofre Cervantes, Luz Abigail.** CORRELACIÓN ENTRE LA ADICCIÓN POR LAS REDES SOCIALES Y EL COMPORTAMIENTO DE LOS ESTUDIANTES DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO . 2018.

35. **Hernandez Sampieri, Roberto y Fernández collado, Carlos.** METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION. 1998.

36. **Mondragon Barrera, Alejandra.** *USO DE LA CORRELACION DE SPEARMAN EN UN ESTUDIO DE INTERVENCION EN FISIOTERAPIA.* 2011.

37. **Walpole, Ronal E., y otros.** *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias - novena edición.* Mexico : Pearson Education, 2012.

38. **Menéndez, Florentino.** *Residuos, Residuos studentizados y valores DFFIT . su uso en regresion lineal simple y multiple.* 2002.
39. **Rodó, Paula.** *articulos de Economipedia valor -p. 23 de junio de 2020.*
40. **RNE.** *Norma CE.010 Pavimentos urbanos.* Lima : SENCICO, 2010.
41. **CALIDRA.** *CALIDRA.* [En línea] 06 de Diciembre de 2018.
<https://calidra.com/el-uso-de-la-cal-en-la-edificacion/>.
42. **MTC/14.** *Glosario de Términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial.* Lima : Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018.
43. **Grupo SIPSA.** *SIPSA.* [En línea] 21 de Junio de 2017.
<https://www.cipsa.com.mx/26/noticias/diferencias-entre-suelos-cohesivos-y-granulares/>.
44. **Whitman, Robert V. y Lambe, William T. .** *Química.* [En línea] 13 de Agosto de 1997. <https://www.quimica.es/enciclopedia/Granulometr%C3%ADa.html>.
45. **Tamayo y Tamayo, Mario.** *Investigación Científica.* Mexico : Limusa S.A., 2003.
46. **Hernández Sampieri, Roberto.** *Metodología de la investigación.* México : McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2018.
47. **Piloña Ortiz, Gabriel Alfredo.** *Guía práctica sobre métodos y técnicas de investigación documental y de campo.* Guatemala : GP Editores, 2016.
48. **Monge Hurtado, Eddson Luis y Huamani Arango, Felipe.** *Estudio de la influencia de la fibra de cabuya en concretos $f'c=175$ kg/cm² y $f'c=175$ kg/cm² en el distrito de Lircay y provincia de Angaraes.* Lircay : Universidad nacional de Huancavelica, 2018.
49. **López Sumarrieva, José Johel y Ortiz Pinares, Grely.** *Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la sub rasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.* Abancay : Universidad Tecnológica de los Andes, 2018.
50. **ASTM.** *PDFCOFFE.* [En línea] 13 de Mayo de 2014. [Citado el: 25 de Agosto de 2021.]
51. **Fernández Bao, Sheila.** *DISEÑO DE EXPERIMENTOS:DISEÑO FACTORIAL.* Barcelona : s.n., 2020.

ANEXOS

Anexo I: Operacionalización de variables

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Fibra de Agave Americana	Variable independiente	<p>El Agave americana es una planta perteneciente a la familia de los Agavaceae, originaria de América Tropical, aunque se presenta, específicamente en las regiones andinas.</p> <p>Crece de manera natural o cultivada en zonas áridas y semiáridas, en terrenos arenosos, pedregosos y de baja productividad agrícola. Las fibras de Agave americana se localizan de manera longitudinal en las hojas del penco y son consideradas como una de las fibras naturales más resistentes (Briseño Sanchez, 2016).</p>	<p>La fibra de Agave americana es extraída y tratada con óxido de calcio, las cuales se les va a cortar en diferentes longitudes (20mm, 60mm y 100mm).</p>	Longitud de fibra.	20mm, 60mm y 100mm	mm
				Dosificación de la fibra.	2%, 6% y 15%	%
Óxido de Calcio		<p>Llamado también cal viva es un producto de color blanco, de apariencia amorfa, con un peso específico que varía entre 3, 18 y 3,40. Es una sustancia inestable, por tener gran avidez de agua, con la cual reacciona de la siguiente manera:</p> $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2 + \text{calor}$ <p>Esta reacción produce el Hidróxido de Calcio Ca(OH)_2 también llamada Cal Apagada, es tal la avidez con el agua que absorbe vapor de agua de la atmósfera y de las sustancias orgánicas cercanas</p>	<p>En esta investigación el óxido de calcio es utilizado para realizar el tratamiento de la fibra de agave americana y como aditivo para la estabilización del suelo arcilloso.</p>	Proporción.	0.5%, 1.5% y 5.0%	%

		produciendo efectos cáusticos. Tal motivo hace que el manejo de la cal viva se hace peligroso, ya que puede producir quemaduras (Montejo Fonseca, y otros, 2018)				
Estabilización de suelos	Variable dependiente	Para la estabilización de suelos con cal se deben elaborar especímenes para el ensayo de compresión no confinada al contenido óptimo de humedad y máxima densidad máxima seca, se debe determinar el % de óxido de calcio por peso seco de suelo, elaborar una gráfica de resistencia y % de cal, los suelos que se usen para la construcción de suelo-óxido de calcio deben estar limpios no deben tener más del 3% de materia orgánica y además se debe de reportar resultados de la capacidad de soporte según la metodología "California Bearing Ratio – CBR" (Relación de soporte de California) para evidenciar las mejora (RNE, 2012).	La estabilización de suelos será determinada mediante el índice de soporte de California CBR.	Densidad máxima seca	DMS	g/cm ³
				Contenido óptimo de humedad	COH	%
				Resistencia CBR del suelo	CBR	%
				Permeabilidad	Ascensión capilar	%

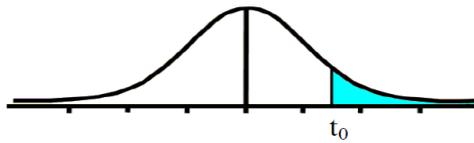
Anexo II: Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
Problema General	Objetivo general	Hipótesis General	Variables Independientes			
¿En qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco?	Determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.	La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la estabilización de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.	Fibra de Agave americana	Longitud de fibra.	20mm, 60mm y 100mm	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de investigación Aplicada • Diseño de investigación Experimental • Población EL suelo de la calle Pachacutec de la provincia del Cusco • Muestra 55 ensayos • Técnicas e Instrumentos de recolección de datos Recolección de datos de campo.
				Dosificación de la fibra.	2%, 6% y 15%	
			Óxido de Calcio	Proporción.	0.5%, 1.5% y 5.0%	
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicos	Variable Dependiente			
¿En qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco?	Determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.	La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la densidad máxima seca y el contenido óptimo de humedad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.	Estabilización de suelos	Densidad máxima seca	DMS	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas e Instrumentos de recolección de datos Recolección de datos de campo.
				Contenido óptimo de humedad	COH	

<p>¿En qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco?</p>	<p>Determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.</p>	<p>La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la resistencia CBR de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.</p>	<p>Resistencia CBR del suelo</p>	<p>CBR</p>	<p>Ensayos de laboratorio. Procesamiento de datos en Excel -</p>
<p>¿En qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco?</p>	<p>Determinar en qué medida influye la fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.</p>	<p>La fibra de Agave americana tratada con óxido de calcio influye significativamente en la permeabilidad de suelos arcillosos en la subrasante de pavimentos rígidos en la ciudad de Cusco.</p>	<p>Permeabilidad</p>	<p>Ascensión capilar</p>	

Anexo III: Tabla t-Student

Tabla t-Student



Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7531	2.1315	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7970
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
26	0.6840	1.3150	1.7056	2.0555	2.4786	2.7787
27	0.6837	1.3137	1.7033	2.0518	2.4727	2.7707
28	0.6834	1.3125	1.7011	2.0484	2.4671	2.7633
29	0.6830	1.3114	1.6991	2.0452	2.4620	2.7564
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
31	0.6825	1.3095	1.6955	2.0395	2.4528	2.7440
32	0.6822	1.3086	1.6939	2.0369	2.4487	2.7385
33	0.6820	1.3077	1.6924	2.0345	2.4448	2.7333
34	0.6818	1.3070	1.6909	2.0322	2.4411	2.7284
35	0.6816	1.3062	1.6896	2.0301	2.4377	2.7238
36	0.6814	1.3055	1.6883	2.0281	2.4345	2.7195
37	0.6812	1.3049	1.6871	2.0262	2.4314	2.7154
38	0.6810	1.3042	1.6860	2.0244	2.4286	2.7116
39	0.6808	1.3036	1.6849	2.0227	2.4258	2.7079
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
41	0.6805	1.3025	1.6829	2.0195	2.4208	2.7012
42	0.6804	1.3020	1.6820	2.0181	2.4185	2.6981
43	0.6802	1.3016	1.6811	2.0167	2.4163	2.6951
44	0.6801	1.3011	1.6802	2.0154	2.4141	2.6923
45	0.6800	1.3007	1.6794	2.0141	2.4121	2.6896
46	0.6799	1.3002	1.6787	2.0129	2.4102	2.6870
47	0.6797	1.2998	1.6779	2.0117	2.4083	2.6846
48	0.6796	1.2994	1.6772	2.0106	2.4066	2.6822
49	0.6795	1.2991	1.6766	2.0096	2.4049	2.6800

50	0.6794	1.2987	1.6759	2.0086	2.4033	2.6778
51	0.6793	1.2984	1.6753	2.0076	2.4017	2.6757
52	0.6792	1.2980	1.6747	2.0066	2.4002	2.6737
53	0.6791	1.2977	1.6741	2.0057	2.3988	2.6718
54	0.6791	1.2974	1.6736	2.0049	2.3974	2.6700
55	0.6790	1.2971	1.6730	2.0040	2.3961	2.6682
56	0.6789	1.2969	1.6725	2.0032	2.3948	2.6665
57	0.6788	1.2966	1.6720	2.0025	2.3936	2.6649
58	0.6787	1.2963	1.6716	2.0017	2.3924	2.6633
59	0.6787	1.2961	1.6711	2.0010	2.3912	2.6618
60	0.6786	1.2958	1.6706	2.0003	2.3901	2.6603
61	0.6785	1.2956	1.6702	1.9996	2.3890	2.6589
62	0.6785	1.2954	1.6698	1.9990	2.3880	2.6575
63	0.6784	1.2951	1.6694	1.9983	2.3870	2.6561
64	0.6783	1.2949	1.6690	1.9977	2.3860	2.6549
65	0.6783	1.2947	1.6686	1.9971	2.3851	2.6536
66	0.6782	1.2945	1.6683	1.9966	2.3842	2.6524
67	0.6782	1.2943	1.6679	1.9960	2.3833	2.6512
68	0.6781	1.2941	1.6676	1.9955	2.3824	2.6501
69	0.6781	1.2939	1.6672	1.9949	2.3816	2.6490
70	0.6780	1.2938	1.6669	1.9944	2.3808	2.6479
71	0.6780	1.2936	1.6666	1.9939	2.3800	2.6469
72	0.6779	1.2934	1.6663	1.9935	2.3793	2.6458
73	0.6779	1.2933	1.6660	1.9930	2.3785	2.6449
74	0.6778	1.2931	1.6657	1.9925	2.3778	2.6439
75	0.6778	1.2929	1.6654	1.9921	2.3771	2.6430
76	0.6777	1.2928	1.6652	1.9917	2.3764	2.6421
77	0.6777	1.2926	1.6649	1.9913	2.3758	2.6412
78	0.6776	1.2925	1.6646	1.9908	2.3751	2.6403
79	0.6776	1.2924	1.6644	1.9905	2.3745	2.6395
80	0.6776	1.2922	1.6641	1.9901	2.3739	2.6387
81	0.6775	1.2921	1.6639	1.9897	2.3733	2.6379
82	0.6775	1.2920	1.6636	1.9893	2.3727	2.6371
83	0.6775	1.2918	1.6634	1.9890	2.3721	2.6364
84	0.6774	1.2917	1.6632	1.9886	2.3716	2.6356
85	0.6774	1.2916	1.6630	1.9883	2.3710	2.6349
86	0.6774	1.2915	1.6628	1.9879	2.3705	2.6342
87	0.6773	1.2914	1.6626	1.9876	2.3700	2.6335
88	0.6773	1.2912	1.6624	1.9873	2.3695	2.6329
89	0.6773	1.2911	1.6622	1.9870	2.3690	2.6322
90	0.6772	1.2910	1.6620	1.9867	2.3685	2.6316
91	0.6772	1.2909	1.6618	1.9864	2.3680	2.6309
92	0.6772	1.2908	1.6616	1.9861	2.3676	2.6303
93	0.6771	1.2907	1.6614	1.9858	2.3671	2.6297
94	0.6771	1.2906	1.6612	1.9855	2.3667	2.6291
95	0.6771	1.2905	1.6611	1.9852	2.3662	2.6286
96	0.6771	1.2904	1.6609	1.9850	2.3658	2.6280
97	0.6770	1.2903	1.6607	1.9847	2.3654	2.6275
98	0.6770	1.2903	1.6606	1.9845	2.3650	2.6269
99	0.6770	1.2902	1.6604	1.9842	2.3646	2.6264
100	0.6770	1.2901	1.6602	1.9840	2.3642	2.6259
∞	0.6745	1.2816	1.6449	1.9600	2.3263	2.5758

Anexo IV: Resultados de los ensayos de laboratorio

CÉSAR EDILBERTO ARBULÚ JURADO

MBA. Ing. Civil CIP 115764

RUC 10239763681

Consultor en geotecnia, con laboratorio propio.

Informe 101-CEAJ-2021

Informe de resultado de laboratorio:

Datos generales:

Solicitantes: Edwin Luna Baca, Gandy Quispe Herhuay.

Fecha del ensayo: 07 de junio al 12 de julio de 2021

Dirección del laboratorio: Av. Micaela Bastidas 258, Wanchaq, Cusco, Perú.

Muestreo, procedencia y manipulación del suelo hasta llegar al laboratorio: hecha por el solicitante.

Resultados:

Tabla 1.

Resultados de ensayos múltiples.

NOMBRE	Ensayo	PESO DEL MOLDE MAS SUELO HUMEDO	CODIGO DE LA CAPSULA	PESO DE LA CAPSULA	PESO DE LA CAPSULA MAS SUELO HUMEDO	PESO DE LA CAPSULA MAS SUELO SECO	Peso suelo (g)	Dh (g/cm ³)	w	Ds (g/cm ³)
N11	1	2276.00	10	21.00	138.50	122.50	531.00	1.5	15.76	1.318
N11	2	2397.00	27	21.30	120.70	106.20	652.00	1.9	17.08	1.600
N11	3	2362.00	01	21.30	54.70	46.60	617.00	1.8	32.02	1.343
N13	1	2355.00	B2	21.60	92.80	86.30	610.00	1.8	10.05	1.593
N13	2	2432.00	703	21.50	77.40	69.90	687.00	2.0	15.50	1.709
N13	3	2448.00	26	20.90	134.60	112.20	703.00	2.0	24.53	1.622
N4	1	2296.00	12	21.00	85.30	76.80	551.00	1.6	15.23	1.374
N4	2	2325.00	28	21.80	113.40	98.70	580.00	1.7	19.12	1.399
N4	3	2390.00	23	20.50	106.70	89.80	645.00	1.9	24.39	1.490
N7	1	2286.00	14	20.50	66.80	61.20	541.00	1.6	13.76	1.367
N7	2	2297.00	32	22.10	111.40	96.50	552.00	1.6	20.03	1.322
N7	3	2416.00	06	20.70	88.90	72.40	671.00	1.9	31.91	1.462
N10	2	2336.00	21	21.60	83.80	75.10	591.00	1.7	16.26	1.461
N10	1	2383.00	31	21.20	97.10	87.50	638.00	1.8	14.48	1.601
N10	3	2424.00	30	20.90	90.90	76.40	679.00	2.0	26.13	1.547
N12	1	2351.00	09	20.30	75.70	70.60	606.00	1.7	10.14	1.581
N12	2	2484.00	07	20.70	88.60	78.50	739.00	2.1	17.47	1.808
N12	3	2429.00	34	21.00	89.20	75.40	684.00	2.0	25.37	1.568
N2	1	2344.00	37	21.30	76.80	71.50	599.00	1.7	10.56	1.557
N2	2	2482.00	24	20.40	94.20	83.60	737.00	2.1	16.77	1.814
N2	3	2439.00	22	20.90	99.40	84.10	694.00	2.0	24.21	1.606
N3	1	2279.00	M1	11.90	57.00	52.20	534.00	1.5	11.91	1.371
N3	2	2357.00	35	21.80	74.50	66.70	612.00	1.8	17.37	1.498
N3	3	2397.00	B4	12.20	93.70	76.70	652.00	1.9	26.36	1.483
N8	1	2422.00	M03	21.20	71.90	67.40	677.00	1.9	9.74	1.773
N8	2	2510.00	29	21.30	95.00	84.80	765.00	2.2	16.06	1.894
N8	3	2437.00	04	20.50	111.70	94.10	692.00	2.0	23.91	1.605
N6	1	2366.00	LL2	21.20	55.40	52.10	621.00	1.8	10.68	1.612
N6	2	2395.00	107	47.50	97.20	91.20	650.00	1.9	13.73	1.642
N6	3	2425.00	38	21.10	92.40	79.30	680.00	2.0	22.51	1.595
N5	1	2411.00	20	21.90	71.40	67.20	666.00	1.9	9.27	1.751
N5	2	2495.00	03	20.70	68.10	61.70	750.00	2.2	15.61	1.864
N5	3	2438.00	08	20.80	108.60	90.70	693.00	2.0	25.61	1.585
N9	1	2352.00	18	21.30	60.80	57.10	607.00	1.7	10.34	1.581
N9	2	2489.00	B3	11.60	48.00	43.00	744.00	2.1	15.92	1.844
N9	3	2444.00	25	21.00	104.20	88.10	699.00	2.0	23.99	1.620
N1	1	2429.00	LL1	21.30	58.10	54.70	684.00	2.0	10.18	1.784
N1	2	2500.00	19	21.30	91.80	82.30	755.00	2.2	15.57	1.877
N1	3	2449.00	15	21.10	121.00	101.20	704.00	2.0	24.72	1.622
N14	1	2266.00	33	21.20	85.80	78.40	521.00	1.5	12.94	1.326
N14	2	2328.00	02	20.40	73.20	64.60	583.00	1.7	19.46	1.402
N14	3	2420.00	W3	14.30	63.20	53.60	675.00	1.9	24.43	1.559

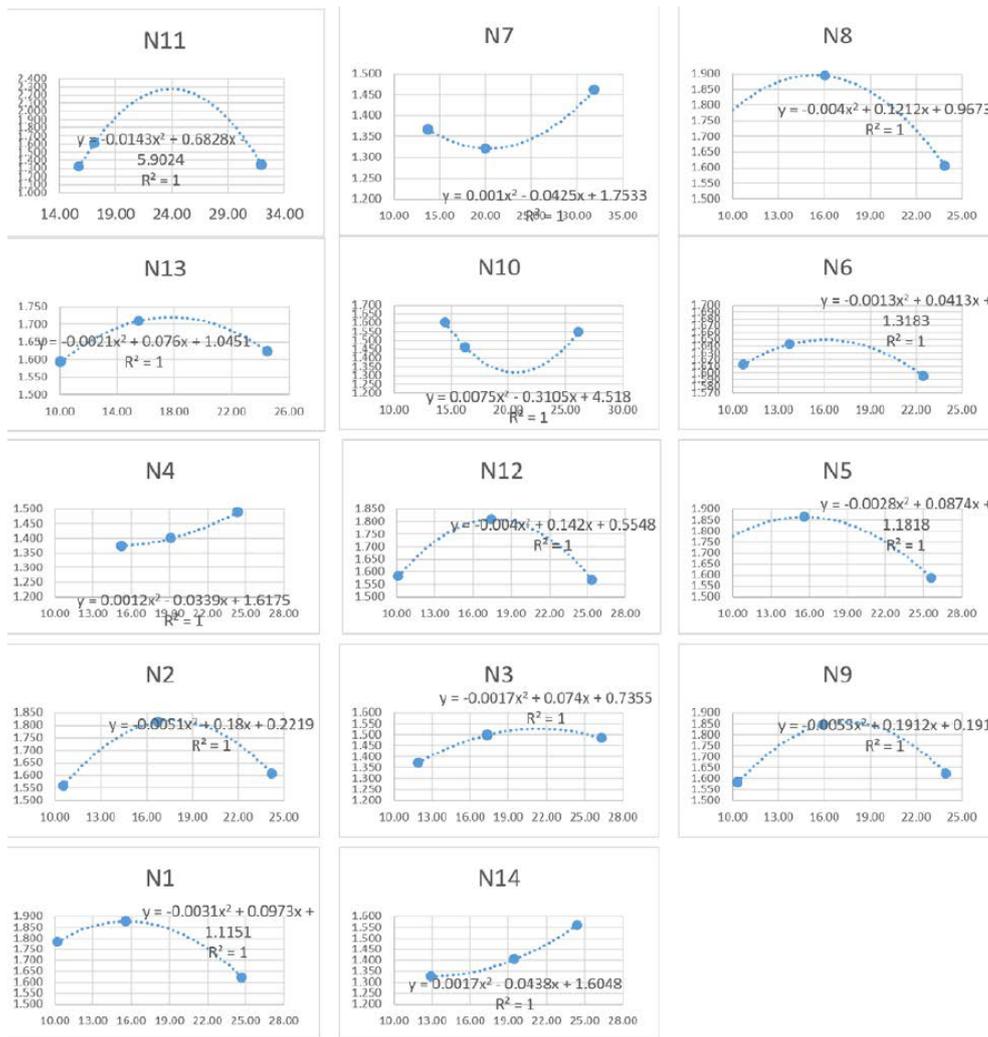
Fuente: ensayos de laboratorio, elaboración: consultor.

CESAR EDILBERTO ARBULU JURADO
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 115764

Tabla 2.
Resultados de Proctor

N	COH	DMS
1	15	1.87
2	17	1.82
3	21	1.52
4	24	1.5
5	15	1.86
6	16	1.65
7	32	1.45
8	16	1.9
9	17	1.85
10	15	1.6
11	24	2.25
12	17	1.8
13	18	1.72
14	24	1.55

Gráfico 1.
Curvas de compactación



CESAR EDUARDO ARBULLU JARAPO
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP. N° 115764

Tabla 3.
Resultados de CBR.

Nombre	Li	L1	L2	DPI1	DPI2	DPI_prom	CBR PDC ASTM D6951 (USACE) (%)	CBR LAB SUMERGIDO ASTM D1883 (%) Ref. 1
1	7.85	8.4	8.85	5.50	4.50	5.00	48.1	11.3
2	7.45	8	8.5	5.50	5.00	5.25	45.6	11.0
3	6.95	7.7	8.4	7.50	7.00	7.25	31.8	9.0
4	4.65	5.2	5.7	5.50	5.00	5.25	45.6	11.0
5	7.95	8.55	8.9	6.00	3.50	4.75	51.0	11.7
6	7.5	8.2	8.65	7.00	4.50	5.75	41.2	10.4
7	5.4	6.5	7.55	11.00	10.50	10.75	20.4	7.1
8	7.6	8.25	8.75	6.50	5.00	5.75	41.2	10.4
9	7.8	8.4	8.8	6.00	4.00	5.00	48.1	11.3
10	5.4	5.85	6.15	4.50	3.00	3.75	66.4	13.5
11	6.9	7.85	8.55	9.50	7.00	8.25	27.5	8.4
12	7.8	8.4	8.85	6.00	4.50	5.25	45.6	11.0
13	5.8	6.75	7.3	9.50	5.50	7.50	30.6	8.9
14	5.65	6.3	6.9	6.50	6.00	6.25	37.5	9.9

Ref 1. Para la determinación del CBR de laboratorio sumergido se utilizó la correlación propuesta por el Norwegian Road Research Laboratory:

$$\text{Log } CBR_{lab} = 2.438 - 1.65 \text{ Log } PR_{field}$$

Donde: CBR_{lab}: CBR sumergido determinado en laboratorio por el método ASTM D1883.

PR_{field}: Índice de penetración en milímetros determinado por el método ASTM D6951,

Tabla 3.
Resultados resumen.

Nombre	long_fib (mm)	Dosis_fibra	DosisOxidoCalcio	DMS (g/cm3)	COH (%)	CBR_sum
N1	100	0	0	1.87	15	11.3
N2	20	2	0	1.82	17	11
N3	100	6	0.5	1.52	21	9
N4	60	15	0.5	1.5	24	11
N5	20	0	1.5	1.86	15	11.7
N6	60	2	5	1.65	16	10.4
N7	60	15	0.5	1.45	32	7.1
N8	100	0	0	1.9	16	10.4
N9	20	2	0	1.85	17	11.3
N10	100	6	0.5	1.6	15	13.5
N11	60	15	0.5	2.25	24	8.4
N12	20	0	1.5	1.8	17	11
N13	60	2	5	1.72	18	8.9
N14	60	15	0.5	1.55	24	9.9

Fuente: ensayos de laboratorio, elaboración: consultor.

Es todo cuanto se informa al respecto.

Cusco, 23 de agosto de 2021


CESAR EDILBERTO ARBULU JURADO
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 115764

CONTENIDO DE HUMEDAD
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO

ASTM D2216
ASTM D422

CODIGO
0

CONTENIDO DE HUMEDAD (ω)		
1	No recipiente	1
2	W recipiente (gr)	0.00
3	W recipiente sw (gr)	245.00
4	W recipiente s (gr)	245.00
5	W w : 3-4 (gr)	0.00
6	W s : 4-2 (gr)	245.00
7	ω : 100*5/6 (%)	0.00

CÉSAR EDILBERTO ARBULÚ JURADO

MBA. Ing. Civil CIP 115764
RUC 10239763681
Consultor en geotecnia, con laboratorio propio.
Informe 102-CEAJ-2021

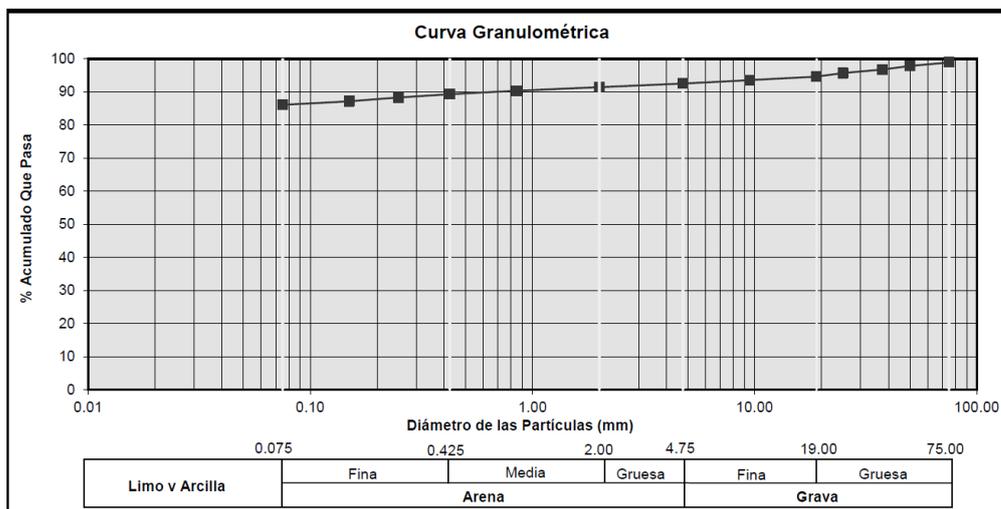
Informe de resultado de laboratorio:

Datos generales:
Solicitantes: Edwin Luna Baca, Gandy Quispe Herñay.
Fecha del ensayo: 07 de junio al 12 de julio de 2021
Dirección del laboratorio: Av. Micaela Bastidas 258, Wanchaq, Cusco, Perú.
Muestreo, procedencia y manipulación del suelo hasta llegar al laboratorio: hecha por el solicitante.

ANALISIS GRANULOMETRICO		
8	W recipiente s (lavado) (gr)	245.00
9	W s (lavado) : 8-2 (gr)	245.00
10	W s fino (platillo) (gr)	242.00
11	W Total Parcial Retenido (gr)	242.00
12	ΔW : 9-11 (gr)	3.00
13	W s fino (total) : [6-(11-10)-12] (gr)	242.00
14	% finos : 100*13/6 (%)	98.78
15	Error : 100*12/9 (%)	1.22

D10	(mm)	0.00
D30	(mm)	0.00
D60	(mm)	0.00
Cu = D60/D10		> 99
Cc = D30 ² /(D10*D60)		0.00

Tamiz		Peso Parcial Retenido	Peso Parcial Retenido Corregido	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado Que Pasa
-	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)	(%)
3"	75.000	0.00	3.00	1.07	1.07	98.93
2"	50.000	0.00	3.00	1.07	2.14	97.86
1 1/2"	37.500	0.00	3.00	1.07	3.20	96.80
1"	25.000	0.00	3.00	1.07	4.27	95.73
3/4"	19.000	0.00	3.00	1.07	5.34	94.66
3/8"	09.500	0.00	3.00	1.07	6.41	93.59
No 004	04.750	0.00	3.00	1.07	7.47	92.53
No 010	02.000	0.00	3.00	1.07	8.54	91.46
No 020	00.850	0.00	3.00	1.07	9.61	90.39
No 040	00.425	0.00	3.00	1.07	10.68	89.32
No 060	00.250	0.00	3.00	1.07	11.74	88.26
No 100	00.150	0.00	3.00	1.07	12.81	87.19
No 200	00.075	0.00	3.00	1.07	13.88	86.12
Platillo		242.00	242.00	86.12	100.00	0.00
Total		242.00	281.00	100.00	-	-

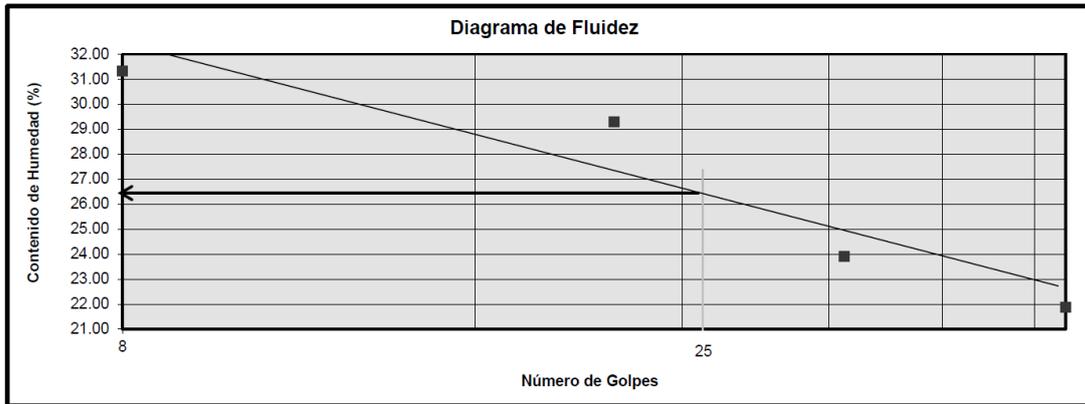



CESAR EDILBERTO ARBULÚ JURADO
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 115764

LIMITE LIQUIDO	ASTM D4318	CODIGO
LIMITE PLASTICO	ASTM D4318	
LIMITE DE CONTRACCION	ASTM D427	
		0

No DE ENSAYO	1	2	3	4
--------------	---	---	---	---

LIMITE LIQUIDO (LL)					
1	No recipiente	100	119	108	43
2	No golpes	51	33	21	8
3	W recipiente (gr)	47.30	46.60	47.40	46.90
4	W recipiente sw (gr)	66.80	63.70	67.70	77.50
5	W recipiente s (gr)	63.30	60.40	63.10	70.20
6	W w : 4-5 (gr)	3.50	3.30	4.60	7.30
7	W s : 5-3 (gr)	16.00	13.80	15.70	23.30
8	ω : 100*6/7 (%)	21.88	23.91	29.30	31.33
9	LL (%)				27.37



LIMITE PLASTICO (LP)					
1	No recipiente	Q3	Q3	Q3	Q3
2	W recipiente (gr)	10.80	10.80	10.80	10.80
3	W recipiente sw (gr)	17.20	17.20	17.20	17.20
4	W recipiente s (gr)	16.60	16.60	16.60	16.60
5	W w : 3-4 (gr)	0.60	0.60	0.60	0.60
6	W s : 4-2 (gr)	5.80	5.80	5.80	5.80
7	LP : 100*5/6 (%)	10.34	10.34	10.34	10.34
8	LP promedio (%)				10.34


CESAR EDILBERTO ARBULU JURADO
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 115764