



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial

Trabajo de Titulación, Modalidad Trabajo Experimental, presentado previo a la obtención del título de Ingeniera Civil

AUTORA: Katherin Ibeth Altamirano Villacís

TUTOR: Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, Mg.

Ambato - Ecuador

Junio-2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniera Civil, con el tema: **“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARENOSOS DEL SECTOR LA LIBERTAD DE HUACHI GRANDE MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL, CEMENTO Y CENIZA DE TOTORA: EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS Y SU APLICACIÓN EN INFRAESTRUCTURA VIAL”** elaborado por la estudiante Katherin Ibeth Altamirano Villacís portadora de la cédula de ciudadanía número 1850142942, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, junio 2026



Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, Mg.

C.C.: 1801950880

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Yo, **Katherin Ibeth Altamirano Villacís**, con C.C.: 1850142942 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente trabajo experimental con el tema: **“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARENOSOS DEL SECTOR LA LIBERTAD DE HUACHI GRANDE MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL, CEMENTO Y CENIZA DE TOTORA: EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS Y SU APLICACIÓN EN INFRAESTRUCTURA VIAL”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autora del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, junio 2026



.....
Katherin Ibeth Altamirano Villacís

C.C.: 1850142942

AUTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, junio 2026



Altamirano Villacís Katherin Ibeth

C.C.: 1850142942

AUTORA

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por la estudiante **Katherin Ibeth Altamirano Villacís** de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARENOSOS DEL SECTOR LA LIBERTAD DE HUACHI RANDE MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL, CEMENTO Y CENIZA DE TOTORA: EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS Y SU APLICACIÓN EN INFRAESTRUCTURA VIAL”**, Modalidad Experimental.

Ambato, junio 2026

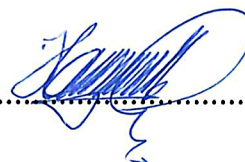
Para constancia firman:



Ing. Ruth Lorena Pérez Maldonado, Mg

C.C.: 1710320332

MIEMBRO CALIFICADOR



Ing. Galo Wilfrido Núñez Aldaz, Mg

C.C.:1802229227

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

A Dios, a la Virgen del Cisne y al Niñito de San José por ser mi luz y mi guía, por sostener mi mano en cada paso de este camino y por darme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para no rendirme jamás. Gracias por escuchar cada una de mis oraciones, por sostenerme con su amor infinito y por abrir puertas y brindarme oportunidades que me permitieron cumplir sueños que parecían lejanos.

A mis amados padres Anderson y Liliana por ser el ejemplo más grande de amor, esfuerzo y entrega que he tenido en mi vida. Todo lo que soy y cada logro alcanzado llevan el esfuerzo, la dedicación y el amor que ustedes me han brindado. Gracias por inculcarme valores que hoy forman parte de la persona que soy, por enseñarme a enfrentar los desafíos con responsabilidad, humildad y perseverancia, y por guiarme siempre por el camino correcto.

Agradezco profundamente cada sacrificio que realizaron para brindarme oportunidades, cada esfuerzo silencioso que hicieron pensando en mi bienestar y cada sueño que postergaron para ayudarme a alcanzar los míos, gracias por cada consejo, cada palabra de aliento y por nunca dejar de creer en mí, incluso cuando yo misma dudaba. Este logro es el reflejo de todo el amor, la dedicación y el trabajo que han sembrado en mi vida durante todos estos años.

A mi querida hermana Daniela, por ser mi compañera de vida, mi refugio en los momentos difíciles y una fuente constante de apoyo y motivación. Gracias por tu cariño, tu comprensión, tu complicidad y por acompañarme con paciencia y alegría durante este camino. Tu presencia ha sido un regalo invaluable en cada etapa de mi vida.

A mis queridos abuelitos Segundo, Rosa, Luis y Zoila, quienes, con su amor incondicional, sus enseñanzas y su ejemplo de vida han dejado huellas imborrables en mi corazón. Gracias por cada consejo lleno de sabiduría, por sus oraciones constantes, por sus palabras de aliento y por el cariño sincero con el que siempre me han acompañado. Gracias por creer en mí desde siempre, por celebrar mis logros como propios y por brindarme su apoyo en cada etapa de mi vida.

Este logro lleva mi nombre, pero pertenece al corazón de todas las personas que caminaron conmigo hasta hacerlo posible. Con todo mi corazón,

Katherin Ibeth Altamirano Villacís

AGRADECIMIENTO

Gracias infinitas a Dios, a la Virgen del Cisne y al Niñito de San José por guiarme y sostenerme durante este hermoso camino, por darme la sabiduría y fortaleza necesarias para alcanzar esta meta.

Gracias, papito, por ser el ejemplo más grande de fortaleza, esfuerzo y perseverancia que he tenido en mi vida. Gracias por trabajar incansablemente para brindarme lo mejor, por enseñarme con su ejemplo que los sueños se alcanzan con sacrificio, responsabilidad y dedicación.

Gracias mamita por ser el corazón que sostiene todo, por sus brazos llenos de consuelo, sus consejos suaves, sus oraciones constantes. Gracias por su amor infinito que es mi refugio en todo momento.

Gracias ñaña por ser una luz constante en mi vida, por tener siempre la capacidad de alegrar mis días, por cada palabra de ánimo, por escucharme cuando lo necesitaba y por acompañarme con tu cariño incondicional a lo largo de este camino.

A mis abuelitos, tíos y primos, gracias por su cariño, apoyo y compañía a lo largo de mi vida. Gracias por cada palabra de aliento, por los momentos compartidos en familia, por las risas que alegraron mis días y por estar presentes, de una u otra manera, durante este importante proceso.

A mis amigos, en especial a Alex, Cristal, Camila y Christian, gracias por compartir conmigo una de las etapas más importantes y significativas de mi vida. Gracias por cada jornada de estudio, por las largas noches de desvelo, por el esfuerzo compartido, por las risas que aligeraron los días difíciles y por cada momento de alegría que convirtió este camino en una experiencia inolvidable.

A la Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme profesional y personalmente en sus aulas. A mis docentes, por compartir generosamente sus conocimientos, experiencias y enseñanzas a lo largo de mi formación universitaria. Gracias por inspirarme a buscar la excelencia y por contribuir no solo a mi crecimiento académico, sino también a mi desarrollo personal. Sus consejos, valores y ejemplo profesional han dejado una huella significativa en mi formación y serán una guía permanente en el ejercicio de mi carrera.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

A. PÁGINAS PRELIMINARES	
PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	xix
RESUMEN EJECUTIVO.....	xx
ABSTRACT	xxi
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	1
I. JUSTIFICACIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	2
III. OBJETIVOS	6
A. OBJETIVO GENERAL.....	6
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA	7

I. EQUIPOS Y MATERIALES	7
II. MÉTODOS	18
A. FASE 1	18
1) <i>Recolección de las muestras de suelo</i>	18
2) <i>Ceniza de Totorá</i>	21
3) <i>Cal y Cemento</i>	26
B. FASE 2	27
1) <i>Análisis Granulométrico</i>	28
2) <i>Límites de Atterberg</i>	32
3) <i>Clasificación de los suelos</i>	36
4) <i>Proctor modificado</i>	42
5) <i>California Bearing Ratio (CBR)</i>	44
C. FASE 3	48
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
A. FASE 1	49
B. FASE 2	51
1) <i>Suelo arenoso en estado natural</i>	52
2) <i>Suelo con adición de 5% de cal</i>	57
3) <i>Suelo con adición de 10% de cal</i>	59
4) <i>Suelo con adición de 15% de cal</i>	61
5) <i>Suelo con adición de 5% de cemento</i>	63

6) Suelo con adición de 10% de cemento	65
7) Suelo con adición de 15% de cemento	67
8) Suelo con adición de 5% de ceniza de totora	69
9) Suelo con adición de 10% de ceniza de totora	71
10) Suelo con adición de 15% de ceniza de totora	73
D. FASE 3	75
1) Suelo en estado natural vs Suelo estabilizado con cal	75
2) Suelo en estado natural vs Suelo estabilizado con cemento.....	80
3) Suelo en estado natural VS Suelo estabilizado con ceniza de totora	85
4) Análisis de la viabilidad económica	90
II. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS	92
A. HIPÓTESIS	92
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
I. CONCLUSIONES.....	94
II. RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	96
PRESUPUESTO ESTABILIZACIÓN CON CAL	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Recolección de las muestras de suelo.	19
Fig. 2. Ubicación de la primera muestra de suelo.	19
Fig. 3. Ubicación de la segunda muestra de suelo.	20
Fig. 4. Ubicación de la tercera muestra de suelo.	21
Fig. 5. Recolección de la planta de totora.	22
Fig. 6. Secado de la planta de totora.	22
Fig. 7. Calentamiento de los crisoles para el ensayo de determinación de temperatura de calcinación.	23
Fig. 8. Calcinación previa de la planta de totora.	23
Fig. 9. Calcinación de la totora en laboratorio.	24
Fig. 10. Horno artesanal para calcinación.	24
Fig. 11. Control de la temperatura de calcinación de la totora.	25
Fig. 12. Calcinación de la totora.	25
Fig. 13. Tamizado de la ceniza.	26
Fig. 14. Cemento Selvalegre.	27
Fig. 15. Cal viva.	27
Fig. 16. Ensayo de granulometría.	29
Fig. 17. Gráfica curva granulométrica.	30
Fig. 18. Pendientes de la curva granulométrica.	30
Fig. 19. Ensayo límite líquido en laboratorio.	34
Fig. 20. Gráfica del ensayo de límite líquido.	34
Fig. 21. Ensayo límite plástico en laboratorio.	35
Fig. 22. Carta de plasticidad de la norma AASHTO.	39
Fig. 23. Carta de plasticidad SUCS.	42
Fig. 24. Ensayo Proctor modificado en el laboratorio.	44
Fig. 25. Ensayo CBR en laboratorio.	45
Fig. 26. Moldes CBR.	46
Fig. 27. Muestras de CBR en inmersión.	46
Fig. 28. Ensayo CBR.	46
Fig. 29. Determinación del índice de CBR [5].	47
Fig. 30. Ubicación muestra de suelo arenoso.	50
Fig. 31. Distribución de grava, arena y limos y arcillas.	52

Fig. 32. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo en estado natural.	54
Fig. 33. Contenido de humedad vs Densidad del suelo en estado natural.....	56
Fig. 34. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 5% cal.	57
Fig. 35. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 5% cal.....	58
Fig. 36. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 10% cal.	59
Fig. 37. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 10% cal.....	60
Fig. 38. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 15% cal.	61
Fig. 39. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 15% cal.....	62
Fig. 40. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 5% cemento.	63
Fig. 41. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 5% cemento.....	64
Fig. 42. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 10% cemento.	65
Fig. 43. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 10% cemento.....	66
Fig. 44. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 15% cemento.	67
Fig. 45. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 15% cemento.....	68
Fig. 46. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 5% ceniza de totora....	69
Fig. 47. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 5% ceniza de totora.....	70
Fig. 48. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 10% ceniza de totora..	71
Fig. 49. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 10% ceniza de totora.....	72
Fig. 50. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 15% ceniza de totora..	73
Fig. 51. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 15% ceniza de totora.....	74
Fig. 52. Representación Límites de Atterberg con adición de cal.	76
Fig. 53. Densidad seca máxima con adición de Cal.	77
Fig. 54. Contenido de humedad óptimo con adición de Cal.....	78
Fig. 55. Representación CBR con adición de Cal.	79
Fig. 56. Porcentaje óptimo de Cal	80
Fig. 57. Representación Límites de Atterberg con adición de cemento.	81
Fig. 58. Densidad seca máxima con adición de Cemento.	82
Fig. 59. Contenido de humedad óptimo con adición de Cemento.....	83
Fig. 60. Representación CBR con adición de Cemento.	84
Fig. 61. Porcentaje óptimo de Cemento	85
Fig. 62. Representación Límites de Atterberg con adición de ceniza de totora.	86
Fig. 63. Densidad seca máxima con adición de Ceniza de Totora.	87
Fig. 64. Contenido de humedad óptimo con adición de Ceniza de Totora.....	88
Fig. 65. Representación CBR con adición de Ceniza de Totora.	89

Fig. 66. Porcentaje óptimo de Ceniza de Totorá	90
Fig. 67. % CBR de todas las adiciones.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I MATERIALES PARA EL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN DE LA TOTORA.....	8
TABLA II ABERTURA DE TAMICES.....	10
TABLA III INSTRUMENTOS Y EQUIPOS PARA EL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA.....	10
TABLA IV INSTRUMENTOS PARA LOS ENSAYOS DE LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO.....	11
TABLA V EQUIPOS E INSTRUMENTOS PARA EL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO	13
TABLA VI EQUIPOS E INSTRUMENTOS PARA EL ENSAYO CBR.....	15
TABLA VII CLASIFICACIÓN DE LA NORMA AASHTO PARA MATERIALES GRANULARES.....	38
TABLA VIII CLASIFICACIÓN DE LA NORMA AASHTO PARA MATERIALES LIMO-ARCILLOSOS.....	38
TABLA IX SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS PARA UN SUELO TIPO GRAVA	40
TABLA X SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS PARA UN SUELO TIPO ARENA.....	41
TABLA XI SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS PARA UN SUELO TIPO ARENA	41
TABLA XII CLASIFICACIÓN DEL SUELO DE ACUERDO AL VALOR DE CBR [5]	47
TABLA XIII TEMPERATURA DE CALCINACIÓN DE LA TOTORA.....	50
TABLA XIV COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE TOTORA.....	51
TABLA XV GRANULOMETRÍA SUELO NATURAL	52

TABLA XVI COEFICIENTES DEL SUELO	53
TABLA XVII LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO EN ESTADO NATURAL ...	53
TABLA XVIII SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS PARA UN SUELO TIPO ARENA	55
TABLA XIX NORMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO PARA MATERIALES GRANULARES	55
TABLA XX PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO EN ESTADO NATURAL	56
TABLA XXI CBR DEL SUELO EN ESTADO NATURAL	57
TABLA XXII LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 5% CAL.....	57
TABLA XXIII PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 5% CAL.....	58
TABLA XXIV CBR DEL SUELO + 5% CAL.....	59
TABLA XXV LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 10% CAL	59
TABLA XXVI PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 10% CAL.....	60
TABLA XXVII CBR DEL SUELO + 10% CAL	61
TABLA XXVIII LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 15% CAL	61
TABLA XXIX PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 15% CAL.....	62
TABLA XXX CBR DEL SUELO + 15% CAL.....	63
TABLA XXXI LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 5% CEMENTO.....	63
TABLA XXXII PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 5% CEMENTO.....	64
TABLA XXXIII CBR DEL SUELO + 5% CEMENTO.....	65
TABLA XXXIV LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 10% CEMENTO.....	65
TABLA XXXV PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 10% CEMENTO.....	66
TABLA XXXVI CBR DEL SUELO + 10% CEMENTO	67
TABLA XXXVII LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 15% CEMENTO	67
TABLA XXXVIII PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 15% CEMENTO.....	68

TABLA XXXIX CBR DEL SUELO + 15% CEMENTO	69
TABLA XL LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 5% CENIZA DE TOTORA	69
TABLA XLI PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 5% CENIZA DE TOTORA.	70
TABLA XLII CBR DEL SUELO + 5% CENIZA DE TOTORA	71
TABLA XLIII LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 10% CENIZA DE TOTORA	71
TABLA XLIV PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 10% CENIZA DE TOTORA	72
TABLA XLV CBR DEL SUELO + 10% CENIZA DE TOTORA	73
TABLA XLVI LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 15% CENIZA DE TOTORA	73
TABLA XLVII PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 15% CENIZA DE TOTORA	74
TABLA XLVIII CBR DEL SUELO + 15% CENIZA DE TOTORA	75
TABLA XLIX LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CAL	76
TABLA L PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CAL	77
TABLA LI % CBR CON ADICIÓN DE CAL	79
TABLA LII LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CEMENTO	81
TABLA LIII PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CEMENTO	82
TABLA LIV % CBR CON ADICIÓN DE CEMENTO	84
TABLA LV LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA	86
TABLA LVI PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA	87
TABLA LVII % CBR CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA.....	89

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Ensayo de Granulometría suelo natural	100
Anexo 2: Ensayo Límites de Atterberg suelo natural.....	102
Anexo 3: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural.....	103
Anexo 4: Ensayo CBR suelo natural	104
Anexo 5: Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 5% de cal.....	106
Anexo 6: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 5% de cal.....	107
Anexo 7: Ensayo CBR suelo natural + 5% de cal	108
Anexo 8: Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 10% de cal.....	110
Anexo 9: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 10% de cal.....	111
Anexo 10: Ensayo CBR suelo natural + 10% de cal	112
Anexo 11. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 15% de cal.....	114
Anexo 12. Ensayo Proctor Modificado suelo natural + 15% de cal.....	115
Anexo 13. Ensayo CBR suelo natural + 15% de cal	116
Anexo 14. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 5% de Cemento	118
Anexo 15. Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 5% de Cemento	119
Anexo 16. Ensayo CBR suelo natural + 5% de Cemento	120
Anexo 17. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 10% de Cemento	122
Anexo 18. Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 10% de Cemento	123
Anexo 19. Ensayo CBR suelo natural + 10% de Cemento	124
Anexo 20. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 15% de Cemento	126
Anexo 21. Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 15% de Cemento	127
Anexo 22. Ensayo CBR suelo natural + 15% de Cemento	128
Anexo 23. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 5% de Ceniza	130
Anexo 24: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 5% de Ceniza	131

Anexo 25: Ensayo CBR suelo natural + 5% de Ceniza.....	132
Anexo 26: Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 10% de Ceniza	134
Anexo 27: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 10% de Ceniza	135
Anexo 28: Ensayo CBR suelo natural + 10% de Ceniza.....	136
Anexo 29: Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 15% de Ceniza	138
Anexo 30: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 15% de Ceniza	139
Anexo 31: Ensayo CBR suelo natural + 15% de Ceniza.....	140
Anexo 32: Presupuesto referencial estabilización con cal.....	142
Anexo 33. Análisis de Precios Unitarios de la estabilización con cal	142
Anexo 34: Presupuesto referencial estabilización con cemento.....	144
Anexo 35. Análisis de Precios Unitarios de la estabilización con cemento	145
Anexo 36: Presupuesto referencial estabilización con ceniza de totora	147
Anexo 37: Análisis de Precios Unitarios de la estabilización con ceniza de totora	147

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SP	Arena mal graduada
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
IP	Índice de Plasticidad
NP	No Plástico
DSM	Densidad Seca Máxima
CBR	California Bearing Ratio
FICM	Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica
FCIAB	Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología
UTA	Universidad Técnica de Ambato

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación evalúa el efecto de la adición de totora como estabilizante alternativo para el mejoramiento del suelo arenoso destinado a subrasante vial y compara su comportamiento con los resultados de estabilización con cal y cemento. El estudio surge de la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles que superen la dependencia de los materiales convencionales y evalúen soluciones innovadoras y ambientalmente responsables con un enfoque constructivo que permitan desarrollar infraestructuras más eficientes y alineadas con criterios de sostenibilidad ambiental.

El trabajo experimental se desarrolló a partir de la caracterización física y mecánica del suelo del sector La Libertad de la parroquia Huachi Grande, en la que se determinó que corresponde a una arena mal graduada (SP) según el sistema de clasificación SUCS y como material granular tipo A-3 de acuerdo al sistema AASHTO. En cuanto a las propiedades mecánicas se obtuvo un CBR de 14,40% clasificándose como una subrasante regular.

Posteriormente se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de los suelos con adiciones de 5%, 10% y 15% de cal, cemento y ceniza de totora. Los resultados mostraron que los tres estabilizantes generaron mejoras en la capacidad portante del suelo, alcanzando un valor máximo de CBR de 240,00% con el 15% de adición de cemento, mientras que la cal obtuvo un valor máximo de 62,40% con el 10% de dosificación. Y la ceniza de totora alcanzó un CBR máximo de 24,10% con 10% de ceniza.

Finalmente, en el análisis de viabilidad técnica y económica se concluyó que la ceniza de totora constituye la mejor alternativa para la estabilización de subrasante de suelos arenosos ya que según el valor de CBR se determina como subrasante muy buena, mientras que la estabilización con cal y cemento se obtiene base buena y base muy buena, que se consideran sobredimensionadas para el objetivo establecido que es estabilizar la subrasante, además el costo es elevado en comparación al de la estabilización con ceniza de totora.

Palabras clave: CAL, CEMENTO, CENIZA DE TOTORA, CBR, ESTABILIZACIÓN DE SUELOS, SUBRASANTE.

ABSTRACT

This research evaluates the effect of adding totora reeds as an alternative stabilizer for improving sandy soil intended for road subgrades and compares its performance with the results of stabilization using lime and cement. The study arises from the need to develop sustainable alternatives that overcome dependence on conventional materials and evaluate innovative and environmentally responsible solutions with a construction approach that allows for the development of more efficient infrastructure aligned with environmental sustainability criteria.

The experimental work was developed based on the physical and mechanical characterization of the soil in the La Libertad sector of the Huachi Grande parish. It was determined that the soil corresponds to a poorly graded sand (SP) according to the Unified Soil Classification System (USCS) and to a granular material type A-3 according to the American Association of State Highway and Transportation Resources (AASHTO) system. Regarding the mechanical properties, a CBR of 14.40% was obtained, classifying it as a fair subgrade.

Subsequently, the physical and mechanical properties of the soils were evaluated with additions of 5%, 10%, and 15% lime, cement, and cattail ash. The results showed that all three stabilizers improved the soil's bearing capacity, reaching a maximum CBR value of 240.00% with the 15% cement addition, while lime reached a maximum value of 62.40% with a 10% dosage. Cattail ash achieved a maximum CBR of 24.10% with a 10% ash content.

Finally, the technical and economic feasibility analysis concluded that totora ash is the best alternative for stabilizing the subgrade of sandy soils, since according to the CBR value it is determined to be a very good subgrade, while stabilization with lime and cement results in a good and very good base, which are considered oversized for the established objective of stabilizing the subgrade, and the cost is high compared to that of stabilization with totora ash.

Keywords: LIME, CEMENT, TOTORA ASH, CBR, SOIL STABILIZATION, SUBGRADE.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

I. JUSTIFICACIÓN

La creciente urbanización y las demandas de la infraestructura vial en Ecuador han sido algunos de los desafíos durante años debido al mal estado de las vías tanto urbanas como rurales, incidiendo negativamente al proceso del desarrollo económico y productivo [1]. Uno de los primeros problemas que se identifican al iniciar un proyecto vial es la presencia de un suelo deficiente y con características inadecuadas. En la Sierra se encuentra principalmente suelo arenoso que en varias ocasiones es incapaz de soportar el peso debido a su baja capacidad portante, lo que impide construir una vía sobre él. Debido a que la subrasante no siempre cumple con las condiciones requeridas para el diseño y funcionamiento adecuado de una carretera es indispensable aplicar técnicas de mejoramiento o estabilización de suelos que permitan optimizar sus propiedades y garantizar su idoneidad para su uso dentro de la estructura del pavimento, exigiendo soluciones innovadoras [2].

La estabilización de suelos ha representado un reto constante que comúnmente se ha tratado con la incorporación de materiales convencionales como cemento portland y cal viva, materiales utilizados para incrementar su resistencia mecánica, reducir la plasticidad y mejorar la capacidad del suelo. Sin embargo, el uso intensivo de estos materiales eleva su costo de producción y genera impactos ambientales significativos aumentando las emisiones globales del dióxido de carbono. [3]

Frente a esta realidad, la búsqueda de materiales alternativos que favorezcan a la estabilización de suelos ha cobrado mayor relevancia dentro de ingeniería civil, motivando al estudio de nuevas opciones que puedan aprovecharse de manera más responsable, combinando criterios técnicos, económicos y ambientales, pero manteniendo el adecuado desempeño geotécnico como estabilizante.

En este contexto, surge el desafío de desarrollar nuevos materiales locales disponibles, principalmente en la región Sierra donde predominan suelos arenosos con baja capacidad portante. Entre los recursos naturales con potencial aprovechamiento destaca la totora (*Schoenoplectus Californicus*), una planta predominante en las lagunas de la Sierra ecuatoriana que gracias a su abundante disponibilidad y rápido crecimiento generan residuos orgánicos que, mediante procesos de combustión controlada producen cenizas con contenido significativo de sílice amorfa, similar a otras cenizas utilizadas en la estabilización de suelos [4].

En este sentido, considerando la necesidad de mejorar el comportamiento de los suelos, la utilización de cal y cemento son las más utilizadas gracias a su alta efectividad. Sin embargo, para proponer estabilizantes más amigables con el medio ambiente, la ceniza de totora es una opción prometedora no solo debido a la disponibilidad de conseguirla localmente, sino que también resulta viable técnica y ambientalmente, con capacidad de mejorar las propiedades del suelo.

El trabajo experimental se enfoca en analizar cómo la incorporación de la cal, el cemento y la ceniza de totora actúan al adicionarlos en el suelo, especialmente en sus propiedades mecánicas como su capacidad de soporte y resistencia. Para ello, se añadieron diferentes porcentajes de estabilizantes con la finalidad de obtener resultados aplicables en obras bajo condiciones de campo reales [5].

Con el propósito de mejorar este proceso y desarrollar innovadoras alternativas de materiales para la estabilización de suelos arenosos se formula la siguiente interrogante de investigación: ¿En qué medida la adición de cal, cemento y ceniza de totora modifica las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande para mejorar su comportamiento como material estabilizante en infraestructura vial?

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En Ecuador en los proyectos viales, los suelos arenosos representan un desafío frecuente, especialmente cuando presentan baja cohesión, escasa capacidad portante y una alta sensibilidad a la presencia de agua; lo que puede generar deformaciones y fallas prematuras en la estructura del pavimento. Por esta razón, según Badillo y Guachamín [6] resulta indispensable analizar y aplicar alternativas técnicas que permitan mejorar el comportamiento de este tipo de suelos, reduciendo los efectos negativos sobre el proyecto y minimizando los riesgos durante las distintas etapas de diseño, construcción y servicio de la obra.

Como lo afirma Guamán [7], una de las alternativas más utilizadas a lo largo de los años para el mejoramiento del suelo es la estabilización con diferentes materiales, ya sea la mezcla entre dos o tres suelos diferentes o la adición de materiales que mejoren las propiedades del suelo. Los materiales más utilizados y probados en los suelos de la Sierra ecuatoriana son la cal y el cemento que gracias a sus propiedades cementantes, cuando les combinamos con el suelo ayudan a aumentar su capacidad de soporte estructural.

En el trabajo investigativo-experimental realizado por Guamán [7] quién trabajó con porcentajes de 2,5%, 7,5%, 12,5% de cal y cloruro de sodio, calculado diferentes propiedades tanto físicas y mecánicas. En el índice de plasticidad el suelo con 2,5% y 7,5% de cal y cloruro de sodio no cumple, pero con 12,5% si cumple ya que para mejoramiento de la subrasante el índice de plasticidad tiene que ser máximo 9 y obtuvo valor de 8,83 para la cal y 6,54 para el cloruro de sodio. En cuanto a la resistencia a la compresión simple las curvas del suelo estabilizado con cal tienen mayor resistencia respecto al suelo natural, y con cada porcentaje va mejorando su resistencia, obteniendo la mayor resistencia al llegar al 12,5% de cal añadida. En el ensayo CBR el valor mínimo aceptado por el MOP para mejoramiento de subrasante es de 20%, con esto, con el porcentaje de 2,5% de cal no cumple ya que se obtiene un CBR de 13,45%, con 7,5% cumple con un valor de 20,8% y el mejor resultado es con 12,5% de cal que nos da un CBR de 26%.

En el trabajo “Estabilización de la subrasante en suelos arenosos con adición de caucho y cal” realizado por Munaylla y Yataco [8] analizaron la adición de cal en 8% y 10% obteniendo mejoras significativas en el comportamiento de las arenas determinándolo como un aditivo estabilizador eficiente y de bajo costo. En el ensayo CBR se evidencia que aumenta de 16% en estado natural a 42,50% en el suelo estabilizado con cal logrando aumentar las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso para utilizarlo como subrasante.

En el artículo de Zambrano y Zambrano titulado “Estabilización de suelo con cal y cemento para el mejoramiento de subrasante” [9] estudiaron la adición de estabilizantes químicos como cal y cemento en 2%, 3% y 4%, obteniendo como resultado que con la adición del 2% de cal el CBR obtenido es 5,60%, con 3% de cal el valor de CBR sube a 6,85% y con el 4% de cal se obtiene un mejor CBR 8,12%, obteniendo un aumento significativo en comparación con el CBR en estado natural que es de 1%. Determinando como porcentaje óptimo de adición de cal el valor de 4%.

Con respecto a la estabilización con cemento Zambrano y Zambrano [9] concluyeron que de los porcentajes analizados el óptimo es el 4% de cemento ya que se obtiene un CBR de 8,12%, respecto al 3% con un CBR de 6,85% y al 2% de cemento que obtiene un 5,60% de CBR. Después de este análisis se observa que mientras más porcentaje de cemento se incrementa en el suelo se obtiene un mejor CBR y recomiendan añadir 4% de cemento ya que además reduce la plasticidad al 8,16% respecto al suelo natural que cuenta con un índice de plasticidad de 22,21%.

En el trabajo investigativo de Badillo y Guachamín [6] cuya finalidad fue realizar un análisis comparativo técnico y económico de acuerdo con los resultados obtenidos de contenido de humedad y capacidad de soporte del suelo mejorado con cal y caucho reciclado de neumáticos. Trabajaron con porcentajes de cal aplicados para la estabilización de 5%, 10% y 15% en tres muestras de suelo diferentes, obteniendo mejores resultados en la muestra 01 que pertenece a una arcilla de baja plasticidad (CL) con valores de CBR al 95% de 44,27% con la adición del 5% de cal, 46,63% con 10% de cal y un valor de CBR de 52,32% con adición de 15% de cal, lográndose ver la gran diferencia frente a suelo no estabilizado, en el que se obtuvo un valor de CBR de 95%. En base a los datos obtenidos concluyen que la estabilización con cal resulta eficiente en los 3 porcentajes aplicados, sin embargo, se obtienen mejores resultados aplicando el 15% de cal.

La conclusión a la que llegan Badillo y Guachamín [6] es que la cal ayuda a controlar el contenido de humedad del suelo ya que genera una reacción exotérmica, al mismo tiempo recalcan que al ser un estabilizador químico requiere mayor cantidad de agua para su hidratación y reacción. Con los resultados obtenidos en su investigación recomiendan la cal viva como estabilizador ya que ayuda a mejorar en gran medida la capacidad del suelo, generando beneficios para ser utilizado como subrasante.

En el artículo científico desarrollado por Castro, Ortiz y Macías [10] cuyo objetivo fue analizar como cambian las propiedades de suelos estabilizados con cal y cemento respecto al suelo natural. Los porcentajes escogidos para la estabilización fueron 3%, 6% y 9%, obteniendo como resultado del ensayo de granulometría que el suelo estudiado corresponde a una Arena Limos (SM) según el método SUCS y de acuerdo con el método AASHTO corresponde al rango A-4 Suelo Limoso. El suelo natural presentó un índice plástico de 5,54 y un CBR de 18,41%. El suelo estabilizado con 3% de cal tuvo un índice plástico de 3,10 y un CBR de 89,26%. Al incrementar 6% de cal se identificó como No Plástico y el CBR mejoró a 173,59%. Los resultados con adición de 9% de cal se mantiene en No Plástico y el CBR es de 148,22%. Con estos datos se evidencia que la cal es un gran estabilizante para los suelos arenosos.

En cuanto a la estabilización con cemento se observa que con la adición del 3% el índice plástico obtenido es 8,41 y el CBR 71,66%. Al añadir 6% el índice plástico disminuye a 8,19 y el CBR aumenta a 141,41%. Finalmente, con 9% de cemento el índice plástico es 7,01 y el CBR aumenta significativamente a 212,10%. Con estos resultados se evidencia que mientras más porcentaje de cemento se añade, la capacidad portante del suelo mejora significativamente.

De acuerdo con el artículo elaborado por Velásquez y Véliz [11] realizaron un estudio de mejoramiento de suelo con adición de cal y cemento en porcentajes de 2%, 4% y 6% evaluando su reacción con cada porcentaje. En los ensayos realizados se observa como el CBR aumenta significativamente, pasando de un CBR de 1,69% del suelo natural a 26,32% con 6% de adición de cal y cemento, notándose la mejora en la capacidad portante del suelo. Además, también reduce la plasticidad de 24,80 a 10,89, volviéndolo un suelo más estable y menos plástico, mejorando su comportamiento frente a deformaciones.

En el artículo realizado por Ayala, Rosadio y Durán [12] se obtienen resultados sobre la estabilización de un suelo arcilloso con ceniza de totora en porcentajes de 10%, 20%, 30% y 40% a través de ensayos de compactación (Proctor modificado), ensayos de resistencia de California (CBR) en el suelo natural y en las mezclas. Los resultados mostraron una mejora en las propiedades mecánicas aumentando el CBR DE 2,2% de suelo natural hasta alcanzar el 9,5% con adición de 20% de ceniza, aumentando 4,3 veces su capacidad de soporte, alcanzando su mejor comportamiento mecánico y convirtiendo el suelo en una subrasante apropiada. No obstante, en porcentajes de adición mayores al 20% se presenta una tendencia de disminución del CBR, esto puede darse debido a que posiblemente la excedencia de ceniza no reaccionó con el suelo, pero sí se hidrató perjudica la interacción de los granos de suelo y los elementos sólidos productos de la reacción puzolánica.

En la tesis titulada Influencia de las cenizas de totora y tuna en las propiedades de la subrasante del Jr. Amazonas elaborada por Aguirre y Garmendia [13] se realizan ensayos para obtener las propiedades físicas y mecánicas. En cuanto al índice plástico del suelo natural se obtuvo un 8%, al añadir una cantidad superior de ceniza de totora el IP disminuye a un 4% con adición del 6,5%. En el valor de CBR se evidenció un impacto significativo ya que inicialmente con el suelo natural se obtuvo un valor de 8,6% al 95% y subió hasta 28,3% con la adición de 16,5% de ceniza de totora, verificando de esta manera que la presencia de ceniza de totora tiene un impacto significativo positivo en la subrasante del suelo.

De acuerdo con el trabajo de Villarreal [14] la incorporación de ceniza de totora en porcentajes de 4%, 8%, 12% y 16% genera variaciones en las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Con el 4% de adición se obtuvo un límite líquido que alcanzó el 32%, el límite plástico fue el 18% y el CBR al 95% fue de 8,10%. Con la adición del 8% el límite líquido aumentó a 33%, el límite plástico a 20% y el CBR al 95% mejoró a 10,50%. Para el 12% el límite líquido incrementó a 35%, el límite plástico a 23%, mientras que el CBR alcanzó 12,50%.

Finalmente, con el 16% de ceniza el límite líquido disminuyó a 33%, el límite plástico aumentó a 24% y se obtuvo el mayor valor de CBR 14,60%. En conclusión, el incremento del contenido de ceniza de totora produjo una mejora progresiva en la capacidad de soporte del suelo, siendo el 16% de adición el porcentaje que presentó el mejor comportamiento mecánico.

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Evaluar experimentalmente la efectividad de la estabilización de suelos arenosos mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora, determinando su influencia en las propiedades de los suelos y su potencial aplicación en proyectos de infraestructura vial.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Realizar un muestreo representativo del suelo arenoso y definir los porcentajes de adición de los materiales estabilizantes como cal, cemento y ceniza de totora.
- 2) Determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso en estado natural y con adición de cal, cemento y ceniza de totora mediante los datos obtenidos en los ensayos de Granulometría, Límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR de laboratorio.
- 3) Elaborar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en los ensayos de los suelos arenosos estabilizados respecto a los suelos no estabilizados, evaluando la viabilidad técnica y económica de la aplicación de estos materiales estabilizantes en la construcción de infraestructuras viales.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

La metodología definida es fundamentalmente experimental, ya que implica la modificación activa y controlada de los porcentajes de estabilizantes en un entorno de laboratorio. La investigación se basará en un enfoque cuantitativo, ya que el estudio se fundamenta en la obtención y comparación numérica de las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso. Se centra en la recopilación y el análisis de datos de laboratorio como los valores del Índice de Soporte de California (CBR) obtenidos de la experimentación con diferentes dosificaciones de cal, cemento y ceniza de totora. Este enfoque busca cuantificar el grado de mejora y establecer los porcentajes de adición óptimos para validar o refutar la hipótesis de que la adición de los materiales estabilizantes produce mejoras significativas en las propiedades del suelo arenoso.

La investigación se considera de carácter descriptiva ya que se obtienen las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso y de las diferentes dosificaciones con los estabilizantes. También se considera explicativo debido a que explica en qué porcentaje de adición se observan mejoras en las propiedades y de esta manera justificar su viabilidad técnica en la infraestructura civil.

La metodología se organiza en tres fases: la primera fase se centra en la recolección del suelo arenoso y los materiales adicionados como cal, cemento y ceniza de totora, además de la determinación de los porcentajes de estabilizantes a aplicarse. La segunda fase comprende la evaluación de las propiedades tanto del suelo natural como el suelo con adición de estabilizantes mediante los ensayos de Granulometría, Límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR de laboratorio. La tercera fase abarca el análisis comparativo de los resultados obtenidos en los ensayos y evaluar la viabilidad técnica y económica de la aplicación de estos materiales en la construcción de infraestructuras viales.

I. EQUIPOS Y MATERIALES

Para la correcta ejecución del proyecto se utilizaron varios equipos técnicos y materiales que permitieron lograr los objetivos. En cada fase se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

A. FASE 1

Para la selección y recolección del suelo arenoso se optó por un muestreo dirigido a zonas que cuentan con este tipo de suelo, enfocado principalmente en la zona centro del país como es la provincia de Tungurahua, específicamente del sector la Libertad en la Parroquia Huachi

Grande que es rica en suelo arenoso. El muestreo se realizó con herramientas manuales como el azadón y la pala, y para tomar las medidas de la calicata se usó un flexómetro. Posteriormente se colocó el suelo en fundas y sacos etiquetados para transportarlos al laboratorio. Se usaron fundas con la finalidad de mantener el contenido de humedad propio del suelo para los ensayos que lo requieren. Adicionalmente se utilizó la aplicación Brújula y Google Earth para obtener las coordenadas de los lugares en los que se tomaron las muestras.

También con la ayuda de una hoz se recolectó la planta de totora en zonas húmedas que es en donde se reproduce, posteriormente se dejó secar la planta al aire libre, seguida de la calcinación controlada en el horno hasta obtener la ceniza. Para conocer la temperatura de calcinación se realizó el ensayo de temperatura de calcinación para el que se usaron equipos especializados como la mufla, crisoles, pinzas, desecador y balanza analítica. Además, se realizaron pruebas de calcinación en el Laboratorio de Ingeniería Civil utilizando mechero bunsen de llama vertical y termómetro láser digital para medir la temperatura. Para calcinar toda la muestra de totora se elaboró un horno artesanal controlando la temperatura con la cámara termográfica y termómetro laser digital (ver TABLA I).

Adicionalmente, se seleccionaron los estabilizantes tradicionales que son la cal y el cemento, considerando sus características técnicas y la disponibilidad comercial que tienen estos. Para determinar los porcentajes de adición de cal, cemento y ceniza de totora, se utilizó una computadora, artículos científicos, trabajos de investigación y libros para investigar y obtener los porcentajes con los que se dieron los mejores resultados de estabilización.

TABLA I
MATERIALES PARA EL ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN
DE LA TOTORA

DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN DE LA TOTORA		
Norma	NTE INEN 520:2012	
Instrumento	Fotografía	Detalle
Mufla		- Marca Barnstead Thermolyne - Laboratorio FCIAB-UTA

Crisoles		- Laboratorio FCIAB-UTA
Pinza		- Laboratorio FCIAB-UTA
Desecador		- Laboratorio FCIAB-UTA
Balanza analítica		- Marca Mettler Toledo - Laboratorio FCIAB-UTA
Bunsen de llama vertical		- Laboratorio FCIAB-UTA - Laboratorio Mecánica FICM-UTA
Termómetro laser digital		- Laboratorio Mecánica FICM-UTA

B. FASE 2

En esta fase se realizaron los diferentes ensayos para obtener las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso natural y el suelo con adición de cal, cemento y ceniza de totora.

Para el ensayo de análisis granulométrico se utilizaron los tamices #4, #10, #40, #60, #100, #200 y la fuente (ver TABLA II) [5]. También se usó la tamizadora, la cual ayudará a agitar los tamices para el suelo más fino. (ver TABLA III).

TABLA II
ABERTURA DE TAMICES

TAMIZ	Abertura (mm)
Nº 4	4,75
Nº 10	2,00
Nº 40	0,43
Nº 60	0,25
Nº 100	0,13
Nº 200	0,05
FUENTE	

TABLA III
INSTRUMENTOS Y EQUIPOS PARA EL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		
Normas	AASHTO T 88-70 y ASTM D 422-63.	
Instrumento	Fotografía	Detalle
Balanza		- Marca Shimadzu - Laboratorio FICM-UTA
Tamizadora		- Marca Shaker - Laboratorio FICM-UTA

Tamices		- Laboratorio FICM-UTA
Moldes		- Laboratorio FICM-UTA

Para el ensayo de límites de Atterberg como el límite líquido y el límite plástico, se usó solamente el suelo que pasó por el tamiz #40. Los equipos requeridos para el ensayo de límite líquido fueron la Copa Casagrande, un acanalador, un mortero de porcelana y una espátula. Para el ensayo de límite plástico se usó una placa de vidrio para hacer los rollos de suelo, un mortero de porcelana y una espátula [15]. (ver TABLA IV).

TABLA IV
INSTRUMENTOS PARA LOS ENSAYOS DE LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO

LÍMITES DE ATTERBERG		
Normas	AASHTO T89, AASHTO T90 y ASTM D 4318.	
Instrumento	Fotografía	Detalle
Copa Casagrande		- Laboratorio FICM-UTA

Acanalador	 A metal tool with a curved blade and a handle, used for shaping or cutting.	- Laboratorio FICM-UTA
Recipientes	 Two circular metal containers. The top one has the number '14' written on it. The bottom one contains a dark, granular substance.	- Laboratorio FICM-UTA
Espátula	 A metal spatula with a flat blade and a handle, used for mixing or spreading.	- Laboratorio FICM-UTA
Mortero de porcelana	 A white ceramic mortar with a wide, shallow bowl and a small spout, used for grinding or mixing.	- Laboratorio FICM-UTA
Placa de vidrio	 A dark, rectangular glass plate or cover, used for covering or protecting.	- Laboratorio FICM-UTA

Apisonador		- Laboratorio FICM-UTA
------------	---	------------------------

En el ensayo Proctor modificado, se usó el suelo que pasó por el tamiz #4, y los equipos son un molde cilíndrico metálico, el cual se colocó sobre una base plana y se complementó con un collarín en la parte superior y una retorta en la parte inferior. También un martillo de compactación, el cual proporciona la energía de compactación necesaria conforme a las especificaciones normativas. Adicionalmente, se utilizó una probeta graduada para medir con precisión el volumen de agua requerido durante el ensayo. (ver TABLA V).

TABLA V
EQUIPOS E INSTRUMENTOS PARA EL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO

PROCTOR MODIFICADO		
Normas	AASHTO T 180 y ASTM D 1557	
Instrumento	Fotografía	Detalle
Molde cilindrico		- Marca Controls - Laboratorio FICM-UTA
Collarín		- Laboratorio FICM-UTA

Retorta		- Laboratorio FICM-UTA
Martillo Compactador		- Marca Controls - Modelo 33-T0076 - Laboratorio FICM-UTA
Bandeja		- Laboratorio FICM-UTA
Alicate		- Laboratorio FICM-UTA
Horno		- Marca Humbolt - Temperatura 110°C +- 10 - Laboratorio FICM-UTA
Probeta		- Marca Brand - Laboratorio FICM-UTA

Balanza		- Laboratorio FICM-UTA
Enrasador		- Laboratorio FICM-UTA

Para el ensayo CBR se utilizaron los valores de humedad óptima obtenidos previamente en el ensayo Proctor modificado. El equipo usado es el mismo del Proctor modificado, incluyendo pesas metálicas con anillos metálicos de $4,54 \pm 0,02$ kg y pesas ranuradas de $2,27 \pm 0,02$ kg; y una máquina Multispeed que se utilizará para aplicar una carga de penetración mediante un pistón sobre la muestra previamente sumergida. En el caso del suelo estabilizado con cemento la máquina Multispeed llegó a su capacidad máxima por lo cual se adaptó la máquina de compresión simple con un cilindro de 2 pulgadas de diámetro y 10 cm de longitud. (ver TABLA VI).

TABLA VI
EQUIPOS E INSTRUMENTOS PARA EL ENSAYO CBR

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)		
Norma	AASHTO T 193	
Instrumento	Fotografía	Detalle
Máquina multispeed		- Laboratorio FICM-UTA

Pesas metálicas		- Laboratorio FICM-UTA
Molde cilíndrico		- Marca Controls - Laboratorio FICM-UTA
Collarín		- Laboratorio FICM-UTA
Retorta		- Laboratorio FICM-UTA
Martillo Compactador		- Marca Controls - Modelo 33-T0076 - Laboratorio FICM-UTA
Bandeja		- Laboratorio FICM-UTA

Alicate		- Laboratorio FICM-UTA
Horno		- Marca Humbolt - Temperatura 110°C +- 10 - Laboratorio FICM-UTA
Probeta		- Marca Brand - Laboratorio FICM-UTA
Balanza		- Laboratorio FICM-UTA
Enrasador		- Laboratorio FICM-UTA

C. FASE 3

Para desarrollar el análisis comparativo de los datos recopilados se utilizó herramientas digitales como Excel, que permitió realizar los cálculos, tablas y gráficas comparativas de las diferentes propiedades del suelo. En esta fase se consolidaron los hallazgos, permitiendo emitir conclusiones y recomendaciones con evidencia técnica sobre estos materiales estabilizantes en la construcción de infraestructuras viales. Además, para la evaluación económica se usó Punish para el análisis de precios unitarios.

II. MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se realizaron ensayos de laboratorio mediante procedimientos técnicos y normalizados orientados a evaluar el comportamiento del suelo natural y el suelo estabilizado con cal, cemento y ceniza de totora. Todos los ensayos se realizaron en base a las normas AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing and Materials) e INEN (Servicio Ecuatoriano de Normalización) para asegurar resultados confiables y técnicamente validados que permitieron comparar los valores obtenidos en las propiedades físicas y mecánicas del suelo en estado natural y del suelo estabilizado con cal, cemento y ceniza de totora.

A. FASE 1

En esta fase se llevaron a cabo las actividades en campo, enfocadas principalmente en la identificación y reconocimiento del sector La Libertad de Huachi Grande que fue el lugar escogido debido a que predomina el suelo arenoso. También se seleccionó el lugar para obtener la totora, determinándose el sector Totoras debido a su riqueza en estas plantaciones, posteriormente se realizó el proceso para obtener la ceniza y los porcentajes que se van a utilizar.

1) Recolección de las muestras de suelo

Para escoger el sector en el que se realizó el muestreo el enfoque se basó en identificar lugares con antecedentes que confirmen la presencia de suelos arenosos. Por esta razón después del análisis se enfocó en 3 lugares del sector La Libertad de Huachi Grande, en base a los antecedentes y Mapas de Órdenes de suelos en el Ecuador que dicen que este sector cuenta con la presencia abundante de suelos arenosos.

El muestreo se realizó mediante la apertura de calicatas de dimensiones 1,00 m de largo, 1,00 m de ancho y 1,00 m de profundidad, previamente se limpió la capa vegetal (Fig. 1). Este procedimiento permitió obtener suelo característico de la subrasante, asegurando que las muestras sean adecuadas para la evaluación de sus propiedades.



Fig. 1. Recolección de las muestras de suelo.

La primera muestra de suelo (M1) se obtuvo de un terreno ubicado al lado de la cancha del sector de La Libertad (Fig. 2). Las coordenadas son las siguientes:

- Zona: 17
- Este: 760604
- Sur: 9853252



Fig. 2. Ubicación de la primera muestra de suelo.

La segunda muestra de suelo se consiguió de un terreno ubicado al lado de la Feria de ganado de La Libertad (Fig. 3). Las coordenadas son las siguientes:

- Zona: 17
- Este: 760416
- Sur: 9853632
- Altitud: 3083.2 m.s.n.m.



Fig. 3. Ubicación de la segunda muestra de suelo.

La tercera muestra de suelo se adquirió de un terreno baldío (Fig. 4). La ubicación está dada por las siguientes coordenadas:

- Zona: 17
- Este: 760047
- Sur: 9853855
- Altitud: 3070 m.s.n.m.

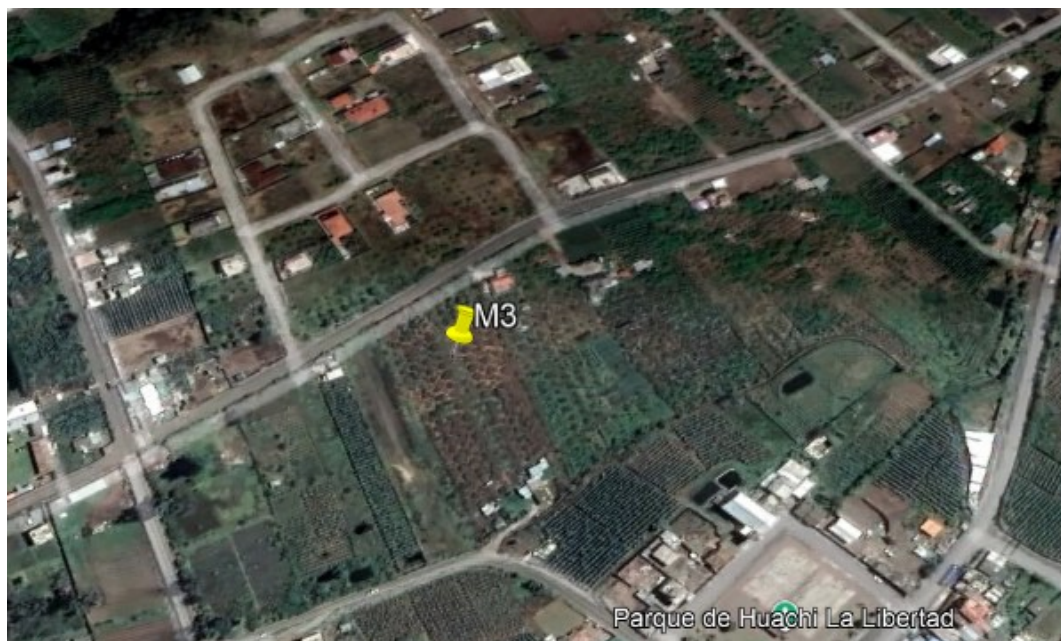


Fig. 4. Ubicación de la tercera muestra de suelo.

Una vez extraídas, las muestras de suelo fueron almacenadas de manera adecuada para preservar su contenido de humedad natural, envolviéndolas y sellándolas correctamente durante su traslado al laboratorio. Posteriormente, el suelo necesario para los otros ensayos se secó de manera natural para que estén adecuados para utilizarlos en los diferentes ensayos y para la elaboración de las mezclas con estabilizantes.

2) *Ceniza de Totorá*

Para la obtención de la ceniza de totora se realizaron una serie de pasos y pruebas de calcinación con la finalidad de tener un estabilizante adecuado de acuerdo con las normas establecidas.

a) *Recolección de la totora*

En primer lugar, se identificó los lugares en los que se reproduce la planta de totora y se llevó a cabo un recorrido visual, seleccionando a la parroquia Totoras en el cual se identificaron diferentes terrenos con plantaciones, evidenciando la abundante presencia de plantas de totora.



Fig. 5. Recolección de la planta de totora.

Inicialmente se cortó la planta con cuidado y se retiró cualquier material extraño, posteriormente se dejó secar al aire libre durante un periodo de 3 a 4 semanas (Fig. 6) reduciendo de esta manera el contenido de humedad y facilitando el proceso de calcinación.



Fig. 6. Secado de la planta de totora.

b) Ensayo para determinar la temperatura de calcinación de la totora

Se realizó el ensayo de calcinación según la Norma NTE INEN 520:2012 “Determinación de la ceniza” para obtener la temperatura correcta a la cual se obtiene la ceniza. Debido a los materiales que se necesitan, se usó el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para iniciar con el ensayo primero se calentaron los crisoles de porcelana vacíos en la mufla

a una temperatura de 550°C durante 30 minutos, transcurrido este tiempo se dejaron enfriar en el desecador y se pesaron en la balanza (Fig. 7). Seguidamente se colocaron entre 3 y 5 gramos de la muestra de totora en cada uno de los 6 crisoles y se tomó el peso exacto.



Fig. 7. Calentamiento de los crisoles para el ensayo de determinación de temperatura de calcinación.

Posteriormente se realizó una calcinación previa con un mechero bunsen vertical para eliminar toda la materia orgánica volátil, calcinando la totora hasta que no salga humo de las muestras (Fig. 8)



Fig. 8. Calcinación previa de la planta de totora.

Después se introdujeron los crisoles con las muestras pre-calcinadas en la mufla a una temperatura de 550°C durante cuatro horas. Pasado este tiempo obtuvimos las muestras de ceniza color blanco lo que quiere decir que el tiempo y la temperatura empleados son los correctos (Fig. 9). [16]



Fig. 9. Calcinación de la totora en laboratorio.

Durante este proceso se registró el peso inicial y final del material, lo que permitió determinar el rendimiento de ceniza y asegurar su adecuada preparación para ser utilizada como aditivo en la estabilización del suelo [15], [17].

c) Calcinación de la totora

La calcinación controlada de la planta de totora se realizó bajo los parámetros obtenidos en el ensayo de determinación de la temperatura de calcinación realizado en el laboratorio. Para lo cual se elaboró un horno artesanal que cumpla o se asemeje a los materiales usados en el laboratorio (Fig. 10).



Fig. 10. Horno artesanal para calcinación.

En un tanque metálico se realizó un agujero en la parte inferior para que pueda ingresar la llama de manera vertical. Aquí se introdujo la totora y se pre-calcinó, pasada esta etapa se tomó en cuenta la temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ para obtener la ceniza (Fig. 11).



Fig. 11. Control de la temperatura de calcinación de la totora.

Para controlar la temperatura, se midió la temperatura con un termómetro láser digital para asegurar que se mantenga constante. Finalmente se dejó enfriar en el mismo tanque metálico y posteriormente se almacenó la ceniza obtenida en fundas plástica selladas, protegiéndola de la humedad (Fig. 12).



Fig. 12. Calcinación de la totora.

d) Tamizado de la ceniza

Según la norma ASTM C618-08 indica que el material de ceniza utilizado para mejoramientos debe pasar por completo el tamiz #200 (0,075mm) por tratarse de partículas finas, por lo cual se tamizó la ceniza obtenida por el tamiz mencionado para cumplir con las normas establecidas y obtener mejores resultados de estabilización (Fig. 13). Este procedimiento permitió obtener ceniza homogénea y adecuada para su incorporación con el suelo natural [18].



Fig. 13. Tamizado de la ceniza.

e) Composición de la ceniza

Se realizó un análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X en la Escuela Politécnica Nacional en la ciudad de Quito a partir del cual se obtuvo la composición química y propiedades físicas fundamentales de la ceniza obtenida.

3) Cal y Cemento

La cal y el cemento se seleccionaron y compraron de acuerdo con criterios técnicos y experiencias previas con la finalidad de analizar su influencia en el comportamiento del suelo arenoso.

Se compró y utilizó el cemento Portland Puzolánico Tipo IP de la marca Selvalegre (Fig. 14).

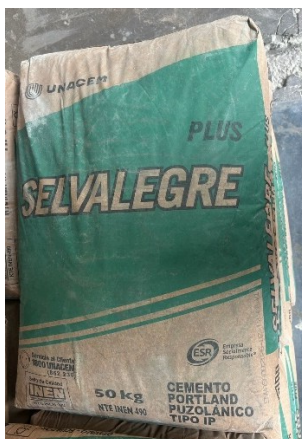


Fig. 14. Cemento Selva Alegre.

En cuanto a la cal, de igual manera se compró y utilizó la siguiente cal (Fig. 15).



Fig. 15. Cal viva.

B. FASE 2

En esta fase de investigación en laboratorio el objetivo principal fue determinar las características físicas y las propiedades del suelo en estado natural y con los diferentes porcentajes de adición de cal, cemento y ceniza de totora.

Para conocer las características y propiedades del suelo estudiado se realizaron ensayos de laboratorio como análisis granulométrico, límites de Atterberg, ensayo Proctor modificado y el Índice de Soporte de California (CBR). Los resultados obtenidos de los ensayos permitieron conocer las propiedades del suelo en estado natural y en el suelo estabilizado para posteriormente compararlos y evaluar los cambios producidos en términos de compactación, resistencia y capacidad de soporte.

Todos los ensayos fueron realizados de acuerdo con las normas técnicas vigentes, principalmente las establecidas por AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing and Materials) e INEN (Servicio Ecuatoriano de Normalización). A continuación, se detallan los métodos de ejecución de cada ensayo y las fórmulas de cálculo correspondientes vinculadas al análisis de los resultados, con el fin de asegurar una interpretación clara y técnica de la información obtenida y facilitar su aplicación en el análisis y discusión de resultados del estudio.

1) Análisis Granulométrico

Se define como la distribución en porcentaje de los distintos tamaños de las partículas que conforman una muestra de un suelo, es decir, divide y clasifica los granos del suelo conforme a sus tamaños. Se presentan varios métodos para hallar la granulometría de los suelos, entre ellos se encuentra el tamizado utilizado típicamente para suelos con partículas gruesas (gravas y arenas) [17], [19].

En la construcción de vías este ensayo es de suma importancia debido a que la granulometría influye directamente en la resistencia del material, evaluando si es un tipo de suelo apropiado o no, además permitió conocer la distribución de los tamaños de las partículas de suelo de cada muestra. Con esta información se entendió la respuesta del suelo analizado frente a los procesos de compactación y su desempeño como subrasante [15]. Para la realización del análisis granulométrico se siguieron los criterios establecidos en las normas AASHTO T 88-70 y ASTM D 422-63.

El análisis granulométrico se realizó con el uso de una serie de tamices de abertura circular, que permitieron clasificar las partículas en diferentes rangos de tamaño. Para este proceso de separación de material se realizó el proceso de tamizado mecánico por vibración, asegurando una clasificación adecuada de las partículas. Los resultados se expresarán en términos porcentuales, considerando el peso retenido en cada tamiz en relación con el peso total de la muestra analizada [15], [17].

Para la ejecución del ensayo se seleccionó una muestra representativa de suelo, con un peso aproximado de 1000 gramos, éste debe estar previamente seco: expuesto al sol o secado en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por un tiempo de 24 horas ± 5 horas. Posteriormente, la muestra se sometió al tamizado mediante una serie de tamices normalizados, ordenados de mayor a menor abertura, comprendidos entre el tamiz N.º 4 (4,76 mm) y el tamiz N.º 200 (0,075

mm) (Fig. 16) [15], [20].



Fig. 16. Ensayo de granulometría.

En la tamizadora mecánica se colocaron los tamices ordenados, en la cual se mantiene en vibración durante mínimo 5 minutos como lo establece la norma; para este caso se dejó un lapso de 15 minutos, asegurando una adecuada separación de las partículas. Seguido, se toman los pesos retenidos en cada tamiz permitiendo calcular los porcentajes correspondientes en relación con el peso total de la muestra para poder graficar la curva granulométrica.

Para obtener el valor del porcentaje retenido se usó la ecuación 1:

$$\%ret = \frac{W_r}{W_t} * 100 \quad (1)$$

Donde,

$\%ret$ valor de porcentaje retenido (%).

W_r peso de partículas retenido (g).

W_t peso total de la muestra (g).

En el caso del valor del porcentaje que pasa por cada uno de los tamices se realiza la siguiente resta mostrada en la ecuación 2:

$$\%pasa = 100 - \%retenido \quad (2)$$

Donde,

%*pasa* valor de porcentaje que pasa (%).

%*retenido* valor de porcentaje retenido (%).

Para obtener la curva granulométrica se graficó en escala semilogarítmica de cuatro ciclos, en la cual se ubican los porcentajes acumulados en el eje vertical y en el eje horizontal en escala logarítmica el tamaño de las partículas en pulgadas, centímetros o numeración de tamices (Fig. 17).

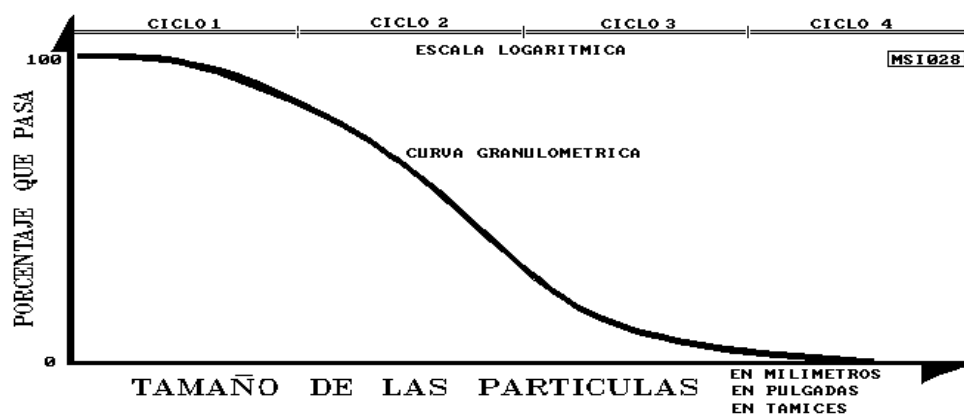


Fig. 17. Gráfica curva granulométrica.

De la curva granulométrica obtenida, se puede analizar dependiendo su pendiente. Si la curva es muy vertical pertenece a suelos mal graduados, si la curva es horizontal significa que tiene mala distribución de partículas y si tiene una pendiente moderada se consideran suelos bien distribuidos (Fig. 18).

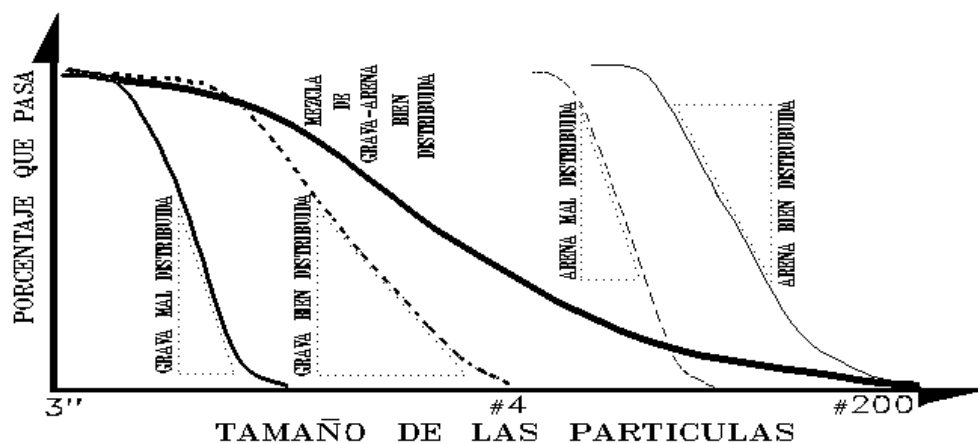


Fig. 18. Pendientes de la curva granulométrica.

A partir de la información obtenida se calcularon parámetros granulométricos como el tamaño nominal máximo, (TNM) el diámetro efectivo (D10), diámetro equiparable (D30), diámetro dimensional (D60), coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc), que permiten evaluar el grado de gradación del suelo y su influencia en el comportamiento mecánico [15].

a) Tamaño nominal máximo

Se denomina al tamaño de partículas mayores encontrados en la muestra, también se define como el grupo de partículas que alcanzan el 5% de la muestra total.

b) Diámetro efectivo (D10)

Es el tamaño de la muestra que representa el 10% del material que pasa y se expresa en milímetros [21].

c) Diámetro equiparable (D30)

Es el tamaño de la muestra que representa el 30% del material que pasa y se expresa en milímetros [21].

d) Diámetro dimensional (D60)

Es el tamaño de la muestra que representa el 60% del material que pasa y se expresa en milímetros [21].

e) Coeficiente de uniformidad (Cu)

El resultado obtenido expresa que, si el número del Cu decrece, la uniformidad aumenta y se calcula con la ecuación 3. Es decir, si Cu es mayor que 3 se considera un suelo bien graduado, en cambio si Cu es menor que 3 el suelo tiende a ser mal graduado o muy uniforme.

$$Cu = \frac{D60}{D10} \quad (3)$$

Donde:

D10 Diámetro que corresponde al 10 % de suelo que pasa.

D60 Diámetro que corresponde al 60 % de suelo que pasa.

f) Coeficiente de curvatura (Cc)

Sirve para determinar la graduación del material, mediante la ecuación 4. En los resultados, si Cc está entre 1 y 3 el suelo está bien graduado, por otro lado, si Cc es menor que 1 o mayor que 3 el suelo es mal graduado o el suelo está uniformemente distribuido.

$$Cc = \frac{(D_{30})(D_{30})}{D_{60} * D_{10}} \quad (4)$$

Donde:

D10 Diámetro que corresponde al 10 % de suelo que pasa.

D30 Diámetro que corresponde al 30 % de suelo que pasa.

D60 Diámetro que corresponde al 60 % de suelo que pasa

2) Límites de Atterberg

La plasticidad es la propiedad que tienen los suelos para poder deformarse, hasta cierto límite sin romperse y para conocerla se usó los límites de Atterberg [21]. Esta propiedad determina que algunos suelos son capaces de resistir deformaciones rápidas sin desmoronarse, sin agrietarse, sin producir rebote elástico y sin variación volumétrica apreciable [19].

Los límites de Atterberg son parámetros utilizados para describir el comportamiento de los suelos finos en función del cambio de humedad y de su consistencia, por medio de los cuales se presentan cuatro estados de consistencia: sólido, semi-sólido, plástico y líquido [21]. Estos límites permiten identificar los cambios de estado que experimenta un suelo cuando pasa de una condición sólida a una plástica y, finalmente, a un estado líquido, lo cual resulta fundamental para evaluar su comportamiento en obras civiles [22].

- Estado sólido: es la condición en la que el suelo alcanza su estabilidad, ya que los cambios de humedad no generan cambios en su volumen. En este estado el suelo tiene un comportamiento mecánico óptimo [19].
- Estado semi-sólido: es la condición en la que el suelo tiene apariencia de un sólido,

sin embargo, aún reduce su volumen al perder humedad. También, deja de ser moldeable, ya que se agrieta y desmorona antes de cambiar su forma. En este estado su comportamiento mecánico es aceptable [19].

- Estado plástico: es la condición en la que el suelo se comporta plásticamente, se puede moldear fácilmente y presenta grandes deformaciones bajo la aplicación de pequeñas fuerzas, aunque vuelve a su estado inicial cuando cesa la aplicación de la fuerza [19].
- Estado líquido: es la condición que se presenta cuando la cantidad de agua es excesiva, generando que el suelo adopte apariencias de una suspensión o líquido viscoso. Esto anula las fuerzas de cohesión entre partículas y su resistencia al corte [19].

Los valores que marcan el cambio entre estos estados son el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, estos se usan ampliamente ya que se correlacionan con la permeabilidad, compactibilidad, contracción y resistencia al corte hidráulico [23]. Para obtener estos valores se rigen en las normas AASHTO T89, AASHTO T90 y ASTM D 4318.

a) *Límite líquido*

Es el contenido de humedad del suelo expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, este límite representa el cambio de estado líquido a estado plástico [21]. Cuando los suelos alcanzan porcentajes de humedad mayores al límite líquido, su comportamiento será el de un fluido viscoso [15].

El ensayo de Límite Líquido se llevó a cabo siguiendo las normas AASHTO T 89 y ASTM D 4318. Para realizar este ensayo la norma establece usar una muestra de suelo seca de un peso aproximado de 100 g, previamente pasada por el tamiz N.º 40 (0,43 mm). Con la muestra lista, se colocó en el mortero de porcelana y homogenizó mediante la adición gradual de agua hasta alcanzar la consistencia adecuada para alcanzar los rangos de golpes 1-10, 11-20, 21-30, 31-40. Éste suelo se colocó en la Copa de Casagrande y extendió con ayuda de la espátula hasta obtener una superficie sin irregularidades de una profundidad aproximada de 10 mm en la parte más profunda [15], [24].

Posteriormente se realizó una ranura en el centro, de arriba hacia abajo evitando rasgar los lados y se procedió a girar la manivela de la Copa Casagrande con una velocidad de

aproximadamente 2 golpes por segundo hasta que el talud de la ranura se cierre a lo largo de aproximadamente 13 mm como lo estipula la norma. Se registró el número de golpes al que se unieron las mitades y tomó una muestra de aproximadamente 10 g de cada lado del lugar en donde se unieron, se pesó y colocó en el horno para determinar su contenido de humedad. Este procedimiento se repite varias veces, ajustando el contenido de humedad de la muestra, hasta obtener los diferentes números de golpes establecidos en los rangos que se plantearon que están por debajo y por arriba de los 25 golpes que es en donde se realizó la lectura para obtener el límite líquido (Fig. 19) [15], [25], [26].



Fig. 19. Ensayo límite líquido en laboratorio.

La curva de escurrimiento representa la relación entre el contenido de humedad (escala normal o aritmética en porcentaje) y el número de golpes (escala logarítmica) y se trazó una línea para posteriormente tomar el límite líquido en los 25 golpes que teóricamente significa que el suelo alcanza una resistencia al corte (Fig. 20).

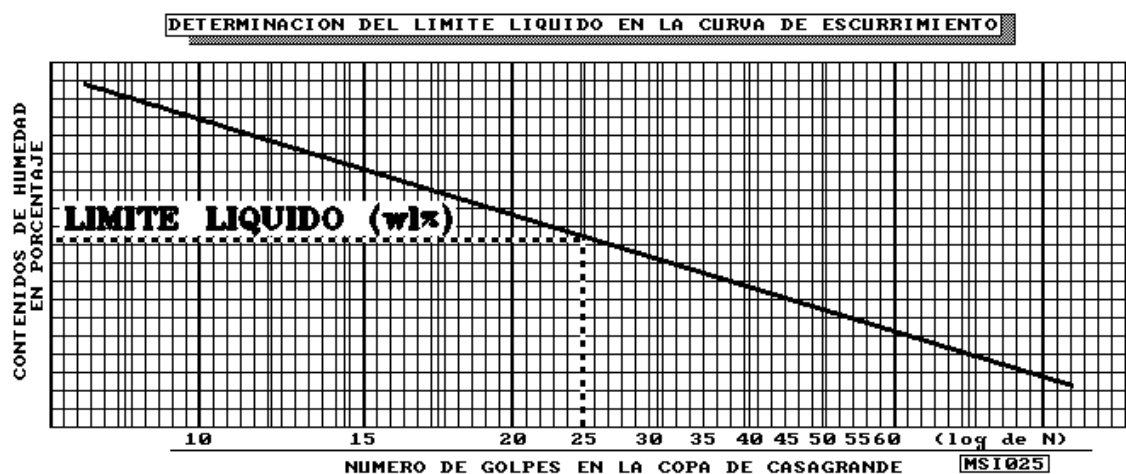


Fig. 20. Gráfica del ensayo de límite líquido.

b) Límite plástico

Se entiende como la frontera que existe entre el estado plástico y el estado semisólido del suelo [15]. Este estado se define como el contenido de humedad en el que el suelo en estado plástico deja de ser moldeable y empieza a agrietarse bajo la acción de una fuerza aplicada, pero no pierde sus propiedades plásticas; representa el contenido de humedad mínimo con el cual el suelo puede manejarse sin deteriorar su estructura. [19]. En términos de laboratorio este límite se identifica como el contenido de humedad en el que los rollitos de aproximadamente 3 mm de diámetro comienzan a agrietarse y desintegrarse durante el proceso de manipulación [15].

El ensayo para determinar el límite plástico se realizó de acuerdo a las normas AASHTO T 90 (2016) y ASTM D 4318, utilizando el método de enrollado a mano. Para iniciar se usó una muestra de suelo seco previamente pasada por el tamiz N.º 40 (0,43 mm) y se humedeció gradualmente hasta alcanzar una consistencia uniforme, adecuada para su manipulación. A partir de esta mezcla se tomó una pequeña porción y utilizando una placa de vidrio se moldeó el suelo manualmente hasta formar hilos (cilindros, gusanitos) de aproximadamente 3 mm de diámetro en un tiempo no mayor a 2 minutos según estipula la normativa, se considera que el proceso terminó cuando al llegar al diámetro esperado se observan pequeñas fisuras, sin embargo, durante el proceso se procura que no se presenten fisuras ni desintegración [17], [23], [27]. Si al alcanzar el diámetro de 3 mm no presenta desintegración o fisuras significa que el suelo tiene una humedad superior a su límite plástico y hay que repetir el proceso hasta lograr las fisuras a los 3mm (Fig. 21) [15].



Fig. 21. Ensayo límite plástico en laboratorio.

Cada rollito se colocó en un recipiente previamente pesado y posteriormente secado en horno durante 24 horas para determinar su contenido de humedad. Este procedimiento se repitió con varias muestras, hasta completar un total de seis determinaciones para calcular un valor promedio de los contenidos de humedad correspondientes a los rollitos moldeados para obtener el límite plástico [15].

c) Índice plástico

Se define como la diferencia numérica entre los valores de Límite Líquido y Límite Plástico, es decir es el porcentaje de agua gravimétrico entre el límite superior y el límite inferior de la plasticidad [19]. El índice plástico generalmente depende de la cantidad de arcilla del suelo, y para encontrar este límite se utiliza la ecuación 5:

$$IP = LL - LP \quad (5)$$

Donde:

LL Límite líquido

LP Límite plástico

Según Atterberg, cuando el índice de plasticidad es igual a cero se considera un suelo no plástico; cuando el índice plástico es menor a 7 el suelo presenta una baja plasticidad lo que significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. En cambio, cuando el índice plástico está comprendido entre 7 y 17 se considera un suelo medianamente plástico y mayor a 17 es un suelo de plasticidad alta que indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua [15], [21].

3) Clasificación de los suelos

Para la clasificación de los suelos se han ido desarrollando diferentes sistemas a lo largo del tiempo, con la finalidad de agrupar y categorizar los diferentes tipos de suelo según su comportamiento, características geotécnicas, respuesta mecánica y desempeño en obras civiles [5]. La clasificación facilita la evaluación del material y apoya en la toma de decisiones relacionadas con su uso en obras civiles de infraestructura, pavimentos y diversos proyectos.

Existen varios sistemas de clasificación de suelos, pero los más usados son: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) ya que consideran la granulometría y la plasticidad como partes importantes para determinar el tipo de suelo.

a) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

Es un sistema desarrollado en 1929 como el Sistema de Clasificación de Administración de Carreteras. Inspirado en la casa de Casagrande, se basa en la granulometría del suelo enfocada principalmente en los tamices N° 10, N° 40 y N° 200. A partir de esto, clasifica los suelos en siete grupos principales A-1 hasta A-7; de los cuales los grupos A-1, A-2 y A-3 corresponden a materiales granulares ya que el 35% o menos de sus partículas atraviesan el tamiz N° 200. Por otra parte, los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son los grupos en los que más del 35% pasan el tamiz N° 200. [28].

La primera categoría comprende los grupos A-1, A-2 y A-3. El grupo de suelos A-1 está conformado por gravas, arenas y fragmentos de rocas de buena calidad, subdividiéndose en A-1-a y A-1-b de acuerdo con el contenido de material fino presente. En cambio, el grupo A-2 comprende las mezclas de arenas, gravas, limos o arcillas en proporciones variables, estableciendo los subgrupos A-2-4, A-2-5, A-2-6 y A-2-7. De igual manera en el grupo A-3 se encuentran las arenas finas que presenten bajo contenido de partículas. Los materiales de esta primera categoría generalmente son adecuados para subrasantes puesto que presentan buena capacidad de soporte. [24], [28].

La segunda categoría está conformada por suelos de partículas finas, en la que predominan los materiales limosos y arcillosos. Los grupos A-4 y A-5 se caracterizan principalmente por su mayor contenido de limo (índice de plasticidad de 10 o menos), y en los grupos A-6 y A-7 predomina la arcilla (índice de plasticidad de 11 o más). A su vez, el grupo A-7 se subdivide en A-7-5 y A-7-6, diferenciación que se realiza a través del límite líquido y el índice de plasticidad [24], [28]. Los suelos pertenecientes a esta categoría presentan condiciones poco favorables para ser usados como subrasantes, debido a su elevada sensibilidad a la humedad y a su menor estabilidad mecánica.

TABLA VII
CLASIFICACIÓN DE LA NORMA AASHTO PARA MATERIALES GRANULARES

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

TABLA VIII
CLASIFICACIÓN DE LA NORMA AASHTO PARA MATERIALES LIMO-ARCILLOSOS

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

La carta de plasticidad es una alternativa para clasificar los suelos, en esta se representa gráficamente la relación entre el límite líquido y el índice de plasticidad. Se identifica el tipo de suelo e interpreta su comportamiento geotécnico gracias a las delimitaciones por zonas asociadas a las diferentes características de plasticidad (Fig. 22).

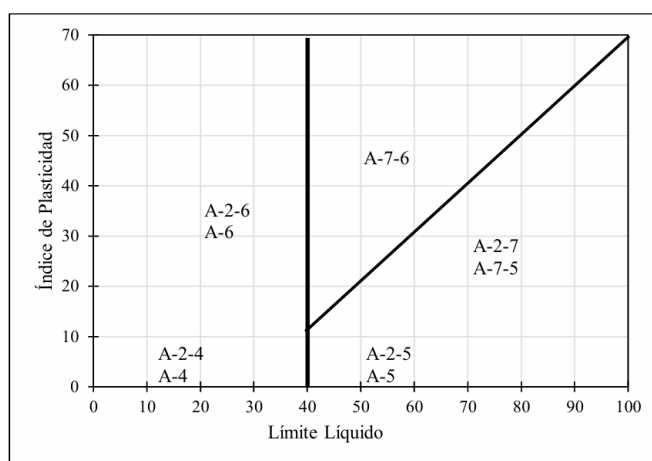


Fig. 22. Carta de plasticidad de la norma AASHTO.

b) Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El Sistema SUCS clasifica los suelos a partir de su granulometría, límites de Atterberg y contenido en materia orgánica [5]. Es uno de los sistemas más utilizados en la actualidad, encontrándose normalizado por la norma ASTM D 2487 en la cual se divide en 2 ramas principales de acuerdo al tamaño predominante de sus partículas.

La primera rama se caracteriza por tener menos del 50% del material pasado por el tamiz N°200 y corresponde a suelos de grano grueso: gravas (G) y arenas (S). En la segunda rama se encuentran los suelos de grado fino, en los que el 50% o más de suelo pasan en tamiz N° 200 y son los suelos limos orgánicos (M), arcillas inorgánicas (C), limos y arcillas de origen orgánico (O). [28], [29].

Para realizar una clasificación adecuada de acuerdo a este sistema se necesita conocer el porcentaje de grava (material retenido en el tamiz N° 4), el porcentaje de arena (fracción que pasa el tamiz N° 4 y es retenida por el tamiz N° 200), el porcentaje de limo y arcilla (material que pasa el tamiza N° 200), el coeficiente de uniformidad (Cu), el coeficiente de gradación (Cc), el límite líquido y el índice de plasticidad de la muestra.

Finalmente, para una identificación más precisa, se incorporan símbolos que describen las propiedades granulométricas y de plasticidad del suelo: suelo bien gradado (W), suelo pobremente gradado (P), materiales de baja plasticidad con límite líquido menos a 50 (L) y suelos de alta plasticidad con límite líquido superior a 50 (H).

TABLA IX
SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS PARA UN SUELO TIPO GRAVA

Símbolo de grupo	Criterios
GW	Menos del 5% pasa el tamiz N° 200 $C_u = D_6/D_{10}$ mayor que o igual que 4 $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
GP	Menos de 5% pasa el tamiz N° 200 No cumple criterios para GW
GM	Más del 12% pasa el tamiz N° 200 Los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 17) Índice de plasticidad menor que 4
GC	Más del 12% pasa el tamiz N° 200 Los límites de Atterberg se grafican encima de la línea A (figura 17) Índice de plasticidad mayor que 7
GC-GM	Más del 12% pasa el tamiz N° 200 Los límites de Atterberg caen en el área oscura marcada con CL-ML en la figura 17
GW-GM	El porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5% y 12% Cumple criterios para GW y GM
GW-GC	El porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5% y 12% Cumple criterios para GW y GC
GP-GM	El porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5% y 12% Cumple criterios para GP y GM
GP-GC	El porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5% y 12% Cumple criterios para GP y GC

TABLA X
SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS PARA UN SUELO TIPO ARENA

Símbolo de grupo	Criterios
SW	Menos 5% pasa el tamiz N° 200 $C_u = D_6/D_{10}$ mayor o igual que 6 $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
SP	Menos de 5% pasa el tamiz N° 200 No cumple ambos criterios SW
SM	Más del 12% pasa el tamiz N° 200 Los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea A (figura 17) Índice de plasticidad mayor que 4
SC	Más del 12% pasa el tamiz N° 200 Los límites de Atterberg se grafican encima de la línea A (figura 17) Índice de plasticidad mayor que 7
SC-SM	Más del 12% pasa el tamiz N° 200 Los límites de Atterberg caen en el área oscura marcada con CL-ML en la figura 17
SW-SM	El porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5 y 12 Cumple los criterios SW y SM
SW-SC	El porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5 y 12 Cumple los criterios SW y SC
SP-SM	El porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5 y 12 Cumple los criterios SP y SM
SP-SC	El porcentaje que pasa el tamiz N° 200 está entre 5 y 12 Cumple los criterios SP y SC

TABLA XI
SISTEMA DE CLASIFICACIÓN SUCS PARA UN SUELO TIPO ARCILLA

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico
	$LL < 50$
	$PI > 7$
	Se grafica arriba de la línea A (véase zona CL en la figura 17)
ML	Inorgánico
	$LL < 50$
	$PI < 4$
	Se grafica debajo de la línea A (véase zona ML en la figura 17)
OL	Orgánico
	$(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$
	$LL < 50$ (véase zona OL en la figura 17)
CH	Inorgánico
	$LL \geq 50$
	PI se grafica arriba de la línea A (véase zona CH en la figura 17)
MH	Inorgánico
	$LL \geq 50$
	PI se grafica debajo línea A (véase zona MH en la figura 17)
OH	Orgánico
	$(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$
	$LL \geq 50$ (véase zona OH en la figura 17)
CL-ML	Inorgánico
	Se grafica en la zona sombreada en la figura 17
Pt	Turba, lodos y otro tipo de suelos alternamente orgánicos

La carta de plasticidad desarrollada por Casagrande es una herramienta importante que facilita la clasificación de suelos mediante la representación gráfica que resume de manera práctica y visual la información establecida por el sistema SUCS. Mediante la relación del límite líquido y el índice de plasticidad la carta de plasticidad permite interpretar el comportamiento del material.

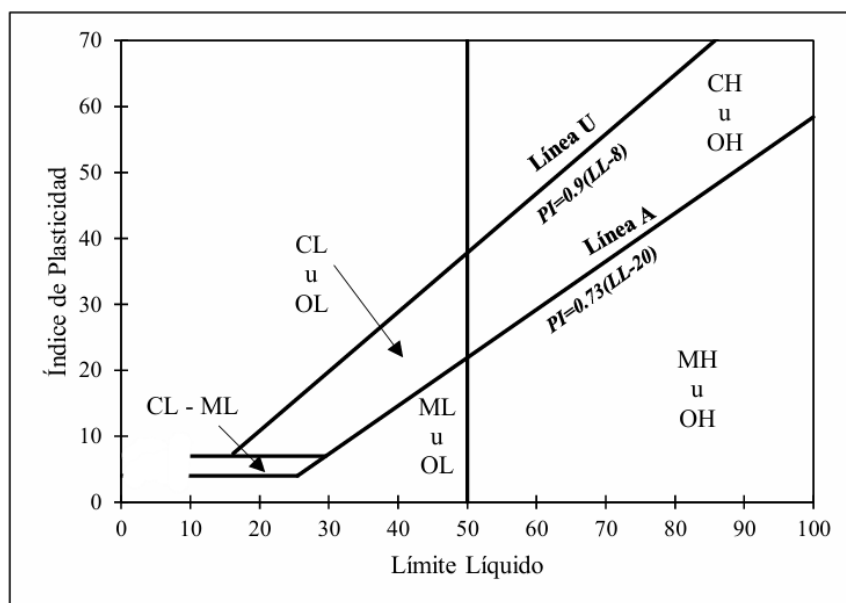


Fig. 23. Carta de plasticidad SUCS.

4) Proctor modificado

El ensayo Proctor permite evaluar el grado de compactación de un suelo mediante la relación existente entre la densidad seca de un suelo y su contenido en agua, esto se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento estandarizado para diferentes contenidos de humedad [19], [21].

El objetivo de este ensayo fue determinar la humedad óptima con la que se hace la compactación para obtener el peso volumétrico seco máximo que puede alcanzar dicho material, asegurando con este dato que el suelo tenga la mejor compactación [19], [21]. Este proceso de compactación del suelo está directamente vinculada al mejoramiento de sus propiedades ingenieriles como el aumento de su resistencia al corte, capacidad de deformación y estabilidad [15],[17].

Para realizar este ensayo se utilizó el Método B y lo establecido en las normas AASHTO T 180 y ASTM D 1557. Según esta normativa, se trabajó con el suelo que pasó el tamiz N° 4

previamente seco para posteriormente añadir un contenido de humedad previamente seleccionado. Después de haber mezclado uniformemente el agua y el suelo se dividió el suelo en 5 partes y se fue colocando una por una dentro de un molde de dimensiones especificadas. Se compactó en cinco capas con 56 golpes de manera uniforme en cada capa, estos golpes con un martillo de 10 libras (44,5 N), el cual se dejó caer desde una altura de 457 mm, generando así una energía de compactación aproximada de 2700 kN·m/m³ calculada con la ecuación 6 [21], [30], [31].

$$Ec = \frac{N * n * w * h}{V} \quad (6)$$

Donde:

Ec energía de compactación (kJ/m³ o kN*m/m³).

N número de golpes por capa.

n número de capas.

W peso del martillo (N)

h altura de caída (m)

V Volumen del molde (m³).

Este procedimiento se llevó a cabo de forma repetitiva, aumentando gradualmente el contenido de humedad de la muestra, hasta contar con la cantidad de datos necesaria para definir la relación entre la humedad y la densidad seca del suelo. Para cada nivel de humedad considerado, se determinará la densidad húmeda del material mediante la ecuación 7, lo que permitirá construir la curva característica del ensayo [15].

$$\gamma_m = \frac{W}{V_m} \quad (7)$$

Donde:

W Peso del suelo húmedo compactado (g).

V_m Volumen del molde (cm³).

Con base en el valor promedio del contenido de humedad determinado para cada punto del ensayo y en los resultados de densidad húmeda obtenidos, se calculó la densidad seca del suelo mediante la ecuación 8:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{W\%}{100}} \quad (8)$$

Donde:

γ_m densidad húmeda del suelo (g/cm³).

W contenido de humedad (%).

Este procedimiento se llevó a cabo para los diferentes porcentajes de adición; 5% de cal, 10% de cal, 15% de cal, 5% de cemento, 10% de cemento, 15% de cemento, 5% de ceniza de totora, 10% de ceniza de totora y 15% de ceniza de totora, conociendo de cada una su contenido de humedad óptimo (Fig. 24).



Fig. 24. Ensayo Proctor modificado en el laboratorio.

5) California Bearing Ratio (CBR)

Se define como la carga que es capaz de soportar el suelo sin que se produzcan asientos excesivos, concretamente mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas con el fin de clasificar la capacidad del suelo como material de subrasante, base o subbase [5], [15].

El CBR es una medida de penetración en mm que se obtiene a partir de la penetración de un pistón estandarizado sometido a condiciones de carga controladas, resultado que se expresa en porcentaje, siendo un CBR=100% el equivalente a lo que penetra el pistón 0,1" (2,54 mm) y 0,2" (5,08 mm) [17]. Este ensayo se usa principalmente en vías gracias a que los resultados que genera son completamente comprensibles.

Este ensayo se realizó de acuerdo con lo establecido en la norma AASHTO T 193, permitiendo analizar el comportamiento del suelo frente a cargas similares a las que actúan en una estructura de pavimento [15]. Con el contenido óptimo de agua obtenido en el ensayo Proctor se estimó la compactación máxima que puede alcanzar un suelo en relación con su grado de humedad en el laboratorio [17].

Para el desarrollo del ensayo se prepararon especímenes compactados en laboratorio con diferentes energías de compactación, aplicando 11, 27 y 56 golpes, utilizando el contenido óptimo de humedad previamente determinado mediante el ensayo Proctor modificado. Primero se utilizó el material seco que pasó el tamiz N°4, se mezcló con el contenido de humedad óptimo y se compactó en 5 capas con 11 golpes el primer cilindro, 27 golpes el segundo cilindro y 56 golpes el tercer cilindro. Una vez compactadas las muestras se retiró el collarín, enrasó el suelo y se le dio la vuelta al molde para colocar las pesas (discos metálicos) con una carga de aproximadamente 6 kilogramos que simulan el peso del pavimento sobre la subrasante (Fig. 25 y Fig. 26) [32].



Fig. 25. Ensayo CBR en laboratorio.



Fig. 26. Moldes CBR.

Posteriormente se llevaron las muestras a un periodo de inmersión durante 96 horas en un tanque de agua, con la finalidad de evaluar los efectos de la saturación y los posibles cambios volumétricos del material (Fig. 27).



Fig. 27. Muestras de CBR en inmersión.

Transcurrido el tiempo de inmersión se sacaron y dejaron escurrir las probetas, posteriormente se registró el peso de las mismas. Finalmente, se ensayaron los moldes en la máquina de penetración del pistón con una carga de 44 N (10 lb), después de que haya sido colocada la sobrecarga sobre el espécimen. La penetración se realizó con una velocidad uniforme de 0,05 in/min y se anotaron las lecturas correspondientes. [32], [33].



Fig. 28. Ensayo CBR.

A partir de estos resultados obtenidos del ensayo se generó la gráfica esfuerzo vs penetración que representa la resistencia del suelo a la penetración del pistón y se calculó el valor de CBR con la ecuación 9, comparando la carga aplicada con la correspondiente a un material patrón, lo que permitirá estimar la aptitud del suelo para su uso en capas de pavimento. [32], [33].

$$CBR (\%) = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga unitaria de la muestra patrón}} \times 100 \quad (9)$$

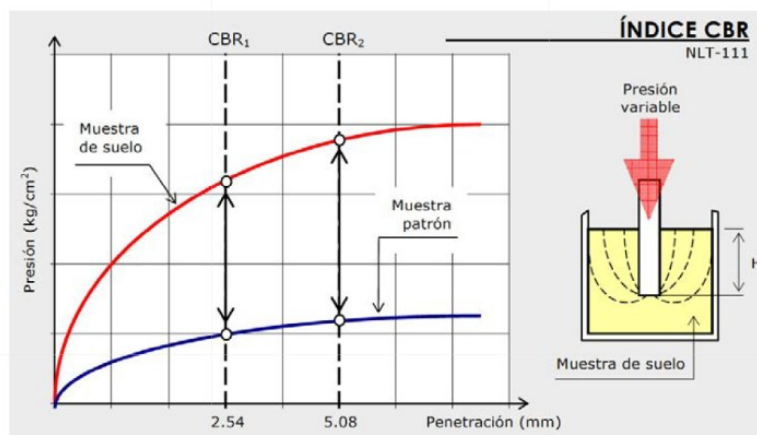


Fig. 29. Determinación del índice de CBR [5].

En estas curvas de la Fig. 29 se evidencia el incremento progresivo a medida que el pistón penetra más. Se determina que cuando la gráfica tiene una pendiente más pronunciada y valores de esfuerzo elevados el material tiene una mayor resistencia y adecuada capacidad de soporte. En cambio, cuando la pendiente de la gráfica es suave y tiene menor incremento de esfuerzo el suelo se considera de baja resistencia y limitada capacidad portante. [33]

Con los datos de CBR se pueden clasificar a las muestras como:

TABLA XII
CLASIFICACIÓN DEL SUELO DE ACUERDO AL VALOR DE CBR [5]

Índice CBR	Clasificación del suelo
0 - 5	Subrasante muy mala
5 - 10	Subrasante mala
10 - 20	Subrasante regular a buena
20 - 30	Subrasante muy buena
30 - 50	Subbase buena
50 - 80	Base buena
80 - 100	Base muy buena

Este procedimiento se llevó a cabo para los diferentes porcentajes de adición; 5% de cal, 10% de cal, 15% de cal, 5% de cemento, 10% de cemento, 15% de cemento, 5% de ceniza de totora, 10% de ceniza de totora y 15% de ceniza de totora, conociendo de cada una el valor de CBR y su clasificación de acuerdo a los valores obtenidos.

C. FASE 3

En esta fase se realizó un análisis comparativo de los resultados de las propiedades obtenidas mediante los ensayos del suelo arenoso natural y del suelo arenoso estabilizado con cal, cemento y ceniza de totora. De esta manera, se procesaron y tabularon los resultados de los ensayos de contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, Proctor Modificado y CBR. Con estos datos se interpretó e identificó el porcentaje óptimo de adición de cal, cemento y ceniza de totora que mejoran la capacidad de carga del suelo, permitiendo verificar la hipótesis planteada inicialmente.

Para determinar la influencia económica de los estabilizantes se realizó el análisis de precios unitarios con el que se evaluó la viabilidad técnica y económica de la cal, cemento y ceniza de totora usados como estabilizantes para la construcción de infraestructuras viales.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos del trabajo experimental desarrollado para evaluar el efecto de la incorporación de cal, cemento y ceniza de totora como estabilizantes para el suelo arenoso de subrasante. El enfoque principal de este capítulo es determinar las variaciones presentadas en las propiedades físicas y mecánicas del suelo en su estado natural con el suelo al adicionar los estabilizantes, permitiendo establecer su influencia en el comportamiento del material.

A continuación, se presentan y explican de manera detallada los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio orientados a determinar los parámetros fundamentales como contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y California Bearing Ratio (CBR) evaluados en el suelo natural y suelos con adición de 5% de cal, 10% de cal, 15% de cal, 5% de cemento, 10% de cemento, 15% de cemento, 5% de ceniza de totora, 10% de ceniza de totora y 15% de ceniza de totora.

Mediante el análisis comparativo de los resultados se determinó el porcentaje óptimo de adición de cada estabilizante mediante un análisis funcional y económico que permite evidenciar la mejora en la subrasante del suelo arenoso, permitiendo evaluar su efectividad como una alternativa sostenible para el mejoramiento de subrasantes en proyectos de infraestructura vial.

A. FASE 1

Esta primera fase se orientó a la obtención de las muestras de suelo en el sector La Libertad de la parroquia Huachi Grande del cantón Ambato, se realizaron 3 calicatas con la finalidad de obtener el suelo arenoso que es el objeto de estudio, se seleccionó la calicata 1 ubicada en las siguientes coordenadas:

- Zona: 17
- Este: 760604
- Sur: 9853252



Fig. 30. Ubicación muestra de suelo arenoso.

Para la obtención de los materiales estabilizantes la cal y el cemento se compraron de acuerdo con criterios técnicos y experiencias previas con la finalidad de analizar su influencia en el comportamiento del suelo arenoso.

Posteriormente se realizó el proceso de quemado de la ceniza de totora a la temperatura obtenida en el ensayo de determinación de la temperatura de calcinación realizado en el laboratorio de la Facultad de Alimentos y Biotecnología arrojando el resultado:

TABLA XIII
TEMPERATURA DE CALCINACIÓN DE LA TOTORA

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN DE LA TOTORA	
Tiempo de calcinación	Temperatura de calcinación
4 horas	550°C $\pm$ 50°C

Para controlar la temperatura, se midió con un termómetro láser digital para asegurar que la temperatura se mantenga constante. Finalmente se dejó enfriar la ceniza en el mismo tanque metálico y posteriormente se almacenó en fundas plástica selladas, protegiéndola de la humedad y se tamizó para su posterior uso.

a) Composición de la ceniza

Mediante un análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X realizado en la Escuela Politécnica Nacional en la ciudad de Quito se obtuvo la composición química y propiedades

físicas fundamentales de la ceniza obtenida, determinando el contenido de óxidos principales que son los que verifican la ceniza de totora como estabilizante. Entre los principales óxidos destacan el Dióxido de Silicio (SiO_2) y el Trióxido de Aluminio (Al_2O_3).

TABLA XIV
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE TOTORA

Composición Química	Porcentaje (%)
Dióxido de silicio (SiO_2)	45,36
Trióxido de Aluminio (Al_2O_3)	13,68
Óxido de calcio (CaO)	9,84
Óxido de Potasio (K_2O)	9,51
Trióxido de Hierro (Fe_2O_3)	5,95
Pentóxido de Fósforo (P_2O_5)	2,17
Óxido de Magnesio (MgO)	1,98
Óxido de Cobre (CuO)	0,45
Trióxido de Azufre (SO_3)	<0,01
Óxido de Zinc (ZnO)	0,029
Óxido de Manganeseo (MnO)	0,014
Pérdida por quemado	11,02

B. FASE 2

Esta fase comprende el análisis de los ensayos de laboratorio realizados con el propósito de determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo arenoso en estado natural y evaluar los cambios generados por la incorporación de los diferentes porcentajes de cal, cemento y ceniza de totora.

Para definir las propiedades físicas del suelo se efectuaron ensayos de contenido de humedad, análisis granulométrico y límites de Atterberg que permitieron clasificar el suelo. Para el suelo con adición de los diferentes estabilizantes se realizaron los límites de Atterberg.

Las propiedades mecánicas se obtuvieron mediante los ensayos de compactación Proctor

Modificado y California Bearing Ratio (CBR) realizados con el suelo natural y con adición de 5% de cal, 10% de cal, 15% de cal, 5% de cemento, 10% de cemento, 15% de cemento, 5% de ceniza de totora, 10% de ceniza de totora y 15% de ceniza de totora. Estas propiedades permiten determinar la capacidad portante de los materiales destinados para subrasantes y estructuras de pavimentos.

1) Suelo arenoso en estado natural

a) Análisis granulométrico

En los resultados obtenidos del análisis granulométrico de la muestra de suelo del sector La Libertad (ver TABLA XV) se evidencia que está constituida principalmente por partículas de arena con un 95,10%, un bajo contenido de finos (limo y arcilla) 4,89% y una casi nula presencia de grava con un 0,01%, reflejando una distribución granulométrica característica de los suelos arenosos con escasa cantidad de material fino (Fig.31).

TABLA XV
GRANULOMETRÍA SUELO NATURAL

GRANULOMETRÍA			
MUESTRA SECTOR "LA LIBERTAD"			
PORCENTAJE DEL MATERIAL		Grava (G%)	Arena (S%)
		0,01%	95,10%
		Limo y Arcilla (Finos %)	
		4,89%	
AASHTO	A-3	SUCS	
		SP	

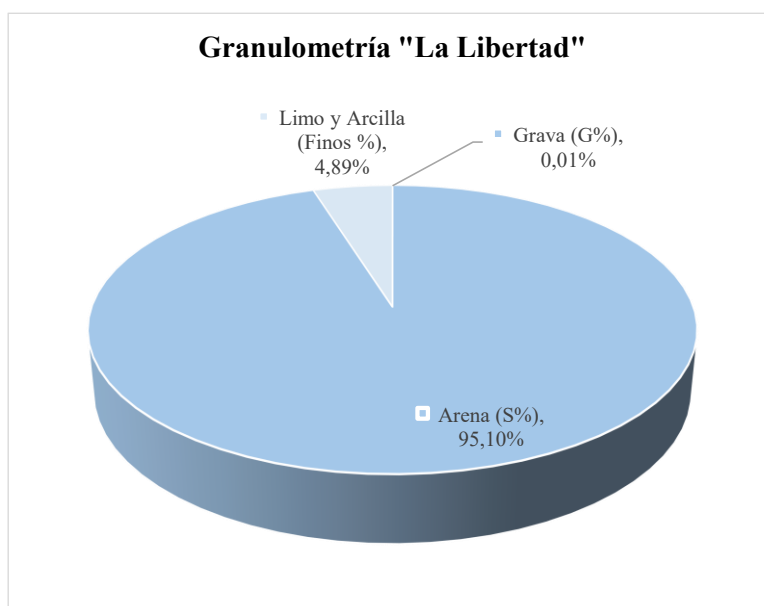


Fig. 31. Distribución de grava, arena y limos y arcillas.

A través del análisis granulométrico se determinaron los coeficientes del suelo (ver TABLA XVI), obteniendo un diámetro efectivo de 0,055, un diámetro equiparable de 0,084 y un diámetro dimensional de 0,157. A partir de estos datos se calculó el coeficiente de uniformidad de 2,855, constatándose como un suelo mal graduado o muy uniforme ya que existe limitada diversidad de tamaños, lo que dificulta el llenado de vacíos. Por otra parte, el coeficiente de curvatura es de 0,817 confirmando que corresponde a un suelo mal graduado.

TABLA XVI
COEFICIENTES DEL SUELO

GRANULOMETRÍA			
Porcentaje que pasa			
Tamiz N°10		99,99%	
Tamiz N°40		94,59%	
Tamiz N°200		4,89%	
Coeficientes del suelo			
TND	1,18	Cu	2,855
D10	0,055		
D30	0,084		
D60	0,157	Cc	0,817

b) Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos en el ensayo de Límites de Atterberg para el suelo en estado natural (ver TABLA XVII) muestran un Límite Líquido (LL) de 21,24% y un Límite Plástico (LP) de 22,18% con los cuales se obtiene el Índice de Plasticidad de -0,94%. Se evidencia que el límite plástico es ligeramente superior al límite líquido por lo que se obtiene un valor negativo en el índice de plasticidad, determinándose al suelo como No Plástico (NP).

Este resultado es consistente con las características granulométricas del material que está compuesto predominantemente por partículas de arena y una cantidad reducida de finos, por lo que no desarrolla propiedades cohesivas significativas ni presenta cambios apreciables de consistencia frente a las variaciones en su contenido de humedad (Fig. 32).

TABLA XVII
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO EN ESTADO NATURAL

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural	
Límite Líquido LL (%)	21,24%
Límite Plástico LP (%)	22,18%
Índice Plástico IP (%)	-0,94%
Grado de Plasticidad	No Plástico

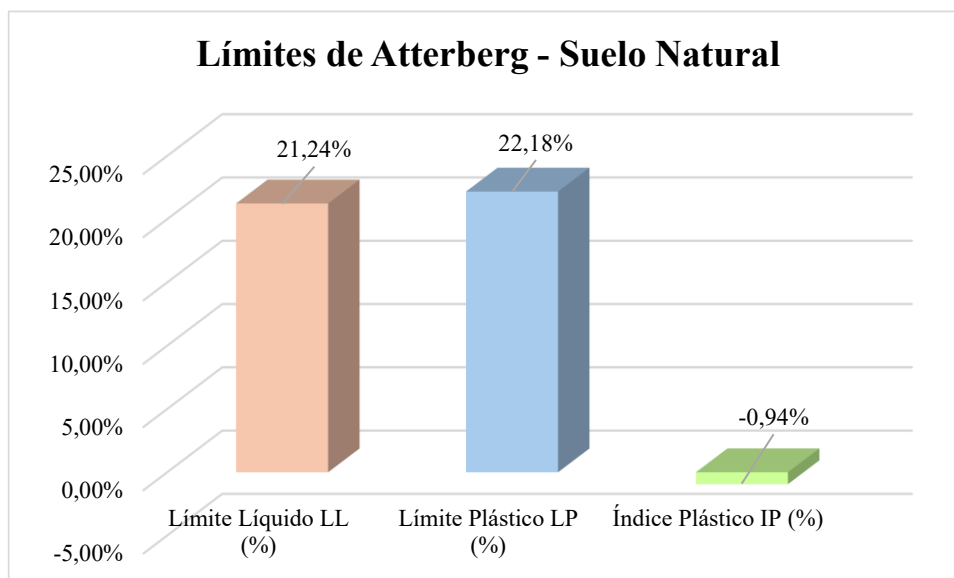


Fig. 32. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo en estado natural.

c) Clasificación del suelo

Con los resultados obtenidos del análisis granulométrico y del ensayo de los límites de Atterberg, se procedió a clasificar el suelo de acuerdo con los criterios establecidos por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y la metodología de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). El uso de estos dos métodos para clasificar el suelo proporciona una base técnica para evaluar la aptitud del material como subrasante y analizar el efecto de los estabilizantes.

Los resultados detallados en la TABLA XVIII pertenecen a las propiedades físicas del suelo en estado natural. En el ensayo de granulometría se observa que el 99,99% de la muestra pasa el tamiz N°4 y el 99,87% pasa el tamiz N°10, demostrando la ausencia casi total de fracciones de suelo gruesas como la grava. De igual manera, el 94,59% del material pasa el tamiz N°40 y solo el 4,89% pasa el tamiz N°200, indicando que el comportamiento mecánico del suelo está ligado a la fricción interparticular de su fracción granular.

El ensayo de límites de Atterberg determinó un límite líquido de 21,24% e identificó el suelo como No Plástico. Con todos los parámetros analizados hasta ahora se puede clasificar al suelo como Arena mal graduada (SP). de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) en la que el suelo responde a que más del 50% pasa el tamiz N°4 y tiene menos del 5% de finos y para terminar el valor del coeficiente unitario es menor a 6 ya que el del suelo es 2,855.

d) *Proctor modificado*

Para el suelo en estado natural en el ensayo Proctor modificado método B se obtuvo una densidad seca máxima de 1,723 gr/cm³ y un contenido de humedad óptimo de 14,80% (ver TABLA XX). Estos valores son coherentes con las características de la arena mal graduada (SP) según el sistema SUCS y A3 de acuerdo con la clasificación AASHTO. La densidad seca máxima refleja la capacidad que tiene el suelo para desarrollar una estructura relativamente compactada bajo la energía de compactación aplicada, por otra parte, la humedad óptima obtenida del ensayo representa la cantidad de agua necesaria para facilitar la reorganización de las partículas y así alcanzar las condiciones óptimas de compactación.

TABLA XX
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO EN ESTADO NATURAL

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,723	14,80

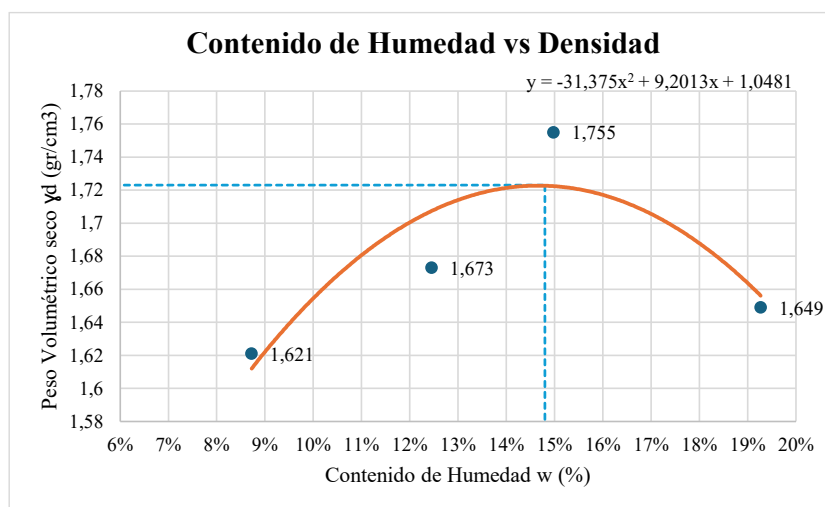


Fig. 33. Contenido de humedad vs Densidad del suelo en estado natural.

e) *California Bearing Ratio CBR*

Los resultados obtenidos en el ensayo de CBR dieron como resultado una capacidad de soporte de 14,40% con la densidad máxima al 95% de 1,617 gr/cm³ (ver TABLA XXI). Este valor clasifica al suelo según el % CBR en la Norma AASHTO como subrasante regular para aplicaciones viales. El valor de CBR obtenido refleja que el suelo posee una capacidad portante moderada, atribuida principalmente al predominio de partículas arenosas y la escasa presencia

de finos.

TABLA XXI
CBR DEL SUELO EN ESTADO NATURAL

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,617	1,536	14,4	Subrasante Regular

2) Suelo con adición de 5% de cal

a) Límites de Atterberg

En el ensayo de Límites de Atterberg para el suelo + 5% de cal se obtuvo un Límite Líquido (LL) de 23,60% y un Límite Plástico (LP) de 21,77% con los cuales se obtiene el Índice de Plasticidad de 1,83% (ver TABLA XXII). El valor del límite líquido evidencia una mayor capacidad de la mezcla para retener humedad y el límite plástico refleja el rango de trabajabilidad del suelo gracias a la cal incorporada. Con estos datos se determina como un suelo de baja plasticidad.

TABLA XXII
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 5% CAL

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 5% cal	
Límite Líquido LL (%)	23,60%
Límite Plástico LP (%)	21,77%
Índice Plástico IP (%)	1,83%
Grado de Plasticidad	Baja plasticidad

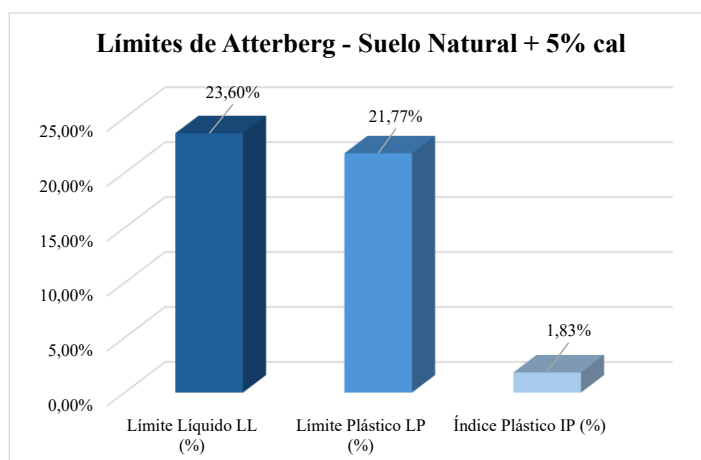


Fig. 34. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 5% cal.

b) Proctor modificado

En el ensayo Proctor modificado método B para el suelo con adición del 5% de cal se determinó una densidad seca máxima de $1,680 \text{ gr/cm}^3$ y un contenido de humedad óptimo de 14,50% (ver TABLA XXIII). El contenido de humedad indica la cantidad de agua necesaria para lograr las condiciones más favorables de compactación.

TABLA XXIII
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 5% CAL

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 5% cal	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,680	14,50

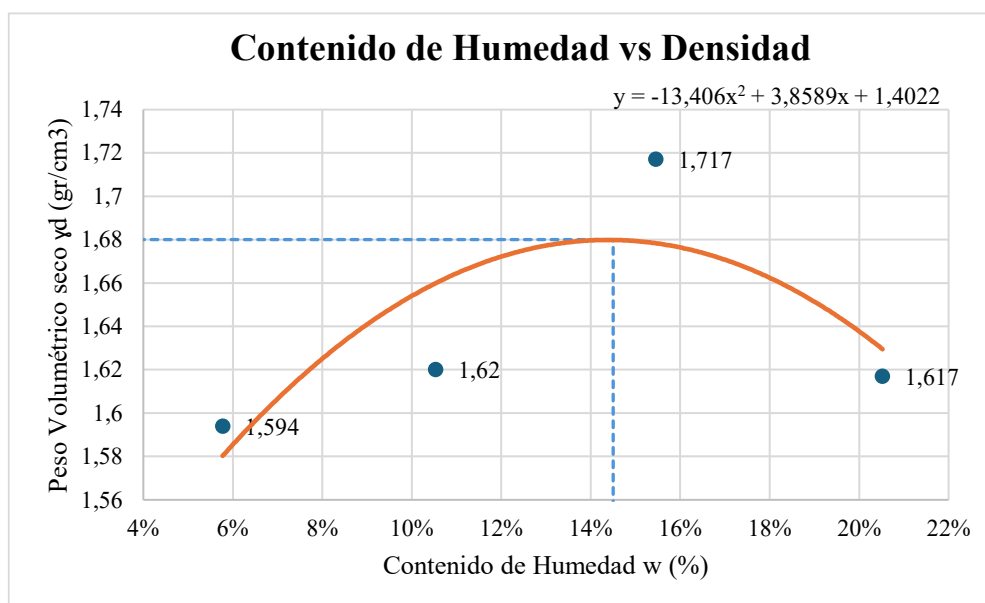


Fig. 35. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 5% cal.

c) California Bearing Ratio CBR

La capacidad de soporte obtenida en el ensayo fue de 41,50% clasificando al suelo según la norma AASHTO como subbase buena, reflejando que la capacidad portante del suelo es buena, atribuida principalmente a la cal como estabilizante. El CBR se obtuvo con la densidad máxima al 95% que es $1,514 \text{ gr/cm}^3$. (ver TABLA XXIV).

TABLA XXIV
CBR DEL SUELO + 5% CAL

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 5% cal			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,594	1,514	41,50	Subbase buena

3) *Suelo con adición de 10% de cal*

a) *Límites de Atterberg*

De acuerdo con los resultados obtenidos para el suelo + 10% de cal se determinó un Límite Líquido (LL) de 22,65% y un Límite Plástico (LP) de 21,84% con los cuales se obtiene el Índice de Plasticidad de 0,81% (ver TABLA XXV). La diferencia existente entre el límite líquido y el límite plástico es mínima, lo que se deduce como un material de plasticidad baja y un rango de consistencia plástica reducido (Fig. 36).

TABLA XXV
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 10% CAL

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 10% cal	
Límite Líquido LL (%)	22,65%
Límite Plástico LP (%)	21,84%
Índice Plástico IP (%)	0,81%
Grado de Plasticidad	Baja plasticidad

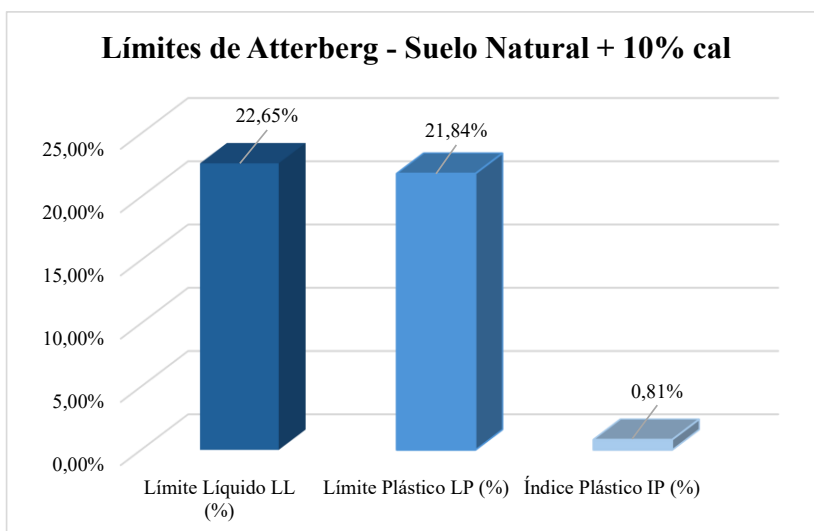


Fig. 36. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 10% cal.

b) Proctor modificado

En el ensayo Proctor modificado método B para el suelo con adición del 10% de cal se obtuvo que el contenido de humedad óptimo es de 16% y la densidad seca máxima obtenida es de 1,614 gr/cm³ (ver TABLA XXVI). Estos resultados evidencian que la mezcla necesita mayor cantidad de agua para lograr su condición más favorable de compactación (Fig. 37).

TABLA XXVI
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 10% CAL

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 10% cal	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,614	16,00

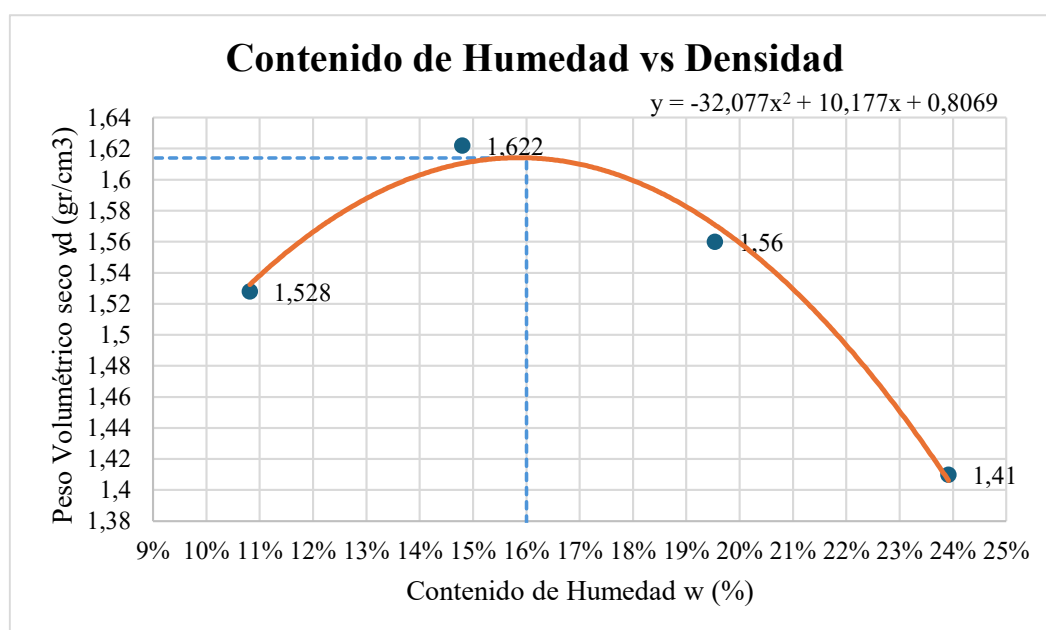


Fig. 37. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 10% cal.

c) California Bearing Ratio CBR

Al evaluar la mezcla estabilizada con 10% de cal se obtuvo una capacidad de soporte de 62,40% con la densidad máxima al 95% que es 1,550 gr/cm³. (ver TABLA XXVII). Con estos resultados se clasificó como base buena según la norma AASHTO de clasificación por el %CBR.

TABLA XXVII
CBR DEL SUELO + 10% CAL

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 10% cal			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,632	1,550	62,40	Base buena

4) Suelo con adición de 15% de cal

a) Límites de Atterberg

El Índice de Plasticidad correspondiente a esta estabilización es de 0,50%, obtenido de la diferencia entre el Límite Líquido (LL) de 22,75% y el Límite Plástico (LP) de 22,25% (ver TABLA XXVIII). Este comportamiento señala que el suelo es predominantemente granular, mostrando una baja sensibilidad a las variaciones de humedad (Fig. 38).

TABLA XXVIII
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 15% CAL

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 15% cal	
Límite Líquido LL (%)	22,75%
Límite Plástico LP (%)	22,25%
Índice Plástico IP (%)	0,50%
Grado de Plasticidad	Baja plasticidad

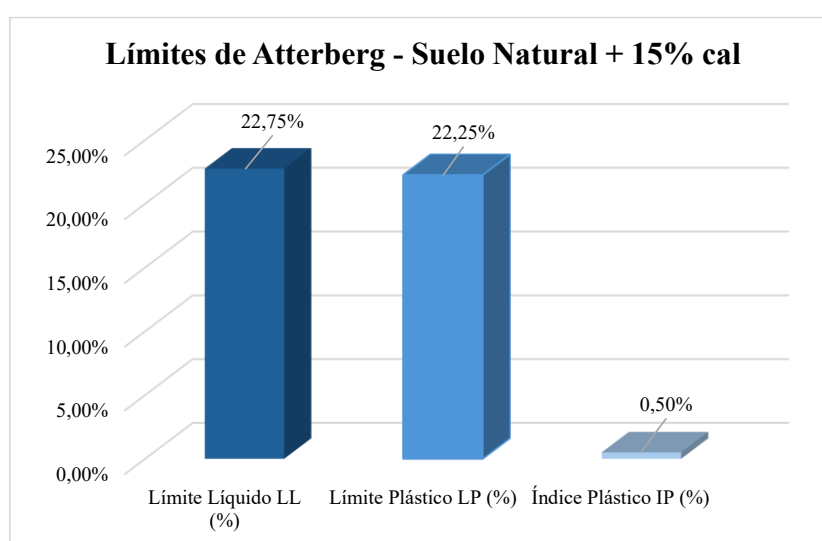


Fig. 38. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 15% cal.

b) Proctor modificado

En el ensayo Proctor modificado método B se obtuvo que el contenido de humedad óptimo para esta estabilización es de 18,10% y la densidad seca máxima obtenida es de 1,584 gr/cm³ (ver TABLA XXIX). Estos resultados evidencian que la mezcla necesita mayor cantidad de agua para lograr su condición más favorable de compactación ya que la cal modifica la relación humedad- densidad de la mezcla (Fig. 39).

TABLA XXIX
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 15% CAL

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 15% cal	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,584	18,10

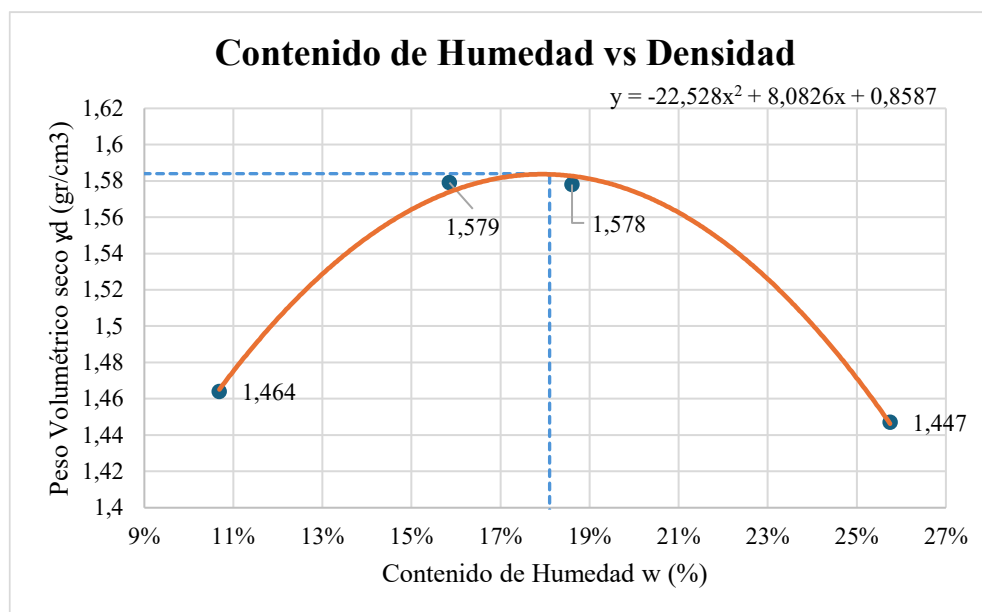


Fig. 39. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 15% cal.

c) California Bearing Ratio CBR

Con los resultados obtenidos de la mezcla estabilizada con 15% de cal se alcanzó una densidad máxima de 1,641 gr/cm³ al 95%. En estas condiciones de compactación se registró una capacidad de soporte de 36,00% permitiendo clasificar al suelo como subbase buena según la norma AASHTO de clasificación por el valor de CBR (ver TABLA XXX).

TABLA XXX
CBR DEL SUELO + 15% CAL

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 15% cal			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,641	1,559	36,00	Subbase buena

5) Suelo con adición de 5% de cemento

a) Límites de Atterberg

En el ensayo de Límites de Atterberg para el suelo + 5% de cemento resultó un Límite Líquido (LL) de 22,50% y un Límite Plástico (LP) de 20,90% con los cuales se calculó el Índice de Plasticidad de 1,60% (ver TABLA XXXI). Este resultado señala que el suelo presenta un rango de consistencia plástica reducido y una limitada susceptibilidad a los cambios frente a las variaciones del contenido de humedad (Fig. 40).

TABLA XXXI
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 5% CEMENTO

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 5% cemento	
Límite Líquido LL (%)	22,50%
Límite Plástico LP (%)	20,90%
Índice Plástico IP (%)	1,60%
Grado de Plasticidad	Baja plasticidad

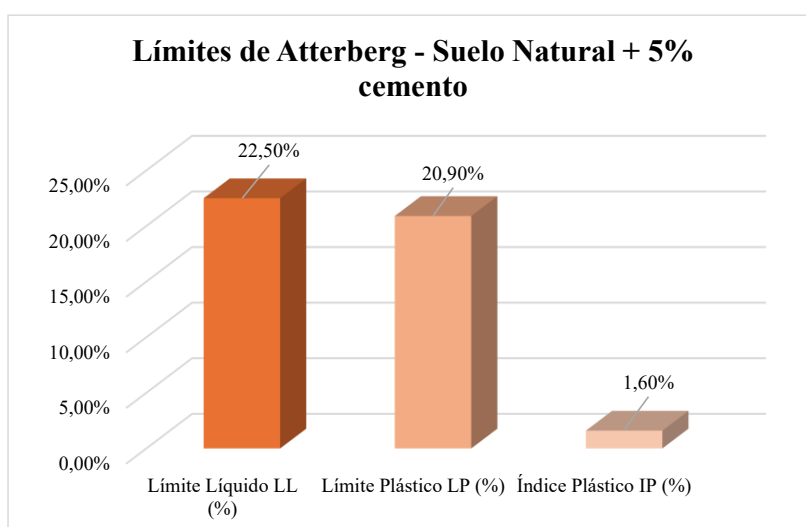


Fig. 40. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 5% cemento.

b) Proctor modificado

En el ensayo Proctor modificado método B para el suelo con adición del 5% de cemento se determinó una densidad seca máxima de 1,709 gr/cm³ y un contenido de humedad óptimo de 14,50% (ver TABLA XXXII). Los parámetros obtenidos representan las condiciones óptimas en las que el suelo estabilizado alcanza su mayor nivel de compactación (Fig. 41).

TABLA XXXII
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 5% CEMENTO

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 5% cemento	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,709	14,50

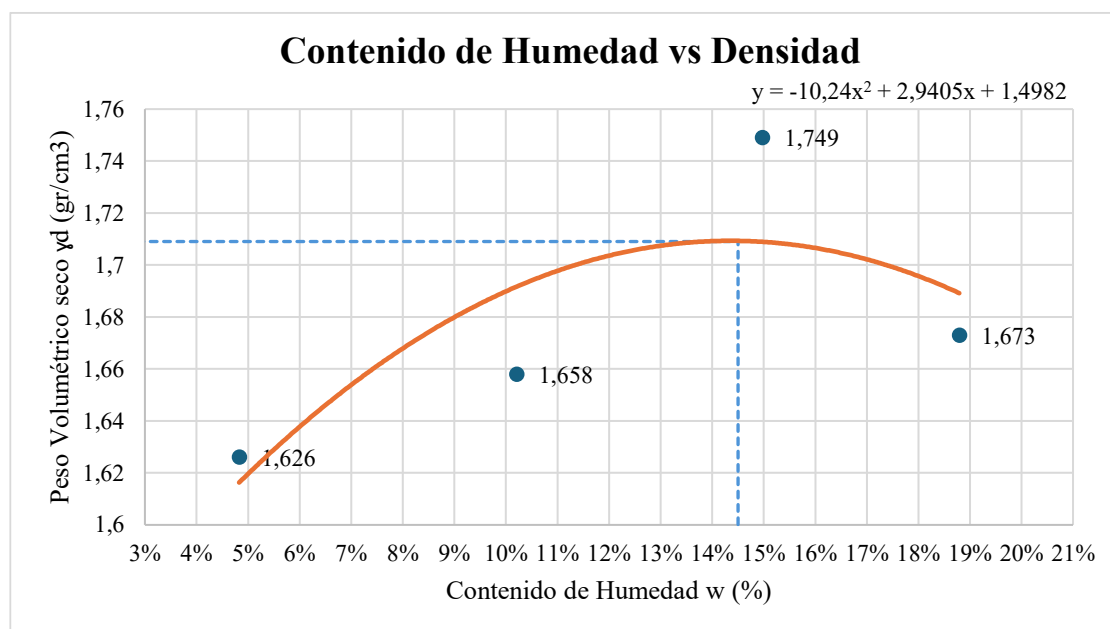


Fig. 41. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 5% cemento.

c) California Bearing Ratio CBR

Los resultados obtenidos en el ensayo evidenciaron un comportamiento sobresaliente para la mezcla de suelo estabilizada, alcanzando una capacidad de soporte de 176,85% clasificando al suelo según la norma AASHTO como una base muy buena (ver TABLA XXXIII). El CBR se obtuvo con la densidad máxima al 95% que es 1,529 gr/cm³. El desempeño mecánico del suelo es significativamente superior y puede soportar con normalidad las cargas transmitidas de la estructura del pavimento.

TABLA XXXIII
CBR DEL SUELO + 5% CEMENTO

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 5% cemento			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,609	1,529	176,85	Base muy buena

6) Suelo con adición de 10% de cemento

a) Límites de Atterberg

De acuerdo con los resultados obtenidos para el suelo + 10% de cemento se obtuvo un Límite Líquido (LL) de 21,20% y un Límite Plástico (LP) de 20,40% con los cuales se calculó el Índice de Plasticidad de 0,80% (ver TABLA XXXIV) (Fig. 42). La diferencia existente entre el límite líquido y el límite plástico es mínima, lo que se deduce como un material de plasticidad baja y un rango de consistencia plástica reducido.

TABLA XXXIV
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 10% CEMENTO

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 10% cemento	
Límite Líquido LL (%)	21,20%
Límite Plástico LP (%)	20,40%
Índice Plástico IP (%)	0,80%
Grado de Plasticidad	Baja plasticidad

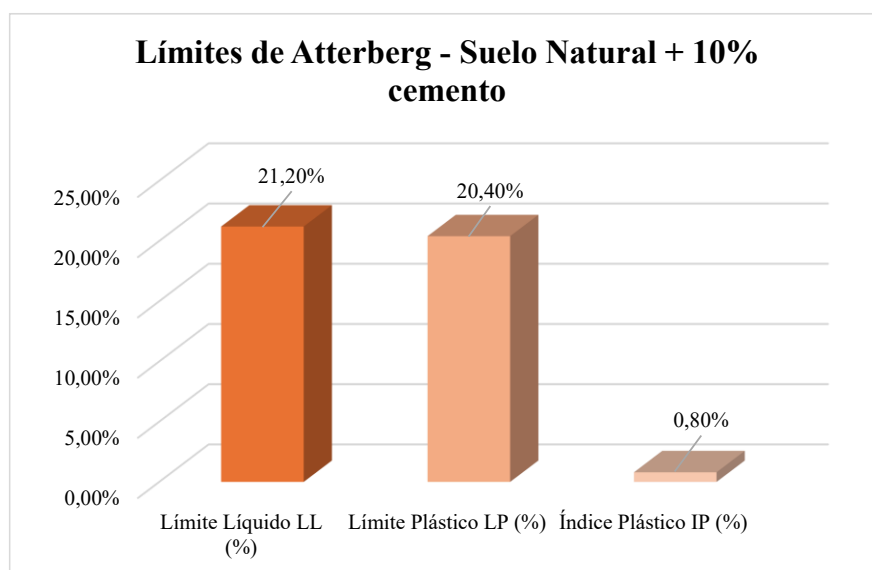


Fig. 42. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 10% cemento.

b) Proctor modificado

En el ensayo Proctor modificado método B para el suelo con adición del 10% de cemento se obtuvo que el contenido de humedad óptimo es de 13,00% y la densidad seca máxima obtenida es de 1,819 gr/cm³ (ver TABLA XXXV). La densidad máxima alcanzada refleja una mejor capacidad de acomodación de partículas, lo que permite obtener una subrasante más densa y estable, acción que se atribuye al cemento.

TABLA XXXV
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 10% CEMENTO

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 10% cemento	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,819	13,00

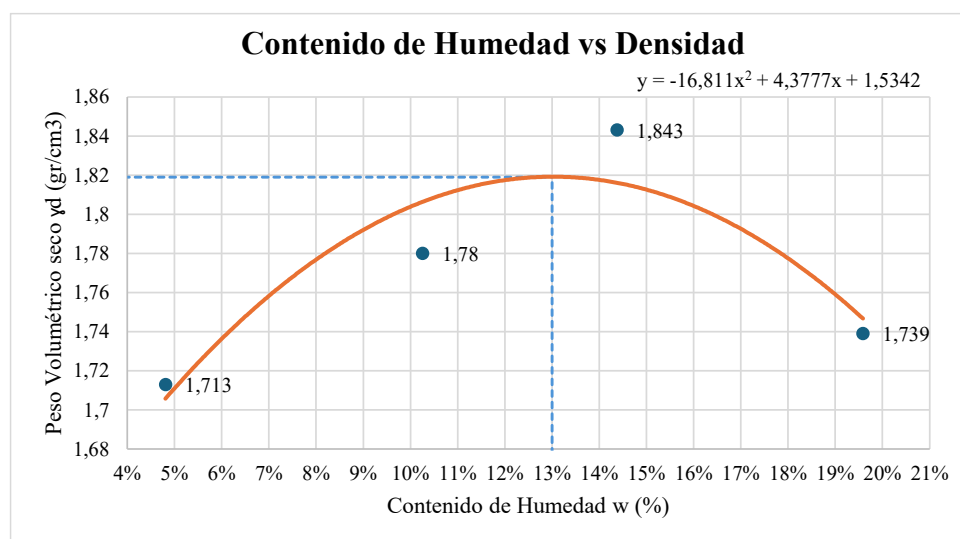


Fig. 43. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 10% cemento.

c) California Bearing Ratio CBR

Al evaluar la mezcla estabilizada con 10% de cemento se obtuvo una capacidad de soporte de 231,00% con la densidad máxima al 95% que es 1,539 gr/cm³ (ver TABLA XXXVI). Con estos resultados se clasificó como base muy buena según la norma AASHTO de clasificación por el % CBR. Con la adición del cemento se evidencia un crecimiento exponencial en la resistencia mecánica del suelo, comprobando la efectividad del cemento como estabilizante.

TABLA XXXVI
CBR DEL SUELO + 10% CEMENTO

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 10% cemento			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,539	1,462	231,00	Base muy buena

7) Suelo con adición de 15% de cemento

a) Límites de Atterberg

El Índice de Plasticidad obtenido en esta estabilización es de -1,55%, considerándose como un material No Plástico. En cuando al Límite Líquido (LL) se alcanzó 19,44% y el Límite Plástico (LP) de 20,99% (ver TABLA XXXVII), debido a que el límite plástico es mayor al límite líquido el índice plástico es negativo, que hace referencia a que el suelo no experimenta cambios significativos en su consistencia frente a los cambios de humedad (Fig. 44).

TABLA XXXVII
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 15% CEMENTO

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 15% cemento	
Límite Líquido LL (%)	19,44%
Límite Plástico LP (%)	20,99%
Índice Plástico IP (%)	-1,55%
No Plástico	

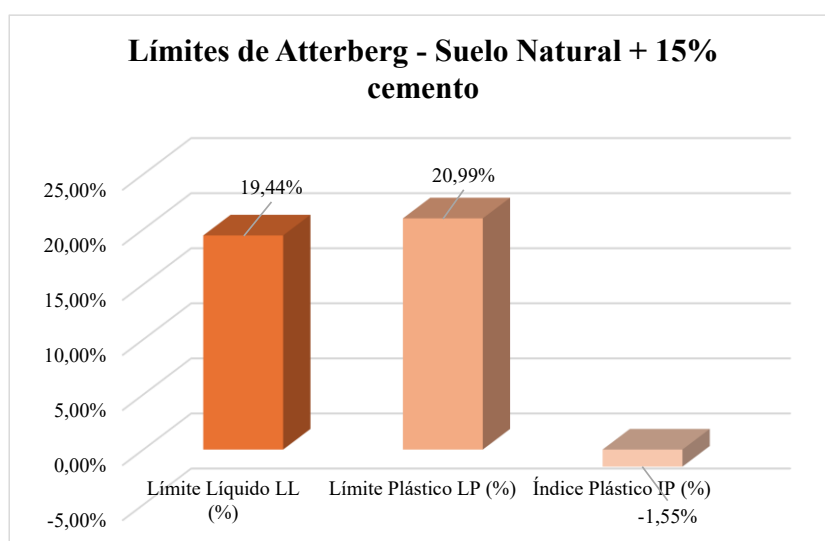


Fig. 44. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 15% cemento.

b) Proctor modificado

Para la mezcla estabilizada con cemento, el ensayo Proctor modificado método B dio un resultado de contenido de humedad óptimo de 16,00% y la densidad seca máxima obtenida es de 1,826 gr/cm³ (ver TABLA XXXVIII) (Fig. 45). La densidad seca máxima obtenida evidencia una mejora en la capacidad de compactación, demostrando que la incorporación de cemento ayuda a una mejor distribución y acomodación de partículas.

TABLA XXXVIII
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 15% CEMENTO

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 15% cemento	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,826	16,00

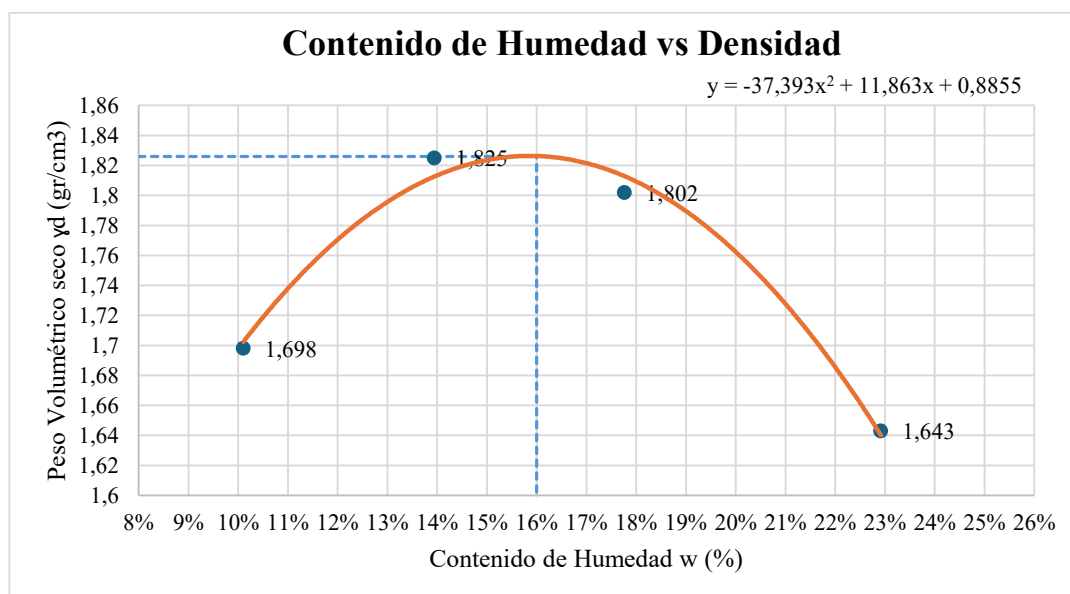


Fig. 45. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 15% cemento.

c) California Bearing Ratio CBR

Con los resultados obtenidos de la mezcla estabilizada con 15% de cemento se alcanzó una densidad máxima de 1,907 gr/cm³ al 95%. En estas condiciones de compactación se registró una capacidad de soporte de 240,00% permitiendo clasificar al suelo como base muy buena según la norma AASHTO de clasificación por el valor de CBR (ver TABLA XXXIX). Este valor refleja una elevada resistencia, superior a la requerida para una subrasante, permitiendo al suelo desempeñar funciones estructurales dentro del pavimento.

TABLA XXXIX
CBR DEL SUELO + 15% CEMENTO

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 15% cemento			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
2,007	1,907	240,00	Base muy buena

8) Suelo con adición de 5% de ceniza de totora

a) Límites de Atterberg

En el ensayo de Límites de Atterberg para el suelo + 5% de ceniza de totora se obtuvo un Límite Líquido (LL) de 23,70% y un Límite Plástico (LP) de 21,19% con los cuales se calculó el Índice de Plasticidad de 2,51% (ver TABLA XL) (Fig. 46). Estos resultados clasifican al suelo con baja plasticidad debido al reducido rango de consistencia plástica que presenta.

La adición de ceniza de totora aumenta ligeramente la plasticidad del suelo, incrementando en pequeña cantidad, sin embargo, el suelo mantiene un comportamiento predominantemente granular.

TABLA XL
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 5% CENIZA DE TOTORA

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 5% ceniza de totora	
Límite Líquido LL (%)	23,70%
Límite Plástico LP (%)	21,19%
Índice Plástico IP (%)	2,51%
Grado de Plasticidad	Baja plasticidad

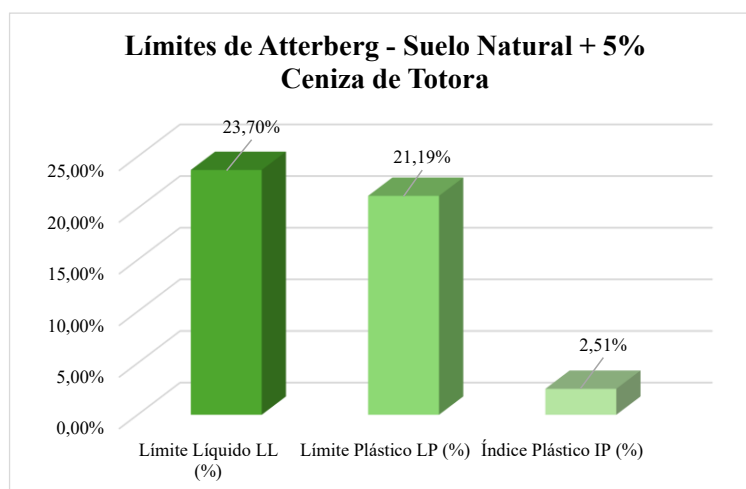


Fig. 46. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 5% ceniza de totora.

b) Proctor modificado

En el ensayo Proctor modificado método B para el suelo con adición del 5% de ceniza de totora se determinó una densidad seca máxima de 1,625 gr/cm³ y un contenido de humedad óptimo de 15,90% (ver TABLA XLI), (Fig. 47). Los parámetros obtenidos representan las condiciones óptimas en las que el suelo estabilizado alcanza su mayor nivel de compactación.

La relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de la mezcla es un parámetro importante durante la construcción de una vía, permitiendo determinar las condiciones adecuadas de compactación durante los procesos constructivos para garantizar que la subrasante alcance los niveles adecuados de compactación en campo.

TABLA XLI
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 5% CENIZA DE TOTORA

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 5% ceniza de totora	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,625	15,90

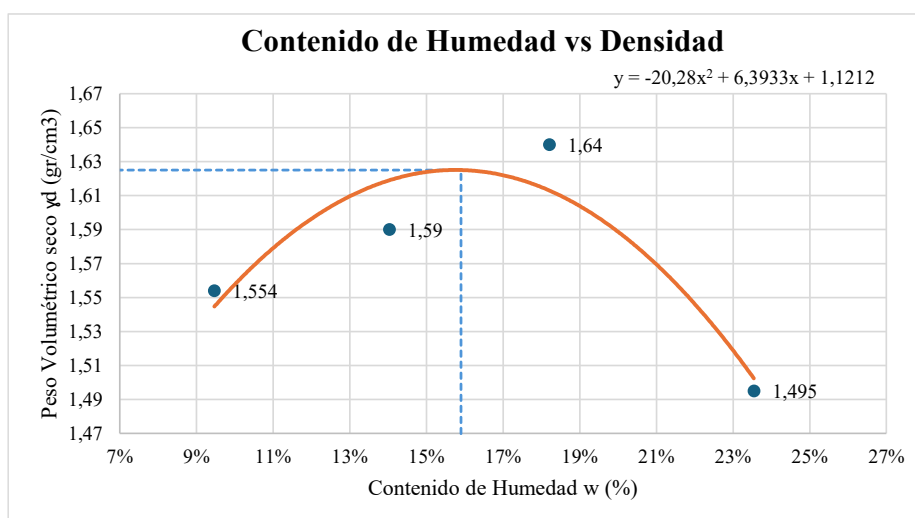


Fig. 47. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 5% ceniza de totora.

c) California Bearing Ratio CBR

Los resultados obtenidos en el ensayo alcanzaron una capacidad de soporte de 18,30% clasificando al suelo según la norma AASHTO como una subrasante buena (ver TABLA XLII). El CBR se obtuvo con la densidad máxima al 95% que es 1,489 gr/cm³. El valor de CBR aumenta favorablemente con la adición de ceniza de totora, generando un mejor desempeño del suelo.

TABLA XLII
CBR DEL SUELO + 5% CENIZA DE TOTORA

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 5% ceniza de totora			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,567	1,489	18,30	Subrasante buena

9) Suelo con adición de 10% de ceniza de totora

a) Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos en el ensayo para el suelo + 10% de ceniza de totora determinaron un Límite Líquido (LL) de 22,50% y un Límite Plástico (LP) de 21,50%, obteniéndose un Índice de Plasticidad de 1,00% (ver TABLA XLIII), (Fig. 48). Este valor determina que la mezcla tiene baja plasticidad, por lo que su comportamiento es predominantemente granular y tiene baja susceptibilidad a experimentar cambios volumétricos significativos, lo que favorece para su uso en obras civiles.

TABLA XLIII
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 10% CENIZA DE TOTORA

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 10% Ceniza de Totora	
Límite Líquido LL (%)	22,50%
Límite Plástico LP (%)	21,50%
Índice Plástico IP (%)	1,00%
Grado de Plasticidad	Baja plasticidad

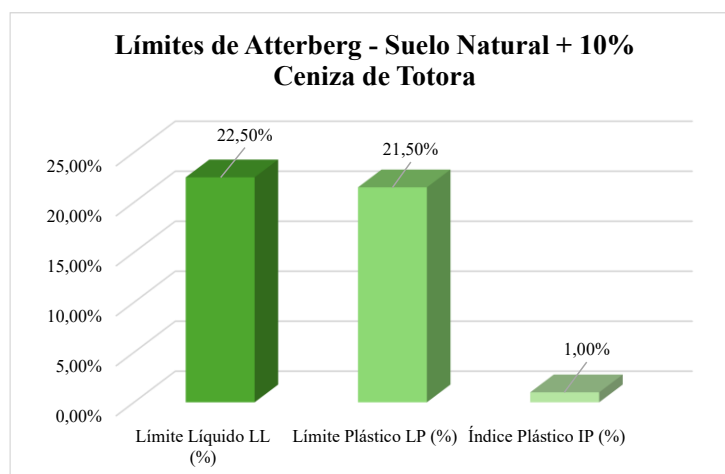


Fig. 48. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 10% ceniza de totora.

b) Proctor modificado

En el ensayo Proctor modificado método B para el suelo con adición del 10% de ceniza de totora se determinó que el contenido de humedad óptimo es de 16,00% y la densidad seca máxima obtenida es de 1,583 gr/cm³ (ver TABLA XLIV), (Fig. 49). Estos resultados representan las condiciones bajo las cuales el suelo alcanza su máximo grado de compactación, permitiendo evaluar la influencia de la ceniza sobre el comportamiento del suelo.

TABLA XLIV
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 10% CENIZA DE TOTORA

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 10% Ceniza de Totora	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,583	16,00

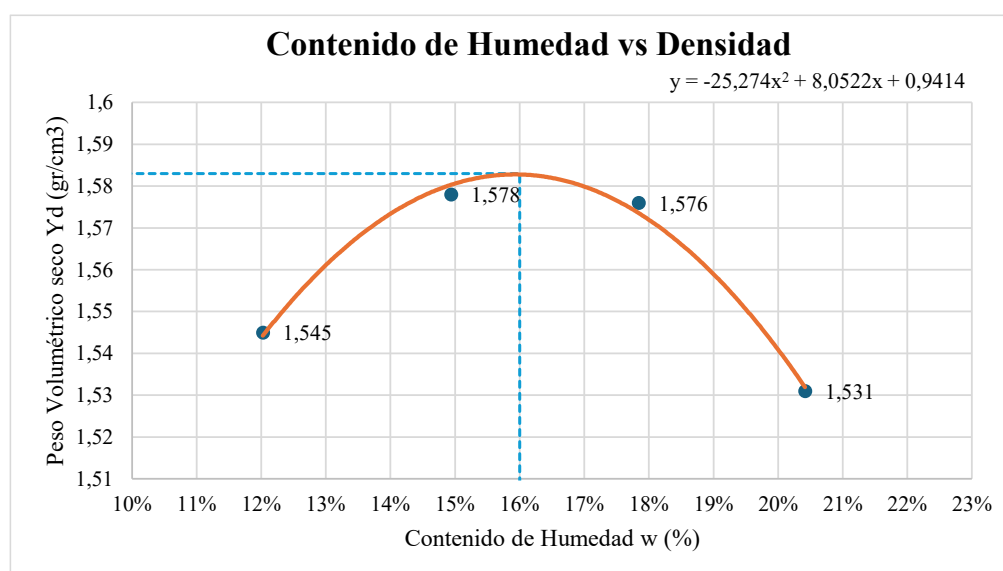


Fig. 49. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 10% ceniza de totora.

c) California Bearing Ratio CBR

Al evaluar la mezcla estabilizada con 10% de ceniza de totora se obtuvo una capacidad de soporte (CBR) de 24,10% con la densidad máxima al 95% que es 1,587 gr/cm³. (ver TABLA XLV). Con estos resultados se clasificó como subrasante muy buena según la norma AASHTO de clasificación por el % CBR y evidencia una mejora en el comportamiento mecánico, reflejando una mayor resistencia frente a las cargas y esfuerzos de penetración.

TABLA XLV
CBR DEL SUELO + 10% CENIZA DE TOTORA

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 10% Ceniza de Totora			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,671	1,587	24,10	Subrasante muy buena

10) Suelo con adición de 15% de ceniza de totora

a) Límites de Atterberg

El Índice de Plasticidad obtenido en esta estabilización es de 0,58%, considerándose como un material de baja plasticidad. En cuando al Límite Líquido (LL) se obtuvo 21,65% y el Límite Plástico (LP) de 21,07% (ver TABLA XLVI), (Fig. 50). La mínima diferencia entre el límite líquido y el límite plástico indican que el suelo tiene una capacidad limitada para modificar su comportamiento frente a las variaciones de humedad.

TABLA XLVI
LÍMITES DE ATTERBERG DEL SUELO + 15% CENIZA DE TOTORA

LÍMITES DE ATTERBERG	
Suelo Natural + 15% Ceniza de Totora	
Límite Líquido LL (%)	21,65%
Límite Plástico LP (%)	21,07%
Índice Plástico IP (%)	0,58%
Grado de Plasticidad	Baja plasticidad

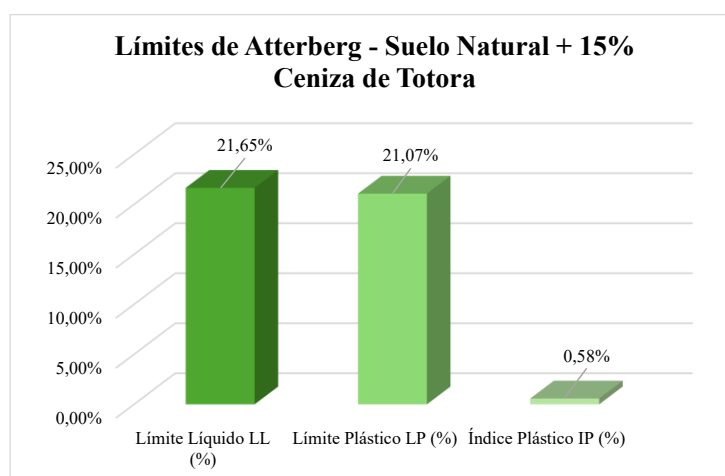


Fig. 50. Representación gráfica Límites de Atterberg del suelo + 15% ceniza de totora.

b) Proctor modificado

Para la mezcla estabilizada con ceniza de totora, el ensayo Proctor modificado método B dio un resultado de contenido de humedad óptimo de 17,00% y la densidad seca máxima obtenida es de 1,626 gr/cm³ (ver TABLA XLVII), (Fig. 51). En los resultados obtenidos se observa un incremento en la humedad óptima, destacando que la mezcla necesita mayor cantidad de agua para alcanzar las condiciones óptimas de compactación.

TABLA XLVII
PROCTOR MODIFICADO DEL SUELO + 15% CENIZA DE TOTORA

PROCTOR MODIFICADO	
Suelo Natural + 15% Ceniza de Totora	
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
1,616	17,00

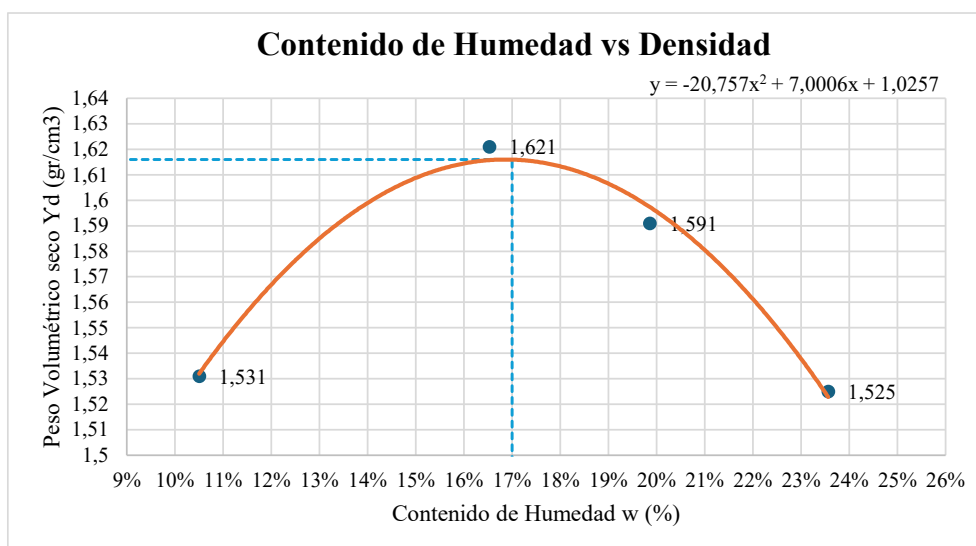


Fig. 51. Contenido de humedad vs Densidad del suelo + 15% ceniza de totora.

c) California Bearing Ratio CBR

Con los resultados obtenidos de la mezcla estabilizada con 15% de ceniza de totora registró una capacidad de soporte de 22,85%, obtenido con una densidad máxima de 1,813 gr/cm³ al 95% (ver TABLA XLVIII). Estos valores permiten clasificar al suelo como subrasante muy buena según la norma AASHTO de clasificación por el valor de CBR., reflejando la influencia favorable de la ceniza de totora en el mejoramiento del suelo arenoso.

TABLA XLVIII
CBR DEL SUELO + 15% CENIZA DE TOTORA

California Bearing Ratio CBR			
Suelo Natural + 15% Ceniza de Totora			
Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO
1,813	1,722	22,85	Subrasante muy buena

C. FASE 3

Con los resultados de los ensayos obtenidos en la fase anterior se realizó un análisis comparativo de los suelos estabilizados con cal, cemento y ceniza de totora respecto al suelo natural para determinar si las propiedades físicas y mecánicas del suelo mejoraron con la adición de los estabilizantes.

Mediante el análisis de precios unitarios se determinaron los costos y se evaluó la viabilidad económica de la estabilización de suelo arenoso para subrasante con adición de cal, cemento y ceniza de totora, determinando la mejor opción desde un punto de vista técnico y económico para su utilización en obras viales.

1) Suelo en estado natural vs Suelo estabilizado con cal

a) Límites de Atterberg

En la TABLA XLIX se presentan los resultados obtenidos del ensayo de los Límites de Atterberg del suelo arenoso estudiado. El suelo en su estado natural clasificado como SP según la SUCS y A-3 según la norma AASHTO presentó un límite líquido de 21,24%, un límite plástico de 22,18% y un índice de plasticidad de -0,94 que lo clasifica como un material no plástico.

Al adicionar 5% de cal en el suelo el límite líquido aumentó a 23,60%, en cambio el límite plástico disminuyó ligeramente a 21,77%, dando un índice plástico de 1,83%. Este comportamiento puede asociarse a la presencia de calcio que modifica la interacción entre las partículas del suelo y el agua. Para la mezcla con 10% de cal el límite líquido aumentó 1,41 puntos porcentuales por encima del suelo natural, teniendo un valor de 22,65%; el límite plástico llegó a un valor de 21,84%, mientras que el índice de plasticidad disminuyó a 0,81%.

Finalmente, el suelo con el 15% de cal obtuvo un valor de límite líquido de 22,75%, ligeramente superior al valor del suelo natural, el límite plástico aumentó a 22,25% y el índice

de plasticidad disminuyó a 0,50%, siendo el menor valor obtenido de las muestras. Con estos resultados señala una reducción progresiva de la plasticidad a medida que aumenta el contenido de cal.

TABLA XLIX
LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CAL

LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CAL				
Muestra	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)	Grado de plasticidad
Suelo Natural	21,24	22,18	-0,94	No Plástico
SN + 5% CAL	23,6	21,77	1,83	Baja plasticidad
SN + 10% CAL	22,65	21,84	0,81	Baja plasticidad
SN + 15% CAL	22,75	22,25	0,5	Baja plasticidad

En la Fig. 52 se evidencia la tendencia que con el primer incremento de cal aumenta ligeramente el índice de plasticidad debido a que genera ligeras modificaciones en la interacción suelo-agua; sin embargo, mientras se incrementa un mayor porcentaje de cal se produce una disminución progresiva de la plasticidad. Los cambios en los límites son poco notables debido a que el suelo estudiado es predominantemente arenoso y los cambios en los límites de consistencia son reducidos.

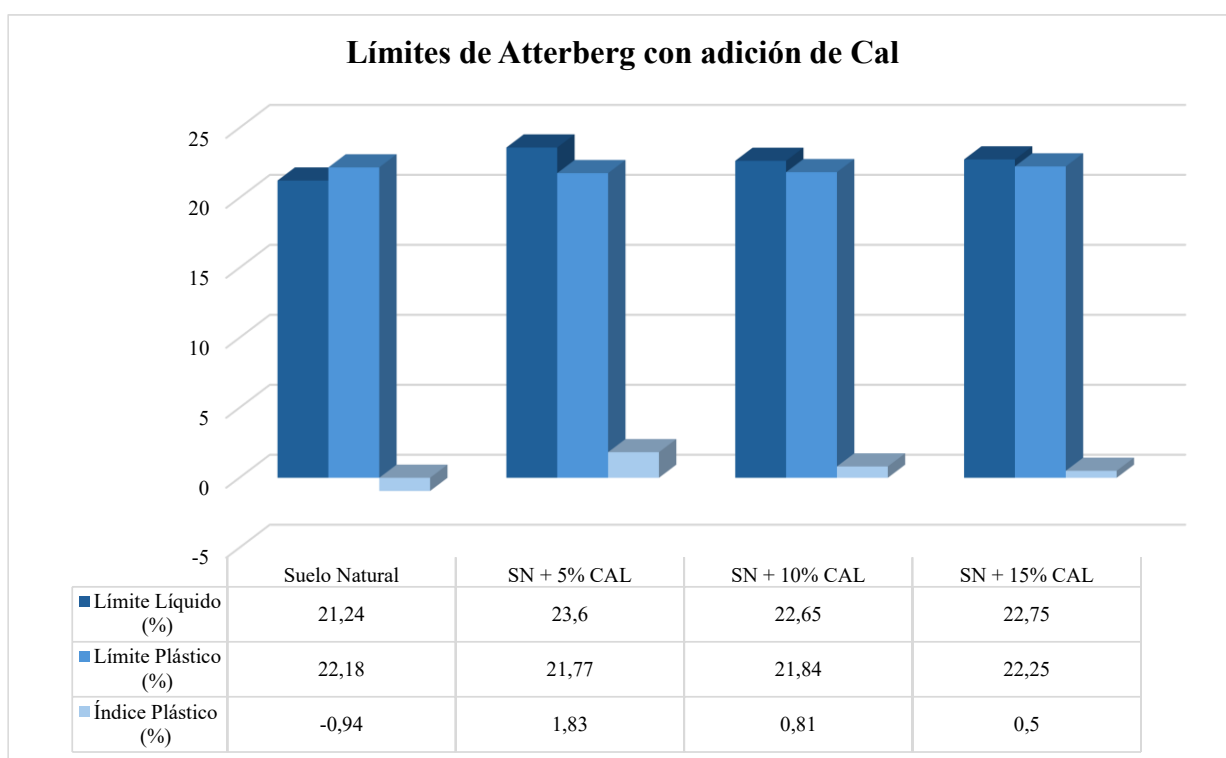


Fig. 52. Representación Límites de Atterberg con adición de cal.

b) Proctor Modificado Método B

TABLA L
PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CAL

PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CAL		
Muestra	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
Suelo Natural	1,723	14,80
SN + 5% CAL	1,680	14,50
SN + 10% CAL	1,614	16,00
SN + 15% CAL	1,584	18,10

Los resultados obtenidos en la TABLA L demuestran las variaciones presentes en los parámetros de compactación debido a la incorporación de cal. El suelo en su estado natural presentó una densidad seca máxima de 1,723 g/cm³ y un contenido de humedad óptimo de 14,80%. Con la adición de cal se observó que la densidad seca máxima disminuye progresivamente con valores de 1,680 g/cm³ con 5% de cal, 1,614 g/cm³ con 10% de cal y 1,584 g/cm³ con 15% de cal. Por otra parte, el contenido de humedad óptimo tiene una tendencia creciente mientras se añade mayor porcentaje de cal.

En la Fig. 53 se muestra de manera gráfica la variación de la densidad seca máxima del suelo con adición de cal. La mayor densidad encontrada en este gráfico es de 1,723 g/cm³ perteneciente al suelo natural, al adicionar 5% de cal la densidad disminuyó a 1,680 g/cm³ equivalente a una reducción de 2,5%. La tendencia se evidencia al adicionar 10% de cal ya que la densidad disminuye a 1,614 g/cm³ y con el 15% de cal obtiene una densidad de 1,584 g/cm³. Este comportamiento es el que normalmente se presenta en los suelos mezclados con cal, por lo que está asociado a mejoras de estabilidad.

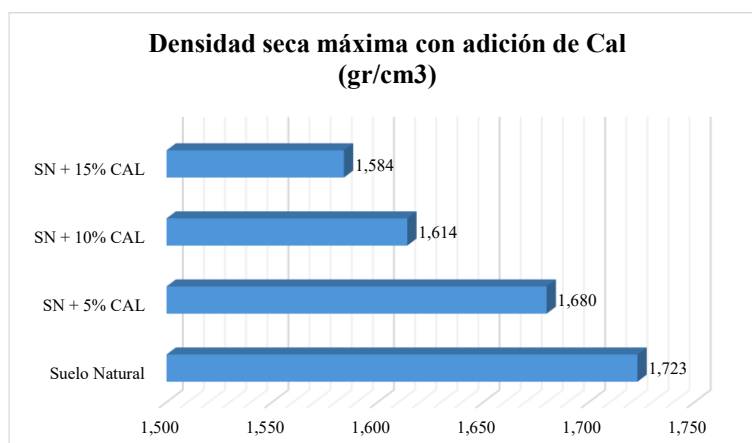


Fig. 53. Densidad seca máxima con adición de Cal.

El contenido de humedad óptimo presenta una tendencia diferente como se puede ver en la Fig. 54. El suelo natural presentó una humedad óptima de 14,80%, al añadirle el 5% de cal el contenido óptimo disminuyó a 14,50%. Al incrementar un mayor porcentaje de cal la humedad óptima aumentó como se evidencia con el 10% de incremento de cal se obtuvo 16% de humedad y con el 15% subió a 18,10%. Este comportamiento se presenta debido a que la cal desarrolla reacciones de hidratación por lo que requiere mayor cantidad de agua.

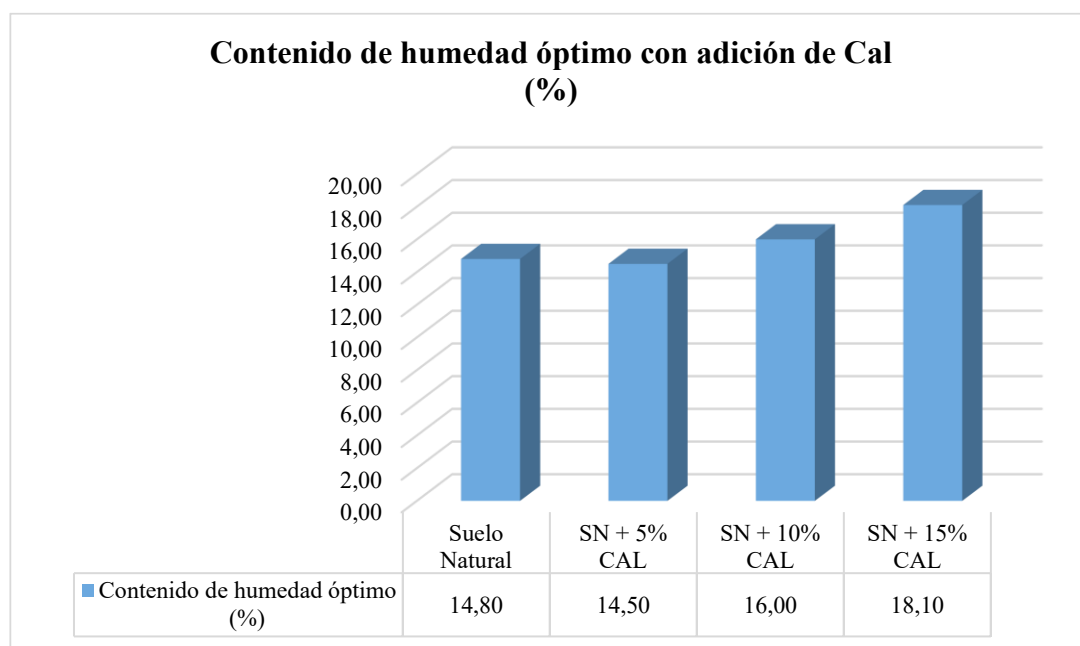


Fig. 54. Contenido de humedad óptimo con adición de Cal.

c) California Bearing Ratio (CBR)

En la TABLA LI se muestran los resultados del ensayo de CBR con adición de cal, se caracterizó al suelo natural para posteriormente poder compararlo con el estabilizado con cal en sus diferentes porcentajes. El suelo natural presentó una densidad seca máxima al 95% de 1,536 gr/cm³ y un CBR de 14,40%, logrando clasificarse como una “Subrasante regular” según la norma AASHTO.

Al incrementar 5% de cal en el suelo la densidad disminuyó levemente a 1,514 gr/cm³ debido al acomodo de las partículas, pero mecánicamente el CBR aumentó a 41,50% clasificándose como “Subbase buena”. Al adicionar el 10% de cal la densidad seca máxima al 95% ascendió a 1,550 gr/cm³ logrando el valor máximo de CBR de adición con cal que es 62,40% y que logra clasificarse como “Base buena”. Finalmente, con la adición del 15% del estabilizante se obtuvo la densidad seca máxima al 95% de 1,559 gr/cm³, pero el CBR disminuyó a 36%, sin embargo,

se clasificó como “Subbase buena”.

TABLA LI
% CBR CON ADICIÓN DE CAL

CBR CON ADICIÓN DE CAL					
Muestra	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO	Incremento (%)
Suelo Natural	1,617	1,536	14,40	Subrasante Regular	0,00
SN + 5% CAL	1,594	1,514	41,50	Subbase buena	188,19
SN + 10% CAL	1,632	1,550	62,40	Base buena	333,33
SN + 15% CAL	1,641	1,559	36,00	Subbase buena	150,00

En la Fig. 55 se muestra gráficamente la variación del CBR del suelo con los diferentes porcentajes de adición de cal. El CBR base es el de 14,40% que corresponde al suelo natural. En el caso del suelo natural + 5% de cal el CBR aumenta a 41,50% lo que es equivalente a un incremento del 188,19%. Para la adición del 10% de cal se observa una tendencia similar ya que aumenta el CBR a 62,40%, equivalente a un incremento de 333,33% respecto al CBR del suelo natural. Finalmente, con el 15% de cal el CBR disminuye respecto al 10%, pero aumenta respecto al CBR del suelo natural, dándonos un valor de 36%, que representa un incremento del 150%.

Este comportamiento muestra que la incorporación de cal incrementa las propiedades de manera significativa hasta un 10% de adición, donde se obtiene la mayor capacidad portante. Sin embargo, al incrementar el porcentaje de adición el aditivo satura mecánicamente la mezcla y debilita la fricción interna de la arena, lo que se evidencia en la disminución del calor de CBR a pesar de tener una densidad alta.

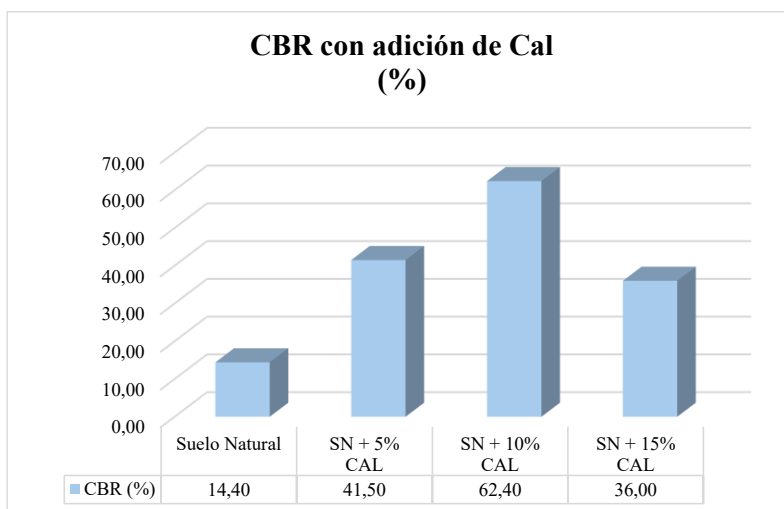


Fig. 55. Representación CBR con adición de Cal.

d) Porcentaje óptimo de la adición de cal

En la Fig. 56 se recopilan los resultados de CBR obtenidos para cada porcentaje de adición y se determinó en el punto más alto de la gráfica que el porcentaje óptimo de adición de cal es de 9,80%, con el que se obtiene un CBR de 62,5%.

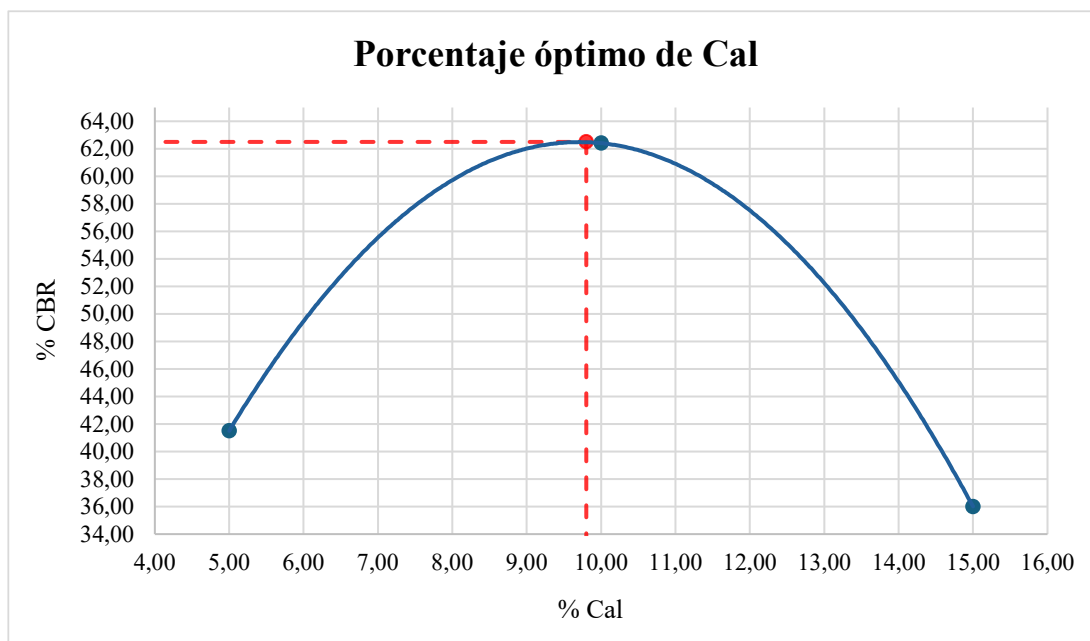


Fig. 56. Porcentaje óptimo de Cal

2) Suelo en estado natural vs Suelo estabilizado con cemento

a) Límites de Atterberg

Los resultados obtenidos en el ensayo se presentan en la TABLA LII. El suelo en su estado natural clasificado como SP según la SUCS y A-3 según la norma AASHTO presentó un límite líquido de 21,24%, un límite plástico de 22,18% y un índice de plasticidad de -0,94 que lo clasifica como un material no plástico debido a que el material es predominantemente granular y con ausencia de finos.

La mezcla del suelo con el 5% de cemento se evidencia que el límite líquido aumentó a 22,50%, mientras que el límite plástico disminuyó a 22,50%. Con estos datos se obtuvo un índice plástico de 1,60%, determinándose como un suelo de baja plasticidad, esto está ligado principalmente a que al incrementar material fino en la muestra se eleva la humedad requerida para alcanzar el estado fluido del suelo.

Para la mezcla con 10% de cemento el límite líquido descendió a 21,20% y el límite plástico alcanzó un valor de 20,50% lo que redujo el índice de plasticidad a 0,80%, manteniéndose como un suelo de baja plasticidad. Finalmente, al evaluar la adición del 15% de cemento el límite líquido decayó a 19,44% y el límite plástico obtenido fue de 20,99, lo que da como resultado un índice plástico de -1,55% determinado como un suelo no plástico. Estos datos evidencian que el incremento del porcentaje de adición del cemento genera una pérdida progresiva de la plasticidad.

TABLA LII
LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CEMENTO

LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CEMENTO				
Muestra	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)	Grado de plasticidad
Suelo Natural	21,24	22,18	-0,94	No Plástico
SN + 5% CEMENTO	22,50	20,90	1,60	Baja plasticidad
SN + 10% CEMENTO	21,20	20,40	0,80	Baja plasticidad
SN + 15% CEMENTO	19,44	20,99	-1,55	No Plástico

En la Fig. 57 se evidencia la tendencia que con el primer incremento de cal aumenta ligeramente el índice de plasticidad debido a que genera ligeras modificaciones en la interacción suelo-agua; sin embargo, mientras se incrementa un mayor porcentaje de cal se produce una disminución progresiva de la plasticidad. Los cambios en los límites son poco notables debido a que el suelo estudiado es predominantemente arenoso y los cambios en los límites de consistencia son reducidos.

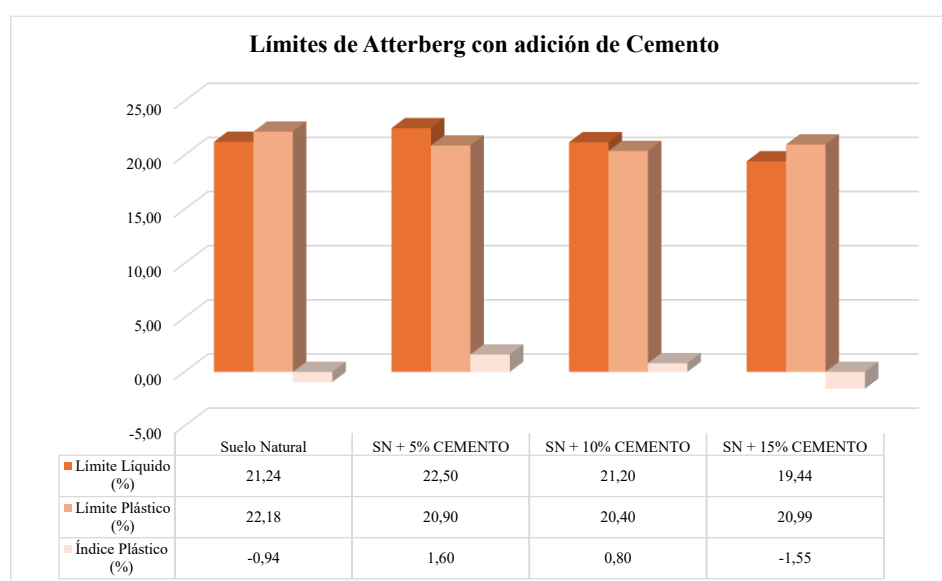


Fig. 57. Representación Límites de Atterberg con adición de cemento.

b) Proctor Modificado Método B

TABLA LIII
PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CEMENTO

PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CEMENTO		
Muestra	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
Suelo Natural	1,723	14,80
SN + 5% CEMENTO	1,709	14,50
SN + 10% CEMENTO	1,819	13,00
SN + 15% CEMENTO	1,826	16,00

Los resultados obtenidos en la TABLA LIII demuestran las variaciones presentes en los parámetros de compactación debido a la incorporación de cal. El suelo en su estado natural presentó una densidad seca máxima de 1,723 g/cm³ y un contenido de humedad óptimo de 14,80%. Con la adición de cal se observó que la densidad seca máxima disminuye progresivamente con valores de 1,680 g/cm³ con 5% de cal, 1,614 g/cm³ con 10% de cal y 1,584 g/cm³ con 15% de cal. Por otra parte, el contenido de humedad óptimo tiene una tendencia creciente mientras se añade mayor porcentaje de cal.

En la Fig. 58 se muestra de manera gráfica la variación de la densidad seca máxima del suelo con adición de cal. La mayor densidad encontrada en este gráfico es de 1,723 g/cm³ perteneciente al suelo natural, al adicionar 5% de cal la densidad disminuyó a 1,680 g/cm³ equivalente a una reducción de 2,5%. La tendencia se evidencia al adicionar 10% de cal ya que la densidad disminuye a 1,614 g/cm³ y con el 15% de cal obtiene una densidad de 1,584 g/cm³. Este comportamiento es el que normalmente se presenta en los suelos mezclados con cal, por lo que está asociado a mejoras de estabilidad.

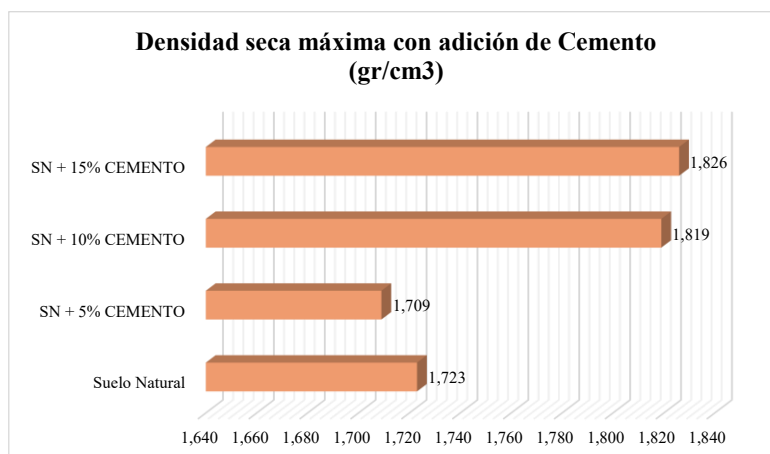


Fig. 58. Densidad seca máxima con adición de Cemento.

En la Fig. 59 se representa la tendencia de los límites de Atterberg con cada porcentaje de adición del estabilizador. El suelo natural presentó una humedad óptima de 14,80%, al añadirle el 5% de cemento el contenido óptimo disminuyó a 14,50%, alterado levemente debido al reacomodo físico de las partículas finas. Al incrementar un mayor porcentaje de cemento a 10% y 15% el contenido óptimo de humedad aumenta a 13,00% y 16,00% respectivamente. El cambio notado no es muy brusco ya que en las arenas no se experimenta reacciones químicas complejas ni cambios volumétricos significativos.

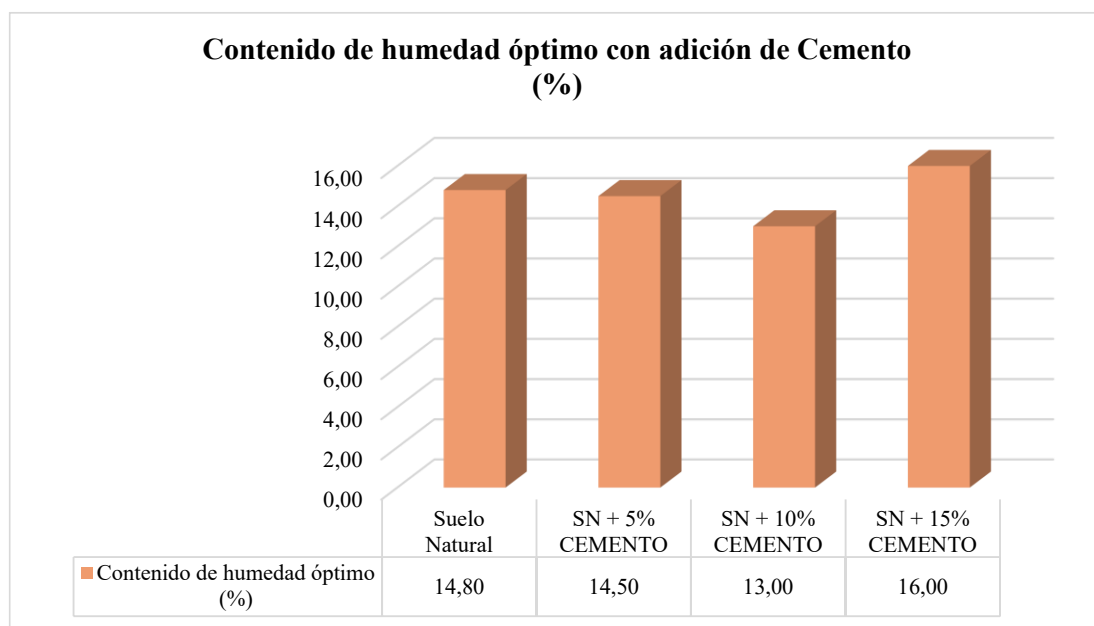


Fig. 59. Contenido de humedad óptimo con adición de Cemento.

c) California Bearing Ratio (CBR)

Los resultados obtenidos del ensayo se muestran en la TABLA LIV, en la que se evidencian las variaciones en las densidades secas máximas al 95% y la capacidad de soporte del suelo. El suelo en su estado natural presentó una densidad seca máxima al 95% de 1,536 gr/cm³ y un CBR de 14,40%, logrando clasificarse como una “Subrasante regular” según la norma AASHTO.

Con la adición del 5% de cemento se evidenció la disminución de la densidad a 1,529 gr/cm³, por la parte mecánica el CBR aumentó exponencialmente a 176,86% clasificándose como “Base muy buena”. Con el incremento de cemento al 10% la densidad seca máxima al 95% siguió la tendencia de disminuir, obteniendo 1,462 gr/cm³ y de igual manera siguiendo la tendencia el valor CBR aumentó notablemente a 231,00%, clasificándose como “Base muy

buena”. Finalmente, al incorporar el 15% de cemento se obtuvo la densidad seca máxima al 95% de 1,907 gr/cm³ y un CBR de a 240,00%, siendo el punto más alto y clasificándolo como “Base muy buena”.

TABLA LIV
% CBR CON ADICIÓN DE CEMENTO

CBR CON ADICIÓN DE CEMENTO					
Muestra	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO	Incremento (%)
Suelo Natural	1,617	1,536	14,40	Subrasante Regular	0,00
SN + 5% CEMENTO	1,609	1,529	176,85	Base muy buena	1128,13
SN + 10% CEMENTO	1,539	1,462	231,00	Base muy buena	1504,17
SN + 15% CEMENTO	2,007	1,907	240,00	Base muy buena	1566,67

En la Fig. 60 se evidencia de manera gráfica la variación del CBR del suelo con los diferentes porcentajes de adición de ceniza de totora. El CBR del suelo natural sin ningún estabilizante es de 14,40%. En la mezcla del suelo natural + 5% de cal se observa un incremento considerable respecto al natural, llegando a un valor de CBR de 176,85%, es decir un incremento de 1128,13%. Para la adición del 10% de cemento la tendencia está marcada con un incremento de 1504,17%, llegando a un CBR de 231,00%. Y el mayor valor de CBR de esta estabilización es con el 15% de adición de cemento ya que alcanza un CBR de 240%, evidenciando un incremento de 1566,67% en comparación al valor obtenido en el suelo natural.

Como se evidencia en los resultados, el cemento no pierde su resistencia por sobredosificación, sino que muestra un crecimiento continuo como se observa en los porcentajes ensayados. Esto sucede debido a que el suelo utilizado es predominantemente arenoso como lo indica su clasificación SP y el cemento con su reacción de hidratación envuelven las partículas de arena y rellenan de forma masiva los vacíos.

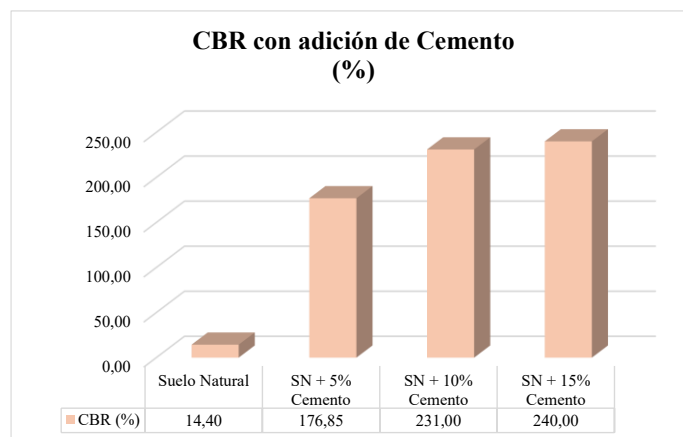


Fig. 60. Representación CBR con adición de Cemento.

d) Porcentaje óptimo de la adición de Cemento

En la Fig. 61 se recopilan los resultados de CBR obtenidos para cada porcentaje de adición de cemento y se determinó en el punto más alto de la gráfica que el porcentaje óptimo de adición de cemento es de 13,5%, con el que se obtiene un CBR de 242%.

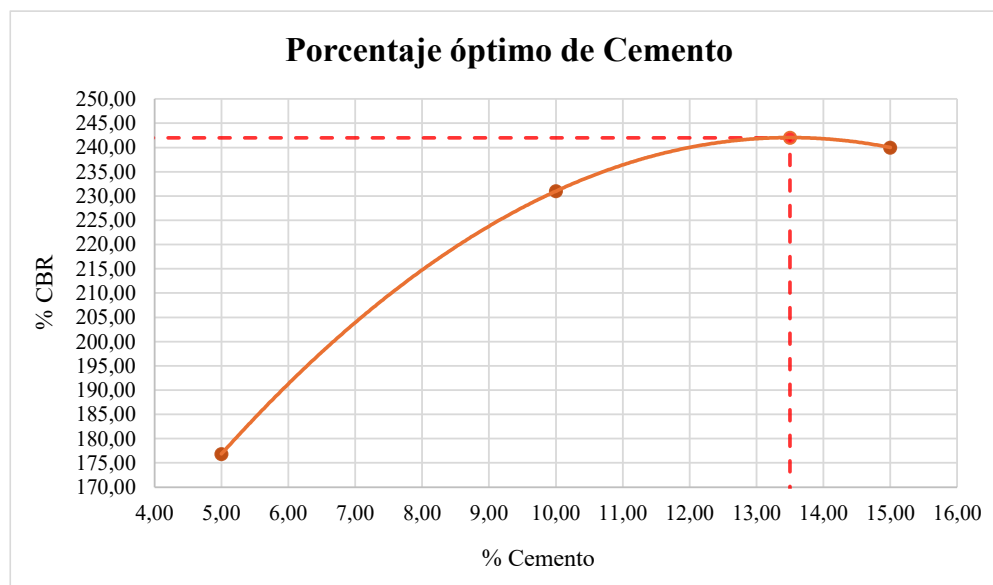


Fig. 61. Porcentaje óptimo de Cemento

3) Suelo en estado natural VS Suelo estabilizado con ceniza de totora

a) Límites de Atterberg

En la TABLA LV se exponen los resultados obtenidos del ensayo de los Límites de Atterberg del suelo arenoso estudiado y el suelo con las diferentes adiciones de ceniza de totora. El suelo en su estado natural clasificado como arena mal graduada (SP) según la SUCS y A-3 según la norma AASHTO presentó un límite líquido de 21,24%, un límite plástico de 22,18% y un índice de plasticidad de -0,94 que lo clasifica como un material no plástico.

El suelo con adición del 5% de ceniza de totora presenta un límite líquido de 23,70%, en cambio el límite plástico disminuyó ligeramente a 21,19%, obteniendo a partir de estos datos un índice plástico de 2,51% que clasifica al suelo como baja plasticidad. El incremento inicial del índice de plasticidad frente al suelo natural se da debido a que a la arena se le adicionaron partículas finas, modificando la retención de agua.

A partir de la mezcla con 10% de ceniza de totora se visualiza una tendencia decreciente ya

que el límite líquido disminuyó a 22,50%, mientras que el límite plástico subió a 21,50%. Con estos datos se determinó una plasticidad baja dado el índice plástico obtenido que es 1,00%. Llegó a un valor de 21,84%, mientras que el índice de plasticidad disminuyó a 0,81%. Para el incremento de 15% de ceniza de totora se registró un límite líquido de 21,65%, ligeramente superior al valor del suelo natural, el límite plástico obtenido fue 21,07% y el índice de plasticidad disminuyó a 0,58%, siendo el menor valor obtenido de las muestras. Con estos resultados se evidencia una pérdida progresiva en la plasticidad a medida que aumenta el contenido de ceniza de totora.

TABLA LV
LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA

LÍMITES DE ATTERBERG CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA				
Muestra	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)	Grado de plasticidad
Suelo Natural	21,24	22,18	-0,94	No Plástico
SN + 5% Ceniza Totora	23,70	21,19	2,51	Baja plasticidad
SN + 10% Ceniza Totora	22,50	21,50	1,00	Baja plasticidad
SN + 15% Ceniza Totora	21,65	21,07	0,58	Baja plasticidad

En la Fig. 62 se observa como varían el límite plástico, límite líquido e índice de plasticidad con los diferentes porcentajes de adición de ceniza de totora. Se observa que con la adición del 5% de ceniza de totora el índice de plasticidad se eleva frente al índice plástico del suelo natural, pero en las adiciones del 10% y 15% se genera una reacción puzolánica entre los componentes de la ceniza de totora y los minerales del suelo, por lo que se observa la disminución progresiva del índice plástico. La adición del estabilizante rigidiza la estructura interna y restringe la movilidad de las partículas, lo que genera una disminución en la afinidad del material con el agua.

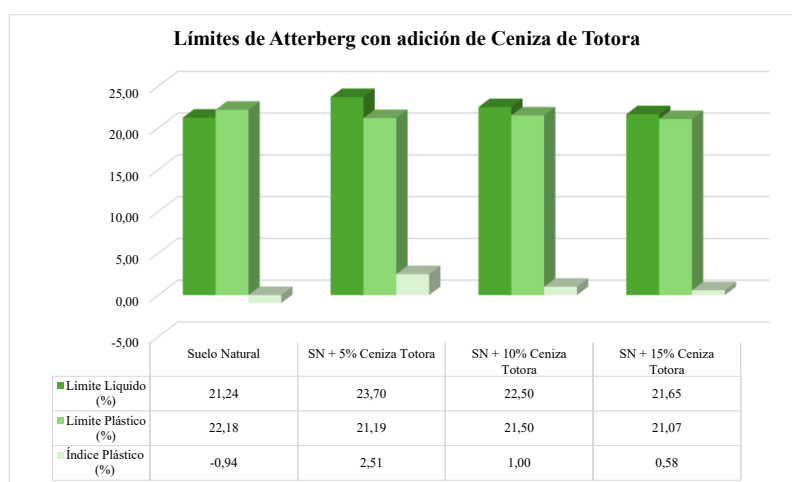


Fig. 62. Representación Límites de Atterberg con adición de ceniza de totora.

b) Proctor Modificado Método B

TABLA LVI
PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA

PROCTOR MODIFICADO CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA		
Muestra	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad óptimo (%)
Suelo Natural	1,723	14,80
SN + 5% Ceniza Totora	1,625	15,90
SN + 10% Ceniza Totora	1,583	16,00
SN + 15% Ceniza Totora	1,616	17,00

Los resultados obtenidos en la TABLA LVI demuestran las variaciones en los parámetros de compactación debido a la adición de ceniza de totora. El suelo en su estado natural presentó una densidad seca máxima de 1,723 g/cm³ y un contenido de humedad óptimo de 14,80%. Con la adición de ceniza de totora se identificó un descenso inicial de la densidad seca máxima. Los valores obtenidos son de 1,625 g/cm³ con adición del 5% de ceniza de totora, con el 10% de cal se obtuvo el valor mínimo de densidad seca máxima que es de 1,625 g/cm³ y finalmente subió a 1,583 g/cm³ con 15% de estabilizante.

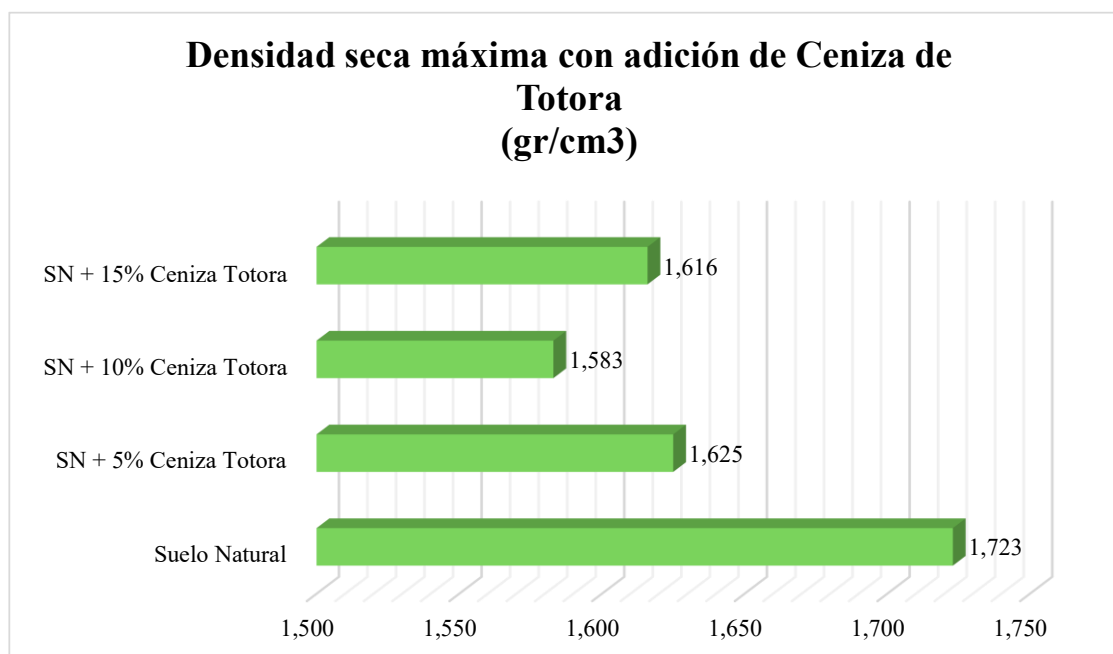


Fig. 63. Densidad seca máxima con adición de Ceniza de Totora.

En cuanto al contenido de humedad el requerimiento de agua incrementa constantemente cuando el porcentaje de ceniza de totora aumenta Fig. 64. Esto se observa en los resultados: el

suelo natural presentó una humedad óptima de 14,80%, la mezcla con el 5% de adición incrementa a 15,90%, con el 10% de adición el contenido óptimo subió a 16,00% y manteniéndose la tendencia con el 15% de estabilizante alcanzó un 17% de contenido óptimo de humedad. Este comportamiento se da debido a que la ceniza de totora al ser derivada de una combustión de materia orgánica es altamente porosa, potenciando la absorción física del agua durante el proceso de homogeneización de la mezcla.

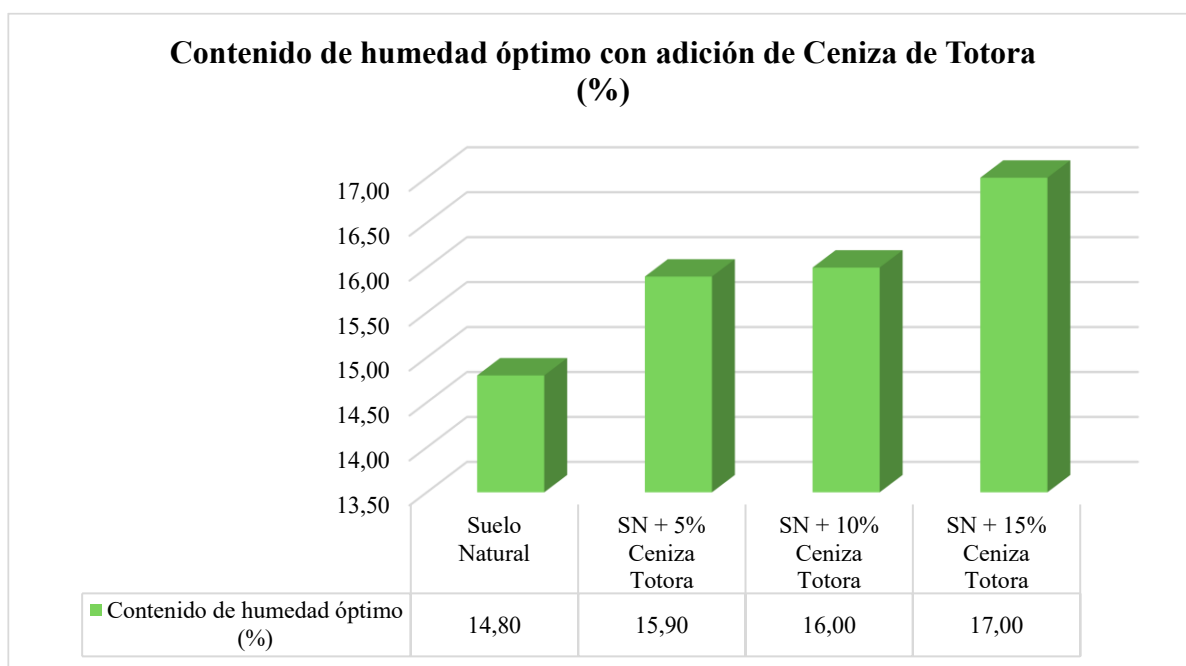


Fig. 64. Contenido de humedad óptimo con adición de Ceniza de Totora.

c) California Bearing Ratio (CBR)

Los resultados del ensayo de CBR se muestran en la TABLA LVII en la que se caracterizó el suelo natural y el suelo estabilizado con ceniza de totora en diferentes porcentajes de adición. El suelo natural presentó una densidad seca máxima al 95% de 1,536 gr/cm³ y un CBR de 14,40%, parámetros que lo clasifican como una “Subrasante regular” según la norma AASHTO.

Con la adición del 5% de ceniza de totora la densidad seca máxima al 95% disminuyó levemente a 1,489 gr/cm³, pero mecánicamente el CBR incrementó a 18,30% clasificándose como “Subrasante buena”. En la mezcla con el 10% de ceniza de totora el CBR logró alcanzar un 24,10% con la densidad seca máxima al 95% de 1,587 gr/cm³ y clasificándose como “Subrasante muy buena”. Finalmente, al incorporar el 15% de ceniza de totora se determinó la densidad seca máxima al 95% de 1,722 gr/cm³ y un CBR de 22,85% que presentó una ligera disminución, sin embargo, se clasificó como “Subrasante muy buena”.

TABLA LVII
% CBR CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA

CBR CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA					
Muestra	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Densidad seca máxima (95%)	CBR (%)	Clasificación del suelo por el %CBR según la Norma AASHTO	Incremento (%)
Suelo Natural	1,617	1,536	14,40	Subrasante Regular	0,00
SN + 5% Ceniza Totora	1,567	1,489	18,30	Subrasante Buena	27,08
SN + 10% Ceniza Totora	1,671	1,587	24,10	Subrasante muy buena	67,36
SN + 15% Ceniza Totora	1,813	1,722	22,85	Subrasante muy buena	58,68

En la Fig. 65 se muestra gráficamente la variación de la capacidad portante del suelo con los diferentes porcentajes de adición de ceniza de totora. El CBR base es el de 14,40% que corresponde al suelo natural. En la muestra adicionada el 5% de ceniza de totora el CBR incrementa un 27,08%, obteniendo un valor de CBR de 18,30%. Para la adición del 10% de estabilizante mantiene la tendencia ascendente con un valor de CBR a 24,10%, equivalente a un incremento de 67,36% respecto al CBR del suelo natural. Finalmente, con el 15% de adición el CBR disminuye a 22,85%, sin embargo, frente al valor de CBR del suelo natural representa un incremento de 22,85%.

Este comportamiento indica que la sobredosificación de ceniza de totora a partir del 15% en el caso estudiado genera que el estabilizador mecánicamente satura el suelo con partículas finas sueltas que reducen la fricción interna de la arena, entendiéndose que esta es la razón por la que presenta un descenso en el valor de CBR.

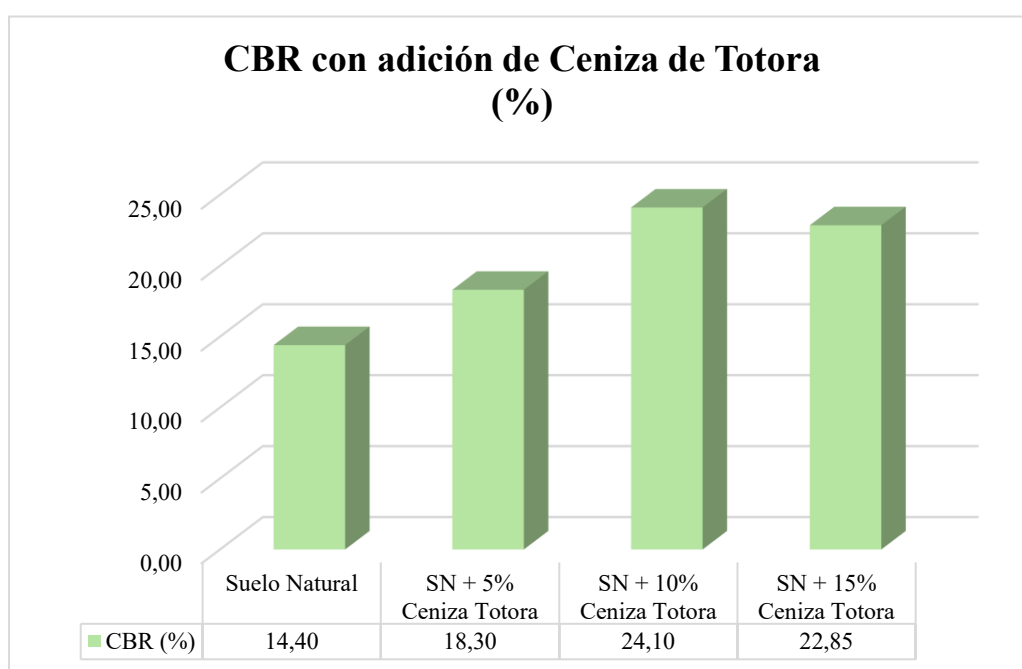


Fig. 65. Representación CBR con adición de Ceniza de Totora.

d) Porcentaje óptimo de la adición de Ceniza de Totorá

En la Fig. 66 se recopilan los resultados de CBR obtenidos para cada porcentaje de adición de ceniza de totora y se determinó en el punto más alto de la gráfica que el porcentaje óptimo de adición de ceniza de totora es de 11,8%, con el que se obtiene un CBR de 24,47%.

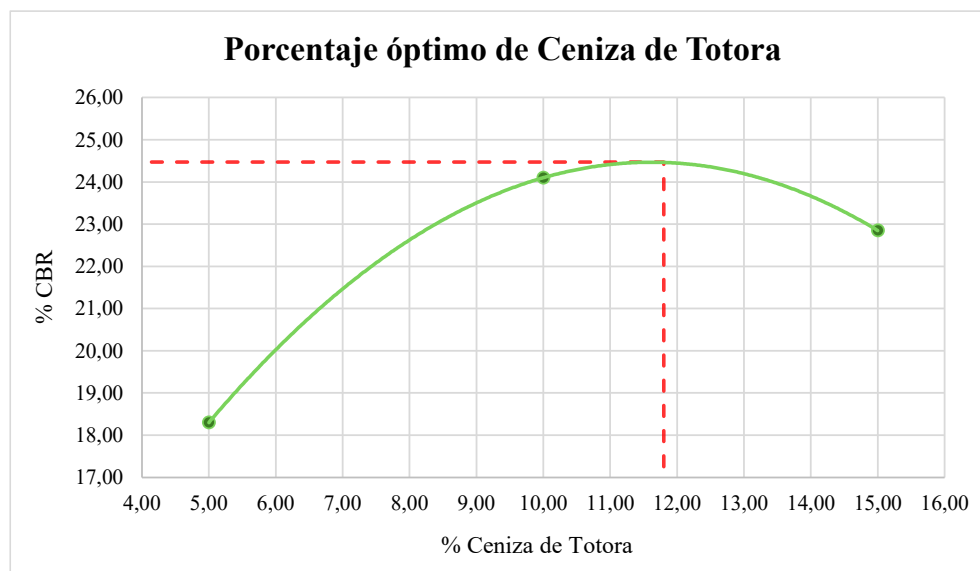


Fig. 66. Porcentaje óptimo de Ceniza de Totorá

4) Análisis de la viabilidad económica

Para analizar la viabilidad económica de la estabilización del suelo arenoso, se realizó un presupuesto referencial para una estabilización de subrasante arenosa de 1 km de longitud y 6 m de ancho de carril con adición de cal, cemento y ceniza de totora. En la TABLA LVIII se evidencia que la estabilización más cara es con cemento, llegando a un valor de \$92.542,10 dólares. Seguido por la estabilización con cal que tiene un presupuesto de \$43.240,57 dólares. Y la estabilización más económica es con la ceniza de totora que da un valor de \$25.510,57 dólares, considerándose la más viable económicamente.

TABLA LVIII
PRESUPUESTOS REFERENCIALES PARA ESTABILIZACIÓN CON CAL, CEMENTO Y CENIZA DE TOTORA

PRESUPUESTO REFERENCIAL	
ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CAL	\$ 43.240,57
ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CEMENTO	\$ 92.542,57
ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA	\$ 25.510,57

a) Estabilización de subrasante arenosa con adición de cal

En la TABLA LIX se detallan los rubros necesarios para llevar a cabo la estabilización con sus respectivas unidades, cantidades y precios unitarios que llevan a tener un presupuesto de \$43.240,57 dólares.

TABLA LIX

PRESUPUESTO REFERENCIAL DE ESTABILIZACIÓN CON CAL

INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CAL

UBICACIÓN: LA LIBERTAD - HUACHI GRANDE

OFERENTE: PRESUPUESTO REFERENCIAL

ELABORADO: KATHERIN ALTAMIRANO

TABLA DE DESCRIPCIÓN DE RUBROS, UNIDADES, CANTIDADES Y PRECIOS

<u>No.</u>	<u>Rubro / Descripción</u>	<u>Unidad</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Precio unitario</u>	<u>Precio global</u>
1.1.1	Replanteo y nivelación (Vías)	km.	1,00	772,57	772,57
1.1.2	Desbroce y limpieza del terreno	m2	6.000,00	0,39	2.340,00
25	Estabilización con cal	m3	1.800,00	18,66	33.588,00
1.5.1	Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)	m2	6.000,00	1,09	6.540,00
				TOTAL:	43.240,57

SON : CUARENTA Y TRES MIL DOSCIENTOS CUARENTA DOLARES, 57/100 CENTAVOS

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

b) Estabilización de subrasante arenosa con adición de cemento

En la TABLA LX se detallan los rubros necesarios para llevar a cabo la estabilización con sus respectivas unidades, cantidades y precios unitarios que llevan a tener un presupuesto de \$92.542,57 dólares.

TABLA LX

PRESUPUESTO REFERENCIAL DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CEMENTO

UBICACIÓN: LA LIBERTAD - HUACHI GRANDE

OFERENTE: PRESUPUESTO REFERENCIAL

ELABORADO: KATHERIN ALTAMIRANO

TABLA DE DESCRIPCIÓN DE RUBROS, UNIDADES, CANTIDADES Y PRECIOS

<u>No.</u>	<u>Rubro / Descripción</u>	<u>Unidad</u>	<u>Cantidad</u>	<u>Precio unitario</u>	<u>Precio global</u>
1.1.1	Replanteo y nivelación.(Vías)	km.	1,00	772,57	772,57
1.1.2	Desbroce y limpieza del terreno	m2	6.000,00	0,39	2.340,00
25	Estabilización con cemento	M3	1.800,00	46,05	82.890,00
1.5.1	Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)	m2	6.000,00	1,09	6.540,00
				TOTAL:	92.542,57

SON : NOVENTA Y DOS MIL QUINIENTOS CUARENTA Y DOS DOLARES, 57/100 CENTAVOS

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

c) Estabilización de subrasante arenosa con adición de ceniza de totora

En la TABLA LXI se detallan los rubros necesarios para llevar a cabo la estabilización con sus respectivas unidades, cantidades y precios unitarios que llevan a tener un presupuesto de \$25.510,57 dólares.

TABLA LXI
PRESUPUESTO REFERENCIAL DE ESTABILIZACIÓN CON CENIZA DE TOTORA

INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CENIZA DE TOTORA
UBICACIÓN: LA LIBERTAD - HUACHI GRANDE
OFERENTE: PRESUPUESTO REFERENCIAL
ELABORADO: KATHERIN ALTAMIRANO

TABLA DE DESCRIPCIÓN DE RUBROS, UNIDADES, CANTIDADES Y PRECIOS

<i>No.</i>	<i>Rubro / Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Precio global</i>
1.1.1	Replanteo y nivelación.(Vías)	km.	1,00	772,57	772,57
1.1.2	Desbroce y limpieza del terreno	m2	6.000,00	0,39	2.340,00
25	Estabilización con ceniza de totora	M3	1.800,00	8,81	15.858,00
1.5.1	Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)	m2	6.000,00	1,09	6.540,00
				TOTAL:	25.510,57

SON : VEINTE Y CINCO MIL QUINIENTOS DIEZ DOLARES, 57/100 CENTAVOS

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

II. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El presente estudio tuvo su enfoque principal en evaluar cómo y en qué medida la adición de cal, cemento y ceniza de totora modifican las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande.

A. HIPÓTESIS

Hipótesis planteada (H1): La adición de cal, cemento y ceniza de totora modifican las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande para mejorar su comportamiento como material estabilizante en infraestructura vial.

B. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Hipótesis nula (H0): La adición de cal, cemento y ceniza de totora no modifican las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande para mejorar su comportamiento como material estabilizante en infraestructura vial.

Contrastación de (H0): Los resultados obtenidos de los diferentes ensayos al adicionar cal,

cemento y ceniza de totora evidenciaron la mejora en las propiedades del suelo, principalmente la capacidad portante que es el ensayo CBR. La tendencia en las mezclas evaluadas se presentó en el aumento del valor de CBR respecto al valor del suelo no estabilizado, demostrando la efectividad de los materiales estabilizantes.

Además, en las muestras se constató la disminución de la plasticidad al incrementar los porcentajes de cal, cemento y ceniza de totora. Gracias a la mejora de las propiedades algunos porcentajes de estabilizantes alcanzaron condiciones de resistencia muy elevadas por lo que pueden soportar cargas de subbase e incluso base en algunos casos. Con estos resultados se descarta la hipótesis de que la cal, el cemento y la ceniza de totora no generan mejoras en las propiedades del suelo arenoso estabilizado.

Evidencia de (H1): La validación de la hipótesis se fundamentó en la comparación de los resultados obtenidos en el suelo natural y en el suelo con diferentes porcentajes de adición de cal, cemento y ceniza de totora. Para el análisis se consideraron los parámetros obtenidos en el laboratorio como el contenido óptimo de humedad, la densidad seca máxima y la capacidad portante, evidenciando que las diferentes dosificaciones produjeron mejoras significativas presentes en su comportamiento físico y mecánico.

En la Fig. 67 se evidencia que en todas las adiciones el valor de CBR sube, por lo que se cumple la hipótesis planteada para el presente trabajo.

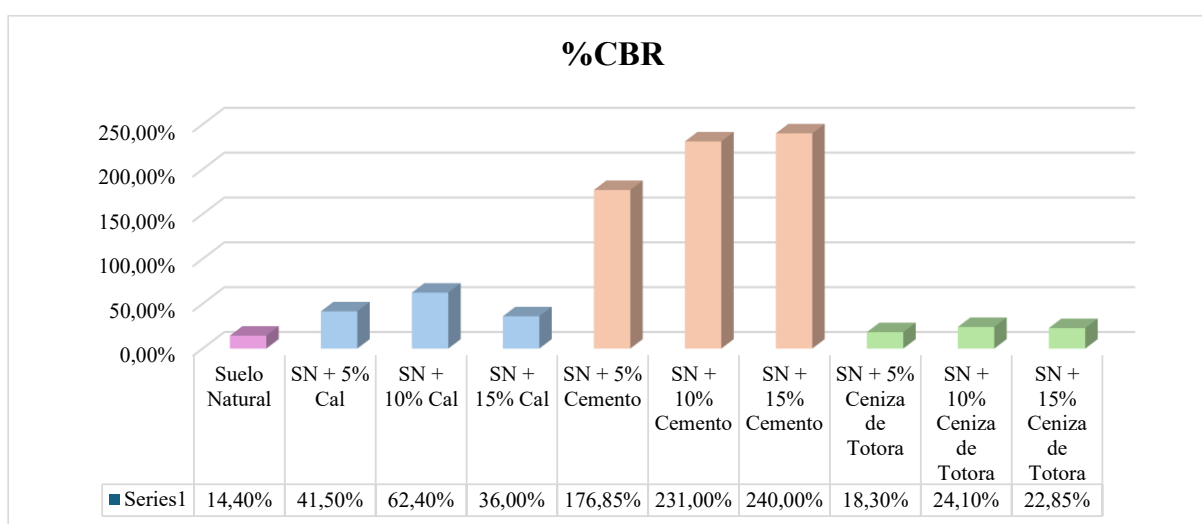


Fig. 67. % CBR de todas las adiciones

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I. CONCLUSIONES

- El suelo en su estado natural alcanzó un valor de CBR de 14,40% con una densidad seca máxima de $1,723 \text{ g/cm}^3$ al 95%, partiendo de una humedad óptima de 14,80% establecida por el ensayo de Proctor modificado. El suelo posee una respuesta aceptable debido a su naturaleza granular, el valor de CBR lo clasifica como subrasante regular, evidenciando las limitaciones que presenta para soportar cargas de tránsito de manera eficiente por lo que se requiere añadir estabilizantes para mejorar el comportamiento del suelo.
- En el ensayo de Proctor Modificado se observa que la adición de los estabilizantes en la humedad óptima aumentó de 14,80% que pertenece al suelo natural a 18,10% con cal, 16,00% con cemento y 17,00% con ceniza de totora. Con estos datos se entiende que los estabilizantes requieren de mayor cantidad de agua para cumplir de mejor manera sus procesos de hidratación y reacción, generando mezclas más estables y menos densas.
- La cal mejora significativamente la capacidad portante del suelo. El CBR aumentó de 14,40% en estado natural a 62,40% añadiendo el 10% de cal, cambiando de igual manera su clasificación de subbase regular a una base buena según la norma AASHTO. En cambio, con el 15% de adición el CBR disminuyó a 36% estableciendo que la sobredosificación reduce la eficiencia mecánica. A partir de estos datos se obtuvo el valor óptimo de adición de cal, siendo de 9,80%.
- El cemento fue el estabilizante que produjo mejores resultados en cuanto a la capacidad portante y resistencia aumentando el CBR de 14,40% a 240,00% con el 15% de adición. Estos datos demuestran que la hidratación del cemento genera una estructura rígida capaz de unir partículas arenosas y llenar los vacíos. Dentro del rango de estudio no se generó disminución en la capacidad de soporte por sobredosificación, sin embargo, basado en la línea de tendencia obtenida se determina un porcentaje óptimo de 13,5%.
- La ceniza de totora también generó una mejora en las propiedades del suelo, llega a un punto máximo y en la adición de 15% disminuye su capacidad de soporte debido al exceso de partículas finas que a su vez disminuyen la fricción interna característica de los suelos arenosos. El mayor valor de CBR obtenido fue de 24,10% con el 10% de

adición, esto representa un incremento de 67,37%. Con esto logra pasar de subrasante regular a subrasante muy buena.

- En cuanto a la viabilidad económica el análisis de precios unitarios demostró que la estabilización con cemento representa un mayor costo presupuestario \$92.542,57 dólares, la cal de igual manera establece un presupuesto referencial de \$43.240,57 dólares. En cambio, la estabilización con ceniza de totora presentó un menor costo de ejecución \$25.510,57 dólares, por estas razones se considera a la estabilización con ceniza de totora como la mejor opción costo-beneficio.

II. RECOMENDACIONES

- Se aconseja trabajar con porcentajes de adición de ceniza de totora cercanos al óptimo, ya que en ese rango se obtuvo la dosificación óptima para alcanzar el mayor valor de CBR. Es decir, adicionar incrementos más pequeños entre 10,00 % y 15,00% para determinar con mayor precisión el porcentaje de adición óptimo para la ceniza de totora.
- Para obras viales de bajo y mediano volumen, se aconseja considerar la ceniza de totora como una alternativa de estabilización para subrasante ya que en los ensayos de laboratorio se clasificó como subrasante muy buena y de igual manera económicamente es una opción viable.
- Para futuras investigaciones se recomienda realizar ensayos de laboratorio con condiciones lo más similares posibles a la realidad en campo, para obtener datos certeros que permitirán conocer con mayor precisión el comportamiento de la estabilización a largo plazo.
- Es aconsejable estudiar combinaciones de ceniza de totora con pequeñas cantidades de cal o cemento, con el objetivo de analizar posibles mejoras en la capacidad portante del suelo. Este tipo de combinaciones podrían ser una opción económica y técnica a más viable.
- Para investigaciones profundas se recomienda que al seleccionar el estabilizante no enfocarse solamente en el máximo incremento, sino también en la función estructural de la capa y en la viabilidad económica. Además, se motiva a probar experimentalmente la adición de materiales que no sean tan comunes para estabilizar suelos y de esta manera crear estabilizantes medioambientalmente no contaminables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Ecuatoriana Vial, “MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE VOLUMEN N° 2-LIBRO A NORMA PARA ESTUDIOS Y DISEÑOS VIALES,” Quito, 2013. Accessed: Dec. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_2A.pdf
- [2] Ministerio de Transporte y Obras Públicas, “Estudio de impacto ambiental y plan de manejo ambiental para la construcción y mejoramiento de la carretera Quinde-Las Golondrinas-Saguangal (Magdalena Bajo) Con una longitud aproximada de 98 Km,” Quito, May 2015. Accessed: Dec. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/09/EIA-UNIFICADO-QUINIDE-SAGUANGAL-MAY-15.pdf>
- [3] K. Onyelowe, M. Onyia, D. Van, H. Baykara, and H. Ugwu, “Pozzolanic Reaction in Clayey Soils for Stabilization Purposes: A Classical Overview of Sustainable Transport Geotechnics,” *Advances in Materials Science and Engineering*, Jan. 2021, Accessed: Mar. 22, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/350399138_Pozzolanic_Reaction_in_Clayey_Soils_for_Stabilization_Purposes_A_Classical_Overview_of_Sustainable_Transport_Geotechnics
- [4] FAO, “Los humedales altoandinos y su vegetación característica,” *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*, 2015.
- [5] J. Guerra, *Mecánica de suelos: conceptos básicos y aplicaciones*, Dextra Editorial. Madrid, 2018. Accessed: Dec. 16, 2025. [Online]. Available: <https://0x102nqtl-y-https-elibro-net.itmsp.museknowledge.com/es/ereader/uta/131540?>
- [6] R. Badillo and V. Guachamín, “Estabilización de suelos arcillosos mediante la utilización de cal viva y caucho reciclado de neumáticos, para mejoramiento de la subrasante en estructuras de pavimento flexible, en la Urbanización 21 de Enero (ciudad: Tena),” *Universidad Central del Ecuador*, 2023, Accessed: Dec. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/90337f84-1d3a-4d90-8247-fc00be97ca7f/content>
- [7] I. Guamán, “Estudio del comportamiento de un suelo arcilloso estabilizado por dos métodos químicos (Cal y Cloruro de sodio),” 2016. Accessed: Dec. 16, 2025. [Online].

- Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/8db45976-a555-44a7-a1b1-3d9a5882d4f6/content>
- [8] Munaylla Margot and Yataco Eder, “Estabilización de la subrasante en suelos arenosos con adición de caucho y cal,” 1AD.
 - [9] T. V. Zambrano-Bravo and M. I. Zambrano-Meza, “Estabilización de suelo con cal y cemento para el mejoramiento de subrasante” *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN*, vol. 7, Dec. 2023, doi: 10.46296/yc.v7i13.0357.
 - [10] A. Castro, E. Ortiz, and L. Macías, “Análisis del comportamiento mecánico de los suelos limo arenosos, estabilizado con cal y cemento,” vol. 7, no. 13, p. 2024, Jan. 2024, doi: 10.46296/ig.v7i13.0153.
 - [11] Velásquez Paul and Véliz José, “Estabilización de suelo arcilloso con el empleo de cal y cemento para el mejoramiento de la subrasante,” vol. 8, no. 15, 2025, doi: 10.46296/ig.v8i15.0249.
 - [12] G. Ayala, A. Rosadio, and G. Durán, “Estudio del efecto de adición de ceniza proveniente de ladrilleras artesanales en la estabilización de suelos arcillosos para pavimentos,” in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Perú: Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, Jul. 2019. doi: 10.18687/LACCEI2019.1.1.115.
 - [13] R. Aguirre and K. Garmendia, “Influencia de las cenizas de totora y tuna en las propiedades de la subrasante del Jr. Amazonas, Huánuco 2023,” Lima, 2023.
 - [14] O. Villafuerte, “Mejoramiento de subrasante del camino vecinal para mejorar valor soporte del suelo utilizando ceniza volátil de totora en zona alto andina del Perú-2023,” Perú. Accessed: Mar. 22, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.unfv.edu.pe/server/api/core/bitstreams/cd056db1-d7d9-4571-bf6b-93de526aa56c/content>
 - [15] W. Botía, “Manual de procedimientos de ensayos de suelos,” Bogotá, May 2015. Accessed: Dec. 17, 2025. [Online]. Available: <https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/433c4e77-8e73-440d-911f-ef67f23ec10c/content>
 - [16] “NTE INEN 520:2012 Determinación de cenizas,” Quito, 2012.
 - [17] F. Villalobos, *Mecánica de suelos*, Ebooks Patagonia., vol. 2. 2016. Accessed: Dec. 17, 2025. [Online]. Available: <https://0x102nsh7-y-https-elibro-net.itmsp.museknowledge.com/es/ereader/uta/196179>
 - [18] “ASTM C018-08 Especificación normalizada para ceniza volante en carbón y puzolana

- natural en crudo o calcinada,” 2008.
- [19] J. Guerra, *Mecánica de Suelos Conceptos básicos y aplicaciones*, Dextra. Madrid, 2018.
 - [20] American Society for Testing and Materials, “Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422, AASHTO T-88)”, Accessed: May 11, 2026. [Online]. Available: https://es.scribd.com/document/527685297/AASHTO-T88#google_vignette
 - [21] C. Villalaz, *Mecánica de suelos y cimentaciones*, Sexta. Monterrey: Limusa, 1980.
 - [22] Y. K. Chauca, “Estudio del mejoramiento de una base granular mediante la aplicación de emulsión asfáltica CSS-1h,” *Obras y Proyectos*, no. 36, pp. 59–69, Dec. 2024, doi: 10.21703/0718-2813.2024.36.3006.
 - [23] Civilgeeks, Tran., “ASTM D4318,” Apr. 2005. [Online]. Available: www.civilgeeks.com
 - [24] L. Castro, “Estabilización de suelo mediante adición de ceniza de cáscara de huevo en las propiedades físicas y mecánicas de la vía,” Jan. 2026.
 - [25] J. Alvarez and A. Vinocuno, “Estabilización de suelos limo arenosos con Nutriente B4 para el mejoramiento de las propiedades físico – mecánicas en el barrio ‘Santo Domingo’, parroquia Cutuglagua del cantón Mejía.,” *Universidad Central del Ecuador*, 2024, Accessed: Dec. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/974add46-dc6a-4909-a1a3-c09a7d743812/content>
 - [26] American Association of State Highway and Transportation Officials, “Determinación del límite líquido de suelo T-89,” 2014.
 - [27] American Association of State Highway and Transportation Officials, “Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de suelos FOP para AASHTO T-90,” 2016, Accessed: Jun. 03, 2026. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/567298177/AASHTO-T-90>
 - [28] Braja M. Das, *Fundamentos de Ingenieria Geotecnica*, vol. cuarto. Accessed: Jun. 03, 2026. [Online]. Available: https://www.academia.edu/37854899/Fundamentos_de_Ingenieria_Geotecnica_Braja_M_Das
 - [29] E. Viteri, “Análisis del efecto de adición de ceniza de totora en las propiedades físico mecánicas de suelos arcillosos de subrasante de la Parroquia Tarqui, Cantón Puyo, Provincia de Pastaza,” Jan. 2026.
 - [30] American Association of State Highway and Transportation Officials, “Norma AASHTO T-180: Proctor modificado,” 2020, [Online]. Available:

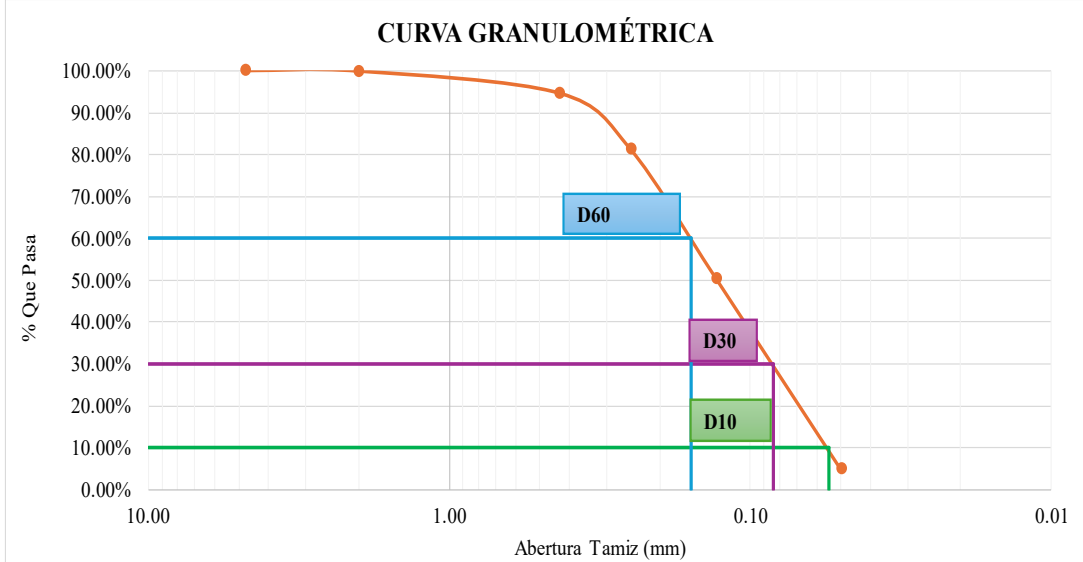
<https://es.scribd.com/doc/61445252/AASHTO-T180-Proctor-Modificado>

- [31] American Society for Testing and Materials, “ASTM D1557-12: Métodos de ensayo estándar para las características de compactación de suelos en laboratorio utilizando un esfuerzo modificado,” 2021, [Online]. Available: <https://store.astm.org/d1557-12r21.html>
- [32] American Association of State Highway and Transportation Officials, “Método AASHTO T193: Ensayo CBR,” 2003, [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/583683833/AASHTO-T-193-Metodo-Estandar-Para-CBR>
- [33] J. Antonio Salazar Guamanquispe Tutor and I. Alex Gustavo López Arboleda, “Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del uso de ceniza de coco natural para la estabilización de suelos blandos,” Jan. 2026. Accessed: Mar. 22, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/48f0c45d-e2ff-4ca3-b59c-22cc7095bdb8/content>

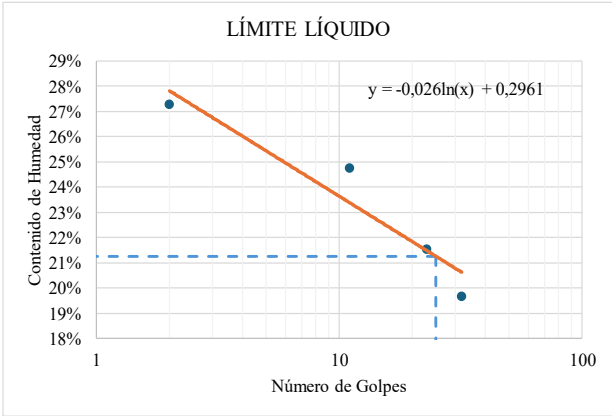
ANEXOS

Suelo Natural

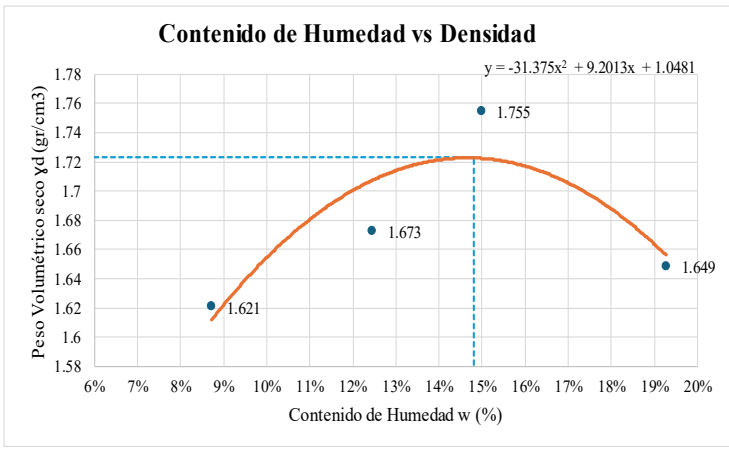
Anexo 1: Ensayo de Granulometría suelo natural

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL							
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.							
ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO									
Muestra:	1	Profundidad:	1m	Ensayado por:	Katherin Altamirano				
Norma:	AASHTO T-88-70 y ASTM D 421-58			Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.				
Coordenadas:	17M 760604 9853252			Ubicación	La Libertad - Huachi Grande				
ENSAYO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS									
Peso de Muestra Inicial:		1000	gr						
TAMIZ	Abertura (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA			
Nº 4	4.75	0.10	0.10	0.01%	0.01%	99.99%			
Nº 10	2.00	1.20	1.30	0.12%	0.13%	99.87%			
Nº 40	0.43	52.60	53.90	5.28%	5.41%	94.59%			
Nº 60	0.25	133.00	186.90	13.35%	18.76%	81.24%			
Nº 100	0.13	306.90	493.80	30.80%	49.56%	50.44%			
Nº 200	0.05	453.90	947.70	45.55%	95.11%	4.89%			
FUENTE		48.70	48.70	4.89%	4.89%				
TOTAL			996.40						
RESULTADOS									
CURVA GRANULOMÉTRICA 									
TND	1.18	Cu	2.855	Error Permitido	1%				
D10	0.055			Error Calculado	0.36%				
D30	0.084	Cc	0.817						
D60	0.157								
RESULTADOS									
PORCENTAJE DEL MATERIAL			Grava (G%)	Arena (S%)	Limo y Arcilla (Finos %)				
			0.01%	95.10%	4.89%				
AASHTO	A-3	SUCS			SP				

Anexo 2: Ensayo Límites de Atterberg suelo natural

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 	
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial
LÍMITES DE ATTERBERG	
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande
Coordenadas:	17M 760604 9853252
Muestra:	1
Normas:	ASTM D4318 AASHTO T 90-70
Ensayado por:	Katherin Altamirano
Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO	
Nº de Recipiente	8
Peso del Recipiente W_r (gr)	11,00
Peso Húmedo + Recipiente $(W_m + W_r)$ (gr)	23,00
Peso Seco + Recipiente $(W_s + W_r)$ (gr)	20,40
Peso Agua (W_w) (gr)	2,60
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	9,40
Contenido de Humedad $(\omega\%)$	27,66%
Promedio $(\omega\%)$	27,27%
Número de Golpes	2
Límite Líquido LL (%)	21,24%
	
LÍMITE PLÁSTICO	
Muestra	1
Nº de Recipiente	14
Peso del Recipiente W_r (gr)	10,80
Peso Húmedo + Recipiente $(W_m + W_r)$ (gr)	13,43
Peso Seco + Recipiente $(W_s + W_r)$ (gr)	12,95
Peso Agua (W_w) (gr)	0,48
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	2,15
Contenido de Humedad $(\omega\%)$	22,33%
Promedio $(\omega\%)$	22,18%
RESULTADOS	
Límite Líquido LL (%)	21,24%
Límite Plástico LP (%)	22,18%
Índice Plástico IP (%)	-0,94%
NO PLÁSTICO	

Anexo 3: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural

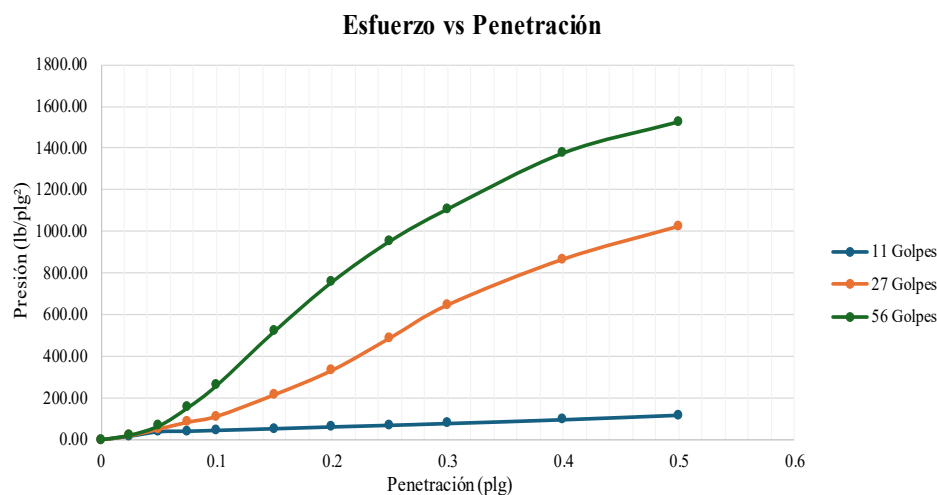
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.						
Muestra:	1		Normas:		AASHTO T180			
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande		Ensayado por:		Katherin Altamirano			
Coordenadas:	17M 760604 9853252		Revisado por		Ing. Rodrigo Acosta, Mg.			
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO								
Número de golpes:	56	Peso de Martillo:	10 lb	Peso del Molde:	14476	gr		
Número de capas:	5	Altura de Caída:	18 "	Volumen del molde	2268.23	cm3		
Diámetro molde:	15.2	Altura del molde:	12.5					
Energía de compactación	52638.44 lb/ft/ft3							
Peso Inicial	6000 gr	6000 gr	6000 gr	6000 gr				
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN								
Número de Ensayo	1	2	3	4				
Humedad inicial añadida en %	8%	12%	16%	20%				
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	18472.5	18743	19053.5	18938				
Peso suelo húmedo Wm (gr)	3997	4267	4578	4462				
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm3)	1.762	1.881	2.018	1.967				
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD								
Número de Recipiente	19	11	4	22	9	5	26	5
Peso del recipiente Wr (gr)	32.50	31.00	32.50	32.50	33.50	32.50	30.00	31.50
Rec. + suelo húmedo Wrs+Wm (gr)	152.50	154.00	156.00	162.00	149.50	143.00	192.00	137.00
Rec. + suelo seco Ws+Wm (gr)	143.00	144.00	142.00	148.00	134.50	128.50	165.00	120.50
Peso sólidos Ws (gr)	110.50	113.00	109.50	115.50	101.00	96.00	135.00	89.00
Peso del agua (gr)	9.50	10.00	14.00	14.00	15.00	14.50	27.00	16.50
Cont. Humedad w (%)	8.60%	8.85%	12.79%	12.12%	14.85%	15.10%	20.00%	18.54%
Cont. Humedad promedio w% (%)	8.72%		12.45%		14.98%		19.27%	
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO								
Peso Volumétrico Seco Yd (gr/cm3)	1.621		1.673		1.755		1.649	
Contenido de Humedad vs Densidad  $y = -31.375x^2 + 9.2013x + 1.0481$								
Peso Vol. Seco Máximo Yd (gr/cm3)	1.723		Óptimo contenido de Humedad				14.80%	

Anexo 4: Ensayo CBR suelo natural

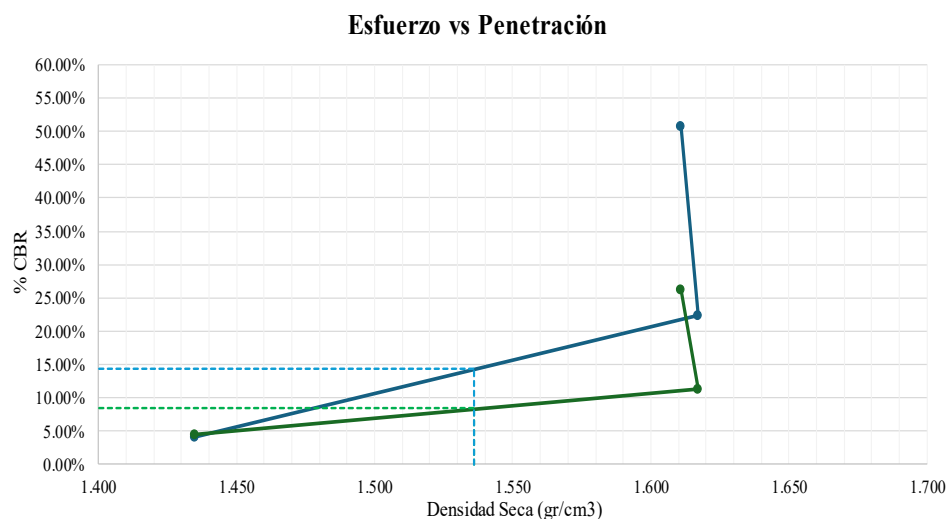
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.				
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg	
			ASTM D-1883	Wopt:	14.80%	
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR						
1. ANTES DE LA SATURACIÓN						
MOLDE	A		B		C	
Nº Golpes	11		27		56	
Altura del molde (cm)	12.40		12.4		12.6	
Diámetro del molde (cm)	15.00		14.9		15.2	
Volúmen del molde (cm³)	2191.26		2162.14		2286.38	
Peso del Molde (gr)	6322.5		7031		9574.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	10236.5		11259.5		13960.5	
Peso Suelo Húmedo (gr)	3914		4228.5		4386	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.786		1.956		1.918	
2. CONTENIDO DE HUMEDAD						
Número de Recipiente	3	8	7	11	33	37
Peso del recipiente Wr (gr)	8.00	9.50	7.50	8.50	9.50	6.00
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)	69.00	93.50	77.50	80.00	99.00	82.00
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)	57.00	77.00	65.00	68.00	84.50	70.00
Peso Suelo Seco Ws (gr)	49.00	67.50	57.50	59.50	75.00	64.00
Peso del Agua Ww (gr)	12.00	16.50	12.50	12.00	14.50	12.00
Contenido de Humedad ω%	24.49%	24.44%	21.74%	20.17%	19.33%	18.75%
Contenido de Humedad Promedio ω%	24.47%		20.95%		19.04%	
Densidad Seca (gr/cm³)	1.435		1.617		1.611	
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Volúmen del molde (cm³)	2191.26		2162.14		2286.38	
Peso del Molde (gr)	6322.5		7031		9574.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	10576		11451		14132.5	
Peso Suelo Húmedo (gr)	4253.5		4420		4558	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.941		2.044		1.994	
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN						
Máquina de compresión simple	Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)			
Nº MOLDE	A		B		C	
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	54.2	18.07	60.4	20.13	68.6	22.87
0.050	117.4	39.13	157.5	52.50	203.3	67.77
0.075	124.6	41.53	255.1	85.03	466.5	155.50
0.100	136.2	45.40	339.6	113.20	788.7	262.90
0.150	160.3	53.43	651.2	217.07	1568.6	522.87
0.200	186	62.00	1003.8	334.60	2281.5	760.50
0.250	209.2	69.73	1467.8	489.27	2866.2	955.40
0.300	234.6	78.20	1943.1	647.70	3329.8	1109.93
0.400	289.2	96.40	2600.6	866.87	4136.1	1378.70
0.500	353.7	117.90	3073.6	1024.53	4585.5	1528.50

N° Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	45.40	4.54%	1.435	62.00	4.13%	1.435
B	113.20	11.32%	1.617	334.60	22.31%	1.617
C	262.90	26.29%	1.611	760.50	50.70%	1.611

Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)		1.617			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in	%CBR Mayor	
95.00%	1.536	11.32%	50.70%	50.70%	

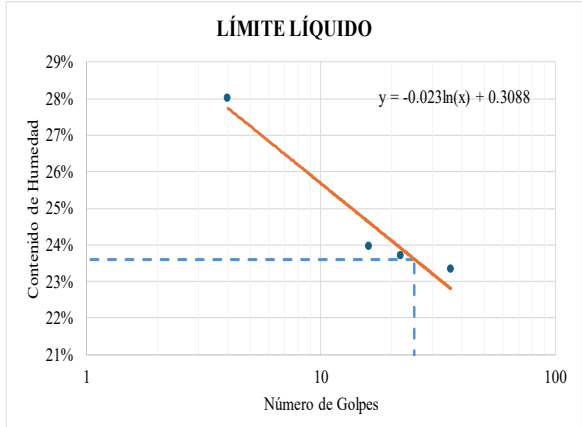


RESULTADOS		
Densidad Seca Máxima	1.617	gr/cm ³
DSM	% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	8.40%	14.40%
% CBR Max	14.40%	

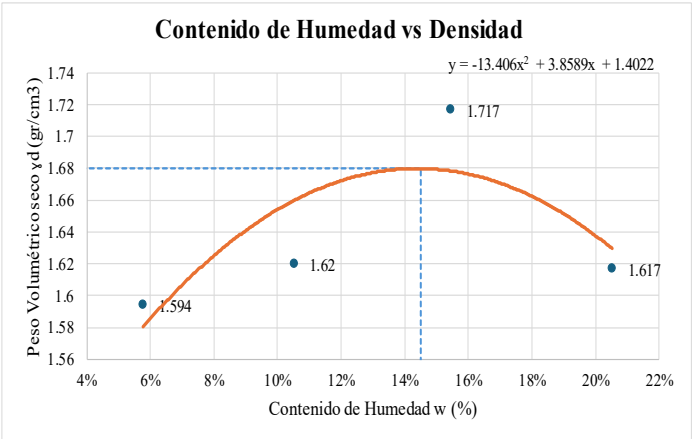


Suelo Natural + 5% de Cal

Anexo 5: Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 5% de cal

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 									
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial							
LÍMITES DE ATTERBERG									
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande			Normas:		ASTM D4318	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Coordenadas:	17M 760604 9853252	Muestra:	1			AASHTO T 90-70	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.	
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO									
Nº de Recipiente	13	40	7	16	18	50	15	27	
Peso del Recipiente W _r (gr)	11.10	10.90	7.60	7.50	11.20	11.30	11.60	11.50	
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	26.80	23.00	18.40	17.90	23.00	25.10	22.80	20.40	
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	23.30	20.40	16.30	15.90	20.70	22.50	20.70	18.70	
Peso Agua (W _w) (gr)	3.50	2.60	2.10	2.00	2.30	2.60	2.10	1.70	
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	12.20	9.50	8.70	8.40	9.50	11.20	9.10	7.20	
Contenido de Humedad (ω%)	28.69%	27.37%	24.14%	23.81%	24.21%	23.21%	23.08%	23.61%	
Promedio (ω%)	28.03%		23.97%		23.71%		23.34%		
Número de Golpes	4		16		22		36		
Límite Líquido LL (%)	23.60%								
									
LÍMITE PLÁSTICO									
Muestra	1	2	3	4	5	6			
Nº de Recipiente	7	13	20	23	35	36			
Peso del Recipiente W _r (gr)	10.60	10.90	10.80	10.70	10.90	10.70			
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	13.30	13.10	13.70	13.40	13.20	13.00			
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	12.80	12.70	13.20	12.90	12.80	12.60			
Peso Agua (W _w) (gr)	0.50	0.40	0.50	0.50	0.40	0.40			
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	2.20	1.80	2.40	2.20	1.90	1.90			
Contenido de Humedad (ω%)	22.73%	22.22%	20.83%	22.73%	21.05%	21.05%			
Promedio (ω%)	21.77%								
RESULTADOS									
Límite Líquido LL (%)	23.60%								
Límite Plástico LP (%)	21.77%								
Índice Plástico IP (%)	1.83%								

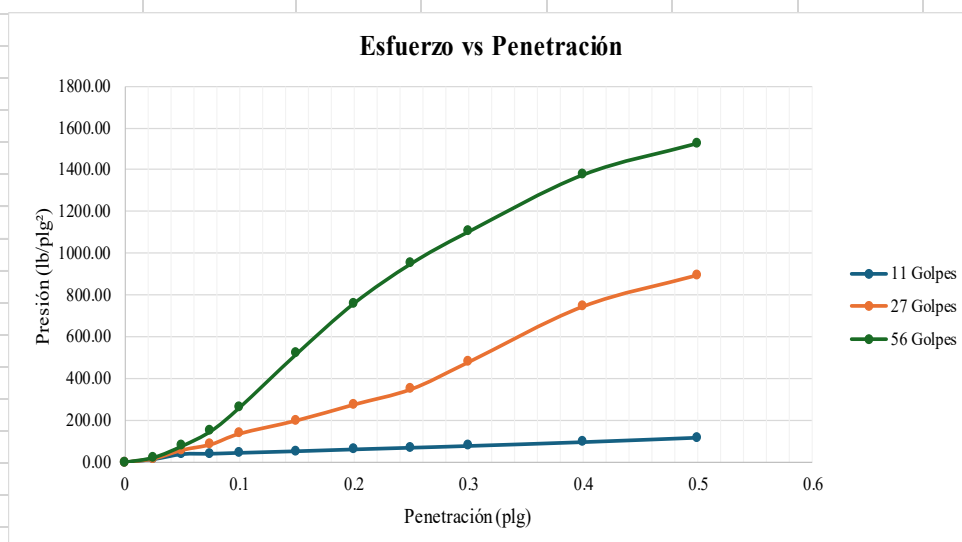
Anexo 6: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 5% de cal

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 	
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.
Muestra:	1
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande
Coordenadas:	17M 760604 9853252
Normas:	AASHTO T180
Ensayado por:	Katherin Altamirano
Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO	
Número de golpes:	56
Peso de Martillo:	10 lb
Peso del Molde:	14476 gr
Número de capas:	5
Altura de Caída:	18 "
Volumen del molde:	2268.23 cm ³
Diámetro molde:	15.2
Altura del molde:	12.5
Energía de compactación	52638.44 lb/ft ³
Peso Inicial	6000 gr
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN	
Número de Ensayo	1
Humedad inicial añadida en %	5%
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	18299.5
Peso suelo húmedo Wm (gr)	3824
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm ³)	1.686
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD	
Número de Recipiente	2H
Peso del recipiente Wr (gr)	31.00
Rec. + suelo húmedo Wrs+Wm (gr)	141.50
Rec. + suelo seco Ws+Wm (gr)	135.50
Peso sólidos Ws (gr)	104.50
Peso del agua (gr)	6.00
Cont. Humedad w (%)	5.74%
Cont. Humedad promedio w% (%)	5.77%
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO	
Peso Volumétrico Seco Yd (gr/cm ³)	1.594
	
Peso Vol. Seco Máximo Yd (gr/cm³)	1.680
Óptimo contenido de Humedad	14.50%

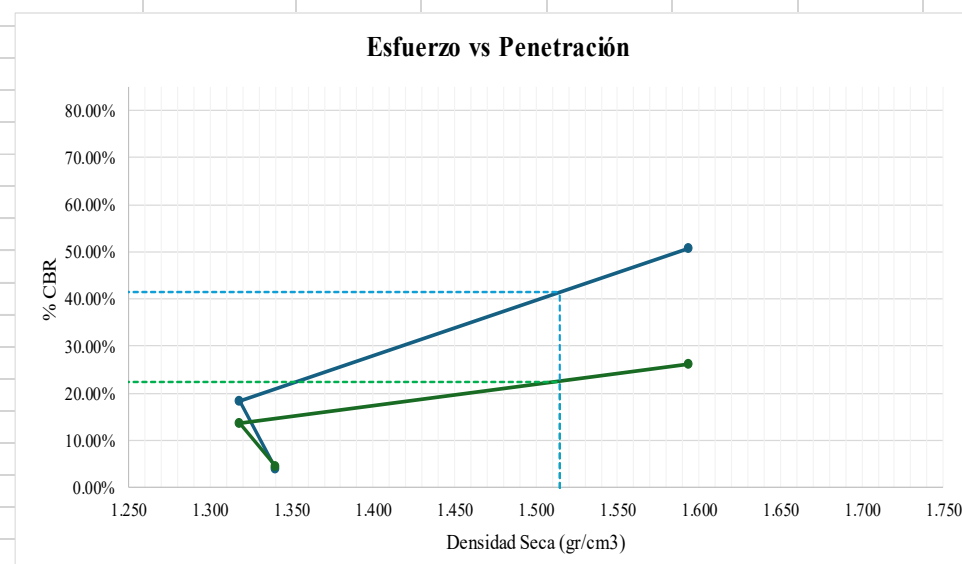
Anexo 7: Ensayo CBR suelo natural + 5% de cal

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.				
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg	
			ASTM D-1883	Wopt:	14.50%	
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR						
1. ANTES DE LA SATURACIÓN						
MOLDE			A	B		C
Nº Golpes			11	27		56
Altura del molde (cm)			12.40	12.8		12.6
Diámetro del molde (cm)			15.00	15.1		15
Volúmen del molde (cm³)			2191.26	2292.21		2226.60
Peso del Molde (gr)			6321	7031		9563.5
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)			10070	10907.5		13846
Peso Suelo Húmedo (gr)			3749	3876.5		4282.5
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)			1.711	1.691		1.923
2. CONTENIDO DE HUMEDAD						
Número de Recipiente			5	12	16	19
Peso del recipiente Wr (gr)			8.00	7.70	8.00	7.80
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)			49.20	62.80	58.70	58.70
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)			40.10	51.10	47.70	47.30
Peso Suelo Seco Ws (gr)			32.10	43.40	39.70	39.50
Peso del Agua Ww (gr)			9.10	11.70	11.00	11.40
Contenido de Humedad ω%			28.35%	26.96%	27.71%	28.86%
Contenido de Humedad Promedio ω%			27.65%		28.28%	
Densidad Seca (gr/cm³)			1.340		1.318	
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Volúmen del molde (cm³)			2191.26	2292.21		2226.60
Peso del Molde (gr)			6321	7031		9563.5
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)			10467.5	11426.5		14153
Peso Suelo Húmedo (gr)			4146.5	4395.5		4589.5
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)			1.892	1.918		2.061
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN						
Máquina de compresión simple			Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)	
Nº MOLDE			A		B	
Penetración (plg)			Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)
0.000			0	0.00	0	0.00
0.025			46	15.33	54.3	18.10
0.050			117.4	39.13	176.9	58.97
0.075			123.2	41.07	258.2	86.07
0.100			136.2	45.40	412.1	137.37
0.150			159.3	53.10	602.6	200.87
0.200			185.6	61.87	830.7	276.90
0.250			209.6	69.87	1052.93	350.98
0.300			234.6	78.20	1440.7	480.23
0.400			289.7	96.57	2240.8	746.93
0.500			353.2	117.73	2691.2	897.07
					4585.5	1528.50

N° Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	45.40	4.54%	1.340	61.87	4.12%	1.340
B	137.37	13.74%	1.318	276.90	18.46%	1.318
C	263.07	26.31%	1.594	762.20	50.81%	1.594
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)			1.594			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.514	26.31%	50.81%		50.81%	

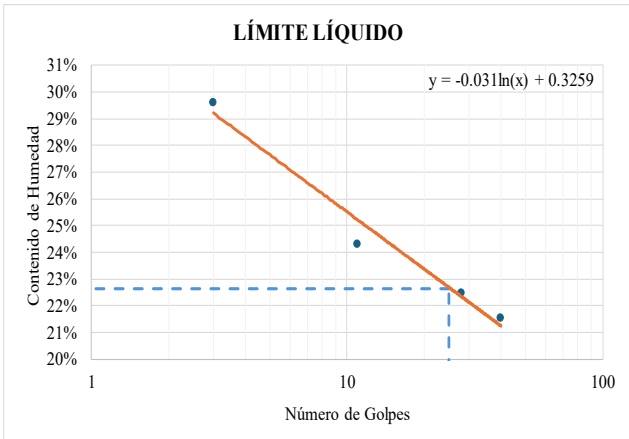


RESULTADOS		
Densidad Seca Máxima	1.594	gr/cm ³
DSM	% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	22.50%	41.50%
% CBR Max	41.50%	

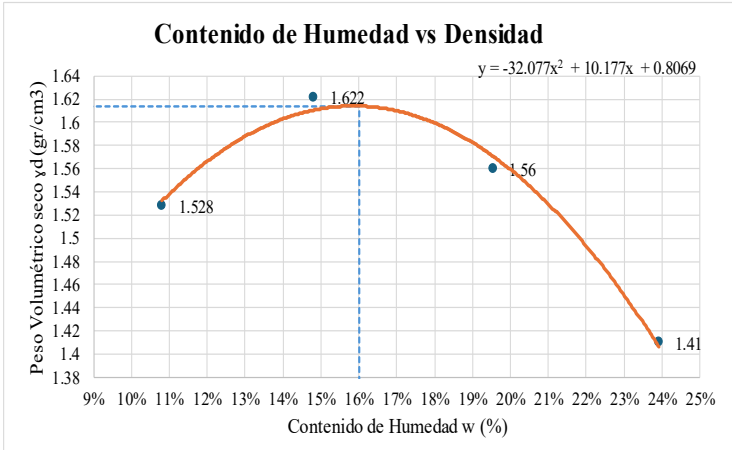


Suelo Natural + 10% de Cal

Anexo 8: Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 10% de cal

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 									
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial							
LÍMITES DE ATTERBERG									
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande				Normas:	ASTM D4318	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Coordenadas:	17M 760604 9853252	Muestra:	1			AASHTO T 90-70	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.	
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO									
Nº de Recipiente	17	36	11	39	7	31	10	12	
Peso del Recipiente W_r (gr)	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.60	7.60	7.60	
Peso Húmedo + Recipiente ($W_m + W_r$) (gr)	17.40	20.40	13.70	16.60	15.50	20.40	14.00	16.90	
Peso Seco + Recipiente ($W_s + W_r$) (gr)	15.10	17.50	12.50	14.80	14.00	18.10	12.90	15.20	
Peso Agua (W_w) (gr)	2.30	2.90	1.20	1.80	1.50	2.30	1.10	1.70	
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	7.60	10.00	5.00	7.30	6.50	10.50	5.30	7.60	
Contenido de Humedad (ω %)	30.26%	29.00%	24.00%	24.66%	23.08%	21.90%	20.75%	22.37%	
Promedio (ω %)	29.63%		24.33%		22.49%		21.56%		
Número de Golpes	3		11		28		40		
Límite Líquido LL (%)	22.65%								
									
LÍMITE PLÁSTICO									
Muestra	1	2	3	4	5	6			
Nº de Recipiente	3	6	14	22	24	30			
Peso del Recipiente W_r (gr)	10.80	10.90	10.80	10.70	10.90	10.80			
Peso Húmedo + Recipiente ($W_m + W_r$) (gr)	12.80	14.10	13.00	13.00	13.70	13.60			
Peso Seco + Recipiente ($W_s + W_r$) (gr)	12.45	13.50	12.60	12.60	13.20	13.10			
Peso Agua (W_w) (gr)	0.35	0.60	0.40	0.40	0.50	0.50			
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	1.65	2.60	1.80	1.90	2.30	2.30			
Contenido de Humedad (ω %)	21.21%	23.08%	22.22%	21.05%	21.74%	21.74%			
Promedio (ω %)	21.84%								
RESULTADOS									
Límite Líquido LL (%)	22.65%								
Límite Plástico LP (%)	21.84%								
Índice Plástico IP (%)	0.81%								

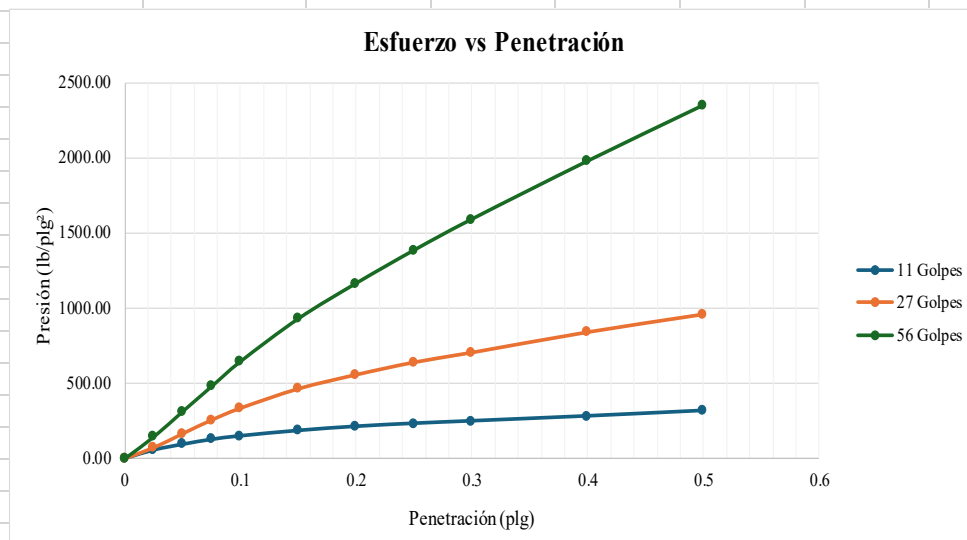
Anexo 9: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 10% de cal

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 	
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.
Muestra:	1
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande
Coordenadas:	17M 760604 9853252
Normas:	AASHTO T180
Ensayado por:	Katherin Altamirano
Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO	
Número de golpes:	56
Peso de Martillo:	10 lb
Peso del Molde:	15362 gr
Número de capas:	5
Altura de Caída:	18 "
Volumen del molde	2256.40 cm ³
Diámetro molde:	15.2
Altura del molde:	12.5
Energía de compactación	52638.44 lb/ft ³
Peso Inicial	6000 gr
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN	
Número de Ensayo	1
Humedad inicial añadida en %	10%
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	19182
Peso suelo húmedo Wm (gr)	3820
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm ³)	1.693
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD	
Número de Recipiente	3
Peso del recipiente W _r (gr)	31.00
Rec. + suelo húmedo W _{rs} +W _m (gr)	93.50
Rec. + suelo seco W _s +W _m (gr)	87.50
Peso sólidos W _s (gr)	56.50
Peso del agua (gr)	6.00
Cont. Humedad w (%)	10.62%
Cont. Humedad promedio w (%)	10.81%
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO	
Peso Volumétrico Seco Y _d (gr/cm ³)	1.528
Contenido de Humedad vs Densidad	
	
Peso Vol. Seco Máximo Y_d (gr/cm³)	1.614
Óptimo contenido de Humedad	16.00%

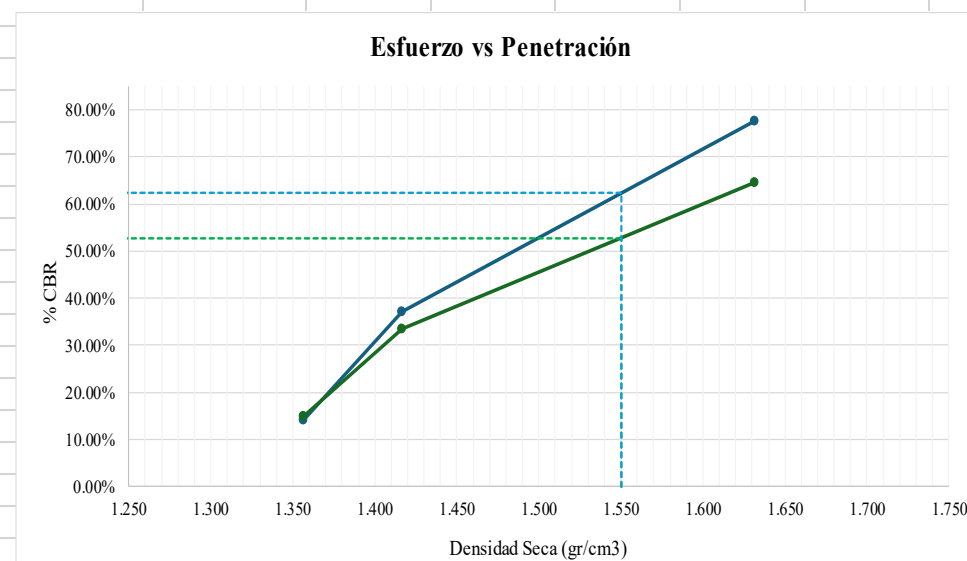
Anexo 10: Ensayo CBR suelo natural + 10% de cal

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.					
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano		
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg		
			ASTM D-1883	Wopt:	16.00%		
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR							
1. ANTES DE LA SATURACIÓN							
MOLDE	A		B		C		
Nº Golpes	11		27		56		
Altura del molde (cm)	12.50		12.7		12.6		
Diámetro del molde (cm)	15.00		15.1		15		
Volúmen del molde (cm³)	2208.93		2274.30		2226.60		
Peso del Molde (gr)	6321		7031		9563.5		
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	10116.5		11114		13954.5		
Peso Suelo Húmedo (gr)	3795.5		4083		4391		
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.718		1.795		1.972		
2. CONTENIDO DE HUMEDAD							
Número de Recipiente	15	38	22	23	18	34	
Peso del recipiente Wr (gr)	7.60	7.30	7.60	7.50	9.70	9.40	
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)	52.90	53.40	54.30	66.20	66.90	73.80	
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)	43.20	43.90	44.40	53.90	57.10	62.60	
Peso Suelo Seco Ws (gr)	35.60	36.60	36.80	46.40	47.40	53.20	
Peso del Agua Ww (gr)	9.70	9.50	9.90	12.30	9.80	11.20	
Contenido de Humedad ω%	27.25%	25.96%	26.90%	26.51%	20.68%	21.05%	
Contenido de Humedad Promedio ω%	26.60%		26.71%		20.86%		
Densidad Seca (gr/cm³)	1.357		1.417		1.632		
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN							
Volúmen del molde (cm³)	2208.93		2274.30		2226.60		
Peso del Molde (gr)	6321		7031		9563.5		
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	10476		11424		14144		
Peso Suelo Húmedo (gr)	4155		4393		4580.5		
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.881		1.932		2.057		
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN							
Máquina de compresión simple	Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)				
Nº MOLDE	A		B		C		
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00	
0.025	168.5	56.17	216.3	72.10	433.6	144.53	
0.050	279.8	93.27	496	165.33	939.8	313.27	
0.075	376.6	125.53	766.9	255.63	1438.8	479.60	
0.100	446.2	148.73	1003.8	334.60	1937.6	645.87	
0.150	552	184.00	1389.6	463.20	2790.2	930.07	
0.200	633.6	211.20	1669.6	556.53	3496.6	1165.53	
0.250	693	231.00	1916.2	638.73	4156.3	1385.43	
0.300	741.6	247.20	2111.6	703.87	4775	1591.67	
0.400	838.8	279.60	2518.3	839.43	5933.9	1977.97	
0.500	946.6	315.53	2873.5	957.83	7046.6	2348.87	

N° Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	148.73	14.87%	1.357	211.20	14.08%	1.357
B	334.60	33.46%	1.417	556.53	37.10%	1.417
C	645.87	64.59%	1.632	1165.53	77.70%	1.632
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)			1.632			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.550	64.59%	77.70%		77.70%	

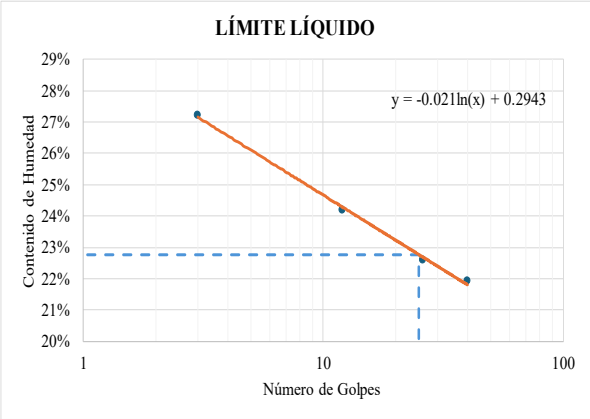


RESULTADOS			
Densidad Seca Máxima		1.632	gr/cm ³
DSM		% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	1.550	52.60%	62.40%
% CBR Max		62.40%	

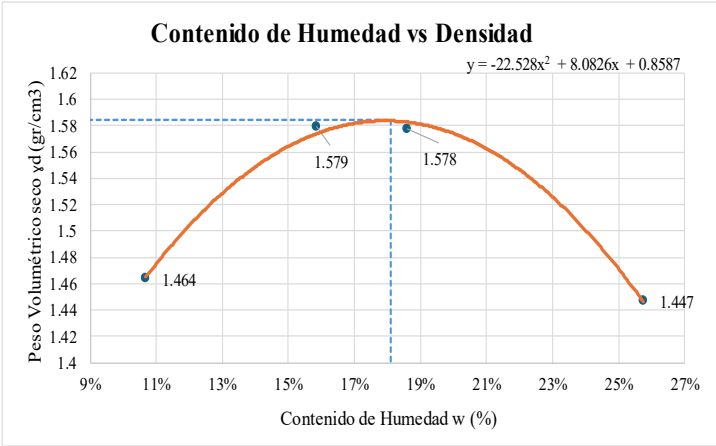


Suelo Natural + 15% de Cal

Anexo 11. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 15% de cal

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 								
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial							
LÍMITES DE ATTERBERG								
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande							
Coordenadas:	17M 760604 9853252							
Muestra:	1							
Normas:	ASTM D4318 AASHTO T 90-70							
Ensayado por:	Katherin Altamirano							
Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.							
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO								
Nº de Recipiente	21	27	25	44	7	14	45	46
Peso del Recipiente W_r (gr)	10.70	10.70	6.10	6.20	6.30	6.10	6.30	6.20
Peso Húmedo + Recipiente ($W_m + W_r$) (gr)	21.00	17.70	13.80	13.90	12.50	12.90	10.50	13.90
Peso Seco + Recipiente ($W_s + W_r$) (gr)	18.80	16.20	12.30	12.40	11.40	11.60	9.70	12.60
Peso Agua (W_w) (gr)	2.20	1.50	1.50	1.50	1.10	1.30	0.80	1.30
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	8.10	5.50	6.20	6.20	5.10	5.50	3.40	6.40
Contenido de Humedad ($\omega\%$)	27.16%	27.27%	24.19%	24.19%	21.57%	23.64%	23.53%	20.31%
Promedio ($\omega\%$)	27.22%		24.19%		22.60%		21.92%	
Número de Golpes	3		12		26		40	
Límite Líquido LL (%)	22.75%							
								
LÍMITE PLÁSTICO								
Muestra	1	2	3	4	5	6		
Nº de Recipiente	35	54	6	14	22	24		
Peso del Recipiente W_r (gr)	6.20	6.30	6.20	10.70	10.60	10.80		
Peso Húmedo + Recipiente ($W_m + W_r$) (gr)	8.80	8.40	9.20	13.00	12.70	13.90		
Peso Seco + Recipiente ($W_s + W_r$) (gr)	8.30	8.00	8.70	12.60	12.30	13.35		
Peso Agua (W_w) (gr)	0.50	0.40	0.50	0.40	0.40	0.55		
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	2.10	1.70	2.50	1.90	1.70	2.55		
Contenido de Humedad ($\omega\%$)	23.81%	23.53%	20.00%	21.05%	23.53%	21.57%		
Promedio ($\omega\%$)	22.25%							
RESULTADOS								
Límite Líquido LL (%)	22.75%							
Límite Plástico LP (%)	22.25%							
Índice Plástico IP (%)	0.50%							

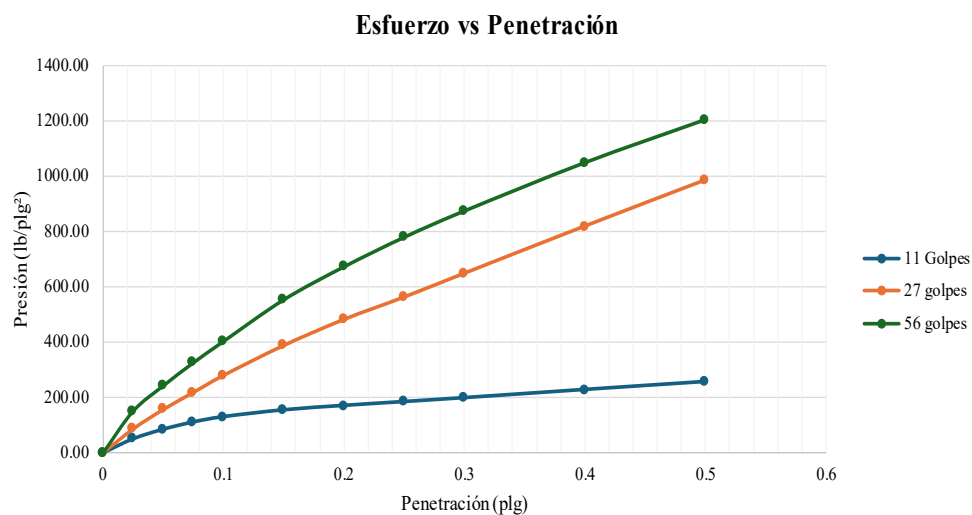
Anexo 12. Ensayo Proctor Modificado suelo natural + 15% de cal

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 							
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.						
Muestra:	1		Normas:	AASHTO T180			
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande		Ensayado por:	Katherin Altamirano			
Coordenadas:	17M 760604 9853252		Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.			
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO							
Número de golpes:	56	Peso de Martillo:	10 lb	Peso del Molde:	15362	gr	
Número de capas:	5	Altura de Caída:	18 "	Volumen del molde	2256.40	cm ³	
Diámetro molde:	15.2	Altura del molde:	12.5				
Energía de compactación	52638.44 lb/ft ³						
Peso Inicial	6000 gr	6000 gr	6000 gr	6000 gr			
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN							
Número de Ensayo	1	2	3	4			
Humedad inicial añadida en %	10%	15%	20%	25%			
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	19019	19490	19585.5	19467.5			
Peso suelo húmedo Wm (gr)	3657	4128	4224	4106			
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm ³)	1.621	1.829	1.872	1.819			
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD							
Número de Recipiente	36	41	13	22	16	62	21
Peso del recipiente Wr (gr)	31.00	20.50	24.40	29.00	21.50	30.00	24.50
Rec. + suelo húmedo Wrs+Wm (gr)	118.00	121.00	112.50	112.50	128.50	111.50	135.00
Rec. + suelo seco Ws+Wm (gr)	109.00	112.00	100.00	101.50	112.00	98.50	112.50
Peso sólidos Ws (gr)	78.00	91.50	75.60	72.50	90.50	68.50	88.00
Peso del agua (gr)	9.00	9.00	12.50	11.00	16.50	13.00	22.50
Cont. Humedad w (%)	11.54%	9.84%	16.53%	15.17%	18.23%	18.98%	25.57%
Cont. Humedad promedio w (%)	10.69%		15.85%		18.61%		25.75%
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO							
Peso Volumétrico Seco Yd (gr/cm ³)	1.464	1.579	1.578	1.447			
Contenido de Humedad vs Densidad $y = -22.528x^2 + 8.0826x + 0.8587$ 							
Peso Vol. Seco Máximo Yd (gr/cm³)	1.584	Óptimo contenido de Humedad	18.10%				

Anexo 13. Ensayo CBR suelo natural + 15% de cal

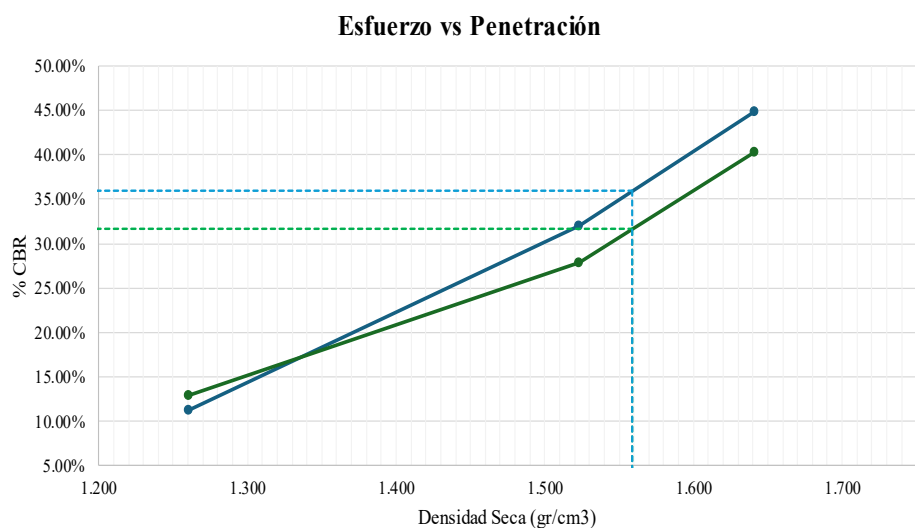
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.					
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano		
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg		
			ASTM D-1883	Wopt:	18.10%		
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR							
1. ANTES DE LA SATURACIÓN							
MOLDE	A		B		C		
Nº Golpes	11		27		56		
Altura del molde (cm)	12.50		12.5		12.7		
Diámetro del molde (cm)	15.30		15.1		15		
Volúmen del molde (cm³)	2298.17		2238.48		2244.28		
Peso del Molde (gr)	9476.5		9118		7570.5		
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	13281		13290		11959		
Peso Suelo Húmedo (gr)	3804.5		4172		4388.5		
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.655		1.864		1.955		
2. CONTENIDO DE HUMEDAD							
Número de Recipiente	5	12	16	19	17	24	
Peso del recipiente Wr (gr)	8.00	7.80	8.00	7.90	10.10	10.10	
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)	72.10	70.10	64.40	64.80	88.70	79.00	
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)	56.80	55.30	54.10	54.40	76.00	68.00	
Peso Suelo Seco Ws (gr)	48.80	47.50	46.10	46.50	65.90	57.90	
Peso del Agua Ww (gr)	15.30	14.80	10.30	10.40	12.70	11.00	
Contenido de Humedad ω%	31.35%	31.16%	22.34%	22.37%	19.27%	19.00%	
Contenido de Humedad Promedio ω%	31.26%		22.35%		19.13%		
Densidad Seca (gr/cm³)	1.261		1.523		1.641		
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN							
Volúmen del molde (cm³)	2298.17		2238.48		2244.28		
Peso del Molde (gr)	9476.5		9118		7570.5		
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	13610		13419.5		12039		
Peso Suelo Húmedo (gr)	4133.5		4301.5		4468.5		
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.799		1.922		1.991		
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN							
Máquina de compresión simple	Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)				
Nº MOLDE	A		B		C		
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00	
0.025	149.8	49.93	258.1	86.03	452.8	150.93	
0.050	251.9	83.97	468.1	156.03	726.6	242.20	
0.075	329.4	109.80	653.3	217.77	976.6	325.53	
0.100	386.2	128.73	837.6	279.20	1208	402.67	
0.150	459.1	153.03	1161.6	387.20	1659.3	553.10	
0.200	506.1	168.70	1443.1	481.03	2016.9	672.30	
0.250	547.2	182.40	1685.8	561.93	2336.9	778.97	
0.300	589	196.33	1943.2	647.73	2622.5	874.17	
0.400	676.5	225.50	2453.9	817.97	3146.6	1048.87	
0.500	761.6	253.87	2953.3	984.43	3613.2	1204.40	

N° Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	128.73	12.87%	1.261	168.70	11.25%	1.261
B	279.20	27.92%	1.523	481.03	32.07%	1.523
C	402.67	40.27%	1.641	672.30	44.82%	1.641
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)		1.641				
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.559	40.27%	44.82%		44.82%	



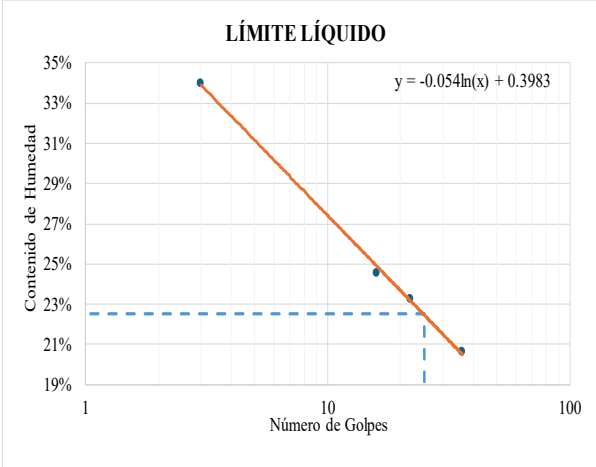
RESULTADOS

Densidad Seca Máxima		1.641	gr/cm ³
DSM		% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	1.559	31.70%	36.00%
% CBR Max		36.00%	

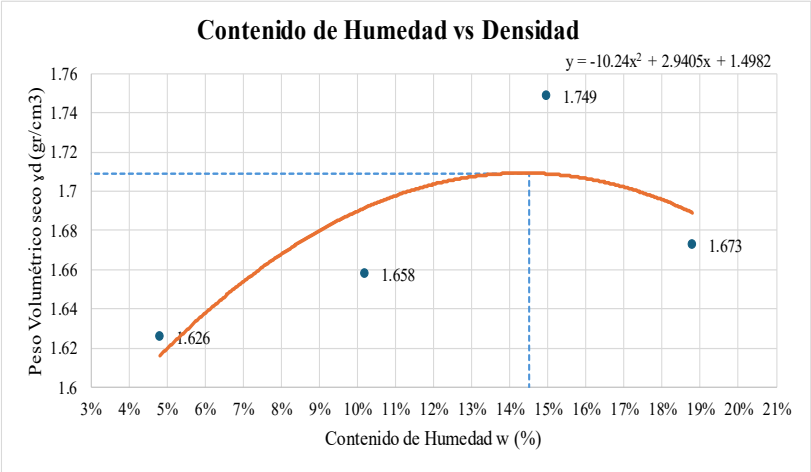


Suelo Natural + 5% de Cemento

Anexo 14. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 5% de Cemento

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 									
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.							
LÍMITES DE ATTERBERG									
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande			Normas:	ASTM D4318	Ensayado por:	Katherin Altamirano		
Coordenadas:	17M 760604 9853252	Muestra:	1		AASHTO T 90-70	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.		
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO									
Nº de Recipiente	7	31	18	35	37	38	12	25	
Peso del Recipiente W _r (gr)	7.50	7.60	7.60	7.60	7.60	7.60	7.50	7.70	
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	17.40	15.70	21.70	16.40	17.30	15.80	15.70	14.70	
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	14.50	14.00	19.20	14.50	15.30	14.40	14.30	13.50	
Peso Agua (W _w) (gr)	2.90	1.70	2.50	1.90	2.00	1.40	1.40	1.20	
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	7.00	6.40	11.60	6.90	7.70	6.80	6.80	5.80	
Contenido de Humedad (ω%)	41.43%	26.56%	21.55%	27.54%	25.97%	20.59%	20.59%	20.69%	
Promedio (ω%)	34.00%		24.54%		23.28%		20.64%		
Número de Golpes	3		16		22		36		
Límite Líquido LL (%)	22.50%								
									
LÍMITE PLÁSTICO									
Muestra	1	2	3	4	5	6			
Nº de Recipiente	4	9	11	19	53	34			
Peso del Recipiente W _r (gr)	10.80	10.70	10.90	10.70	9.40	6.20			
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	13.00	12.60	13.00	12.40	11.40	7.80			
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	12.60	12.25	12.65	12.10	11.07	7.54			
Peso Agua (W _w) (gr)	0.40	0.35	0.35	0.30	0.33	0.26			
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	1.80	1.55	1.75	1.40	1.67	1.34			
Contenido de Humedad (ω%)	22.22%	22.58%	20.00%	21.43%	19.76%	19.40%			
Promedio (ω%)	20.90%								
RESULTADOS									
Límite Líquido LL (%)	22.50%								
Límite Plástico LP (%)	20.90%								
Índice Plástico IP (%)	1.60%								

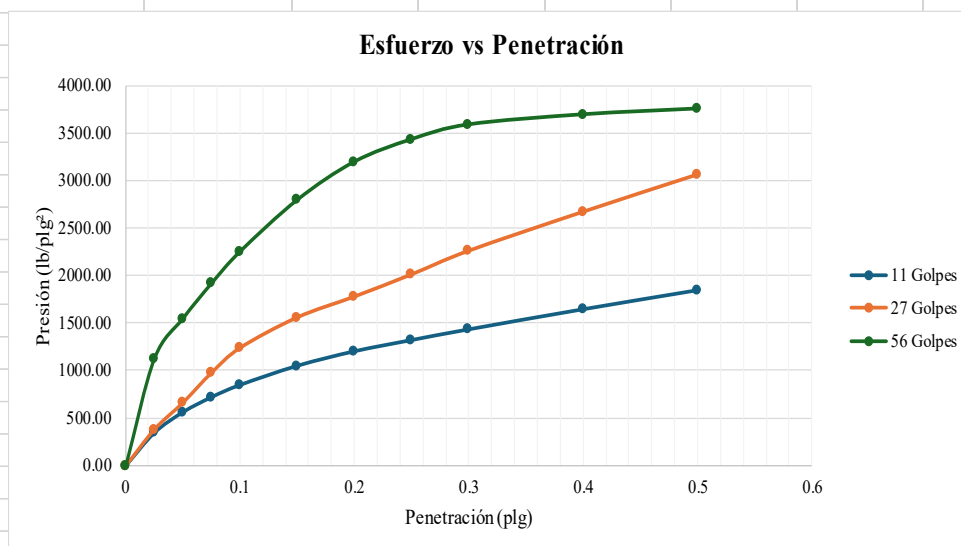
Anexo 15. Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 5% de Cemento

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 	
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.
Muestra:	1
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande
Coordenadas:	17M 760604 9853252
Normas:	AASHTO T180
Ensayado por:	Katherin Altamirano
Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO	
Número de golpes:	56
Peso de Martillo:	10 lb
Peso del Molde:	14786 gr
Número de capas:	5
Altura de Caída:	18 "
Volumen del molde:	2208.94 cm ³
Diámetro molde:	15.2
Altura del molde:	12.5
Energía de compactación	52638.44 lb/ft ³
Peso Inicial	6000 gr
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN	
Número de Ensayo	1 2 3 4
Humedad inicial añadida en %	5% 10% 15% 20%
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	18549.5 18822.5 19228 19174.5
Peso suelo húmedo Wm (gr)	3764 4037 4442 4389
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm ³)	1.704 1.827 2.011 1.987
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD	
Número de Recipiente	14 29 1 2 21 34 3 20
Peso del recipiente Wr (gr)	26.50 24.50 26.00 25.50 30.50 31.00 32.50 33.50
Rec. + suelo húmedo Wrs+Wm (gr)	126.00 120.50 115.50 109.00 110.00 109.00 157.00 155.50
Rec. + suelo seco Ws+Wm (gr)	121.50 116.00 107.50 101.00 100.00 98.50 137.00 136.50
Peso sólidos Ws (gr)	95.00 91.50 81.50 75.50 69.50 67.50 104.50 103.00
Peso del agua (gr)	4.50 4.50 8.00 8.00 10.00 10.50 20.00 19.00
Cont. Humedad w (%)	4.74% 4.92% 9.82% 10.60% 14.39% 15.56% 19.14% 18.45%
Cont. Humedad promedio w% (%)	4.83% 10.21% 14.97% 18.79%
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO	
Peso Volumétrico Seco Yd (gr/cm ³)	1.626 1.658 1.749 1.673
Contenido de Humedad vs Densidad $y = -10.24x^2 + 2.9405x + 1.4982$ 	
Peso Vol. Seco Máximo Yd (gr/cm³)	1.709
Óptimo contenido de Humedad	14.50%

Anexo 16. Ensayo CBR suelo natural + 5% de Cemento

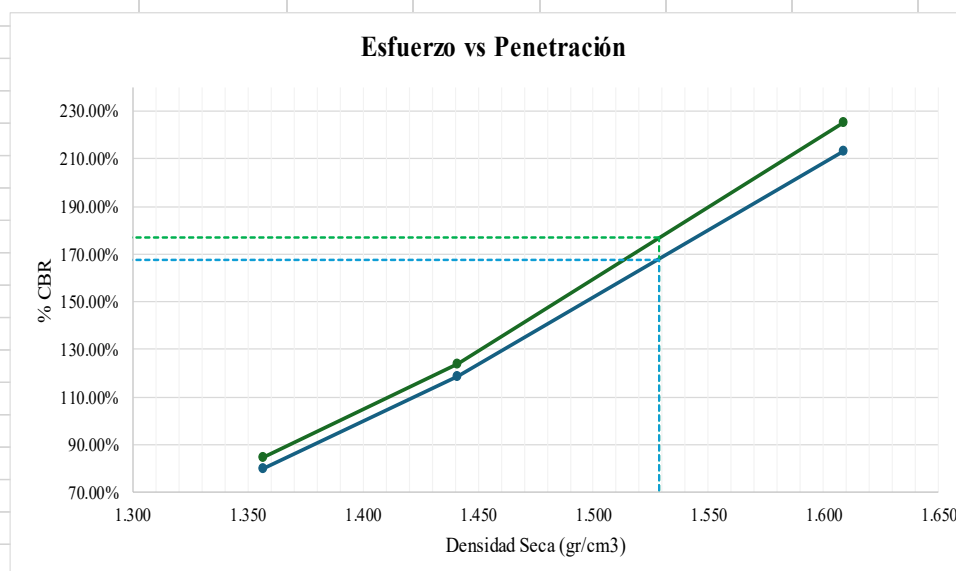
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 								
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.						
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano			
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg			
			ASTM D-1883	Wopt:	14.50%			
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR								
1. ANTES DE LA SATURACIÓN								
MOLDE			A	B	C			
Nº Golpes			11	27	56			
Altura del molde (cm)			12.70	12.7	12.7			
Diámetro del molde (cm)			15.00	15.1	15			
Volúmen del molde (cm³)			2244.28	2274.30	2244.28			
Peso del Molde (gr)			6321	7031	9563.5			
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)			10106	11056.5	13943.5			
Peso Suelo Húmedo (gr)			3785	4025.5	4380			
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)			1.687	1.77	1.952			
2. CONTENIDO DE HUMEDAD								
Número de Recipiente			3	17	2	29	30	31
Peso del recipiente Wr (gr)			31.00	31.50	25.90	24.40	24.70	24.00
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)			93.30	87.40	107.90	102.80	115.20	112.30
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)			81.00	76.60	92.80	88.10	97.20	99.00
Peso Suelo Seco Ws (gr)			50.00	45.10	66.90	63.70	72.50	75.00
Peso del Agua Ww (gr)			12.30	10.80	15.10	14.70	18.00	13.30
Contenido de Humedad ω%			24.60%	23.95%	22.57%	23.08%	24.83%	17.73%
Contenido de Humedad Promedio ω%			24.27%		22.82%		21.28%	
Densidad Seca (gr/cm³)			1.357		1.441		1.609	
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN								
Volúmen del molde (cm³)			2244.28		2274.30		2244.28	
Peso del Molde (gr)			6321		7031		9563.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)			10434.5		11367		14122	
Peso Suelo Húmedo (gr)			4113.5		4336		4558.5	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)			1.833		1.907		2.031	
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN								
Máquina de compresión simple			Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)			
Nº MOLDE			A		B		C	
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	1039.5	346.50	1148.9	382.97	3380.9	1126.97		
0.050	1690.6	563.53	1995.6	665.20	4648.6	1549.53		
0.075	2163.9	721.30	2937.6	979.20	5756.2	1918.73		
0.100	2548.6	849.53	3722.3	1240.77	6759.6	2253.20		
0.150	3151.5	1050.50	4683.6	1561.20	8388.6	2796.20		
0.200	3608.5	1202.83	5340.8	1780.27	9592.3	3197.43		
0.250	3962.6	1320.87	6041.6	2013.87	10300.6	3433.53		
0.300	4300.2	1433.40	6786.4	2262.13	10766.7	3588.90		
0.400	4933.2	1644.40	8016.6	2672.20	11083.5	3694.50		
0.500	5533.2	1844.40	9192.7	3064.23	11266.7	3755.57		

Nº Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	849.53	84.95%	1.357	1202.83	80.19%	1.357
B	1240.77	124.08%	1.441	1780.27	118.68%	1.441
C	2253.20	225.32%	1.609	3197.43	213.16%	1.609
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)			1.609			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.529	225.32%	213.16%		225.32%	



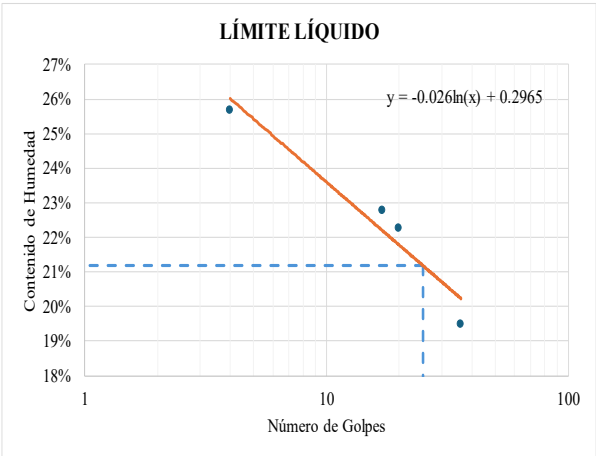
RESULTADOS

Densidad Seca Máxima		1.609	gr/cm ³
DSM		% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	1.529	176.85%	167.85%
% CBR Max		176.85%	

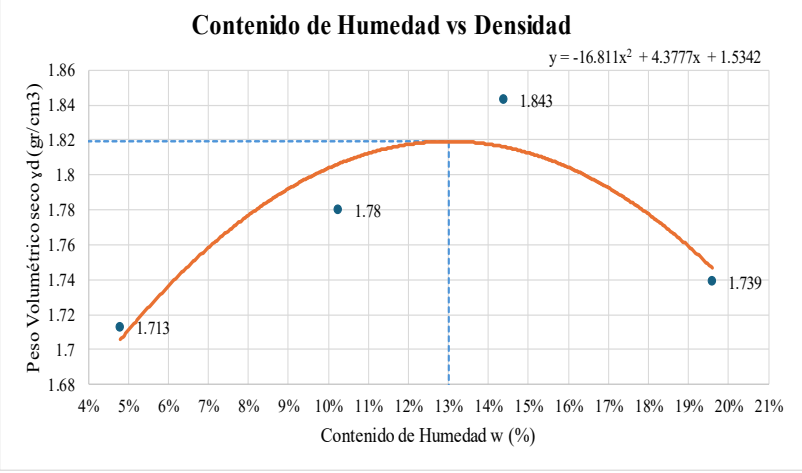


Suelo Natural + 10% de Cemento

Anexo 17. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 10% de Cemento

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 										
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial								
LÍMITES DE ATTERBERG										
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande			Normas:		ASTM D4318	Ensayado por:	Katherin Altamirano		
Coordenadas:	17M 760604 9853252	Muestra:	1			AASHTO T 90-70	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.		
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO										
Nº de Recipiente	31	17	12	18	25	38	10	11		
Peso del Recipiente W_r (gr)	7.70	7.70	7.50	7.70	7.80	7.70	7.60	7.50		
Peso Húmedo + Recipiente $(W_m + W_r)$ (gr)	14.50	15.10	17.40	17.20	15.30	13.90	14.00	12.80		
Peso Seco + Recipiente $(W_s + W_r)$ (gr)	13.10	13.60	15.60	15.40	13.90	12.80	13.00	11.90		
Peso Agua (W_w) (gr)	1.40	1.50	1.80	1.80	1.40	1.10	1.00	0.90		
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	5.40	5.90	8.10	7.70	6.10	5.10	5.40	4.40		
Contenido de Humedad $(\omega\%)$	25.93%	25.42%	22.22%	23.38%	22.95%	21.57%	18.52%	20.45%		
Promedio $(\omega\%)$	25.67%		22.80%		22.26%		19.49%			
Número de Golpes	4		17		20		36			
Límite Líquido LL (%)	21.20%									
										
LÍMITE PLÁSTICO										
Muestra	1	2	3	4	5	6				
Nº de Recipiente	35	36	7	13	20	23				
Peso del Recipiente W_r (gr)	10.90	10.70	10.60	10.90	10.80	10.70				
Peso Húmedo + Recipiente $(W_m + W_r)$ (gr)	13.10	13.00	12.50	12.60	13.00	12.30				
Peso Seco + Recipiente $(W_s + W_r)$ (gr)	12.72	12.61	12.18	12.31	12.62	12.04				
Peso Agua (W_w) (gr)	0.38	0.39	0.32	0.29	0.38	0.26				
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	1.82	1.91	1.58	1.41	1.82	1.34				
Contenido de Humedad $(\omega\%)$	20.88%	20.42%	20.25%	20.57%	20.88%	19.40%				
Promedio $(\omega\%)$							20.40%			
RESULTADOS										
Límite Líquido LL (%)	21.20%									
Límite Plástico LP (%)	20.40%									
Índice Plástico IP (%)	0.80%									

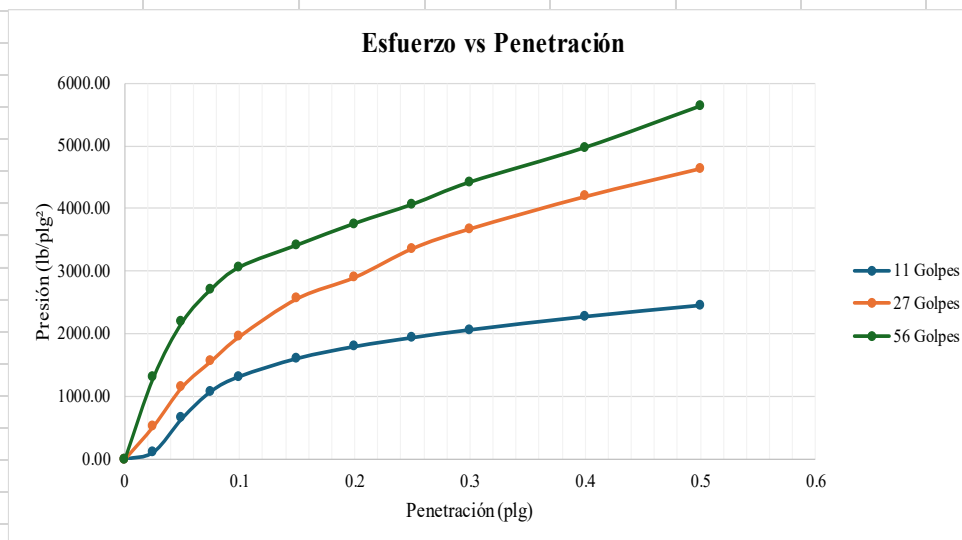
Anexo 18. Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 10% de Cemento

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 	
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.
Muestra:	1
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande
Coordenadas:	17M 760604 9853252
Normas:	AASHTO T180
Ensayado por:	Katherin Altamirano
Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO	
Número de golpes:	56
Peso de Martillo:	10 lb
Peso del Molde:	14476 gr
Número de capas:	5
Altura de Caída:	18 "
Volumen del molde:	2268.23 cm ³
Diámetro molde:	15.2
Altura del molde:	12.5
Energía de compactación	52638.44 lb/ft/ft ³
Peso Inicial	6000 gr
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN	
Número de Ensayo	1 2 3 4
Humedad inicial añadida en %	5% 10% 15% 20%
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	18547.5 18929 19258 19194
Peso suelo húmedo Wm (gr)	4072 4453 4782 4718
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm ³)	1.795 1.963 2.108 2.08
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD	
Número de Recipiente	6 17 2 75 21 29 14 16
Peso del recipiente Wr (gr)	26.50 24.50 30.00 31.50 25.00 24.00 22.50 25.00
Rec. + suelo húmedo Wrs+Wm (gr)	141.00 128.50 117.50 121.50 121.50 122.50 132.00 129.00
Rec. + suelo seco Ws+Wm (gr)	136.00 123.50 109.00 113.50 109.00 110.50 113.00 113.00
Peso sólidos Ws (gr)	109.50 99.00 79.00 82.00 84.00 86.50 90.50 88.00
Peso del agua (gr)	5.00 5.00 8.50 8.00 12.50 12.00 19.00 16.00
Cont. Humedad w (%)	4.57% 5.05% 10.76% 9.76% 14.88% 13.87% 20.99% 18.18%
Cont. Humedad promedio w (%)	4.81% 10.26% 14.38% 19.59%
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO	
Peso Volumétrico Seco Yd (gr/cm ³)	1.713 1.78 1.843 1.739
Contenido de Humedad vs Densidad $y = -16.811x^2 + 4.3777x + 1.5342$ 	
Peso Vol. Seco Máximo Yd (gr/cm³)	1.819
Óptimo contenido de Humedad	13.00%

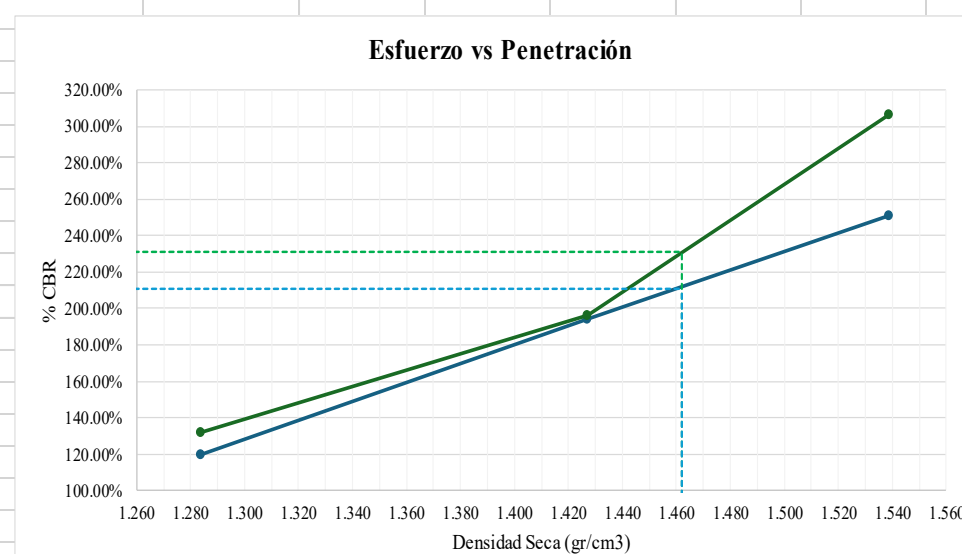
Anexo 19. Ensayo CBR suelo natural + 10% de Cemento

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.				
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193 ASTM D-1883	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg	
				Wopt:	13.00%	
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR						
1. ANTES DE LA SATURACIÓN						
MOLDE	A		B		C	
Nº Golpes	11		27		56	
Altura del molde (cm)	12.50		12.5		12.7	
Diámetro del molde (cm)	15.30		15.1		15	
Volúmen del molde (cm³)	2298.17		2238.48		2244.28	
Peso del Molde (gr)	9476.5		9118.8		7570.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	13202.5		13072		11762.5	
Peso Suelo Húmedo (gr)	3726		3953.2		4192	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.621		1.766		1.868	
2. CONTENIDO DE HUMEDAD						
Número de Recipiente	19	30	31	38	13	15
Peso del recipiente Wr (gr)	8.00	7.00	7.50	6.50	7.50	8.00
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)	43.50	55.50	46.60	42.00	36.60	43.70
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)	36.00	45.60	39.10	35.20	31.40	37.50
Peso Suelo Seco Ws (gr)	28.00	38.60	31.60	28.70	23.90	29.50
Peso del Agua Ww (gr)	7.50	9.90	7.50	6.80	5.20	6.20
Contenido de Humedad ω%	26.79%	25.65%	23.73%	23.69%	21.76%	21.02%
Contenido de Humedad Promedio ω%	26.22%		23.71%		21.39%	
Densidad Seca (gr/cm³)	1.284		1.427		1.539	
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Volúmen del molde (cm³)	2298.17		2238.48		2244.28	
Peso del Molde (gr)	9476.5		9118.8		7570.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	13610		13419.5		12039	
Peso Suelo Húmedo (gr)	4133.5		4300.7		4468.5	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.799		1.921		1.991	
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN						
Máquina de compresión simple	Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)			
Nº MOLDE	A		B		C	
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	350.61	116.87	1589.736	529.91	3931.997	1310.67
0.050	1972.5	657.50	3474.193	1158.06	6567.478	2189.16
0.075	3255.153	1085.05	4702.745	1567.58	8131.987	2710.66
0.100	3966.014	1322.00	5895.923	1965.31	9198.672	3066.22
0.150	4824.093	1608.03	7704.556	2568.19	10251.289	3417.10
0.200	5391.31	1797.10	8724.654	2908.22	11282.623	3760.87
0.250	5814.31	1938.10	10100.34	3366.78	12194.949	4064.98
0.300	6187.071	2062.36	11044.82	3681.61	13254.47	4418.16
0.400	6820.392	2273.46	12591.25	4197.08	14911.525	4970.51
0.500	7357.094	2452.36	13928.5	4642.83	16891.53	5630.51

N° Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	1322.00	132.20%	1.284	1797.10	119.81%	1.284
B	1965.31	196.53%	1.427	2908.22	193.88%	1.427
C	3066.22	306.62%	1.539	3760.87	250.72%	1.539
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)			1.539			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.462	306.62%	250.72%		306.62%	

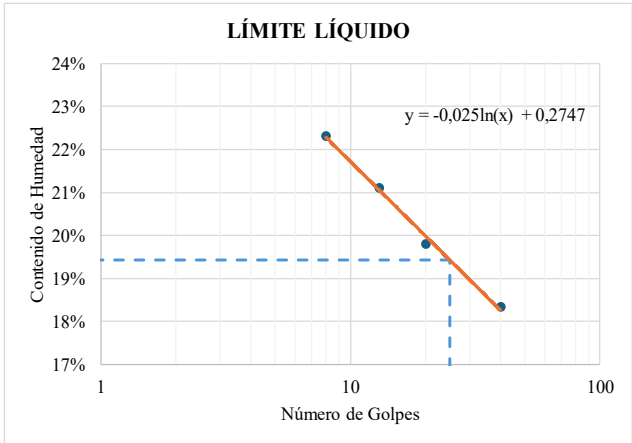


RESULTADOS		
Densidad Seca Máxima	1.539	gr/cm ³
DSM	% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	231.00%	211.00%
% CBR Max	231.00%	

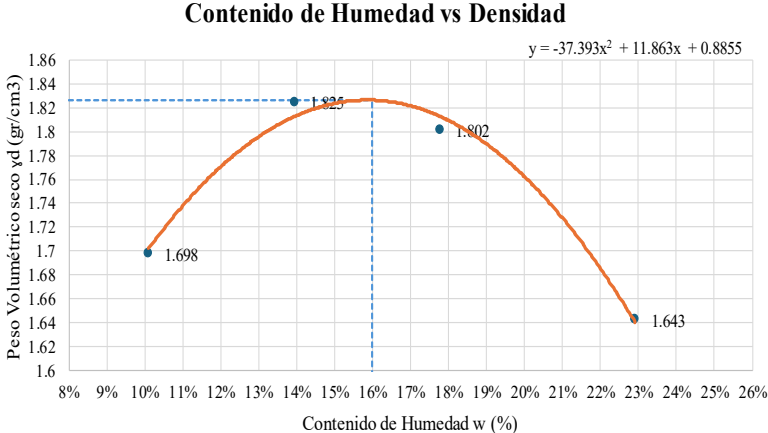


Suelo Natural + 15% de Cemento

Anexo 20. Ensayo Límites de Atterberg suelo natural + 15% de Cemento

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 									
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial							
LÍMITES DE ATTERBERG									
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande			Normas:	ASTM D4318	Ensayado por:	Katherin Altamirano		
Coordenadas:	17M 760604 9853252	Muestra:	1		AASHTO T 90-70	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.		
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO									
Nº de Recipiente	70	71	6	30	37	60	67	53	
Peso del Recipiente W _r (gr)	4,30	4,40	7,70	4,50	4,50	4,40	4,40	4,50	
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	11,10	11,30	17,80	13,30	11,30	10,90	9,60	10,90	
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	9,90	10,00	16,00	11,80	10,10	9,90	8,80	9,90	
Peso Agua (W _w) (gr)	1,20	1,30	1,80	1,50	1,20	1,00	0,80	1,00	
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	5,60	5,60	8,30	7,30	5,60	5,50	4,40	5,40	
Contenido de Humedad (ω%)	21,43%	23,21%	21,69%	20,55%	21,43%	18,18%	18,18%	18,52%	
Promedio (ω%)	22,32%		21,12%		19,81%		18,35%		
Número de Golpes	8		13		20		40		
Límite Líquido LL (%)	19,44%								
LÍMITE LÍQUIDO 									
LÍMITE PLÁSTICO									
Muestra	1	2	3	4	5	6			
Nº de Recipiente	36	35	23	20	13	7			
Peso del Recipiente W _r (gr)	10,70	10,90	10,70	10,80	10,90	10,70			
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	12,70	12,70	12,40	12,40	12,70	12,80			
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	12,35	12,40	12,10	12,12	12,40	12,42			
Peso Agua (W _w) (gr)	0,35	0,30	0,30	0,28	0,30	0,38			
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	1,65	1,50	1,40	1,32	1,50	1,72			
Contenido de Humedad (ω%)	21,21%	20,00%	21,43%	21,21%	20,00%	22,09%			
Promedio (ω%)	20,99%								
RESULTADOS									
Límite Líquido LL (%)	19,44%								
Límite Plástico LP (%)	20,99%								
Índice Plástico IP (%)	-1,55%								
NO PLÁSTICO									

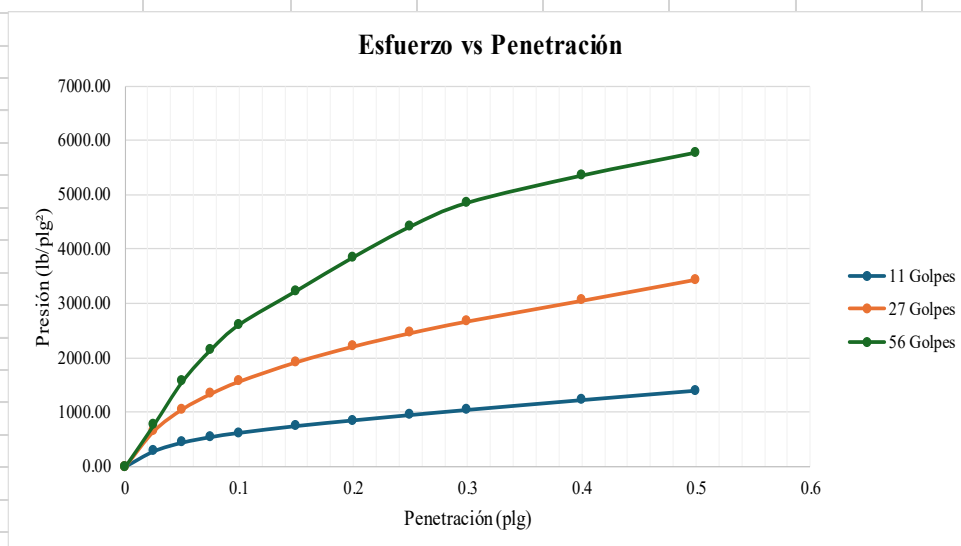
Anexo 21. Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 15% de Cemento

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 								
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.						
Muestra:	1		Normas:		AASHTO T180			
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande		Ensayado por:		Katherin Altamirano			
Coordenadas:	17M 760604 9853252		Revisado por		Ing. Rodrigo Acosta, Mg.			
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO								
Número de golpes:	56	Peso de Martillo:	10 lb	Peso del Molde:	14476	gr		
Número de capas:	5	Altura de Caída:	18 "	Volumen del molde	2268.23	cm3		
Diámetro molde:	15.2	Altura del molde:	12.5					
Energía de compactación	52638.44 lb/ft³							
Peso Inicial	6000 gr		6000 gr		6000 gr		6000 gr	
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN								
Número de Ensayo	1		2		3		4	
Humedad inicial añadida en %	10%		15%		20%		25%	
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	18716.5		19191.5		19290		19057	
Peso suelo húmedo Wm (gr)	4241		4716		4814		4581	
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm³)	1.87		2.079		2.122		2.02	
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD								
Número de Recipiente	8	18	5	108	23	26	20	65
Peso del recipiente Wr (gr)	23.50	26.00	32.50	30.00	25.00	26.00	9.50	31.50
Rec. + suelo húmedo Wrs+Wm (gr)	129.50	132.50	160.00	164.00	137.00	112.00	133.50	131.50
Rec. + suelo seco Ws+Wm (gr)	120.00	122.50	144.50	147.50	119.50	99.50	109.00	114.00
Peso sólidos Ws (gr)	96.50	96.50	112.00	117.50	94.50	73.50	99.50	82.50
Peso del agua (gr)	9.50	10.00	15.50	16.50	17.50	12.50	24.50	17.50
Cont. Humedad w (%)	9.84%	10.36%	13.84%	14.04%	18.52%	17.01%	24.62%	21.21%
Cont. Humedad promedio w% (%)	10.10%		13.94%		17.76%		22.92%	
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO								
Peso Volumétrico Seco Yd (gr/cm³)	1.698		1.825		1.802		1.643	
Contenido de Humedad vs Densidad  $y = -37.393x^2 + 11.863x + 0.8855$								
Peso Vol. Seco Máximo Yd (gr/cm³)		1.826		Óptimo contenido de Humedad			16.00%	

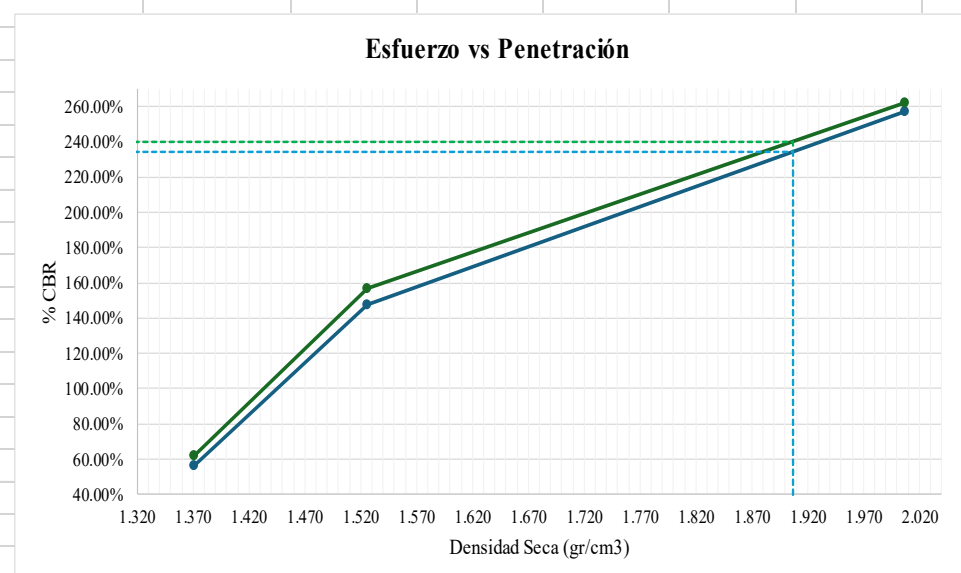
Anexo 22. Ensayo CBR suelo natural + 15% de Cemento

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.				
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg	
			ASTM D-1883	Wopt:	16.00%	
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR						
1. ANTES DE LA SATURACIÓN						
MOLDE			A	B	C	
Nº Golpes			11	27	56	
Altura del molde (cm)			12.50	12.5	12.7	
Diámetro del molde (cm)			15.30	15.1	15	
Volúmen del molde (cm³)			2298.17	2238.48	2244.28	
Peso del Molde (gr)			9476.5	9118.8	7570.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)			13406.9	13298.8	13005.2	
Peso Suelo Húmedo (gr)			3930.4	4180	5434.7	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)			1.71	1.867	2.422	
2. CONTENIDO DE HUMEDAD						
Número de Recipiente	3	5	7	8	10	12
Peso del recipiente Wr (gr)	7.50	7.50	8.00	7.00	7.00	7.50
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)	58.10	56.70	59.10	56.00	69.00	57.30
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)	48.10	46.90	49.80	47.00	58.10	49.00
Peso Suelo Seco Ws (gr)	40.60	39.40	41.80	40.00	51.10	41.50
Peso del Agua Ww (gr)	10.00	9.80	9.30	9.00	10.90	8.30
Contenido de Humedad ω%	24.63%	24.87%	22.25%	22.50%	21.33%	20.00%
Contenido de Humedad Promedio ω%	24.75%		22.37%		20.67%	
Densidad Seca (gr/cm³)	1.371		1.526		2.007	
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Volúmen del molde (cm³)			2298.17	2238.48	2244.28	
Peso del Molde (gr)			9476.5	9118.8	7570.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)			13857.9	13708.5	13398.7	
Peso Suelo Húmedo (gr)			4381.4	4589.7	5828.2	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)			1.906	2.050	2.597	
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN						
Máquina de compresión simple	Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)			
Nº MOLDE	A		B		C	
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	848.8597	282.95	1966.499	655.50	2302.7252	767.58
0.050	1327.031	442.34	3175.969	1058.66	4702.24	1567.41
0.075	1632.472	544.16	4026.375	1342.13	6461.501	2153.83
0.100	1867.377	622.46	4711.107	1570.37	7855.319	2618.44
0.150	2241.373	747.12	5777.863	1925.95	9715.73	3238.58
0.200	2553.725	851.24	6645.589	2215.20	11576.74	3858.91
0.250	2848.518	949.51	7384.893	2461.63	13270.1	4423.37
0.300	3132.162	1044.05	8032.365	2677.46	14578.83	4859.61
0.400	3670.864	1223.62	9171.729	3057.24	16077.74	5359.25
0.500	4191.128	1397.04	10339.89	3446.63	17345.99	5782.00

Nº Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	622.46	62.25%	1.371	851.24	56.75%	1.371
B	1570.37	157.04%	1.526	2215.20	147.68%	1.526
C	2618.44	261.84%	2.007	3858.91	257.26%	2.007
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)			2.007			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.907	261.84%	257.26%		261.84%	

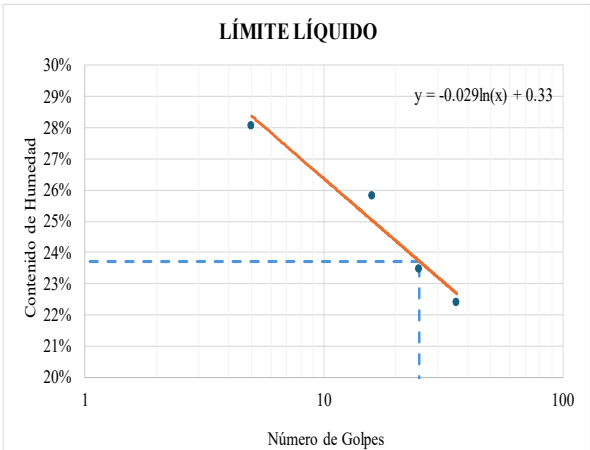


RESULTADOS		
Densidad Seca Máxima		2.007 gr/cm ³
DSM		% CBR 0.1 in
95%	1.907	240.00%
% CBR Max		234.50%
		240.00%

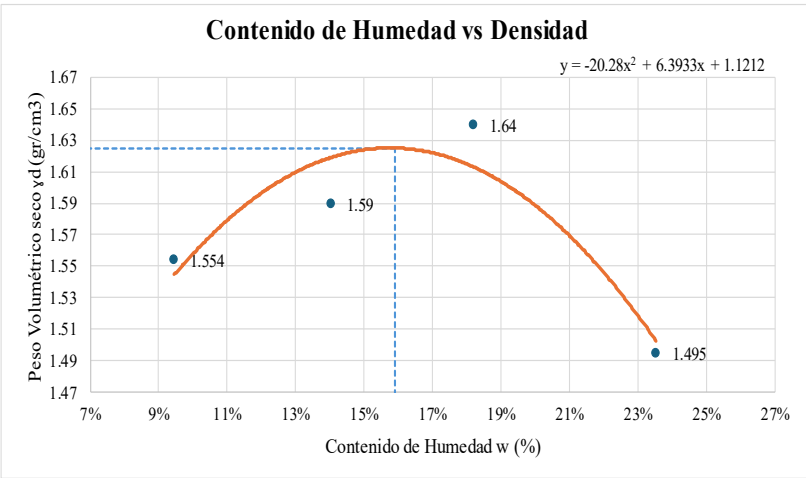


Suelo Natural + 5% de Ceniza

Anexo 23. Ensayo Limites de Atterberg suelo natural + 5% de Ceniza

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 									
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial							
LÍMITES DE ATTERBERG									
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande			Normas:	ASTM D4318	Ensayado por:	Katherin Altamirano		
Coordenadas:	17M 760604 9853252	Muestra:	1		AASHTO T 90-70	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.		
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO									
Nº de Recipiente	5	13	36	11	25	34	10	12	
Peso del Recipiente W _r (gr)	7.70	7.60	7.60	7.50	7.80	7.70	7.60	7.50	
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	15.10	14.80	14.90	15.30	14.70	15.00	14.70	14.60	
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	13.50	13.20	13.40	13.70	13.40	13.60	13.40	13.30	
Peso Agua (W _w) (gr)	1.60	1.60	1.50	1.60	1.30	1.40	1.30	1.30	
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	5.80	5.60	5.80	6.20	5.60	5.90	5.80	5.80	
Contenido de Humedad (ω%)	27.59%	28.57%	25.86%	25.81%	23.21%	23.73%	22.41%	22.41%	
Promedio (ω%)	28.08%		25.83%		23.47%		22.41%		
Número de Golpes	5		16		25		36		
Límite Líquido LL (%)	23.70%								
									
LÍMITE PLÁSTICO									
Muestra	1	2	3	4	5	6			
Nº de Recipiente	5	8	23	20	12	15			
Peso del Recipiente W _r (gr)	10.80	10.90	10.70	10.80	10.70	11.00			
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	13.00	12.80	13.10	12.90	12.60	13.10			
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	12.63	12.48	12.70	12.51	12.26	12.72			
Peso Agua (W _w) (gr)	0.37	0.32	0.40	0.39	0.34	0.38			
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	1.83	1.58	2.00	1.71	1.56	1.72			
Contenido de Humedad (ω%)	20.22%	20.25%	20.00%	22.81%	21.79%	22.09%			
Promedio (ω%)	21.19%								
RESULTADOS									
Límite Líquido LL (%)	23.70%								
Límite Plástico LP (%)	21.19%								
Índice Plástico IP (%)	2.51%								

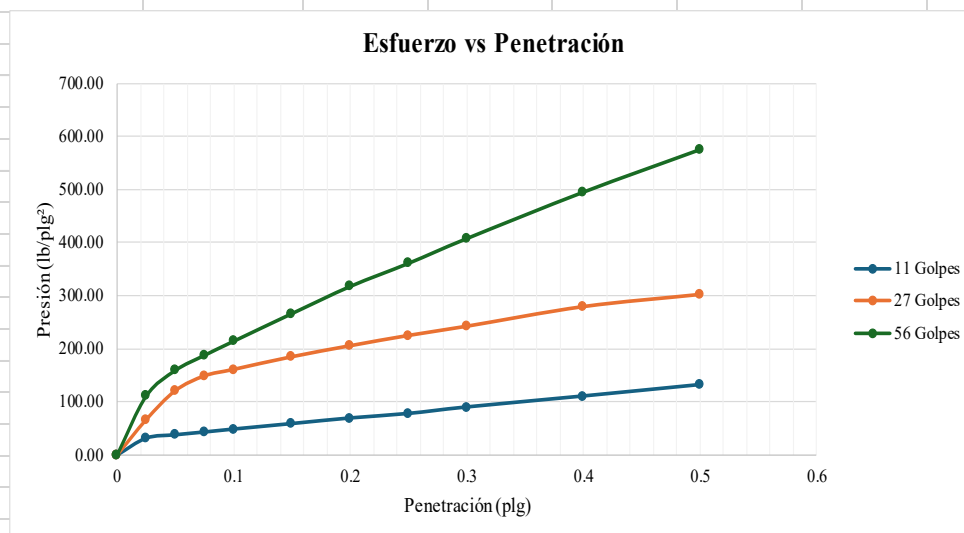
Anexo 24: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 5% de Ceniza

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 								
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.							
Muestra:	1		Normas:	AASHTO T180				
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande		Ensayado por:	Katherin Altamirano				
Coordenadas:	17M 760604 9853252		Revisado por	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.				
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO								
Número de golpes:	56	Peso de Martillo:	10 lb	Peso del Molde:	13481	gr		
Número de capas:	5	Altura de Caída:	18 "	Volumen del molde	2208.93	cm ³		
Diámetro molde:	15.2	Altura del molde:	12.5					
Energía de compactación	52638.44 lb/ft ³							
Peso Inicial	6000 gr	6000 gr	6000 gr	6000 gr				
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN								
Número de Ensayo	1	2	3	4				
Humedad inicial añadida en %	10%	15%	20%	25%				
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	17238.5	17485.5	17762.5	17559.5				
Peso suelo húmedo Wm (gr)	3758	4005	4282	4079				
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm ³)	1.701	1.813	1.938	1.847				
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD								
Número de Recipiente	1	2	11	17	18	27	34	36
Peso del recipiente Wr (gr)	10.00	10.50	9.50	10.00	10.00	9.50	9.50	10.00
Rec. + suelo húmedo Wrs+Wm (gr)	75.00	78.50	80.50	75.00	96.00	85.00	99.00	85.50
Rec. + suelo seco Ws+Wm (gr)	69.40	72.60	72.10	66.70	82.50	73.60	80.70	72.20
Peso sólidos Ws (gr)	59.40	62.10	62.60	56.70	72.50	64.10	71.20	62.20
Peso del agua (gr)	5.60	5.90	8.40	8.30	13.50	11.40	18.30	13.30
Cont. Humedad w (%)	9.43%	9.50%	13.42%	14.64%	18.62%	17.78%	25.70%	21.38%
Cont. Humedad promedio w% (%)	9.46%		14.03%		18.20%		23.54%	
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO								
Peso Volumétrico Seco Yd (gr/cm ³)	1.554		1.59		1.64		1.495	
Contenido de Humedad vs Densidad $y = -20.28x^2 + 6.3933x + 1.1212$ 								
Peso Vol. Seco Máximo Yd (gr/cm³)	1.625		Óptimo contenido de Humedad		15.90%			

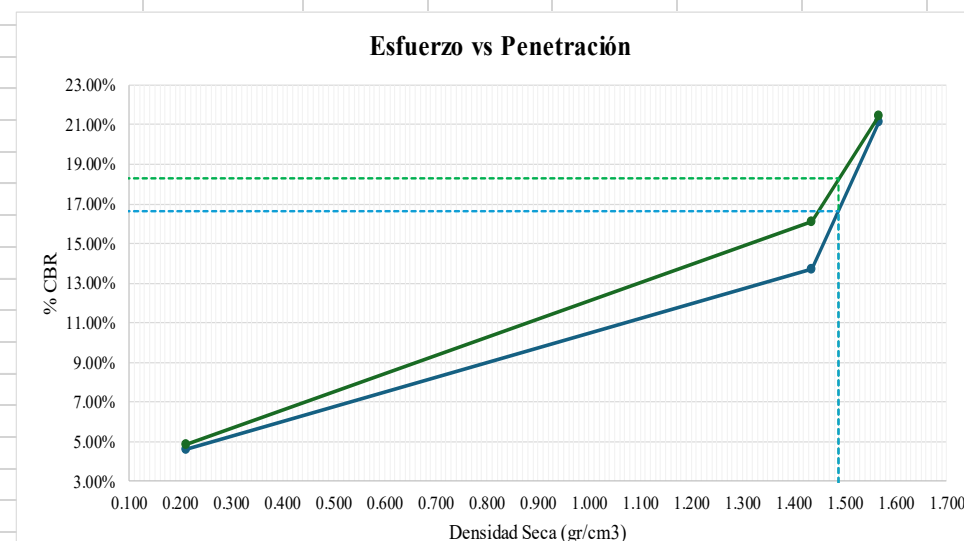
Anexo 25: Ensayo CBR suelo natural + 5% de Ceniza

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.				
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193 ASTM D-1883	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg	
				Wopt:	15.90%	
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR						
1. ANTES DE LA SATURACIÓN						
MOLDE	A		B		C	
Nº Golpes	11		27		56	
Altura del molde (cm)	12.50		12.6		12.6	
Diámetro del molde (cm)	15.20		15		16.5	
Volúmen del molde (cm³)	2268.23		2226.60		2694.19	
Peso del Molde (gr)	9476.5		7570.5		8072	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	10106		11610		13157	
Peso Suelo Húmedo (gr)	629.5		4039.5		5085	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	0.278		1.814		1.887	
2. CONTENIDO DE HUMEDAD						
Número de Recipiente	27	18	34	36	22	16
Peso del recipiente Wr (gr)	9.50	9.80	9.50	10.00	7.80	8.10
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)	66.00	70.30	68.40	74.40	61.80	57.40
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)	52.50	56.20	56.20	61.00	52.60	49.10
Peso Suelo Seco Ws (gr)	43.00	46.40	46.70	51.00	44.80	41.00
Peso del Agua Ww (gr)	13.50	14.10	12.20	13.40	9.20	8.30
Contenido de Humedad ω%	31.40%	30.39%	26.12%	26.27%	20.54%	20.24%
Contenido de Humedad Promedio ω%	30.89%		26.20%		20.39%	
Densidad Seca (gr/cm³)	0.212		1.437		1.567	
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Volúmen del molde (cm³)	2268.23		2226.60		2694.19	
Peso del Molde (gr)	9476.5		7570.5		8072	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	12739		11900.5		13347.5	
Peso Suelo Húmedo (gr)	3262.5		4330		5275.5	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.438		1.945		1.958	
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN						
Máquina de compresión simple	Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)			
Nº MOLDE	A		B		C	
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	95	31.67	200.1	66.70	333.6	111.20
0.050	113.6	37.87	363.5	121.17	478.3	159.43
0.075	129.2	43.07	446.6	148.87	563.6	187.87
0.100	145.6	48.53	483.1	161.03	643.2	214.40
0.150	176.5	58.83	554.6	184.87	799.6	266.53
0.200	207.7	69.23	616.6	205.53	953.1	317.70
0.250	233	77.67	674.6	224.87	1083.7	361.23
0.300	269.3	89.77	726.5	242.17	1223.6	407.87
0.400	330.6	110.20	837	279.00	1486.1	495.37
0.500	394.5	131.50	905.6	301.87	1726.5	575.50

N° Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	48.53	4.85%	0.212	69.23	4.62%	0.212
B	161.03	16.10%	1.437	205.53	13.70%	1.437
C	214.40	21.44%	1.567	317.70	21.18%	1.567
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)			1.567			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.489	21.44%	21.18%		21.44%	

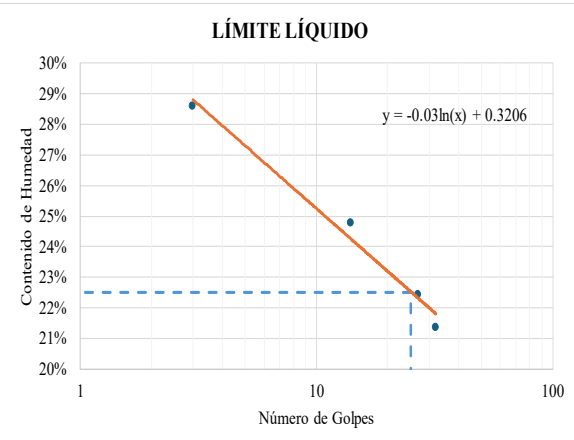


RESULTADOS			
Densidad Seca Máxima		1.567	gr/cm ³
DSM		% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	1.489	18.30%	16.65%
% CBR Max		18.30%	

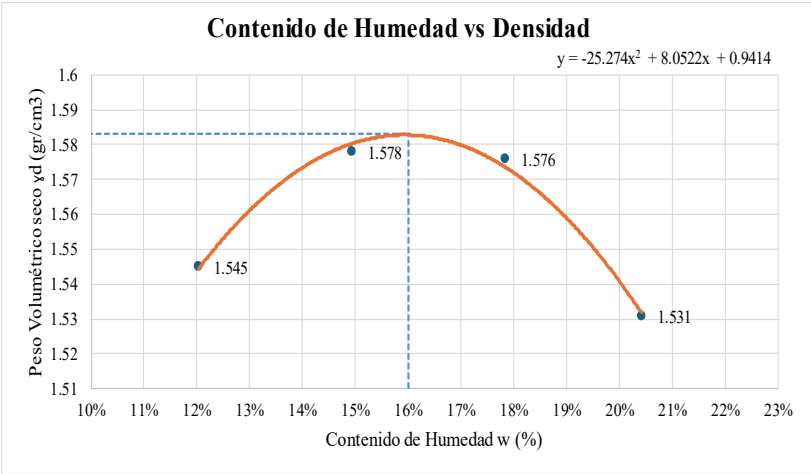


Suelo Natural + 10% de Ceniza

Anexo 26: Ensayo Limites de Atterberg suelo natural + 10% de Ceniza

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 									
PROYECTO		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial							
LÍMITES DE ATTERBERG									
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande			Normas:		ASTM D4318	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Coordenadas:	17M 760604 9853252	Muestra:	1			AASHTO T 90-70	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.	
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO									
Nº de Recipiente	1	4	8	21	23	30	9	11	
Peso del Recipiente W _r (gr)	7.50	7.60	7.50	7.40	7.70	7.80	7.60	7.40	
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	13.90	14.10	14.60	14.80	14.90	14.80	14.50	14.70	
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	12.47	12.66	13.20	13.32	13.60	13.50	13.30	13.40	
Peso Agua (W _w) (gr)	1.43	1.44	1.40	1.48	1.30	1.30	1.20	1.30	
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	4.97	5.06	5.70	5.92	5.90	5.70	5.70	6.00	
Contenido de Humedad (ω%)	28.77%	28.46%	24.56%	25.00%	22.03%	22.81%	21.05%	21.67%	
Promedio (ω%)	28.62%		24.78%		22.42%		21.36%		
Número de Golpes	3		14		27		32		
Límite Líquido LL (%)	22.50%								
									
LÍMITE PLÁSTICO									
Muestra	1	2	3	4	5	6			
Nº de Recipiente	22	18	31	30	13	25			
Peso del Recipiente W _r (gr)	10.60	10.70	10.70	10.90	10.80	10.70			
Peso Húmedo + Recipiente (W _m +W _r) (gr)	13.80	12.80	13.13	12.97	12.65	13.10			
Peso Seco + Recipiente (W _s +W _r) (gr)	13.24	12.43	12.70	12.60	12.31	12.69			
Peso Agua (W _w) (gr)	0.56	0.37	0.43	0.37	0.34	0.41			
Peso Muestra Seca (W _s) (gr)	2.64	1.73	2.00	1.70	1.51	1.99			
Contenido de Humedad (ω%)	21.21%	21.39%	21.50%	21.76%	22.52%	20.60%			
Promedio (ω%)	21.50%								
RESULTADOS									
Límite Líquido LL (%)	22.50%								
Límite Plástico LP (%)	21.50%								
Índice Plástico IP (%)	1.00%								

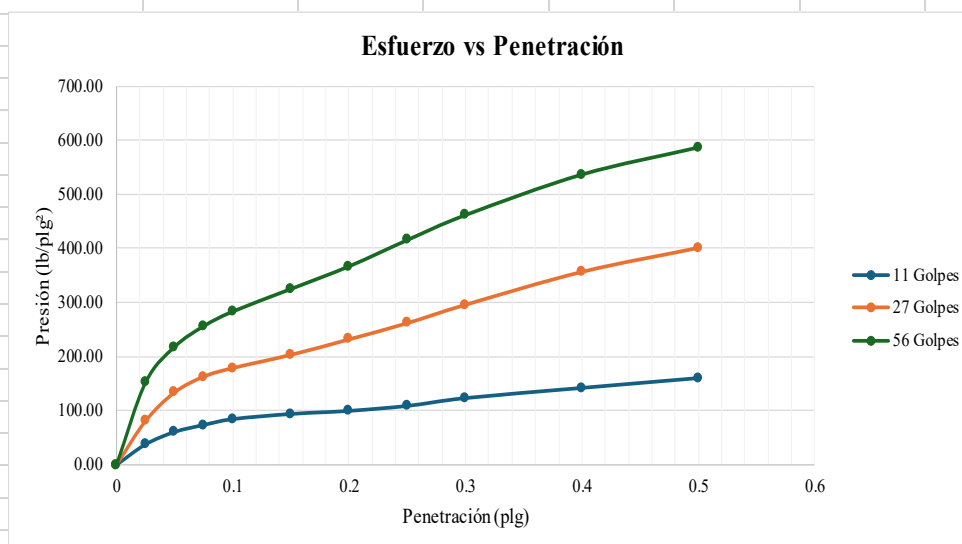
Anexo 27: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 10% de Ceniza

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 								
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.							
Muestra:	1							
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande							
Coordenadas:	17M 760604 9853252							
Normas:	AASHTO T180							
Ensayado por:	Katherin Altamirano							
Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.							
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO								
Número de golpes:	56	Peso de Martillo:	10 lb	Peso del Molde:	14198	gr		
Número de capas:	5	Altura de Caída:	18 "	Volumen del molde	2191.96	cm ³		
Diámetro molde:	15.2	Altura del molde:	12.5					
Energía de compactación	52638.44 lb/ft ³							
Peso Inicial	5000	5000	5000	5000				
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN								
Número de Ensayo	1	2	3	4				
Humedad inicial añadida en %	15%	20%	25%	30%				
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	17992.5	18174	18268.5	18238				
Peso suelo húmedo Wm (gr)	3795	3976	4071	4040				
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm ³)	1.731	1.814	1.857	1.843				
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD								
Número de Recipiente	13	16	31	30	23	22	36	4
Peso del recipiente W _r (gr)	7.50	8.00	7.00	7.00	7.60	7.70	10.00	6.50
Rec. + suelo húmedo W _{rs} +W _m (gr)	56.00	50.00	59.50	55.00	64.30	61.20	71.10	67.00
Rec. + suelo seco W _s +W _m (gr)	50.90	45.40	52.00	49.40	55.30	53.50	61.30	56.20
Peso sólidos W _s (gr)	43.40	37.40	45.00	42.40	47.70	45.80	51.30	49.70
Peso del agua (gr)	5.10	4.60	7.50	5.60	9.00	7.70	9.80	10.80
Cont. Humedad w (%)	11.75%	12.30%	16.67%	13.21%	18.87%	16.81%	19.10%	21.73%
Cont. Humedad promedio w (%)	12.03%		14.94%		17.84%		20.42%	
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO								
Peso Volumétrico Seco Y _d (gr/cm ³)	1.545		1.578		1.576		1.531	
Contenido de Humedad vs Densidad $y = -25.274x^2 + 8.0522x + 0.9414$ 								
Peso Vol. Seco Máximo Y_d (gr/cm³)	1.583		Óptimo contenido de Humedad		16.00%			

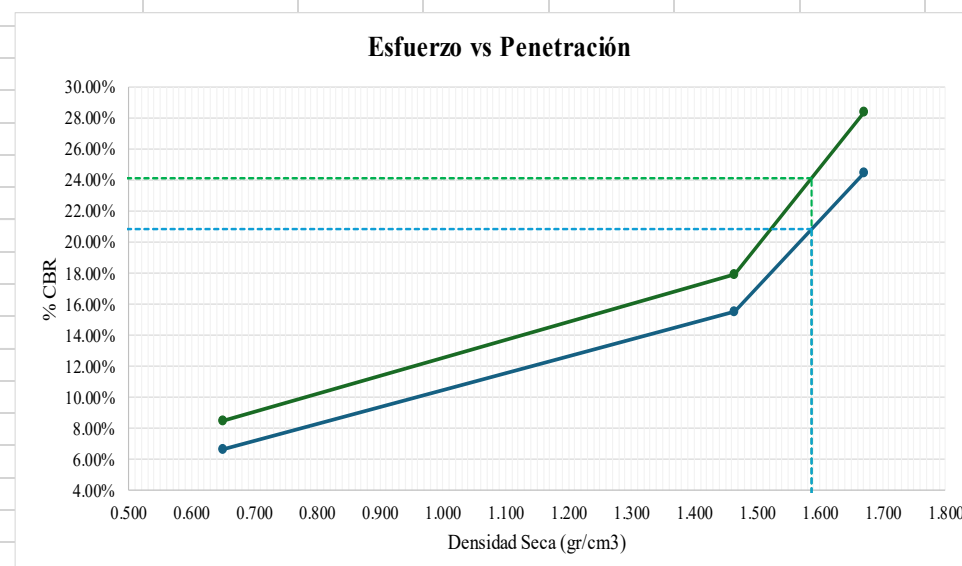
Anexo 28: Ensayo CBR suelo natural + 10% de Ceniza

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 						
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.				
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano	
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193 ASTM D-1883	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg	
				Wopt:	16.00%	
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR						
1. ANTES DE LA SATURACIÓN						
MOLDE	A		B		C	
Nº Golpes	11		27		56	
Altura del molde (cm)	12.50		12.6		12.6	
Diámetro del molde (cm)	15.20		15		16.5	
Volúmen del molde (cm³)	2268.23		2226.60		2694.19	
Peso del Molde (gr)	6321		7031		9563.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	8285.6		11130		15007.5	
Peso Suelo Húmedo (gr)	1964.6		4099		5444	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	0.866		1.841		2.021	
2. CONTENIDO DE HUMEDAD						
Número de Recipiente	14	29	2	3	17	11
Peso del recipiente Wr (gr)	24.30	24.40	24.40	24.70	24.00	24.20
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)	95.10	87.90	85.40	90.10	83.30	89.70
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)	77.40	72.30	72.90	76.80	72.90	78.50
Peso Suelo Seco Ws (gr)	53.10	47.90	48.50	52.10	48.90	54.30
Peso del Agua Ww (gr)	17.70	15.60	12.50	13.30	10.40	11.20
Contenido de Humedad ω%	33.33%	32.57%	25.77%	25.53%	21.27%	20.63%
Contenido de Humedad Promedio ω%	32.95%		25.65%		20.95%	
Densidad Seca (gr/cm³)	0.651		1.465		1.671	
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Volúmen del molde (cm³)	2268.23		2226.60		2694.19	
Peso del Molde (gr)	6321		7031		9563.5	
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	10156.7		11420.4		15335.2	
Peso Suelo Húmedo (gr)	3835.7		4389.4		5771.7	
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.691		1.971		2.142	
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN						
Máquina de compresión simple	Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)			
Nº MOLDE	A		B		C	
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	113.8	37.93	244.1	81.37	457.7	152.57
0.050	182.7	60.90	402.8	134.27	655.5	218.50
0.075	221.5	73.83	490.0	163.33	769.8	256.60
0.100	254	84.67	537.6	179.20	851.1	283.70
0.150	282.6	94.20	611.1	203.70	976.2	325.40
0.200	299.7	99.90	697.3	232.43	1102.2	367.40
0.250	327.4	109.13	787.3	262.43	1247.9	415.97
0.300	370.8	123.60	889.4	296.47	1386.4	462.13
0.400	427.2	142.40	1071.9	357.30	1611.2	537.07
0.500	481.9	160.63	1205.2	401.73	1761.6	587.20

N° Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	84.67	8.47%	0.651	99.90	6.66%	0.651
B	179.20	17.92%	1.465	232.43	15.50%	1.465
C	283.70	28.37%	1.671	367.40	24.49%	1.671
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)			1.671			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.587	28.37%	24.49%		28.37%	

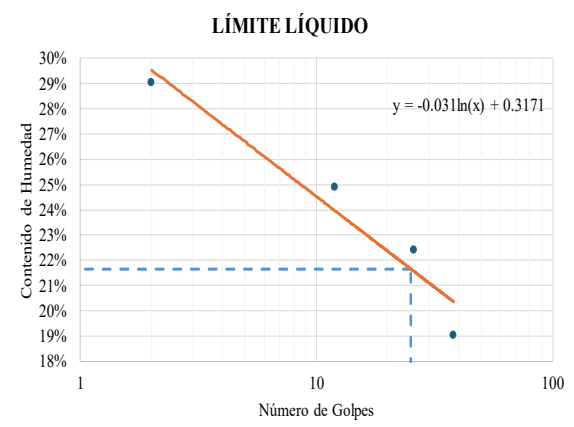


RESULTADOS		
Densidad Seca Máxima	1.671	gr/cm ³
DSM	% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	1.587	24.10%
% CBR Max	24.10%	

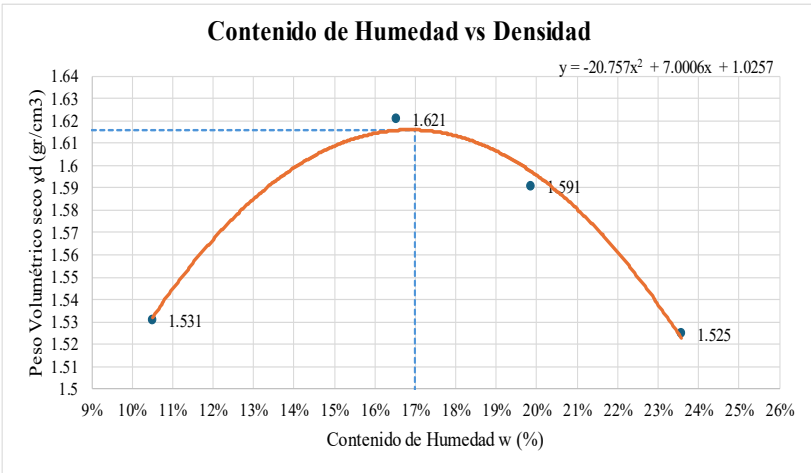


Suelo Natural + 15% de Ceniza

Anexo 29: Ensayo Limites de Atterberg suelo natural + 15% de Ceniza

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 									
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial								
LÍMITES DE ATTERBERG									
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande			Normas:	ASTM D4318	Ensayado por:	Katherin Altamirano		
Coordenadas:	17M 760604 9853252	Muestra:	1		AASHTO T 90-70	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.		
ENSAYO PARA DETERMINAR LÍMITE LÍQUIDO DEL SUELO									
Nº de Recipiente	27	14	25	8	31	10	4	1	
Peso del Recipiente W_r (gr)	7.60	7.80	7.70	7.50	7.60	7.70	7.60	7.50	
Peso Húmedo + Recipiente ($W_m + W_r$) (gr)	14.00	14.50	14.20	14.80	13.90	14.30	14.80	14.80	
Peso Seco + Recipiente ($W_s + W_r$) (gr)	12.55	13.00	12.90	13.35	12.74	13.10	13.65	13.63	
Peso Agua (W_w) (gr)	1.45	1.50	1.30	1.45	1.16	1.20	1.15	1.17	
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	4.95	5.20	5.20	5.85	5.14	5.40	6.05	6.13	
Contenido de Humedad ($\omega\%$)	29.29%	28.85%	25.00%	24.79%	22.57%	22.22%	19.01%	19.09%	
Promedio ($\omega\%$)	29.07%		24.89%		22.40%		19.05%		
Número de Golpes	2		12		26		38		
Límite Líquido LL (%)	21.65%								
									
LÍMITE PLÁSTICO									
Muestra	1	2	3	4	5	6			
Nº de Recipiente	4	9	12	15	22	28			
Peso del Recipiente W_r (gr)	10.60	10.60	10.80	10.70	10.70	10.70			
Peso Húmedo + Recipiente ($W_m + W_r$) (gr)	13.15	12.96	13.00	13.20	12.87	13.05			
Peso Seco + Recipiente ($W_s + W_r$) (gr)	12.70	12.53	12.63	12.78	12.50	12.63			
Peso Agua (W_w) (gr)	0.45	0.43	0.37	0.42	0.37	0.42			
Peso Muestra Seca (W_s) (gr)	2.10	1.93	1.83	2.08	1.80	1.93			
Contenido de Humedad ($\omega\%$)	21.43%	22.28%	20.22%	20.19%	20.56%	21.76%			
Promedio ($\omega\%$)	21.07%								
RESULTADOS									
Límite Líquido LL (%)	21.65%								
Límite Plástico LP (%)	21.07%								
Índice Plástico IP (%)	0.58%								

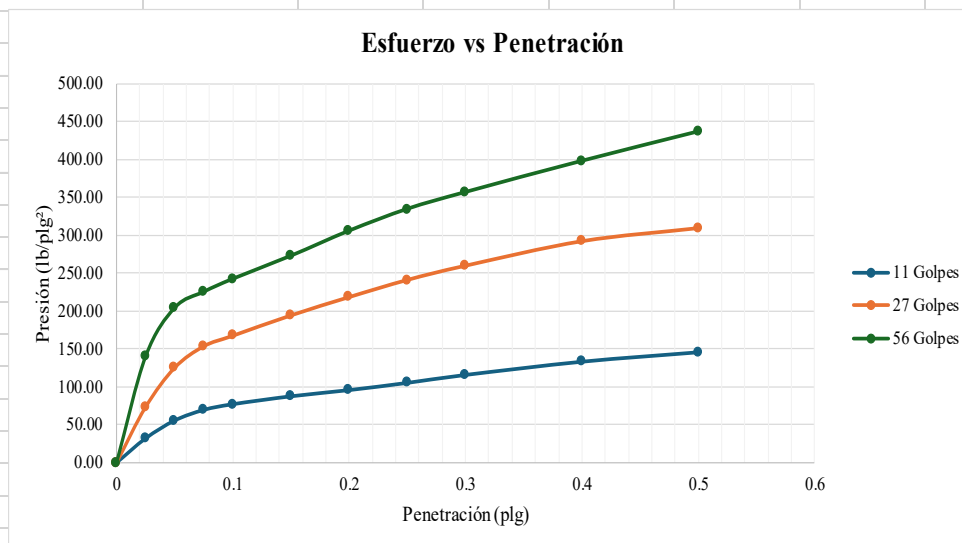
Anexo 30: Ensayo Proctor Modificado tipo B suelo natural + 15% de Ceniza

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 	
PROYECTO	Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.
Muestra:	1
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande
Coordenadas:	17M 760604 9853252
Normas:	AASHTO T180
Ensayado por:	Katherin Altamirano
Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg.
ESPECIFICACIONES DE ENSAYO	
Número de golpes:	56
Peso de Martillo:	10 lb
Peso del Molde:	14198 gr
Número de capas:	5
Altura de Caída:	18 "
Volumen del molde:	2191.96 cm ³
Diámetro molde:	15.2
Altura del molde:	12.5
Energía de compactación	52638.44 lb/ft ³
Peso Inicial	5000
	5000
	5000
	5000
1. PROCESO DE COMPACTACIÓN	
Número de Ensayo	1
Humedad inicial añadida en %	10%
P. Molde+Suelo húmedo (gr)	17906.7
Peso suelo húmedo Wm (gr)	3709
Peso unitario húmedo Ym (gr/cm ³)	1.692
	1.889
	1.907
	1.884
2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDOS DE HUMEDAD	
Número de Recipiente	4
Peso del recipiente Wr (gr)	129.00
Rec. + suelo húmedo Wrs+Wm (gr)	231.00
Rec. + suelo seco Ws+Wm (gr)	223.50
Peso sólidos Ws (gr)	94.50
Peso del agua (gr)	7.50
Cont. Humedad w (%)	7.94%
	13.07%
	16.66%
	16.39%
	19.53%
	20.18%
	22.86%
	24.26%
Cont. Humedad promedio w% (%)	10.50%
	16.53%
	19.86%
	23.56%
3. DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO SECO	
Peso Volumétrico Seco Yd (gr/cm ³)	1.531
	1.621
	1.591
	1.525
Contenido de Humedad vs Densidad $y = -20.757x^2 + 7.0006x + 1.0257$  The graph plots Dry Density (Yd) in gr/cm³ on the y-axis (ranging from 1.5 to 1.64) against Moisture Content (w) in % on the x-axis (ranging from 9% to 26%). A parabolic curve is fitted to the data points. The peak of the curve is at a moisture content of 17.00% and a dry density of 1.616 gr/cm³. The data points shown are (10.50%, 1.531), (16.53%, 1.621), (19.86%, 1.591), and (23.56%, 1.525).	
Peso Vol. Seco Máximo Yd (gr/cm³)	1.616
Óptimo contenido de Humedad	17.00%

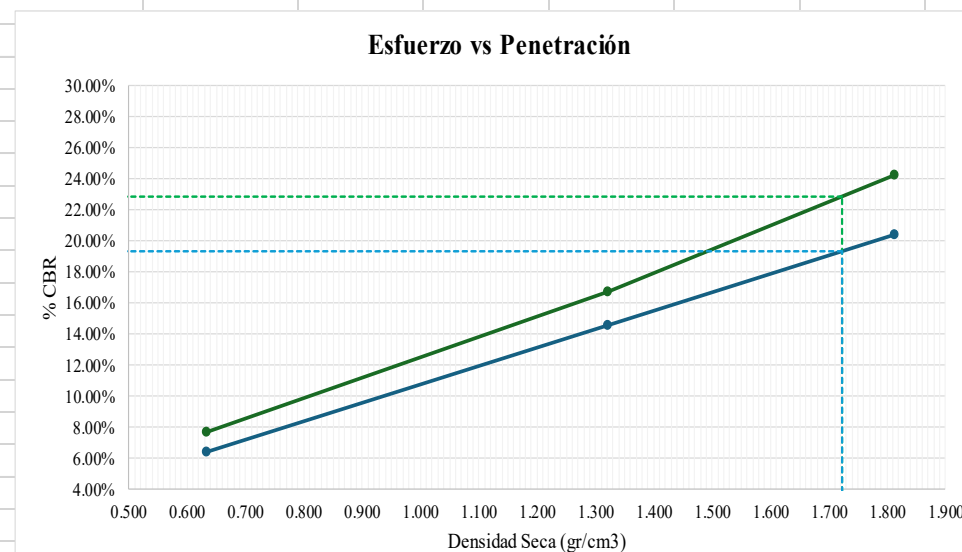
Anexo 31: Ensayo CBR suelo natural + 15% de Ceniza

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
PROYECTO:		Análisis experimental de la estabilización de suelos arenosos del sector La Libertad de Huachi Grande mediante la adición de cal, cemento y ceniza de totora: evaluación de propiedades físicas y mecánicas y su aplicación en infraestructura vial.					
Muestra:	1	Coordenadas:	17M 760604 9853252	Ensayado por:	Katherin Altamirano		
Ubicación:	La Libertad - Huachi Grande	Norma:	AASHTO T-193 ASTM D-1883	Revisado por:	Ing. Rodrigo Acosta, Mg		
				Wopt:	17.00%		
ENSAYO DE COMPACTACIÓN CBR							
1. ANTES DE LA SATURACIÓN							
MOLDE	A		B		C		
Nº Golpes	11		27		56		
Altura del molde (cm)	12.50		12.5		12.4		
Diámetro del molde (cm)	15.20		15		15.1		
Volúmen del molde (cm³)	2268.23		2208.93		2220.58		
Peso del Molde (gr)	9476.5		7570.5		8072		
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	11367.3		11227.3		12897.5		
Peso Suelo Húmedo (gr)	1890.8		3656.8		4825.5		
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	0.834		1.655		2.173		
2. CONTENIDO DE HUMEDAD							
Número de Recipiente	34	38	16	19	5	12	
Peso del recipiente Wr (gr)	9.40	7.30	8.00	7.90	8.00	7.80	
Recip + Suelo Húmedo Wr+Wm (gr)	75.40	68.20	70.40	72.50	73.60	65.90	
Recip + Suelo Seco Wr+Ws (gr)	59.50	53.80	57.70	59.60	62.80	56.20	
Peso Suelo Seco Ws (gr)	50.10	46.50	49.70	51.70	54.80	48.40	
Peso del Agua Ww (gr)	15.90	14.40	12.70	12.90	10.80	9.70	
Contenido de Humedad ω%	31.74%	30.97%	25.55%	24.95%	19.71%	20.04%	
Contenido de Humedad Promedio ω%	31.35%		25.25%		19.87%		
Densidad Seca (gr/cm³)	0.635		1.321		1.813		
3. DESPUÉS DE LA SATURACIÓN							
Volúmen del molde (cm³)	2268.23		2208.93		2220.58		
Peso del Molde (gr)	9476.5		7570.5		8072		
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	13248.6		11609.2		13157.4		
Peso Suelo Húmedo (gr)	3772.1		4038.7		5085.4		
Peso Unitario Húmedo (gr/cm³)	1.663		1.828		2.29		
ENSAYO DE CARGA Y PENETRACIÓN							
Máquina de compresión simple	Área pistón: 3 plg²		Velocidad de Carga: 1.27 mm/min (0.05 plg/min)				
Nº MOLDE	A		B		C		
Penetración (plg)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	Dial	Presión (lb/plg²)	
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00	
0.025	96.7	32.23	220.8	73.60	420.5	140.17	
0.050	167.4	55.80	376.4	125.47	612.9	204.30	
0.075	209.3	69.77	461.1	153.70	675.9	225.30	
0.100	231.9	77.30	502.8	167.60	727.3	242.43	
0.150	263.2	87.73	583.5	194.50	818.6	272.87	
0.200	287.8	95.93	656.0	218.67	917.6	305.87	
0.250	316.4	105.47	723.9	241.30	1003.7	334.57	
0.300	347.8	115.93	780.2	260.07	1070.3	356.77	
0.400	400.1	133.37	877.1	292.37	1193.5	397.83	
0.500	437.5	145.83	928.9	309.63	1309.9	436.63	

N° Molde	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.100	Densidad seca	Presión (lb/plg ²)	CBR 0.200	Densidad seca
A	77.30	7.73%	0.635	95.93	6.40%	0.635
B	167.60	16.76%	1.321	218.67	14.58%	1.321
C	242.43	24.24%	1.813	305.87	20.39%	1.813
Densidad Seca Máxima (gr/cm ³)			1.813			
DSM		%CBR 0.1 in	%CBR 0.2 in		%CBR Mayor	
95.00%	1.722	24.24%	20.39%		24.24%	



RESULTADOS		
Densidad Seca Máxima	1.813	gr/cm ³
DSM	% CBR 0.1 in	% CBR 0.2 in
95%	1.722	22.85%
% CBR Max	22.85%	



PRESUPUESTO ESTABILIZACIÓN CON CAL

Anexo 32: Presupuesto referencial estabilización con cal

INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CAL
UBICACIÓN: LA LIBERTAD - HUACHI GRANDE
OFERENTE: PRESUPUESTO REFERENCIAL
ELABORADO: KATHERIN ALTAMIRANO

TABLA DE DESCRIPCIÓN DE RUBROS, UNIDADES, CANTIDADES Y PRECIOS

<i>No.</i>	<i>Rubro / Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Precio global</i>
1.1.1	Replanteo y nivelación (Vías)	km.	1,00	772,57	772,57
1.1.2	Desbroce y limpieza del terreno	m2	6.000,00	0,39	2.340,00
25	Estabilización con cal	m3	1.800,00	18,66	33.588,00
1.5.1	Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)	m2	6.000,00	1,09	6.540,00
				TOTAL:	43.240,57

SON : CUARENTA Y TRES MIL DOSCIENTOS CUARENTA DOLARES, 57/100 CENTAVOS

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

Anexo 33. Análisis de Precios Unitarios de la estabilización con cal

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 1 DE 4

RUBRO : 1.1.1

UNIDAD: km.

DETALLE : Replanteo y nivelación.(Vías)

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					35,84
HERRAMIENTAS MANUALES	1,00	0,00	0,00	53,849	0,00
EQUIPO DE TOPOGRAFÍA	1,00	0,00	0,00	53,849	0,00
SUBTOTAL M					35,84
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
TOPÓGRAFO (EN CONSTRUCCIÓN) EO C1	1,00	4,75	4,75	53,849	255,78
CADENERO EO D2	2,00	4,28	8,56	53,849	460,95
SUBTOTAL N					716,73
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB	
ESTACAS DE MADERA	U	20,000	1,00	20,00	
SUBTOTAL O				20,00	
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL P				0,00	

TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	772,57
INDIRECTOS (%)	0,00%
UTILIDAD (%)	0,00%
COSTO TOTAL DEL RUBRO	772,57
VALOR UNITARIO	772,57

SON: SETECIENTOS SETENTA Y DOS DÓLARES, 57/100 CENTAVOS

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 2 DE 4

RUBRO : 1.1.2
DETALLE : Desbroce y limpieza del terreno

UNIDAD: m2

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,02
HERRAMIENTAS VARIAS	4,00	0,17	0,68	0,031	0,02
SUBTOTAL M					0,04
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
PEÓN EO E2	2,00	4,23	8,46	0,031	0,26
TECNICO OBRAS CIVILES EO C2	1,00	4,52	4,52	0,020	0,09
SUBTOTAL N					0,35
MATERIALES DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB
SUBTOTAL O					0,00
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB
SUBTOTAL P					0,00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					0,39
INDIRECTOS (%)					0,00
UTILIDAD (%)					0,00
COSTO TOTAL DEL RUBRO					0,39
VALOR UNITARIO					0,39

SON: CERO DÓLARES, 39/100 CENTAVOS
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 3 DE 4

RUBRO : 25
DETALLE : Estabilización con cal

UNIDAD: M3

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,01
CAMIÓN CISTERNA	0,50	30,00	15,00	0,016	0,24
MOTONIVELADORA	1,00	40,00	40,00	0,016	0,64
RODILLO LISO	1,00	40,00	40,00	0,016	0,64
SUBTOTAL M					1,53
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
CHOFER TANQUEROS CH C1	0,50	6,22	3,11	0,016	0,05
OP. MOTONIVELADORA OP C1	1,00	4,75	4,75	0,016	0,08
OP. RODILLO AUTOPROPULSADO OP C2	1,00	4,52	4,52	0,016	0,07
PEON EO E2	1,00	4,23	4,23	0,016	0,07
SUBTOTAL N					0,27
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB	
CAL VIVA	M3	1,400	11,76	16,46	
AGUA	M3	0,790	0,50	0,40	
SUBTOTAL O				16,86	
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL P				0,00	
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					18,66
INDIRECTOS (%)				0,00%	0,00
UTILIDAD (%)				0,00%	0,00
COSTO TOTAL DEL RUBRO					18,66
VALOR UNITARIO					18,66

SON: DIECIOCHO DÓLARES, 66/100 CENTAVOS
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 4 DE 4

RUBRO : 1.5.1

UNIDAD: m2

DETALLE : Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,01
RODILLO VIBRATORIO (liso)	1,00	40,00	40,00	0,008	0,32
RODILLO VIBRATORIO PATA DE CAB	1,00	40,00	40,00	0,008	0,32
TANQUERO DE AGUA	1,00	30,00	30,00	0,008	0,24
HERRAMIENTAS VARIAS	1,00	0,17	0,17	0,008	0,00
SUBTOTAL M					0,89
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
PEON EO E2	2,00	4,23	8,46	0,008	0,07
OPERADOR DE MOTONIVELADORA OP C1	1,00	4,75	4,75	0,008	0,04
OPERADOR DE RODILLO AUTOPROPUL OP C2	1,00	4,52	4,52	0,008	0,04
CHOFER TANQUEROS CH C1	1,00	6,22	6,22	0,008	0,05
SUBTOTAL N					0,20
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL O				0,00	
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL P				0,00	
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					1,09
INDIRECTOS (%)				0,00%	0,00
UTILIDAD (%)				0,00%	0,00
COSTO TOTAL DEL RUBRO					1,09
VALOR UNITARIO					1,09

SON: UN DÓLAR, 09/100 CENTAVOS

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

PRESUPUESTO ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Anexo 34: Presupuesto referencial estabilización con cemento

INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
 PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CEMENTO
 UBICACIÓN: LA LIBERTAD - HUACHI GRANDE
 OFERENTE: PRESUPUESTO REFERENCIAL
 ELABORADO: KATHERIN ALTAMIRANO

TABLA DE DESCRIPCIÓN DE RUBROS, UNIDADES, CANTIDADES Y PRECIOS

No.	Rubro / Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio global
1.1.1	Replanteo y nivelación.(Vías)	km.	1,00	772,57	772,57
1.1.2	Desbroce y limpieza del terreno	m2	6.000,00	0,39	2.340,00
25	Estabilizacion con cemento	M3	1.800,00	46,05	82.890,00
1.5.1	Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)	m2	6.000,00	1,09	6.540,00
TOTAL:					92.542,57

SON : NOVENTA Y DOS MIL QUINIENTOS CUARENTA Y DOS DOLARES, 57/100 CENTAVOS

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

Anexo 35. Análisis de Precios Unitarios de la estabilización con cemento

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 1 DE 4

RUBRO : 1.1.1

UNIDAD: km.

DETALLE : Replanteo y nivelación.(Vías)

EQUIPO DESCRIPCIÓN		CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.						35,84
HERRAMIENTAS MANUALES		1,00	0,00	0,00	53,849	0,00
EQUIPO DE TOPOGRAFÍA		1,00	0,00	0,00	53,849	0,00
SUBTOTAL M						35,84
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN		CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
TOPOGRAFO (EN CONSTRUCCIÓN) EO C1		1,00	4,75	4,75	53,849	255,78
CADENERO EO D2		2,00	4,28	8,56	53,849	460,95
SUBTOTAL N						716,73
MATERIALES DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB
ESTACAS DE MADERA			U	20,000	1,00	20,00
SUBTOTAL O						20,00
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN			UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB
SUBTOTAL P						0,00

TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	772,57
INDIRECTOS (%)	0,00%
UTILIDAD (%)	0,00%
COSTO TOTAL DEL RUBRO	772,57
VALOR UNITARIO	772,57

SON: SETECIENTOS SETENTA Y DOS DÓLARES, 57/100 CENTAVOS

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 2 DE 4

RUBRO : 1.1.2

UNIDAD: m2

DETALLE : Desbroce y limpieza del terreno

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,02
HERRAMIENTAS VARIAS	4,00	0,17	0,68	0,031	0,02
SUBTOTAL M					0,04
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
PEÓN EO E2	2,00	4,23	8,46	0,031	0,26
TECNICO OBRAS CIVILES EO C2	1,00	4,52	4,52	0,020	0,09
SUBTOTAL N					0,35
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL O					0,00
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL P					0,00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					0,39
INDIRECTOS (%)				0,00%	0,00
UTILIDAD (%)				0,00%	0,00
COSTO TOTAL DEL RUBRO					0,39
VALOR UNITARIO					0,39

SON: CERO DÓLARES, 39/100 CENTAVOS

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 3 DE 4

RUBRO : 25
DETALLE : Estabilización con cemento

UNIDAD: M3

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,01
CAMIÓN CISTERNA	0,50	30,00	15,00	0,016	0,24
MOTONIVELADORA	1,00	40,00	40,00	0,016	0,64
RODILLO LISO	1,00	40,00	40,00	0,016	0,64
SUBTOTAL M					1,53
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
CHOFER TANQUEROS CH C1	0,50	6,22	3,11	0,016	0,05
OP. MOTONIVELADORA OP C1	1,00	4,75	4,75	0,016	0,08
OP. RODILLO AUTOPROPULSADO OP C2	1,00	4,52	4,52	0,016	0,07
PEON EO E2	1,00	4,23	4,23	0,016	0,07
SUBTOTAL N					0,27
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B		COSTO C=AxB
CEMENTO	M3	1,400	31,32		43,85
AGUA	M3	0,790	0,50		0,40
SUBTOTAL O					44,25
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B		COSTO C=AxB
SUBTOTAL P					0,00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					46,05
INDIRECTOS (%)				0,00%	0,00
UTILIDAD (%)				0,00%	0,00
COSTO TOTAL DEL RUBRO					46,05
VALOR UNITARIO					46,05

SON: CUARENTA Y SEIS DÓLARES, 05/100 CENTAVOS
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 4 DE 4

RUBRO : 1.5.1
DETALLE : Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)

UNIDAD: m2

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,01
RODILLO VIBRATORIO (liso)	1,00	40,00	40,00	0,008	0,32
RODILLO VIBRATORIO PATA DE CAB	1,00	40,00	40,00	0,008	0,32
TANQUERO DE AGUA	1,00	30,00	30,00	0,008	0,24
HERRAMIENTAS VARIAS	1,00	0,17	0,17	0,008	0,00
SUBTOTAL M					0,89
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
PEON EO E2	2,00	4,23	8,46	0,008	0,07
OPERADOR DE MOTONIVELADORA OP C1	1,00	4,75	4,75	0,008	0,04
OPERADOR DE RODILLO AUTOPROPUL OP C2	1,00	4,52	4,52	0,008	0,04
CHOFER TANQUEROS CH C1	1,00	6,22	6,22	0,008	0,05
SUBTOTAL N					0,20
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B		COSTO C=AxB
SUBTOTAL O					0,00
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B		COSTO C=AxB
SUBTOTAL P					0,00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					1,09
INDIRECTOS (%)				0,00%	0,00
UTILIDAD (%)				0,00%	0,00
COSTO TOTAL DEL RUBRO					1,09
VALOR UNITARIO					1,09

SON: UN DÓLAR, 09/100 CENTAVOS
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

PRESUPUESTO ESTABILIZACIÓN CON CENIZA DE TOTORA

Anexo 36: Presupuesto referencial estabilización con ceniza de totora

INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
 PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE ARENOSA CON ADICIÓN DE CAL
 UBICACIÓN: LA LIBERTAD - HUACHI GRANDE
 OFERENTE: PRESUPUESTO REFERENCIAL
 ELABORADO: KATHERIN ALTAMIRANO

TABLA DE DESCRIPCIÓN DE RUBROS, UNIDADES, CANTIDADES Y PRECIOS

<i>No.</i>	<i>Rubro / Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Precio global</i>
1.1.1	Replanteo y nivelación (Vías)	km.	1,00	772,57	772,57
1.1.2	Desbroce y limpieza del terreno	m2	6.000,00	0,39	2.340,00
25	Estabilización con cal	m3	1.800,00	18,66	33.588,00
1.5.1	Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)	m2	6.000,00	1,09	6.540,00
TOTAL:					43.240,57

SON : CUARENTA Y TRES MIL DOSCIENTOS CUARENTA DOLARES, 57/100 CENTAVOS

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

Anexo 37: Análisis de Precios Unitarios de la estabilización con ceniza de totora

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 1 DE 4

RUBRO : 1.1.1

UNIDAD: km.

DETALLE : Replanteo y nivelación.(Vías)

<i>EQUIPO DESCRIPCIÓN</i>	<i>CANTIDAD A</i>	<i>TARIFA B</i>	<i>COSTO HORA C=AxB</i>	<i>RENDIMIENTO R</i>	<i>COSTO D=CxR</i>
Herramienta Menor 5% de M.O.					35,84
HERRAMIENTAS MANUALES	1,00	0,00	0,00	53,849	0,00
EQUIPO DE TOPOGRAFÍA	1,00	0,00	0,00	53,849	0,00
SUBTOTAL M					35,84
<i>MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN</i>	<i>CANTIDAD A</i>	<i>JORNAL/HR B</i>	<i>COSTO HORA C=AxB</i>	<i>RENDIMIENTO R</i>	<i>COSTO D=CxR</i>
TOPÓGRAFO (EN CONSTRUCCIÓN) EO C1	1,00	4,75	4,75	53,849	255,78
CADENERO EO D2	2,00	4,28	8,56	53,849	460,95
SUBTOTAL N					716,73
<i>MATERIALES DESCRIPCIÓN</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>CANTIDAD A</i>	<i>PRECIO UNIT. B</i>	<i>COSTO C=AxB</i>	
ESTACAS DE MADERA	U	20,000	1,00	20,00	
SUBTOTAL O				20,00	
<i>TRANSPORTE DESCRIPCIÓN</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>CANTIDAD A</i>	<i>TARIFA B</i>	<i>COSTO C=AxB</i>	
SUBTOTAL P				0,00	

TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	772,57
INDIRECTOS (%)	0,00%
UTILIDAD (%)	0,00%
COSTO TOTAL DEL RUBRO	772,57
VALOR UNITARIO	772,57

SON: SETECIENTOS SETENTA Y DOS DÓLARES, 57/100 CENTAVOS

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 2 DE 4

RUBRO : 1.1.2

UNIDAD: m2

DETALLE : Desbroce y limpieza del terreno

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,02
HERRAMIENTAS VARIAS	4,00	0,17	0,68	0,031	0,02
SUBTOTAL M					0,04
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
PEÓN EO E2	2,00	4,23	8,46	0,031	0,26
TECNICO OBRAS CIVILES EO C2	1,00	4,52	4,52	0,020	0,09
SUBTOTAL N					0,35
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL O					0,00
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL P					0,00

TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	0,39
INDIRECTOS (%)	0,00%
UTILIDAD (%)	0,00%
COSTO TOTAL DEL RUBRO	0,39
VALOR UNITARIO	0,39

SON: CERO DÓLARES, 39/100 CENTAVOS

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 3 DE 4

RUBRO : 25

UNIDAD: M3

DETALLE : Estabilización con ceniza de totora

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,01
CAMIÓN CISTERNA	0,50	30,00	15,00	0,016	0,24
MOTONIVELADORA	1,00	40,00	40,00	0,016	0,64
RODILLO LISO	1,00	40,00	40,00	0,016	0,64
SUBTOTAL M					1,53
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
CHOFER TANQUEROS CH C1	0,50	6,22	3,11	0,016	0,05
OP. MOTONIVELADORA OP C1	1,00	4,75	4,75	0,016	0,08
OP. RODILLO AUTOPROPULSADO OP C2	1,00	4,52	4,52	0,016	0,07
PEON EO E2	1,00	4,23	4,23	0,016	0,07
SUBTOTAL N					0,27
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB	
CENIZA DE TOTORA	M3	1,400	4,72	6,61	
AGUA	M3	0,790	0,50	0,40	
SUBTOTAL O				7,01	
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL P				0,00	

TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	8,81
INDIRECTOS (%)	0,00%
UTILIDAD (%)	0,00%
COSTO TOTAL DEL RUBRO	8,81
VALOR UNITARIO	8,81

SON: OCHO DÓLARES, 81/100 CENTAVOS

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

HOJA 4 DE 4

RUBRO : 1.5.1

UNIDAD: m2

DETALLE : Subrasante conformación y compactación con equipo pesado (liso)

EQUIPO DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 5% de M.O.					0,01
RODILLO VIBRATORIO (liso)	1,00	40,00	40,00	0,008	0,32
RODILLO VIBRATORIO PATA DE CAB	1,00	40,00	40,00	0,008	0,32
TANQUERO DE AGUA	1,00	30,00	30,00	0,008	0,24
HERRAMIENTAS VARIAS	1,00	0,17	0,17	0,008	0,00
SUBTOTAL M					0,89
MANO DE OBRA DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
PEON EO E2	2,00	4,23	8,46	0,008	0,07
OPERADOR DE MOTONIVELADORA OP C1	1,00	4,75	4,75	0,008	0,04
OPERADOR DE RODILLO AUTOPROPUL OP C2	1,00	4,52	4,52	0,008	0,04
CHOFER TANQUEROS CH C1	1,00	6,22	6,22	0,008	0,05
SUBTOTAL N					0,20
MATERIALES DESCRIPCIÓN	UNIDAD		CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB
SUBTOTAL O					0,00
TRANSPORTE DESCRIPCIÓN	UNIDAD		CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB
SUBTOTAL P					0,00

TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	1,09
INDIRECTOS (%) 0,00%	0,00
UTILIDAD (%) 0,00%	0,00
COSTO TOTAL DEL RUBRO	1,09
VALOR UNITARIO	1,09

SON: UN DÓLAR, 09/100 CENTAVOS
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

FECHA: 22 DE MAYO DE 2026

ANEXO FOTOGRÁFICO

LÍMITES DE ATTERBERG



PROCTOR MODIFICADO



CALIFORNIA BEARING RATIO



CALCINACIÓN DE LA TOTORA

