

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Influencia del sulfonato ISS 2500 con virutas de acero en el mejoramiento de subbases granulares sobre subrasantes arenosas para pavimentación

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Maria Teresa Diaz Olea

ASESOR

Juan Merino Roncero

<https://orcid.org/0000-0002-5753-7664>

Chiclayo, 2026

**Influencia del sulfonato ISS 2500 con virutas de acero en el
mejoramiento de subbases granulares sobre subrasantes arenosas
para pavimentación**

PRESENTADA POR
Maria Teresa Diaz Olea

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Angel Alberto Lorren Palomino
PRESIDENTE

Anibal Teodoro Diaz Orrego
SECRETARIO

Juan Merino Roncero
VOCAL

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen María, por brindarme fortaleza espiritual durante esta etapa universitaria y acompañarme en cada logro.

A los amores de mi vida, mi novio Jorge Adrian y a mi hijo Adriano José, quienes son mi motivación diaria para superarme y seguir creciendo.

A mi mamá Yolanda y a mi papá José, por su amor incondicional, confianza y apoyo constante en mi formación profesional.

A mis hermanos David y Víctor, deseando siempre su felicidad y que cumplan todos sus sueños.

A mi abuela Teresa, presente en mi corazón, y a mi abuelo Eduardo, ejemplo de fortaleza y guía en mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo y a sus directivos, por brindar los espacios, laboratorios y recursos que hicieron posible mi formación profesional.

Al Ing. Juan Merino Roncero, por su valiosa orientación durante la realización de mi investigación.

Al Ing. Roberto Carlos Castillo Velarde, por su acompañamiento y guía como docente, que enriquecieron mi aprendizaje.

Al Ing. César Cachay Lazo, por sus enseñanzas que me guiaron a lo largo de mi trayectoria universitaria y en la culminación de este trabajo.

A todos ellos, mi sincero agradecimiento por su respaldo, motivación y confianza, que hicieron posible este logro.

Influencia del sulfonato ISS 2500 con virutas de acero en el mejoramiento de subbases granulares sobre subrasantes arenosas para pavimentación

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%	14%	4%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to Universidad Politécnica del Perú Trabajo del estudiante	<1%
7	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	<1%
8	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1%
10	ia800109.us.archive.org Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1%

Índice

Resumen	13
Abstract	14
Introducción.....	15
Revisión de literatura.....	18
Materiales y métodos	42
Resultados y discusión	93
Conclusiones	149
Recomendaciones	151
Referencias	152
Anexos	155

Lista de Tablas

Tabla 1: Simbología del SUCS y su proceso de clasificación	27
Tabla 2: Signos convencionales para perfil de calicatas	29
Tabla 3: Clasificación general de suelos según AASHTO.....	30
Tabla 4: Clasificación de suelos según índice de plasticidad.....	32
Tabla 5: Categoría de subrasante según su CBR.....	33
Tabla 6: Requerimientos granulométricos para subbase granular.....	37
Tabla 7: Ensayos para subbase granular.....	38
Tabla 8: Operacionalización de variables	43
Tabla 9: Combinación de las adiciones utilizadas.....	43
Tabla 10: Cantidad de muestras patrón para ensayos del suelo	44
Tabla 11: Cantidad de muestras patrón para ensayos de subbase granular.....	45
Tabla 12: Cantidad de muestras experimentales para ensayos de suelo	45
Tabla 13: Cantidad de muestras experimentales para ensayos de subbase granular.....	46
Tabla 14: Cantidad de muestras de suelo para ensayo de permeabilidad	46
Tabla 15: Cantidad de muestras de subbase para ensayo de permeabilidad	47
Tabla 16: Factor “k” según MTC E - 110	61
Tabla 17: Porcentaje de contenido de humedad para calicatas C-01, C-02 y C-03	94
Tabla 18: Granulometría por tamizado para calicata C-01	94
Tabla 19: Granulometría por tamizado para calicata C-02	95
Tabla 20: Granulometría por tamizado para calicata C-03	96
Tabla 21: Límite líquido, plástico e índice de plasticidad para calicatas C-01, C-02 y C-03 .	98
Tabla 22: Gravedad específica para calicatas C-01, C-02 y C-03.....	98
Tabla 23: Clasificación SUCS y AASHTO para calicatas C-01, C-02 y C-03.....	99
Tabla 24: Resultados de ensayos químicos para calicatas C-01, C-02 y C-03	100
Tabla 25: Porcentaje de contenido de humedad para afirmado.....	101
Tabla 26: Granulometría por tamizado para afirmado	102

Tabla 27: Límites de Atterberg para afirmado	103
Tabla 28: Peso específico y porcentaje de absorción del afirmado.....	104
Tabla 29: Clasificación SUCS y AASHTO para afirmado	104
Tabla 30: Resultados de ensayos químicos para afirmado.....	105
Tabla 31: Porcentaje de caras fracturadas para afirmado.....	105
Tabla 32: Porcentaje de partículas chatas y alargadas para afirmado	106
Tabla 33: Resultados de equivalente de arena para afirmado	107
Tabla 34: Resultado de desgaste por abrasión para afirmado	108
Tabla 35: Proctor modificado para muestra patrón del suelo - Calicata N°03.....	109
Tabla 36: CBR para muestra patrón del suelo - Calicata N°03.....	110
Tabla 37: Proctor modificado para muestra patrón del afirmado.....	111
Tabla 38: CBR para muestra patrón de afirmado.....	112
Tabla 39: Límites de Atterberg para muestras de suelo con 5% y 10% de ISS2500	115
Tabla 40: Proctor modificado para 1er grupo experimental - Calicata N°03.....	116
Tabla 41: CBR para 1er grupo experimental - Calicata N°03.....	117
Tabla 42: Proctor modificado para 2do grupo experimental - Calicata N°03.....	119
Tabla 43: CBR para 2do grupo experimental - Calicata N°03.....	120
Tabla 44: Proctor modificado para 3er grupo experimental - Calicata N°03.....	122
Tabla 45: CBR para 3er grupo experimental - Calicata N°03.....	123
Tabla 46: Proctor modificado para 4to grupo experimental - Calicata N°03.....	125
Tabla 47: CBR para 4to grupo experimental - Calicata N°03.....	126
Tabla 48: Límites de Atterberg para muestras de afirmado con 5% y 10% de ISS2500	128
Tabla 49: Proctor modificado para 1er grupo experimental - Afirmado.....	130
Tabla 50: CBR para 1er grupo experimental - Afirmado.....	131
Tabla 51: Proctor modificado para 2do grupo experimental - Afirmado.....	133
Tabla 52: CBR para 2do grupo experimental - Afirmado.....	134
Tabla 53: Proctor modificado para 3er grupo experimental - Afirmado.....	136

Tabla 54: CBR para 3er grupo experimental - Afirmado.....	137
Tabla 55: Proctor modificado para 4to grupo experimental - Afirmado.....	139
Tabla 56: CBR para 4to grupo experimental - Afirmado.....	140
Tabla 57: Comparación porcentual del CBR para los distintos diseños de la subrasante.....	142
Tabla 58: Incremento porcentual del CBR para el diseño óptimo de la subrasante.....	142
Tabla 59: Comparación porcentual del CBR para los distintos diseños de la subbase.....	143
Tabla 60: Incremento porcentual del CBR para el diseño óptimo de la subbase.....	143
Tabla 61: Ensayo de permeabilidad para muestra patrón y diseño óptimo – subrasante.....	144
Tabla 62: Ensayo de permeabilidad para muestra patrón y diseño óptimo – subbase granular	144
Tabla 63: Análisis de costos por m2 para subrasante – muestra patrón (sin adición).....	145
Tabla 64: Análisis de costos por m2 para subrasante – Diseño óptimo (10%ISS2500 + 10%VA)	145
Tabla 65: Análisis de costos por m2 para subbase granular – muestra patrón (sin adición).	146
Tabla 66: Análisis de costos por m2 para subbase granular – Diseño óptimo (10%ISS2500 + 10%VA)	146

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1: Límites de Atterberg.....	31
Ilustración 2: Ubicación de la zona de la extracción de las muestras	51
Ilustración 4: Zona de extracción – Calicata N°02.....	52
Ilustración 3: Zona de extracción – Calicata N°01.....	52
Ilustración 5: Zona de extracción – Calicata N°03.....	52
Ilustración 6: Entrega del material a domicilio	53
Ilustración 7: Afirmado para subbase granular	53
Ilustración 9: Viruta de acero calcinada	55
Ilustración 8: Trituración de viruta de acero calcinada	55
Ilustración 10: Colocación de la muestra al horno	56
Ilustración 11: Retiro de las muestras del horno	57
Ilustración 12: Lavado de finos previo al secado de la muestra.....	59
Ilustración 13: Tamizado de la muestra de suelo	59
Ilustración 14: Granulometría Grueso - Afirmado	59
Ilustración 15: Granulometría Fino - Afirmado	60
Ilustración 16: Retiro del horno de la muestra representativa	62
Ilustración 17: Uso del acanalador para formación de ranura	62
Ilustración 18: Registro de número de golpes necesarios	62
Ilustración 19: Proceso de tamizado para determinación del LP	64
Ilustración 20: Amasado con espátula para consistencia requerida	65
Ilustración 21: Formación de cilindros.....	65
Ilustración 22: Secado de muestra al horno.....	67
Ilustración 23: Llenado del matraz con agua destilada	67
Ilustración 24: Eliminación de burbujas de aire manualmente	67
Ilustración 25: Ingreso de la muestra de afirmado al horno	69
Ilustración 26: Proceso de saturación de la muestra.....	70

Ilustración 27: Evaluación de partículas con caras fracturadas.....	71
Ilustración 28: Clasificación de partículas chatas y alargadas	74
Ilustración 29: Llenado con agua desionizada.....	76
Ilustración 30: Muestra de afirmado en cilindro	76
Ilustración 31: Colocación de la muestra dentro del tambor rotatorio	78
Ilustración 32: Esferas de Acero.....	78
Ilustración 33: Retiro de material	79
Ilustración 34: Preparación del extracto acuoso	82
Ilustración 35: Retiro de las muestras del horno	82
Ilustración 36: Combinación de las cuatro adiciones indicadas	84
Ilustración 37: Introducción del suelo natural al molde	85
Ilustración 38: Compactación de las muestras	85
Ilustración 39: CBR del suelo experimental.....	87
Ilustración 40: Curva para el cálculo del Índice de CBR	88
Ilustración 41: Ensayo CBR al suelo natural.....	89
Ilustración 42: CBR - Penetración.....	89
Ilustración 43: Introducción del suelo natural al molde	91
Ilustración 44: Ensayo Límites de Atterberg.....	92
Ilustración 45: Límite plástico.....	92
Ilustración 46: Curva granulométrica para Calicata C – 01	95
Ilustración 47: Curva granulométrica para Calicata C – 02	96
Ilustración 48: Curva granulométrica para Calicata C – 03	97
Ilustración 49: Curva granulométrica para Afirmado	102
Ilustración 50: Proctor modificado promedio para muestra patrón de suelo - Calicata N°03	109
Ilustración 51: Índice de CBR 01 para muestra patrón de suelo	110
Ilustración 52: Índice de CBR 02 para muestra patrón de suelo	111
Ilustración 53: Índice de CBR 03 para muestra patrón de suelo	111

Ilustración 54: Proctor modificado promedio para muestra patrón de afirmado.....	112
Ilustración 55: Índice de CBR 01 para muestra de afirmado	113
Ilustración 56: Índice de CBR 02 para muestra de afirmado	114
Ilustración 57: Índice de CBR 03 para muestra de afirmado	114
Ilustración 58: Límite de Atterberg para muestra de suelo con 5% de ISS2500.....	115
Ilustración 59: Límite de Atterberg para muestra de suelo con 10% de ISS2500.....	115
Ilustración 60: Proctor modificado promedio para 1er grupo experimental - Calicata N°03	116
Ilustración 61: Índice de CBR 01 para 1er grupo experimental de suelo.....	118
Ilustración 62: Índice de CBR 02 para 1er grupo experimental de suelo.....	118
Ilustración 63: Índice de CBR 03 para 1er grupo experimental de suelo.....	119
Ilustración 64: Proctor modificado promedio para 2do grupo experimental - Calicata N°03	120
Ilustración 65: Índice de CBR 04 para 2do grupo experimental de suelo.....	121
Ilustración 66: Índice de CBR 05 para 2do grupo experimental de suelo.....	121
Ilustración 67: Índice de CBR 06 para 2do grupo experimental de suelo.....	122
Ilustración 68: Proctor modificado promedio para 3er grupo experimental - Calicata N°03	123
Ilustración 69: Índice de CBR 07 para 3er grupo experimental de suelo.....	124
Ilustración 70: Índice de CBR 08 para 3er grupo experimental de suelo.....	124
Ilustración 71: Índice de CBR 09 para 3er grupo experimental de suelo.....	125
Ilustración 72: Proctor modificado promedio para 4to grupo experimental - Calicata N°03	126
Ilustración 73: Índice de CBR 10 para 4to grupo experimental de suelo.....	127
Ilustración 74: Índice de CBR 13 para 4to grupo experimental de suelo.....	128
Ilustración 75: Índice de CBR 15 para 4to grupo experimental de suelo.....	128
Ilustración 76: Límite de Atterberg para muestra de afirmado con 5% de ISS2500.....	129
Ilustración 77: Límite de Atterberg para muestra de afirmado con 10% de ISS2500.....	129
Ilustración 78: Proctor modificado promedio para 1er grupo experimental - Afirmado.....	130

Ilustración 79: Índice de CBR 01 para 1er grupo experimental de afirmado.....	132
Ilustración 80: Índice de CBR 02 para 1er grupo experimental de afirmado.....	132
Ilustración 81: Índice de CBR 03 para 1er grupo experimental de afirmado.....	132
Ilustración 82: Proctor modificado promedio para 2do grupo experimental - Afirmado.....	133
Ilustración 83: Índice de CBR 07 para 2do grupo experimental de afirmado.....	135
Ilustración 84: Índice de CBR 08 para 2do grupo experimental de afirmado.....	135
Ilustración 85: Índice de CBR 09 para 2do grupo experimental de afirmado.....	135
Ilustración 86: Proctor modificado promedio para 3er grupo experimental - Afirmado.....	136
Ilustración 87: Índice de CBR 10 para 3er grupo experimental de afirmado.....	138
Ilustración 88: Índice de CBR 11 para 3er grupo experimental de afirmado.....	138
Ilustración 89: Índice de CBR 12 para 3er grupo experimental de afirmado.....	138
Ilustración 90: Proctor modificado promedio para 4to grupo experimental - Afirmado	139
Ilustración 91: Índice de CBR 13 para 4to grupo experimental de afirmado.....	141
Ilustración 92: Índice de CBR 14 para 4to grupo experimental de afirmado.....	141
Ilustración 93: Índice de CBR 15 para 4to grupo experimental de afirmado.....	141

Resumen

En los últimos años, el sector de la construcción viene experimentando avances en el desarrollo de técnicas destinadas a mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos en las infraestructuras viales. Estas técnicas van desde la sustitución de materiales granulares hasta la adición de estabilizadores iónicos con la finalidad de mejorar la capacidad portante del suelo, reducir asentamientos e incrementar su estabilidad. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal evaluar la estabilización de subbases granulares y suelos arenosos mediante el uso combinado de sulfonado ISS2500 con viruta de acero. Para ello, se elaboró un estudio de tipo experimental a un conjunto de ensayos realizados a un total de 152 muestras, de las cuales 24 fueron destinadas para el ensayo de Proctor modificado, 120 para ensayo CBR, 4 para el ensayo de límites de Atterberg y 4 para el ensayo de permeabilidad. Los resultados para el ensayo CBR muestra un incremento favorable para todos los diseños; sin embargo, el cuarto diseño (10% de ISS + 10% de viruta de acero) fue quien mejor destacó presentando resultados al 100% de la MDS del 39.20% frente a un 29.30% del diseño patrón para el análisis de la subrasante, mientras que para el afirmado presentó un incremento del 64.53% frente al diseño patrón que obtuvo un 22.33%. Asimismo, se observó una reducción de la permeabilidad, lo que confirma que el incorporar ISS2500 y viruta de acero, incrementa valores del CBR además de lograr una mejor compactación con un menor porcentaje del contenido de humedad.

Palabras clave: Estabilización, Suelos arenosos, Subrasante, Sulfonado ISS 2500, Viruta de acero, Proctor modificado, CBR.

Abstract

In recent years, the construction sector has seen advances in the development of techniques aimed at improving the physical and mechanical properties of soils in road infrastructure. These techniques range from the replacement of granular materials to the addition of ionic stabilizers in order to improve the bearing capacity of the soil, reduce settlement, and increase its stability. In this context, the present research has as its main objective to evaluate the stabilization of granular subbases and sandy soils through the combined use of ISS2500 sulfonate and steel chips. To this end, an experimental study was carried out on a set of tests performed on a total of 152 samples, of which 24 were used for the modified Proctor test, 120 for the CBR test, 4 for the Atterberg limits test, and 4 for the permeability test. The results for the CBR test show a favorable increase for all designs; however, the fourth design (10% ISS + 10% steel chips) stood out the most, with results at 100% of the MDS of 39.20% compared to 29.30% for the standard design for subgrade analysis, while for the pavement, it showed an increase of 64.53% compared to the standard design, which obtained 22.33%. Likewise, a reduction in permeability was observed, confirming that incorporating ISS2500 and steel chips increases CBR values and achieves better compaction with a lower moisture content percentage.

Keywords: Stabilization, Clay soils, Subgrade, Sulfonated ISS 2500, Steel shavings, Modified Proctor, CBR.

Introducción

En el área de la ingeniería civil, el suelo desempeña un papel fundamental, sobre todo en la estabilización de taludes, la construcción de terraplenes y la pavimentación de carreteras. El análisis de sus propiedades mecánicas y físicas debe alinearse a las necesidades y exigencias de cada proyecto. Sin embargo, no siempre se dispone de suelos que brinden la estabilidad requerida para explanadas u otras infraestructuras, lo que obliga al uso de materiales marginales, tolerables o inadecuados debido a las crecientes demandas medioambientales y sociales, que buscan reducir el uso excesivo de materiales de préstamos y la disposición de suelos en vertederos [4]. Es así como tradicionalmente, se recurre al reemplazo del suelo o la implementación de cimentaciones profundas, métodos que, aunque son efectivos, resultan costosos, lo que ha impulsado el desarrollo de alternativas más económicas para la mejora de estos suelos [5].

En los últimos años, se vienen desarrollado diversas técnicas orientadas a la optimización de las características físicas y mecánicas de los suelos con propósito de desarrollar pavimentos; destacando entre ellas el uso de geomallas, la adición de cal o cemento y la sustitución de materiales granulares, los cuales han demostrado ser eficaces para incrementar la estabilidad del suelo, su capacidad portante y la disminución de asentamientos [6]. Paralelamente, el uso de fibras como refuerzo ha ganado interés en las últimas décadas. Estudios recientes evidencian que la incorporación de fibras de acero en la matriz del suelo produce una mejora significativa en su resistencia al corte [6]. Por otro lado, se vienen desarrollado investigaciones orientadas al uso de fibras naturales orgánicas como una alternativa ecológica y de bajo costo para el reforzamiento de suelos. En el ámbito nacional, la viruta de acero procedente de residuos de la construcción se presenta como una alternativa innovadora y prometedora [5]. Este enfoque además de ser económico y ambientalmente sostenible también es fácil de aplicar utilizando equipos convencionales. Sin embargo, los estudios sobre esta técnica son aún limitados, evidenciando la necesidad de continuar con su investigación [5].

Ahora bien, se sabe que el suelo es la base fundamental en una estructura vial; por ello, cuando presenta inestabilidad, baja resistencia o un uso inadecuado frente a la carga de diseño; tiende a ceder, lo que genera el hundimiento del pavimento flexible y, con ello, la formación de baches y pérdida del material. Frente a esta problemática, el sulfonato ISS2500 se plantea como un estabilizante químico eficiente capaz de mejorar la resistencia de suelos con baja capacidad portante, y a su vez evitar reemplazos o incrementos en los costos de los proyectos viales [1]. En este contexto, el presente estudio busca evaluar la efectividad del ISS2500 combinado con

virutas de acero, en la mejora de las características geotécnicas de suelos arenosos utilizados en subrasante y subbase [1].

El ISS2500 destaca como un estabilizador iónico que facilita la unión de partículas del suelo, generando una mayor compactación, mejor capacidad de carga y prevención de problemas comunes como el barro y los baches. Este estabilizador actúa disociando moléculas de agua y activando iones metálicos presentes en el suelo, lo que permite aprovechar los materiales in situ que, normalmente, serían descartados. De esta manera, se reduce el uso de materiales granulares y se obtiene ahorros significativos en los procesos de construcción y mantenimiento de vías [7]. Por otro lado, este producto no es tóxico, es ambientalmente seguro, es de fácil aplicación y sobre todo es económico, ya que no necesita de equipos especializados para su uso o dilución, utilizando incluso agua salada o desalinizada [7].

La solución frente a la problemática abordada en esta tesis se fundamenta en evaluar la efectividad de la adición del ISS2500 combinado con viruta de acero en subbases granulares y suelos arenosos. Esto se plantea con el principal motivo de que la interacción de estos materiales con las partículas del suelo permite modificar su estructura a nivel iónico y en consecuencia mejoran su capacidad portante y durabilidad. Ante ello, el planteamiento del problema de esta tesis es ¿De qué manera la adición combinada de sulfonatado ISS 2500 con viruta de acero influirán en la mejora de estabilización de subbases granulares sobre suelos arenosos para fines de pavimentación? En atención a dicha pregunta se formula la hipótesis siguiente: la adición combinada de sulfonatado ISS 2500 con viruta de acero influye de manera positiva en la mejora de estabilización de subbases granulares y suelos arenosos para fines de pavimentación.

Esta investigación se fundamenta en diversos aspectos que se describen a continuación:

En el aspecto técnico, el buen desempeño de un pavimento depende directamente de las propiedades que posee la subrasante y la subbase granular; es así como los suelos con baja capacidad portante son más susceptibles a fallas como hundimientos y con ello la formación de baches y la pérdida de material. Frente a ello, el ISS2500 actúa como estabilizador iónico capaz de modificar la interacción entre partículas del suelo y, al complementarse con la viruta de acero, que funciona como refuerzo mecánico, se logra optimizar la estabilidad y alargar la duración de los pavimentos.

Ahora bien, en el aspecto económico, la ejecución y el mantenimiento de estructuras viales suele demandar una inversión considerable que se debe a la necesidad de reemplazar suelos con baja capacidad portante y a su vez la adquisición de materiales granulares de préstamo. Es así como el uso del ISS2500 en conjunto con la viruta de acero representan una alternativa rentable

ya que permite estabilizar suelos in situ y reducir los costos asociados al acarreo y disposición de materiales convirtiéndose en un método eficiente y económicamente viable.

Finalmente, en el aspecto ambiental, la estabilización de suelos mediante el uso del ISS2500 y la viruta de acero, permite que se reduzca la extracción de agregados naturales y, por ende, la degradación de canteras y ecosistemas al ya no necesitar de grandes volúmenes de material granular de préstamo. Es así como el uso de estos materiales favorece a una construcción vial más limpia, con menores emisiones de CO₂ y con una reducción de la huella ambiental en los proyectos de pavimentación.

Para concluir, se plantearon objetivos necesarios que ayuden con el desarrollo de esta investigación, planteando el objetivo general el evaluar la estabilización de subbases granulares y suelos arenosos para fines de pavimentación mediante el uso combinado de sulfonato ISS 2500 con virutas de acero. Para el desarrollo exitoso de este objetivo, fue necesarios implementar un número determinado de objetivos específicos los cuales se detallan a continuación:

- ✓ Evaluar las características físicas básicas para muestras de suelo natural y afirmado en calles no pavimentadas del Sector Alto Perú del distrito de Pimentel.
- ✓ Cuantificar la concentración de sales, cloruros y sulfatos presentes en el suelo natural y en la subbase granular.
- ✓ Determinar la máxima densidad seca, óptimo contenido de humedad y CBR para las muestras convencionales y experimentales.
- ✓ Determinar la dosis óptima experimental bajo adición combinada de los estabilizadores y precisar su influencia en la subrasante, así como la subbase granular.
- ✓ Hallar la permeabilidad convencional y experimental según dosis óptima para subrasante y subbase granular.
- ✓ Hallar el costo por m² de la dosis óptima para estabilización de subrasante y subbase granular experimental, respecto lo convencional.

Revisión de literatura

- *Antecedentes*

Antecedentes internacionales

M. A. Ospina, S. B. Chaves y L.M. Jiménez [8], nos hablan sobre la inestabilidad y la baja capacidad de carga de los suelos arcillosos, que han representado un desafío continuo en la ingeniería civil, especialmente en pavimentaciones y diversos proyectos viales. Estos suelos, caracterizados por su alta plasticidad, presentan serias dificultades en su comportamiento mecánico, lo que puede ocasionar fallas en las estructuras construidas sobre ellos. En este sentido, la investigación se centró en analizar la evolución de mezclas de suelo arcilloso con la aplicación de escoria de acero, un subproducto de la industria metalúrgica. Para ello, se empleó una metodología experimental utilizando muestras de arcilla caolinita, típica de las subrasantes de la sabana de Bogotá, a las que se les incorporó escoria de acero en concentraciones del 25%, 50% y 75%. Se llevaron a cabo ensayos en laboratorio para medir parámetros como el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y el California Bearing Ratio (CBR). Los datos obtenidos evidenciaron que la incorporación de escoria de acero incrementó de manera importante el valor del CBR, de 7.97% a 30.20% en la mayor dosificación. Asimismo, la humedad del suelo se redujo de 20.20% a 10.80% y el índice de plasticidad disminuyó de 15.50% a 0%. Sin embargo, la resistencia al corte también se redujo a la mitad, disminuyendo de 0.20 MPa a 0.10 MPa. Estos resultados demostraron que el porcentaje óptimo de escoria es 25%, ya que mejora la capacidad de carga sin afectar negativamente otras propiedades. Se concluyó que la escoria de acero es una opción eficaz y sostenible para estabilizar suelos arcillosos en obras viales.

L. N. Cardona y J. S. Sánchez [9], afirman la exploración de opciones sostenibles en el sector de la construcción a raíz de las afectaciones climáticas, vienen fomentando el desarrollo de alternativas ecológicas para la estabilización de suelos en proyectos civiles. En este contexto, su investigación propone la incorporación de viruta de acero, un material reciclado, en mezclas de suelo-cemento con el objetivo de evaluar sus propiedades mecánicas y su viabilidad en aplicaciones de construcción. El método usado contempló la preparación de diversas mezclas de suelo-cemento-viruta de acero, utilizando diferentes proporciones de agua para conocer el contenido óptimo de humedad. Se llevaron a cabo ensayos de compresión en nueve briquetas por combinación, variando los porcentajes de cemento (4%, 6% y 8%) y de viruta de acero (0%, 2.5%, 5%, 7.5% y 10% en relación con el peso de este último). Los resultados evidenciaron que

las mezclas con 7.5% y 10% de viruta de acero lograron una resistencia de 2.1 MPa, cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma (artículo 350-13 de Invias). Además, se observó una mejora significativa en las características mecánicas de los compuestos, como mayor resistencia y durabilidad, corroborada mediante límites de Atterberg, ensayos de granulometría y contenido de humedad. En conclusión, la inclusión de viruta de acero en mezclas de suelo- cemento optimiza las características mecánicas del material y, además significa una opción sostenible al emplear un recurso reciclado.

J. E. Páez y L. F. Díaz [10], afirman que la estabilización de suelos con aditivos químicos surge como respuesta a la problemática de materiales granulares arcillosos con propiedades mecánicas desfavorables, tales como expansividad, cambios volumétricos y bajo soporte estructural. Este desafío afecta especialmente en los proyectos viales, como se evidencia en zonas de Bogotá, Colombia, donde minerales arcillosos presentes en materiales de cantera han limitado su uso en construcción. Por consiguiente, esta tesis tomó como propósito conocer cómo la adición de aceite sulfonato afecta las propiedades dinámicas (módulo de rigidez al corte y amortiguación) de un compuesto granular arcilloso, evaluado a través de ensayos dinámicos a bajas deformaciones. La metodología consistió en la elaboración de 19 especímenes, adicionando aceite sulfonato al agua de mezcla en proporción al 2%. Los especímenes fueron compactados por método estático y ensayados bajo presiones de confinamiento de 0 a 400 kPa con curados de 0 a 90 días. Los resultados mostraron un aumento del 60% en el módulo de rigidez tras 0 días de curado, con mejoras continuas hasta los 30 días. A partir de los 60 días, se observó una degradación progresiva, correlacionada con micro fisuras identificadas mediante microscopía electrónica. Se concluyó que el aceite sulfonato mejora significativamente las propiedades dinámicas a corto plazo y ofrece una solución viable para estabilizar materiales arcillosos en proyectos de infraestructura vial, promoviendo un uso más eficiente de recursos naturales.

Antecedentes nacionales

E. J. Castañeda Niño [11], aborda la problemática de la inestabilidad obtenida en la subrasante de Puente Piedra, Lima, donde los suelos débiles afectan la durabilidad y seguridad de las infraestructuras viales. El estudio tuvo como objetivo principal evaluar la efectividad de los estabilizantes Poliacrilamida Aniónica-Polycom y Sulfonatado-ISS2500 en mejorar las propiedades geotécnicas del suelo de subrasante, aumentando su capacidad de carga y resistencia. La metodología empleada fue de tipo cuantitativo, descriptivo y cuasi experimental, y se realizaron ensayos en laboratorio utilizando tres dosis de estabilizantes: 2%, 4% y 6%. Se

midieron parámetros como el Índice de Plasticidad (IP), la Masa Dry de Suelo (MDS) y el California Bearing Ratio (CBR) a fin de estudiar la mejora del suelo. Los resultados demostraron que las dosis de estabilizantes incrementaron significativamente el CBR hasta un 45.29%, lo que demuestra la optimización de la capacidad portante del suelo. Asimismo, el Índice de Plasticidad alcanzó un 15.70% y la MDS se incrementó a 1.462 g/cm³, lo que refleja una mayor compactación y resistencia del suelo tratado. La dosis más efectiva fue la de 6%, mostrando la mejora óptima en las propiedades geotécnicas. En consecuencia, la utilización de estos estabilizantes resulta ser altamente efectivo para estabilizar subrasantes en zonas con suelos débiles, recomendándose especialmente la dosis del 6% para proyectos viales similares.

Y. L. Pacheco Moya [12], afirma en su investigación que la problemática de los suelos cohesivos con baja capacidad portante y alta plasticidad es una de las principales causas de fallas estructurales en subrasantes viales. Estos suelos presentan limitaciones significativas que dificultan la transitabilidad y aumentan los costos de mantenimiento de las vías. Ante esta situación, surge la necesidad de explorar alternativas que mejoren las características físico-mecánicas de dichos suelos y, al mismo tiempo, sean sostenibles. Por ello esta tesis planteó como propósito evaluar la resultante del compuesto sulfonado combinado con cemento en la mejora de las características físico-mecánicas de los suelos cohesivos utilizados en subrasantes. Este estudio buscó determinar las proporciones óptimas de estos materiales para maximizar su efectividad. El método usado fue de tipo experimental, utilizando un diseño con mezclas de suelo tratadas con cemento Portland tipo I (en proporciones de 3%, 5% y 7%) y aceite sulfonado (3%, 5% y 7%). Se llevaron a cabo ensayos en laboratorio que incluyeron Proctor modificado, límites de Atterberg y pruebas de CBR para evaluar el desempeño de las mezclas. Los datos determinaron que la cantidad inmejorable fue del 7% de cemento y 7% de aceite sulfonado, logrando un incremento en el CBR del suelo natural de 5.80% a 48.30% con 7% de adición combinada. Por otro lado, se determinó la disminución significativa en la plasticidad del suelo tratado y una mejora en su resistencia estructural. En conclusión, esta combinación representa una solución eficiente para estabilizar suelos cohesivos en subrasantes, mejorando significativamente sus propiedades mecánicas y contribuyendo al desarrollo de infraestructuras más duraderas y sostenibles.

S. T. Guizado y M. D. Hurtado [13], comentan en su investigación realizada en la localidad de Azapampa, ubicada en el distrito de Chilca, Huancayo, presenta un problema recurrente en la transitabilidad de sus vías debido a la baja capacidad portante de los suelos arcillosos cohesivos que conforman la subrasante. Estos suelos, con valores de CBR inferiores al 6%,

generan dificultades en épocas de lluvias, como formación de lodo, charcos y huellas profundas, afectando tanto a peatones como a vehículos. Para abordar esta problemática, se planteó el objetivo de evidenciar de qué manera la incorporación de fragmentos de metal reciclado contribuye a la estabilización de la subrasante. Este enfoque busca además ofrecer una solución sostenible mediante el reciclaje de chapas metálicas. La metodología empleada fue de tipo experimental, utilizando una calicata de 1.5 metros de profundidad para obtener muestras de suelo. Se realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y CBR, comparando suelos naturales y estabilizados con fragmentos de metal reciclado (FMR) en proporciones de 4%, 6% y 8%. Los datos obtenidos indicaron que la dosificación óptima fue del 8%. Esta mezcla incrementó el CBR al 95% de la densidad seca máxima de 3.1% a 5.0%, y al 100% de la densidad seca máxima de 4.3% a 9.7%. Asimismo, se observó una ligera disminución en la densidad seca máxima, pasando de 1.93 gr/cm³ a 1.89 gr/cm³ y un aumento en el contenido óptimo de humedad pasando de ser de un 12% a un 14.5% aproximadamente. En conclusión, la adición de FMR mejora significativamente la capacidad portante de suelos cohesivos, ofreciendo una alternativa técnica, económica y ambientalmente sostenible para estabilizar subrasantes en vías no pavimentadas.

Antecedentes locales

A. G. Gálvez [14], nos muestra en su proyecto, la problemática de los suelos arcillosos, caracterizados por su poca capacidad de soporte y alta expansividad, el cual representa un desafío crítico en la construcción de infraestructuras viales. Estas características desfavorables generan deformaciones y daños estructurales en pavimentos, incrementando los costos de mantenimiento y reparación. Ante esta situación, este estudio abordó la estabilización de suelos arcillosos a través de la adición de virutas de acero, un material reciclado con potencial para mejorar las propiedades físico-mecánicas de las subrasantes. El objetivo general del estudio fue determinar de qué manera la aplicación de virutas de acero modifica las características mecánicas de los suelos arcillosos de la zona "Antonio Raymondi del Acqua," ubicada en Chiclayo. Para ello, se empleó una metodología experimental que incluyó la caracterización inicial del suelo, la preparación de mezclas con diferentes porcentajes de virutas de acero (1%, 2%, 4%, 8% y 15%) y la realización de ensayos mecánicos como Proctor modificado y el índice CBR. La resultante indicó que el porcentaje óptimo de adición fue del 15%, alcanzando un incremento significativo del CBR a 5.5%, cumpliendo así con los requisitos mínimos establecidos para su uso en subrasantes. Además, se observó una mejora en la densidad seca máxima y una reducción en el contenido óptimo de humedad, demostrando la efectividad del

estabilizante. En conclusión, la utilización de virutas de acero contribuye al mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos problemáticos y además resulta ser una solución sostenible al aprovechar materiales reciclados.

D. E Sinarahua Alarcón [15], aborda la problemática relacionada con las deficiencias de la infraestructura vial en este sector. Las características de la subrasante arcillosa, como su baja capacidad de soporte y alta expansividad, generan hundimientos, desniveles y limitan la transitabilidad, lo que afecta tanto la disponibilidad a prestaciones indispensables como el incremento monetario y social de la comunidad. El fin principal planteado en el proyecto consistió en determinar el resultado de los aditivos Perma Zyme 30X y ConAid sobre las propiedades físico-mecánicas de la subrasante, evaluando su capacidad en el mejoramiento de la resistencia del suelo y su viabilidad económica como una solución técnica adecuada para el contexto local. La investigación utilizó un diseño experimental con muestreo no probabilístico. Se prepararon muestras de suelo sin estabilizar y con estabilizantes, empleando cuatro dosificaciones diferentes: Perma Zyme 30X (0.9L, 1L, 1.1L y 1.2L) y ConAid (2.5cm³, 3cm³, 3.5cm³ y 4cm³). Los ensayos incluyeron granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, índice de expansión, CBR y resistencia a la compresión simple no confinada. Los resultados indicaron que Perma Zyme 30X redujo la plasticidad en un 13% y aumentó la densidad seca máxima en un 6%, mientras que ConAid logró reducir la plasticidad en un 20% e incrementar la densidad seca en un 7%. Además, ambos aditivos incrementaron el CBR entre un 300% y un 400%. En conclusión, su aplicación mejoró significativamente las propiedades del suelo arcilloso, siendo alternativas viables para estabilizar subrasantes en vías no pavimentadas y contribuyendo al desarrollo urbano sostenible.

P. I. Flores León (2019) [16], aborda la problemática contextualizada en el aparcamiento de la Clínica USAT y su composición como suelo arcilloso. Su investigación se centra en su baja capacidad portante y elevada plasticidad; características que afectan la estabilidad estructural y limitan su uso en infraestructura vial. Además, el manejo inadecuado de residuos plásticos, especialmente plástico PET, agrava el impacto ambiental en la región. Ante esta situación, se planteó una solución sostenible mediante la reutilización de plástico PET reciclado como estabilizador de suelos. Se estableció como propósito evaluar el resultado del plástico PET reciclado aplicado a las características físico-mecánicas de los suelos arcillosos en el ámbito estudiado, buscando mejorar su capacidad portante para su uso como subrasantes. La investigación utilizó un diseño experimental donde se analizaron mezclas de suelo con diferentes porcentajes de PET (1%, 1.15%, 1.25%, 1.5% y 2.5%) y longitudes de fibras (1",

1.5", 2.5", y 4"). Se realizaron ensayos de compactación Proctor modificado y pruebas de CBR (California Bearing Ratio) para determinar las propiedades óptimas de las mezclas. Se evidenció en los resultados una dosificación óptima de 1.15% de plástico PET con fibras de 1" de longitud. Esta combinación mejoró la máxima densidad seca en un 9.6% y mejoró el CBR en un 4.21% al compactar al 100% de la densidad máxima. Además, la mezcla redujo significativamente la expansión del suelo, obteniendo una estabilidad mejorada. En conclusión, la adición de plástico PET reciclado por una parte optimiza las características físico-mecánicas del suelo y además representa una opción amigable con el medio ambiente.

- ***Bases Legales***

- ***Manual de carreteras: Sección suelos y pavimentos MTC/14***

Dicho documento consta de dos tomos que abordan aspectos fundamentales para la ejecución de infraestructuras viales, incluyendo trabajos preliminares, pavimentos flexibles y rígidos, sistemas de drenaje y obras complementarias. El propósito consiste en asegurar la seguridad, calidad y durabilidad de las vías, promoviendo un desarrollo vial sostenible. Además, proporciona directrices técnicas clave en el diseño, construcción, mantenimiento y evaluación de suelos y pavimentos, constituyéndose como una referencia normativa para las entidades responsables del sector vial [17].

- ***Manual de ensayos de materiales – 2016***

Este documento ofrece procedimientos detallados para la realización de ensayos en suelos, agregados, asfalto y concreto, materiales esenciales para los proyectos viales. Establece tanto los procedimientos de prueba como los parámetros de calidad requeridos, permitiendo uniformizar los procesos y asegurar la resistencia, estabilidad y durabilidad de las obras. Su correcta aplicación garantiza que los materiales empleados se acojan a las normas técnicas respectivas y así lograr un buen desempeño [18].

- ***Ensayo de análisis granulométrico mediante tamizado, MTC E 107***

Permite conocer la distribución de tamaños de las partículas que componen el suelo, cuantificando los porcentajes que pasan por cada tamiz, incluso por el N°200. Esta información es esencial para evaluar la capacidad portante del suelo, su comportamiento ante la compactación y otras propiedades relevantes en el diseño y ejecución de obras civiles [18].

Límites de Atterberg, Norma ASTM D4318

La granulometría ayuda a clasificar el tamaño de las partículas del suelo, pero para comprender mejor su comportamiento ante la humedad, se emplean los límites de Atterberg. Estos definen los estados del suelo (sólido, semisólido, plástico y líquido) en función de su contenido de agua. Aunque el límite de retracción se considera menos relevante, los límites líquido y plástico permiten predecir la plasticidad y cohesividad del suelo, fundamentales en ingeniería geotécnica [18].

Ensayo de límite líquido en suelos – MTC E 110

Este ensayo determina el contenido de humedad en el cual el suelo cambia de estado plástico a líquido. Se utiliza el dispositivo de Casagrande, aplicando una serie de golpes controlados sobre una muestra de suelo con partículas menores a 0.43 mm. El cierre del surco tras 25 golpes indica el valor del límite líquido, que es esencial para clasificar suelos y prever su comportamiento bajo diferentes condiciones [18].

Determinación del límite plástico e índice de plasticidad mediante el ensayo MTC E 111

Este procedimiento establece el contenido mínimo de humedad con el cual el suelo pasa de estado semisólido a plástico. Se modelan varillas de suelo de 0.32 cm de diámetro sin que se desintegren, utilizando muestras que pasen por el tamiz N°40. Junto con el índice plástico (IP), este ensayo proporciona información clave sobre la deformabilidad del suelo, factor clave en el diseño geotécnico [18].

Método de ensayo para determinar la humedad del suelo – MTC E 108

Permite cuantificar el contenido de agua del suelo en porcentaje respecto al peso de sus partículas sólidas. Se realiza pesando una muestra húmeda, secándola en un horno a 110 ± 5 °C hasta obtener el peso constante. La pérdida de peso representa el contenido de humedad, parámetro que incide en la compactación, estabilidad y capacidad de soporte del suelo en obras civiles [18].

Ensayo de compactación de Proctor modificado, MTC E 115

El ensayo de compactación Proctor modificado es un procedimiento clave en ingeniería geotécnica que permite determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad

seca máxima que puede alcanzar un suelo bajo condiciones controladas de compactación. Este procedimiento utiliza un molde de 10.15 o 15.24 cm de diámetro y un pisón de 44.5 N, dejado caer desde una altura de 45 cm, alcanzando una energía de compactación de 2700 kN·m/m³. Los resultados obtenidos definen parámetros críticos, como el contenido de humedad óptimo (OCH) y la densidad seca máxima (MDS), esenciales para garantizar que el suelo alcance una densidad conveniente para su empleo en obras de construcción [18].

Determinación del CBR mediante el ensayo MTC E 132

El ensayo de CBR (California Bearing Ratio) es un método esencial para evaluar la resistencia y la capacidad de soporte de suelos y materiales utilizados en subrasantes, subbases y capas base de pavimentos, además de materiales reciclados en infraestructuras viales y campos de aterrizaje. Este procedimiento mide la resistencia del suelo frente a fuerzas verticales aplicadas, proporcionando información clave para el diseño y construcción de pavimentos. Reconocido por su viabilidad y costo accesible, el CBR es ampliamente utilizado y está regulado por estándares internacionales como ASTM y normas locales, como la MTC E132 en Perú. Su aplicación asegura que las capas de pavimento cumplan con los requisitos de estabilidad y durabilidad necesarios para soportar las cargas vehiculares previstas [18].

Documento EG-2013 de especificaciones técnicas generales para obras de construcción

Comprende dos tomos que desarrollan estándares técnicos para la construcción de infraestructura vial, abordando desde los trabajos preliminares hasta el diseño de pavimentos y obras de drenaje. Este manual tiene como propósito principal establecer estándares técnicos claros y precisos que aseguren que las infraestructuras construidas cumplan con criterios rigurosos de seguridad, durabilidad y funcionalidad [19].

Pavimentos Urbanos, NTP CE.010

Define criterios mínimos y especificaciones técnicas para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos urbanos. Incluye un glosario técnico y referencias normativas que facilitan su aplicación. Busca asegurar vías urbanas funcionales, seguras y duraderas, promoviendo un desarrollo urbano sostenible mediante la correcta gestión de recursos y calidad en la ejecución de obras viales [20].

NTP E.050, 2018: Procedimientos para muestreo y mecánica de suelos

Esta norma establece los lineamientos para realizar muestreos y estudios mecánicos de suelos, incluyendo la cantidad de calicatas según el tipo de obra y los métodos para extraer muestras disturbadas y no disturbadas. También regula ensayos fundamentales como la granulometría, límites de Atterberg, corte y compactación. Su correcta aplicación permite caracterizar el suelo con precisión, lo cual es esencial para el diseño seguro de cimentaciones, estructuras y pavimentos, minimizando riesgos técnicos en la construcción [21].

NTP CE.020, 2018: Procedimientos para estabilización de suelos y taludes

Regula el proceso de estabilización de suelos y taludes mediante métodos de muestreo, análisis y aplicación de soluciones como aditivos químicos, compactación mecánica y sistemas de drenaje. Su propósito es asegurar la estabilidad del terreno y prevenir deslizamientos o fallas que comprometan la infraestructura. Esta norma permite diseñar intervenciones efectivas, adaptadas a las condiciones del suelo, garantizando la seguridad y vida útil de las obras [22].

- ***Bases Teóricas***

- ✓ **El suelo**

El suelo constituye un material natural formado mayormente por partículas minerales y pequeñas cantidades de materia orgánica, producto de procesos geológicos y biológicos. Su análisis mediante métodos como tamizado o trituración permite estudiar propiedades esenciales como resistencia, permeabilidad y compactación, fundamentales para la estabilidad de obras de ingeniería civil [23].

- ***Origen y formación***

Los suelos provienen de la meteorización de rocas, ya sea por procesos mecánicos, que fragmentan la roca sin alterar su composición, o químicos, que modifican su estructura original. Estos procesos determinan las características del suelo, lo cual es crucial en el ámbito constructivo [23].

- ***Caracterización***

Este análisis considera propiedades físicas, químicas y mineralógicas. Particularmente, los suelos arcillosos se identifican por su textura fina y plasticidad, y se clasifican según su tamaño de partícula en arcillosos, limosos o arenosos [24].

✓ **Clasificación de suelos según SUCS**

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), desarrollado por Casagrande, [17]. Este método organiza los suelos en dos grandes categorías:















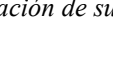
➤ ***Suelos de composición gruesa***

Menos del 50% pasa por la malla N°200; se dividen en gravas (GW, GP, GM, GC) y arenas (SW, SP, SM, SC) según gradación y plasticidad [25].

➤ ***Suelos de grano fino***

Más del 50% pasa el tamiz N°200; se agrupan en limos (M), arcillas (C) u orgánicos (O), y se califican por su plasticidad (L para baja, H para alta) dependiendo del límite líquido [25].

Tabla 1: Simbología del SUCS y su proceso de clasificación

DIVISIONES MAYORES		SÍMBOLO		DESCRIPCIÓN
		SUCS	GRÁFICO	
SUELOS GRANULARES	GRAVA Y SUELOS GRAVOSOS	GW		GRAVA BIEN GRADUADA
		GP		GRAVA MAL GRADUADA
		GM		GRAVA LIMOSA
		GC		GRAVA ARCILLOSA
	ARENA Y SUELOS ARENOSOS	SW		ARENA BIEN GRADUADA
		SP		ARENA MAL GRADUADA
		SM		ARENA LIMOSA
		SC		ARENA ARCILLOSA
SUELOS FINOS	LIMOS Y ARCILLAS (LL < 50)	ML		LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
		CL		ARCILLA INORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
		OL		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA ORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD
	LIMOS Y ARCILLAS (LL > 50)	MH		LIMO INORGÁNICO DE ALTA PLASTICIDAD
		CH		ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD
		OH		LIMO ORGÁNICO O ARCILLA ORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	Pt		TURBA Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS.	

Fuente: Sistema Unificado de clasificación de suelos - SUCS

✓ **Tipificación de suelos según el sistema AASHTO**

El sistema AASHTO, elaborado por Terzaghi y Hogentogler en 1929, fue creado para identificar suelos adecuados para la construcción de carreteras. Inicialmente conocido como el Sistema de clasificación de la agencia de Caminos Públicos, fue perfeccionado y formalizado en 1945 bajo la norma AASHTO M145 [26].

Este método clasifica los suelos en siete grupos principales (A-1 a A-7) con base en ensayos de laboratorio como el análisis granulométrico, el límite líquido y el límite plástico. Además, se emplea el Índice de Grupo (IG), una herramienta que permite cuantificar la calidad del suelo como subrasante, siendo más favorable mientras menor sea su valor.

$$(IG) = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

Donde:

a = Porcentaje de partículas finas (material que atraviesa el tamiz N.º 200), dentro del rango de 35 % a 75 %, con un valor asignado entre 0 y 40.

b = Porcentaje de finos, en un rango más reducido de 15 % a 55 %, también valorado entre 0 y 40.

c = Porción correspondiente al límite líquido, entre 40 % y 60 %, con un valor de 0 a 20.

d = Fracción del índice de plasticidad, que varía entre 10 % y 30 %, representada con valores entre 0 y 20.

Valores bajos del Índice de Grupo (cerca de cero) indican suelos adecuados para carreteras, mientras que valores altos (alrededor de 20 o más) reflejan una menor aptitud como subrasante. [26]. El sistema AASHTO divide los suelos en dos grupos generales basados en el porcentaje de finos que pasa la malla N.º 200:

➤ ***Materiales granulares (Grupos A-1, A-2 y A-3)***

Son aquellos suelos con un contenido de finos igual o inferior al 35 %, compuestos mayormente por gravas y arenas bien graduadas, lo que los hace adecuados como subrasante [27].




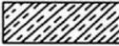


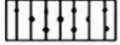

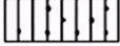






- **Grupo A-1:** Mezclas de grava y arena con bajo contenido de finos no plásticos.

- ➔ **Subgrupo A-1-a:** Suelos con predominancia de grava o piedra, con o sin finos.
- ➔ **Subgrupo A-1-b:** Materiales principalmente arenosos, con posible inclusión de cemento bien graduado.
- **Grupo A-2:** Presentan mayor variabilidad en el tipo y cantidad de finos.
 - ➔ **Subgrupo A-2-4 y A-2-5:** Contienen finos $\leq 35\%$.
 - ➔ **Subgrupo A-2-6 y A-2-7:** Incorporan arcillas plásticas, aumentando la plasticidad del suelo.
- **Materiales arcillosos (Grupos A-4 a A-7)**

Estos suelos tienen más del 35 % de finos y se caracterizan por su alto contenido de limos y arcillas, lo cual reduce su calidad como subrasante [27].

- **Grupo A-4:** Suelos limosos con plasticidad baja a moderada.
- **Grupo A-5:** Limos con materiales especiales (como mica o diatomeas) y alta plasticidad.
- **Grupo A-6:** Arcillas plásticas con más del 75 % de partículas menores a 0.075 mm, aunque pueden contener fracciones de arena y grava.
- **Grupo A-7:** Similar al A-6, pero con límites líquidos más altos.
 - ➔ **Subgrupo A-7-5:** Plasticidad moderada y elasticidad considerable.
 - ➔ **Subgrupo A-7-6:** Alta plasticidad y elevada sensibilidad a la humedad.

Tabla 2: Signos convencionales para perfil de calicatas

Simbología	Clasificación	Simbología	Clasificación
	A-1-a		A-5
	A-1-b		A-6
	A-3		A-7-5
	A-2-4		A-7-6
	A-2-5		Materia orgánica
	A-2-6		Roca sana
	A-2-7		Roca desintegrada
	A-4		

Fuente: SNIP-PERÚ, Lima, 2015

Tabla 3: Tipificación general de suelos según AASHTO

Clasificación General	Material Granular						Material limo arcillosos				
	A-1		A-2				A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1a	A-1b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5
% pasante #10 #40 #200	50% máx 30% máx 15% máx	50% máx 25% máx	35% máx	35% máx	35% máx	35% máx	51% mín 10% máx	36% mín	36% mín	36% mín	36% mín
Características del material que pasa por el tamiz #40											
LL			40% máx	41% mín	40% máx	41% mín	N.P.	40% máx	41% mín	40% máx	41% mín
Ip	6% máx	6% máx	10% máx	10% máx	11% mín	11% mín		10% máx	10% máx	11% mín	11% mín
Ig	0	0	0	0	4 máx	4 máx	0	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipo de material	Fragmentos pétreos de gravas y arenas		Gravas y arenas, limosas y arcillosas				Arena fina	Suelos limosos		Suelos arcillosos	

Fuente: Método empírico AASHTO 93

✓ Suelos arenosos

Los suelos arenosos se caracterizan por ser un material granular compuesto mayormente por partículas de arena. Este tipo de suelo presenta baja plasticidad, limitada capacidad de almacenamiento de agua y alta permeabilidad, lo que facilita el paso del agua a través de él. Debido a estas propiedades, el suelo arenoso requiere procesos de estabilización para incrementar sus propiedades físicas y mecánicas, incluyendo la resistencia y la capacidad de carga, esenciales para su uso como subrasante en pavimentos [28].

➤ Clasificación según el tamaño de partículas

Los suelos se clasifican de acuerdo con el tamaño de sus partículas:

- Limos: Tamaño entre 0.002 mm y 0.05 mm; suele estar mezclado con arcilla.
- Arenas: Mayor a 0.05 mm; mejora el drenaje, pero es escasa en suelos arcillosos.
- Arcillas: Partículas menores a 0.002 mm; retienen mucha agua, pero presentan problemas de drenaje.

➤ Propiedades físicas

○ Granulometría

En suelos arenosos, la distribución de tamaños es mayormente gruesa. El tamizado es efectivo, cuando el porcentaje que pasa la malla N.º 200 es mayor al 50%, se clasifica como suelo de grano fino. [29].

○ Densidad

La densidad se mide de dos maneras [29]:

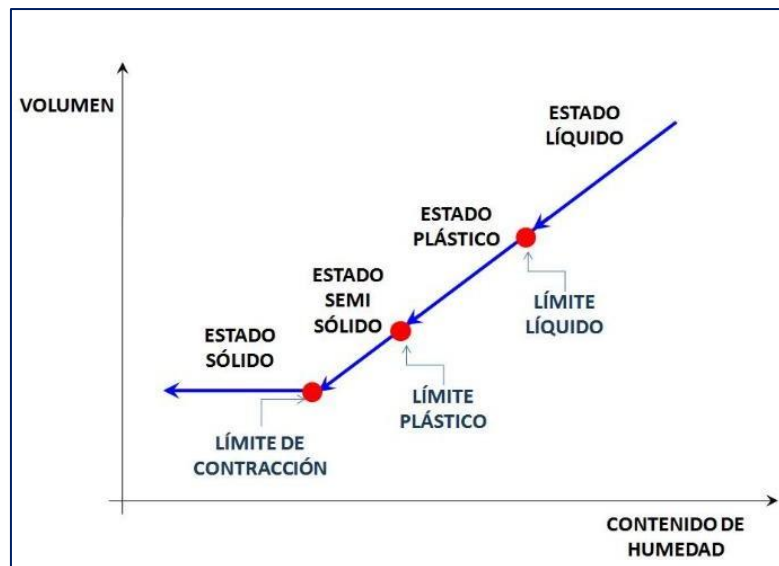
- **Densidad absoluta:** Masa por unidad de volumen sin vacíos del suelo.
- **Densidad aparente:** Incluye los vacíos en la totalidad del volumen del suelo.

○ Plasticidad

Es la capacidad del suelo para deformarse sin fracturarse, especialmente en suelos arcillosos. Esta propiedad se determina mediante los L. de Atterberg, que definen su comportamiento en distintos estados de humedad [29].

- **Límite de contracción:** Momento en que el suelo deja de reducir su volumen a medida que disminuye su humedad [30].
- **Límite plástico:** Humedad mínima en la que el suelo pasa de semisólido a plástico [30].
- **Límite líquido:** Humedad en la que el suelo se vuelve líquido, perdiendo cohesión [30].
- **Índice de plasticidad:** Diferencia entre el límite líquido y plástico, que define el rango de humedad en que el suelo muestra comportamiento plástico [30].

Ilustración 1: Límites de Atterberg [30]



Conforme al Manual de Carreteras, los suelos arcillosos tienen un índice de plasticidad alto (mayor a 20), lo que les otorga una alta capacidad de retención de agua y baja permeabilidad. En cambio, los suelos arenosos tienen un índice de plasticidad bajo (menos de 7), lo que significa que tienen baja cantidad de arcilla,

mayor permeabilidad y menor capacidad de retención de agua. Los suelos arenosos, debido a su granularidad, requieren estabilización para mejorar su capacidad de carga en aplicaciones como subrasantes de pavimentos.

Tabla 4: Tipificación de suelos según el índice de plasticidad

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

Fuente: Geotechnical Consulting

○ **Peso volumétrico**

Es la medida que indica su relación peso–volumen (kg/m^3), teniendo en cuenta los vacíos en su estructura cuando está seco y suelto. Se obtiene al introducir una muestra de suelo en un recipiente de volumen determinado, llenándolo sin compactarlo, y pesándolo. Luego, se resta el peso del recipiente y el valor obtenido se divide entre el volumen del recipiente. Este parámetro es útil para convertir entre peso y volumen en cálculos prácticos en diversas aplicaciones técnicas y científicas [29].

➤ **Propiedades mecánicas**

○ **Permeabilidad**

Los suelos arenosos poseen alta permeabilidad debido a su estructura granular y baja cohesión. Esta característica facilita el drenaje del agua, pero también puede llevar al arrastre de partículas y pérdida de soporte si no se estabilizan adecuadamente [31].

○ **Comprensibilidad**

Presentan baja comprensibilidad, es decir, se deforman poco bajo cargas, lo que los hace estables frente a asentamientos. Sin embargo, su baja cohesión puede afectar su comportamiento estructural si no se mejora mediante compactación o estabilización [31].

○ **Estabilidad volumétrica**

A diferencia de los suelos arcillosos, los suelos arenosos no presentan problemas significativos de expansión o contracción con los cambios de humedad, lo que les confiere mayor estabilidad dimensional [31].

○ **Resistencia mecánica**

La resistencia de los suelos arenosos depende principalmente del grado de compactación y del tipo de arena. Una arena bien graduada y compactada puede ofrecer buena capacidad de soporte. Sin embargo, si está suelta o mal distribuida, su resistencia disminuye notablemente [31].

✓ **Subrasante**

La subrasante es la base natural del terreno que sirve de apoyo a la estructura del pavimento, y desempeña un papel fundamental como soporte para asegurar su resistencia y durabilidad. Corresponde a la superficie del terraplén o la base del corte natural del terreno, que ha sido adecuadamente preparada, compactada y, si es necesario, estabilizada para mejorar sus propiedades mecánicas. Esta capa debe tener la resistencia a las cargas verticales y las deformaciones inducidas por la acción del tráfico vehicular y otras fuerzas externas. Por ello, los suelos que la componen deben cumplir con ciertos requisitos técnicos, tales como alcanzar una compactación mínima del 95% de la densidad seca máxima, determinada mediante el ensayo Proctor modificado, y presentar un CBR igual o superior al 3%. En el caso de que el suelo no cumpla estas condiciones, se recomienda clasificarlo y aplicar técnicas de mejoramiento, como la estabilización química, para asegurar un comportamiento estructural adecuado y una mayor durabilidad de la vía [32].

➤ ***Clasificación de subrasante***

Tabla 5: Categoría de subrasante según su CBR

CATEGORÍAS DE SUBRASANTE	CBR
Subrasante Pobre	$CBR \leq 3\%$
Subrasante Regular	$3\% < CBR < 8\%$
Subrasante Buena	$8\% < CBR < 17\%$
Subrasante Excelente	$CBR \geq 17\%$

Fuente: NTP CE.010

✓ **Estabilización de suelos**

Es un proceso que mejora las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural para hacerlo más adecuado en obras como pavimentos. Puede realizarse mecánicamente o mediante aditivos (químicos, naturales o sintéticos), con el fin de aumentar su resistencia y asegurar su vida útil. Es clave analizar previamente el tipo de suelo para aplicar el método más eficiente [33].

➤ **Importancia**

- **Incremento en la capacidad de carga:** La estabilización aumenta la resistencia del suelo, permitiendo que soporte cargas más pesadas sin fallos [34].
- **Reducción de deformaciones:** Minimiza riesgos como erosión, deslizamientos y asentamientos, protegiendo infraestructuras y personas [34].
- **Optimización de recursos:** Reduce la necesidad de transportar o reemplazar suelos, lo que genera ahorros [34].
- **Mejoras en drenaje y permeabilidad:** Optimiza la permeabilidad, reduciendo problemas de humedad e inundaciones [34].
- **Aumento de la durabilidad:** Prolonga la vida útil de las estructuras construidas sobre el suelo tratado [34].

➤ **Técnicas de mejoramiento de suelos**

○ **Estabilización mecánica**

Este método mejora las propiedades físicas del suelo mediante técnicas como la compactación y la adición de materiales granulares, lo que refuerza la estructura y aumenta la resistencia [35].

○ **Estabilización química**

Consiste en aplicar estabilizantes como cal, cemento o polímeros que reaccionan con el suelo para modificar sus características. Por ejemplo, La cal reduce el grado de plasticidad de los suelos de tipo arcilloso, mejorando su rigidez y resistencia [35].

○ **Estabilización física**

Utiliza materiales como geotextiles o geomallas para reforzar el suelo y aumentar su capacidad de carga. [35]. Este tipo de estabilización incluye dos enfoques:

- ➔ **Sustitución de suelos:** Se coloca un estrato de material de mejor calidad sobre el suelo de base existente, o se reemplaza por completo el suelo hasta la profundidad indicada en el proyecto.

➔ **Combinación de suelos:** Este método implica mezclar el suelo original con un material de mayor calidad. El proceso consiste en escarificar el terreno a al menos 15 cm de profundidad, luego mezclar y compactar hasta lograr la densidad y el nivel adecuado para la subrasante [17].

➤ ***Clasificación de agentes estabilizantes de suelos***

○ **Estabilización de suelos con cal**

La cal favorece la mejora de las propiedades del suelo, aumentando su resistencia al corte y estabilidad ante variaciones climáticas. Reacciona con el suelo, modificando su pH, estructura y composición, lo que reduce el comportamiento plástico de los suelos arcillosos reforzando su resistencia. Además, facilita la compactación y mejora la trabajabilidad, siendo aplicable en formas de polvo, pasta o lechada [23].

○ **Estabilización de suelos con cemento**

El cemento convierte el suelo disgregado en un material endurecido. Al mezclarlo con agua y, a veces, otros aditivos, el suelo se convierte en un material con propiedades mecánicas superiores. Esta técnica es eficaz en suelos arenosos, formando una masa sólida que soporta altas cargas. Es crucial que el suelo esté libre de materia orgánica y sulfatos para asegurar el éxito del proceso [23].

○ **Estabilización de suelos con asfalto**

El asfalto mejora la estabilidad y durabilidad del suelo mediante la adición de asfaltos líquidos, emulsiones o alquitrán. En suelos arenosos, actúa como un ligante que reduce las deformaciones por el tránsito, mientras que, en suelos cohesivos, mejora la impermeabilidad y protección contra el agua, incrementando la capacidad de carga [23].

○ **Estabilización de suelos con cloruros**

Los cloruros, como el cloruro de sodio y cloruro de calcio, mejoran la cohesión y resistencia del suelo al reducir la humedad y disminuir su plasticidad. Este método es efectivo para suelos con baja capacidad portante, mejorando la estabilidad frente a cargas y condiciones climáticas adversas [34].

○ **Estabilización de suelos con polímeros**

Los polímeros, como el poliacrilato de sodio y la poliacrilamida, crean una red que une las partículas del suelo, mejorando su cohesión, estabilidad e impermeabilidad.

Este método es ideal para suelos problemáticos y ofrece soluciones duraderas y adaptables a diversas condiciones geotécnicas [34].

○ **Estabilización de suelos con virutas de acero**

La estabilización del suelo mediante virutas de acero mejora la resistencia y capacidad de carga al incorporar este material reciclado, que generalmente proviene de subproductos industriales. Estas actúan como refuerzos físicos, distribuyendo las tensiones de manera más homogénea y reduciendo las deformaciones bajo las cargas aplicadas. Este método también contribuye a la sostenibilidad, ya que reutiliza desechos metálicos que, de otro modo, se convertirían en residuos. Es una opción económica y ecológica, especialmente útil en suelos con baja capacidad portante, proporcionando soluciones eficientes en proyectos de construcción e infraestructura [36].

○ **Estabilización de suelos con aceite sulfonado**

La estabilización con aceite sulfonado utiliza este aditivo químico con la finalidad de mejorar las propiedades físico-mecánicas del suelo. El aceite sulfonado, conocido por sus propiedades surfactantes, interactúa con las partículas del suelo, reduciendo su cohesión inicial y facilitando su reordenamiento. Esto mejora la compactación, disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia del suelo. Este proceso es particularmente útil en suelos con alta plasticidad o aquellos que son difíciles de estabilizar con métodos convencionales, ya que el aceite sulfonado permite modificar la estructura del suelo de manera eficiente, optimizando su comportamiento bajo cargas. Además, es una opción rentable en términos de costos y tiempos de ejecución en proyectos específicos de ingeniería geotécnica [37].

✓ **Capa de subbase granular**

La subbase tiene como función optimizar el espesor del pavimento utilizando materiales más económicos, aunque en ocasiones se pueden emplear materiales de mayor calidad. En general, se utiliza un material de menor calidad para reducir los costos, lo que incrementa el espesor del asfalto, ya que materiales de menor calidad requieren mayor espesor para soportar las tensiones [38].

Además de soportar la base y la capa de rodadura, la subbase también actúa como sistema de drenaje y controla la capilaridad del agua. En algunos casos, dependiendo de las

condiciones del proyecto, esta capa puede ser eliminada. Cuando se emplea, debe estar constituida por material granular con un CBR igual o mayor al 40 [39].

➤ *Importancia y características*

La subbase juega un papel clave en el rendimiento del pavimento, especialmente al prevenir el bombeo de suelos finos de subrasante, lo cual puede causar la pérdida de material debajo de los bordes y juntas de las losas. Este problema surge cuando se combinan suelos susceptibles al bombeo, acumulación de agua bajo el pavimento y de cargas pesadas frecuentes. El material de la subbase debe cumplir con ciertos requisitos, como un valor $CBR \geq 40\%$ en muestras compactadas y saturadas, un índice plástico (IP) ≤ 9 , y un límite líquido (LL) ≤ 40 . Además, debe facilitar su mezcla para obtener la mayor densidad específica posible y no contener piedras o guijarros que superen dos tercios del espesor. Si se tienen varias opciones de bancos de material, se prioriza el que tenga menor nivel porcentual de partículas que pasen por la malla No. 200, mayor valor de CBR y menor índice plástico [38].

➤ *Especificaciones normativas*

Es fundamental que los materiales de la subbase satisfagan los requisitos normativos y estén exentos de impurezas tales como material vegetal, residuos y agregados de arcilla. Las fallas en pavimentos suelen deberse a problemas como una compactación deficiente, contaminación del sustrato o un drenaje inadecuado, los cuales afectan directamente la durabilidad de la estructura [39]. En la tabla N°6 se muestran los requerimientos granulométricos para la subbase y en el tabla N°7 los ensayos que se deben realizar [19].

Tabla 6: *Requerimientos granulométricos para subbase granular*

Tamiz	Porcentaje que pasa en peso			
	Gradación A (1)	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50.00 mm (2")	100	100	-	-
25.00 mm (1")	-	75 a 95	100	100
9.50 mm (3/8")	30 a 65	40 a 75	50 a 85	60 a 100
4.75 mm (N° 4)	25 a 55	30 a 60	35 a 65	50 a 85
2.00 mm (N° 10)	15 a 40	20 a 45	25 a 50	40 a 70
425.00 μm (N° 40)	8 a 20	15 a 30	15 a 30	25 a 45
75 μm (N° 200)	2 a 8	5 a 15	5 a 15	8 a 15

Fuente: ASTM D1241 (MTC EG 2013)

Tabla 7: Ensayos para subbase granular

Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	Norma AASHTO	Requerimiento	
				< 3000 msnm	> 3000 msnm
Abrasión Los Ángeles	MTC E207	C131	T96	50% máx.	50% máx.
CBR	MTC E132	D1883	T193	40% mín.	40% mín.
Límite líquido	MTC E110	D4318	T89	25% máx.	25% máx.
Índice de plasticidad	MTC E111	D4318	T90	6% máx.	4% máx.
Equivalente de arena	MTC E114	D2419	T176	25% mín.	35% mín.
Sales solubles	MTC E219	-	-	1% máx.	1% máx.
Partículas chatas y alargadas	-	D4791	-	20% máx.	20% máx.

Fuente: ASTM D1241 (MTC EG 2013)

✓ Virutas de acero

Las partículas de acero en forma de viruta son un subproducto obtenido durante el tratamiento mecánico, especialmente cuando se trabaja con piezas metálicas. Este residuo se presenta en pequeños fragmentos curvados cuyo tamaño, forma y espesor varían según el material trabajado y el tipo de operación realizada [14]. En el mecanizado, las virutas se clasifican según las propiedades del material y el proceso utilizado. Las principales categorías son [40]:

- **Viruta discontinua:** Se produce al mecanizar materiales frágiles, duros y propensos a la fractura. Se desprenden en fragmentos irregulares y facilitan el manejo, aunque pueden generar superficies menos uniformes en la pieza.
- **Viruta continua:** La viruta continua, o viruta plástica, se produce al trabajar materiales dúctiles que se deforman considerablemente antes de romperse. Formas largas espirales o hebras, lo que puede dificultar el mecanizado debido a que tiende a enredarse en la herramienta o la máquina. No obstante, este tipo de viruta generalmente resulta en acabados más uniformes.

El manejo correcto de las virutas es esencial en el mecanizado, ya que previene obstrucciones en la maquinaria, asegura la seguridad del operario y mejora el reciclaje de residuos metálicos. Las virutas de acero se reciclan y reutilizan en varios procesos industriales, favoreciendo la sostenibilidad en el sector metalúrgico. [40].

✓ Estabilizador Sulfonado ISS 2500

El Estabilizador Iónico ISS 2500 es una innovación en la estabilización de suelos, destacándose por su habilidad para utilizar materiales locales con baja resistencia portante

y bajos niveles de plasticidad. Su acción se basa en un mecanismo de interacción iónica que mejora notablemente las características mecánicas del suelo, incrementando su valor de CBR y disminuyendo su propensión a absorber agua. Esto previene la formación de barro, baches y otros daños comunes en superficies de tierra o caminos no pavimentados [41].

➤ ***Principales características [42]***

○ **Modo de operación**

- ➔ Permite usar suelos inadecuados sin necesidad de reemplazarlos por materiales granulares.
- ➔ Ahorra en costos de construcción y mantenimiento, especialmente en proyectos de tráfico bajo.

○ **Especificaciones técnicas**

- ➔ Gravedad específica mínima: 1.15 (H₂O – 1.0)
- ➔ pH: Menor a 2
- ➔ Dosis de aplicación:
Suelos con menos del 10% de material pasando por el Tamiz N°200
Suelos con elevada plasticidad: 0.04 Lt/m².

○ **Ventajas**

- ➔ Aumenta el grado de compactación y capacidad de carga del suelo.
- ➔ Utiliza recursos locales, reduciendo la dependencia de recursos externos.
- ➔ Ofrece un tratamiento permanente sin mantenimiento recurrente.
- ➔ Se puede diluir con agua salada.
- ➔ Ahorra costos en maquinarias, sin requerir equipos especializados.
- ➔ Los caminos tratados están disponibles para el tránsito inmediatamente después de su aplicación.

○ **Impacto económico y ambiental**

- ➔ Más económico que los métodos tradicionales de estabilización.
- ➔ Reduce los costos en proyectos viales de bajo tráfico especialmente en caminos reales.
- ➔ Contribuye a la sostenibilidad al disminuir desechos y aprovechar recursos locales

➤ ***Aplicaciones del estabilizador ISS 2500***

El compuesto estabilizador iónico ISS 2500 es ideal para proyectos de estabilización de suelos en carreteras, caminos de tierra y áreas con tránsito moderado. Su uso reduce los costos operativos y mejora la durabilidad de las infraestructuras viales. Su

aplicación es sencilla, permitiendo que los caminos tratados sean abiertos al tráfico de inmediato, evitando interrupciones [41].

De acuerdo con el documento técnico de ROAD MATERIAL STABILISER PERÚ S.A.C, este producto, clasificado como estabilizador electroquímico, es particularmente efectivo para suelos con baja calidad estructural. Ofrece ventajas económicas y operativas, siendo una alternativa preferida frente a los métodos convencionales de estabilización. En resumen, el ISS 2500 mejora suelos de baja calidad con recursos mínimos, presentándose como una solución sostenible y rentable para la construcción y mantenimiento vial [41].

o **Criterios de selección para el ISS 2500**

El sulfonatado ISS 2500 será adquirido por intermedio del proveedor RMS Perú, ubicado en la Av. Alfredo Benavides N°1480 del distrito de Miraflores - Lima. En cuanto al afirmado, esta provendrá de la cantera “La Victoria” en el distrito de Pátapo. Las muestras de suelo serán extraídas con sumo cuidado, perteneciente a una vía no pavimentada del distrito de Pimentel.

Materiales y métodos

○ *Tipo y nivel de investigación*

✓ **Tipo de investigación:**

El estudio desarrollado corresponde a una investigación experimental, debido a que se analizaron muestras de suelo obtenidas en el Sector Alto Perú en Pimentel para posteriormente ser ensayadas en el laboratorio EICA – USAT. Para ello, primero se evaluó la caracterización de los estratos arenosos del distrito de Pimentel; posteriormente, dichos resultados de cada ensayo sirvieron para la discusión correspondiente entre las muestras convencionales y experimentales, bajo dosificaciones de sulfonato ISS 2500 con virutas de acero. Los ensayos corresponderán a la caracterización de las propiedades químicas, físicas y mecánicas del suelo, con el fin de conocer el comportamiento de los estratos ante efectos de compactación.

✓ **Nivel de investigación:**

La investigación es de nivel aplicativo, dado que se pretende solucionar una problemática y demostrar la utilidad del sulfonato ISS 2500 con virutas de acero, para la estabilización de subbases granulares y subrasante, por lo que se conformarán 4 grupos de estudio que cuantificarán los resultados convencionales y experimentales.

○ *Hipótesis y variables*

✓ **Hipótesis:**

La adición combinada de sulfonato ISS 2500 con viruta de acero influye de manera positiva en la mejora de estabilización de subbases granulares sobre suelos arenosos para fines de pavimentación.

✓ **Variables y operacionalización**

➤ **Variable independiente:**

Adición combinada de sulfonato ISS 2500 con viruta de acero

➤ **Variables dependientes:**

Estabilización de subbases granulares

Estabilización de suelos arenosos

➤ **Operacionalización de variables:**

Se presenta a continuación la matriz de definición de variables y su operacionalización:

Tabla 8: Operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	RANGO DE APLICACIÓN	MÉTODO DE MEDICIÓN (INSTRUMENTO)
Adición combinada de sulfonatado ISS 2500 con viruta de acero	Cantidad de sulfonatado ISS 2500 con viruta de acero	% en peso	5% ISS 2500 + 5% VA	Balanza correctamente calibrada
			5% ISS 2500 + 10% VA	
			10% ISS 2500 + 5% VA	
			10% ISS 2500 + 10% VA	
VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÓN (INSTRUMENTO)
Estabilización de subbases granulares y suelos arenosos	Propiedades mecánicas	Máxima densidad seca	g/cm ³	Proctor modificado NTP 339.141 ASTM D1557
		Óptimo contenido de humedad	%	
		Grado de compactación	%	CBR (NTP 339.145-ASTM D1883)
		Permeabilidad	cm/s	ACI 522R06

Fuente: Elaboración propia

○ **Población y muestra**

✓ **Población:**

Se aplicó una población probabilística por muestreo aleatorio simple para la selección de las combinaciones del sulfonatado ISS 2500 con virutas de acero, cuyo propósito fue la de obtener la dosificación óptima que brinde mejores resultados en cuanto al aumento de la resistencia mecánica de la subbase granular y subrasante. De acuerdo con el alcance de la norma EG 2013 y ficha técnica, se evaluó la eficiencia del sulfonatado ISS 2500 con virutas de acero, en base a la comparativa de resultados experimentales, bajo las siguientes adiciones:

Tabla 9: Combinación de las adiciones utilizadas

Adición	Combinación
1 ^{era}	5% ISS 2500 + 5% VA
2 ^{da}	5% ISS 2500 + 10% VA
3 ^{era}	10% ISS 2500 + 5% VA
4 ^{ta}	10% ISS 2500 + 10% VA

✓ **Muestra:**

Se consideró emplear un enfoque de muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que la investigación utiliza criterios subjetivos para seleccionar la cantidad de muestras a usar. En concordancia con la NTP E.050 y la NTP CE.010, se llevarán a cabo tres calicatas como mínimo. Basándose en la cantidad de ensayos requeridos, se consideraron 27 muestras patrón tanto para el suelo arenoso 16 para la subbase granular.

En la Tabla N°10, se aprecia la cantidad de ensayos de clasificación del suelo, realizando siete por cada calicata. En base a los resultados, se realizó la identificación del tipo de suelo que predomina en cada una. La calicata que presentó un suelo de tipo arenoso fue seleccionada para la ejecución de los ensayos correspondientes a la muestra patrón de subrasante (ya que se centra en un ámbito investigativo), específicamente tres ensayos Proctor Modificado y tres ensayos CBR. En conjunto, se dispondrá de 27 muestras para realizar los nueve ensayos planificados en esta investigación, orientados al análisis y caracterización del suelo.

De manera similar, en la Tabla N°11 se presentan los ensayos para la subbase granular, donde cada ensayo contará con una repetición, excepto los ensayos de Proctor con energía modificada y CBR, que tendrán tres repeticiones. Por ende, se contará con 16 muestras destinadas a la ejecución de doce ensayos programados en esta investigación.

En total, se realizarán 43 ensayos de muestra patrón de subrasante y subbase granular.

Tabla 10: Cantidad de muestras patrón para ensayos del suelo

ENSAYOS DE MUESTRAS PATRÓN PARA SUELO				
Ensayos	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3	Normativa
Ensayo del Contenido de Humedad	1	1	1	MTC E 108
Granulometría por Tamizado	1	1	1	MTC E 107
Límite Líquido	1	1	1	MTC E 110
Límite Plástico	1	1	1	MTC E 111
Gravedad Específica	1	1	1	MTC E 106
Clasificación de suelos	1	1	1	NTP 339.134
Sales, Cloruros y Sulfatos	1	1	1	MTC E 219
Proctor Modificado	0	0	3	MTC E 115
CBR	0	0	3	MTC E 132
PARCIAL	7	7	13	
TOTAL	27			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Cantidad de muestras patrón para ensayos de subbase granular

ENSAYOS DE MUESTRAS PATRÓN PARA SUB-BASE GRANULAR		
Ensayos	Cantidad	Normativa
Ensayo del CH	1	MTC E 108
Granulometría por Tamizado	1	MTC E 107
Límite Líquido	1	MTC E 110
Límite Plástico	1	MTC E 111
Porcentaje de absorción y P. Específico	1	MTC E 206
Caras Fracturadas	1	MTC E 210
Partículas Alargadas y Chatas	1	MTC E 223
Equivalente de Arena	1	MTC E 114
Abrasión	1	MTC E 207
Sales, Cloruros y Sulfatos	1	MTC E 219
Proctor Modificado	3	MTC E 115
Capacidad de Soporte CBR	3	MTC E 132
PARCIAL	16	
TOTAL	16	

Fuente: Elaboración propia

Para las muestras experimentales, se emplearon cuatro adiciones de mezcla, combinando sulfonato ISS 2500 con viruta de acero en las siguientes configuraciones: 5% ISS2500 + 5% VA, 5% ISS2500 + 10% VA, 10% ISS2500 + 5% VA y 10% ISS2500 + 10% VA. En relación con las muestras destinadas al análisis del suelo (Tabla N°12), se prepararon 18 muestras por cada combinación, considerando 03 muestras para el ensayo Proctor de energía modificada y 15 para CBR. Adicionalmente, se realizarán pruebas de límites de A. con adiciones del 5% y 10% de sulfonato ISS 2500, tanto para el suelo como para el afirmado, con el fin de evaluar el efecto del aditivo sobre la plasticidad de los materiales. Esta información permitió evaluar posibles variaciones en la consistencia, cohesividad y trabajabilidad del material estabilizado, lo cual resulta esencial para su desempeño como subbase o subrasante mejorada. En total, se trabajará con 74 muestras experimentales.

Tabla 12: Cantidad de muestras experimentales para ensayos de suelo

MUESTRAS EXPERIMENTALES – SUELO					
Ensayos	5% ISS 2500 + 5% VA	5% ISS 2500 + 10% VA	10% ISS 2500 + 5% VA	10% ISS 2500 + 10% VA	Normativa
Límites de Atterberg	1.00	0.00	1.00	0.00	MTC E 114
Proctor Modificado	3.00	3.00	3.00	3.00	MTC E 115
Capacidad de Soporte CBR	15.00	15.00	15.00	15.00	MTC E 132
PARCIAL	19.00	18.00	19.00	18.00	
TOTAL	74.00				

Fuente: Elaboración propia

De manera similar, para las muestras experimentales orientadas al análisis de la subbase granular (Tabla N°13), se obtuvieron 18 muestras por cada combinación, considerando 03 muestras ensayo Proctor de energía modificada y 15 para CBR. Asimismo, se contempla la ejecución de ensayos de límites de Atterberg con adiciones del 5% y 10% de sulfonato ISS 2500, con el objetivo de analizar si este aditivo influye en la consistencia y comportamiento plástico del afirmado. Esta información contribuirá a evaluar la capacidad del estabilizante para modificar favorablemente la trabajabilidad y cohesión del material granular. En total, se trabajará con 74 muestras experimentales.

Tabla 13: Cantidad de muestras experimentales para ensayos de subbase granular

MUESTRAS EXPERIMENTALES – SUBBASE GRANULAR					
Ensayos	5% ISS 2500 + 5% VA	5% ISS 2500 + 10% VA	10% ISS 2500 + 5% VA	10% ISS 2500 + 10% VA	Normativa
Límites de Atterberg	1.00	0.00	1.00	0.00	MTC E 114
Proctor Modificado	3.00	3.00	3.00	3.00	MTC E 115
Capacidad de Soporte CBR	15.00	15.00	15.00	15.00	MTC E 132
PARCIAL	19.00	18.00	19.00	18.00	
TOTAL	74.00				

Fuente: Autoría propia

En la Tabla N.º 14 se observan los datos del ensayo de permeabilidad según la norma ACI 522R aplicado al análisis del suelo, se utilizará una muestra patrón y una muestra experimental óptima (%ISS + %VA), obteniendo un total de dos muestras.

De manera similar, la Tabla N°15 presenta los detalles correspondientes al análisis de la subbase granular, donde también se empleará una muestra patrón y una muestra experimental óptima, sumando nuevamente un total de dos muestras.

Tabla 14: Cantidad de especímenes de suelo para prueba de permeabilidad

ENSAYO DE PERMEABILIDAD - SUELO (NORMA ACI 522R - 06)	
Muestra Patrón	1
Muestra óptima → %ISS + %VA	1
TOTAL	2

Fuente: Autoría propia

Tabla 15: Cantidad de especímenes de subbase para prueba de permeabilidad

ENSAYO DE PERMEABILIDAD - SUBBASE (NORMA ACI 522R - 06)	
Muestra Patrón	1
Muestra óptima → %ISS + %VA	1
TOTAL	2

Fuente: Autoría propia

➤ Justificación del número de ensayos CBR por tratamiento experimental

El presente estudio contempla la ejecución de 15 ensayos CBR por cada combinación experimental (combinación de sulfonado ISS 2500 + virutas de acero), lo cual resulta en un total de 60 ensayos CBR para los especímenes experimentales de suelo, y 60 adicionales para las muestras experimentales de subbase granular, sumando 120 ensayos CBR experimentales en total. Esta decisión está fundamentada en criterios estadísticos, metodológicos y operativos, y responde a la necesidad de generar resultados confiables, representativos y replicables.

○ Estimación de tamaño muestral para variable cuantitativa

De acuerdo con los lineamientos metodológicos de Sucasaire Pilco (2022), cuando se busca estimar una media con un nivel de precisión específico [43], se emplea la siguiente ecuación para determinar el tamaño de muestra para variables cuantitativas:

$$n = \frac{Z^2 \times s^2}{E^2}$$

Donde:

Z = Representa el valor crítico de la distribución normal para un nivel de confianza específico (por ejemplo, 1.96 para 95%).

S = Desviación estándar estimada del ensayo CBR (según estudios previos, aprox. 2.5 %).

E = Margen de error máximo deseado (en este caso, 1.25 %).

Al sustituir:

$$n = \frac{(1.96)^2 \times (2.5)^2}{(1.25)^2} = \frac{(3.8416) \times (6.25)}{(1.5625)} = 15.37$$

Este cálculo indica que se requieren aproximadamente 15 ensayos CBR por combinación experimental para lograr una estimación precisa de la media con un nivel de confianza del 95 % y un margen de error de ± 1.25 %. Como señala Sucasaire, redondear a 15 es estadísticamente apropiado y metodológicamente aceptado.

○ **Relación con el diseño experimental y tipo de muestra**

La presente investigación se basa en un diseño completamente aleatorizado, con cuatro tratamientos experimentales definidos por combinaciones de porcentajes de ISS 2500 y virutas de acero. Siendo una investigación de tipo experimental con muestra no probabilística, la selección de muestras responde a criterios técnicos y objetivos del investigador, centrados en la comparación de resultados entre tratamientos y el control. La ecuación que se utiliza para la obtención del número total de unidades experimentales es:

$$N = a \times n$$

Donde:

a = 4, es el número de combinaciones estudiadas

n = 15, es el número de repeticiones por cada combinación

➔ **N** = 4 x 15 = **60 ensayos**

Este número permite aplicar un análisis de varianza (ANOVA) con poder estadístico suficiente para detectar diferencias significativas entre tratamientos, lo cual es coherente con el enfoque cuantitativo del estudio.

○ **Relación con la población y muestra total del estudio**

En términos metodológicos, la muestra total fue determinada considerando que el estudio trabaja con una población definida de materiales (suelo arenoso y afirmado), seleccionados mediante muestreo no probabilístico para las muestras patrón y muestreo aleatorio simple para los aditivos. La selección de 15 muestras por tratamiento experimental es consistente con la necesidad de garantizar representatividad dentro de cada grupo de estudio, respetando el enfoque de experimentación controlada y cumpliendo con los requerimientos de comparabilidad estadística de los resultados.

Esta estructura responde a la composición de la población experimental total:

- 4 combinaciones de tratamiento
- 15 repeticiones por combinación
- 2 tipos de material (subrasante y subbase granular)
- 4 (combinaciones) x 15 (repeticiones) x 2 (materiales) = **120 ensayos CBR**

○ **Rigor y viabilidad operativa**

Este número de ensayos también se evaluó desde una perspectiva logística: recursos de laboratorio, disponibilidad de moldes, tiempo de compactación y curado de muestras. Los 15 ensayos por tratamiento representan un equilibrio entre validez estadística y factibilidad operativa, permitiendo generar conclusiones sólidas sin exceder la capacidad técnica del laboratorio.

○ ***Procedimientos e instrumentos de recolección de datos***

✓ **Técnicas de investigación:**

Durante la realización de este estudio, los métodos empleados para cada ensayo proporcionaron resultados acordes con los lineamientos técnicos establecidos por las normas correspondientes. Estos resultados fueron interpretados y registrados para su posterior análisis y discusión. Los datos obtenidos tendrán un carácter cuantitativo; por lo tanto, se elaboraron hojas de cálculo en Excel para procesar y analizar de manera ordenada los valores obtenidos, tanto de las muestras experimentales como de las estabilizadas de forma convencional. Los ensayos contemplados incluyen porcentaje de humedad, estudio granulométrico, peso específico, límites de plasticidad y fluidez y absorción, superficies fracturadas, partículas chatas y alargadas, equivalente de arena, abrasión, clasificación de suelos, análisis de sales, cloruros y sulfatos, así como las determinaciones mediante PM. y CBR.

✓ **Instrumentos de recolección:**

Con el propósito de procesar los datos, se usaron programas de cómputo, como es el word, excel, power point, entre otros. En cuanto a los ensayos anteriormente mencionados, según normativas ASTM y NTP, se usarán cucharas, balanza, horno, tamices, pala, taras, espátulas, vaso precipitador, badilejo, copa de Casagrande, ranurador, calibrador, molde

cilíndrico, martillo metálico, pisón, disco espaciador de acero, pesas de plomo, prensa hidráulica, papel filtro, tanques, cronometro, trípode y extensómetro.

✓ **Proceso para demostrar la hipótesis**

- a) **Ejecución de calicatas:** En cumplimiento de la norma E.050, se ejecutarán tres calicatas en una vía no pavimentada del distrito de Pimentel, cuyas dimensiones serán de 1.00 m x 1.00 m x 1.50 m.
- b) **Clasificación de muestras de suelos:** Se llevará a cabo la recolección de muestras de suelo en estado natural, considerando sus características de textura y coloración.
- c) **Ensayos de muestras patrón del suelo:** Se ejecutarán 7 ensayos distribuidos entre las calicatas C-1, C-2 y C-3 con un total de 21 muestras. Luego, en la calicata que presente suelo de tipo arenoso, se realizarán las pruebas de CBR y Proc. M. cada uno tendrá 3 muestras (repeticiones), sumando un total de 27 muestras. (Tabla N°12).
- d) **Ensayos de muestras patrón de la subbase:** Se ejecutarán 12 ensayos sobre el material granular de afirmado con un total de 16 muestras. Entre ellos se incluyen ensayos físicos, químicos y mecánicos, destacando 3 Proctor Modificado y 3 CBR, de acuerdo con las especificaciones del MTC. (Tabla N°13).
- e) **Estabilización del suelo experimental:** Se realizarán los ensayos de Límites de Atterberg, PM y CBR aplicados a muestras suelo con adiciones combinadas con sulfonato ISS 2500 y virutas de acero, según tabla N°14.
- f) **Estabilización de la subbase experimental:** Se realizarán las pruebas de Límites de Atterberg, Pruebas de PM y CBR aplicados a muestras de afirmado con adiciones combinadas con sulfonato ISS 2500 y virutas de acero, según tabla N°15.
- g) **Permeabilidad del suelo:** En base a la resultante con mayor aumento de CBR.
- h) **Evaluación económica:** Se efectuará el análisis de costo unitario por m², para la dosis óptima de la estabilización experimental de subrasante y subbase granular, siendo comparada con la estabilización convencional.

- *Proceso de extracción y adquisición de materiales*

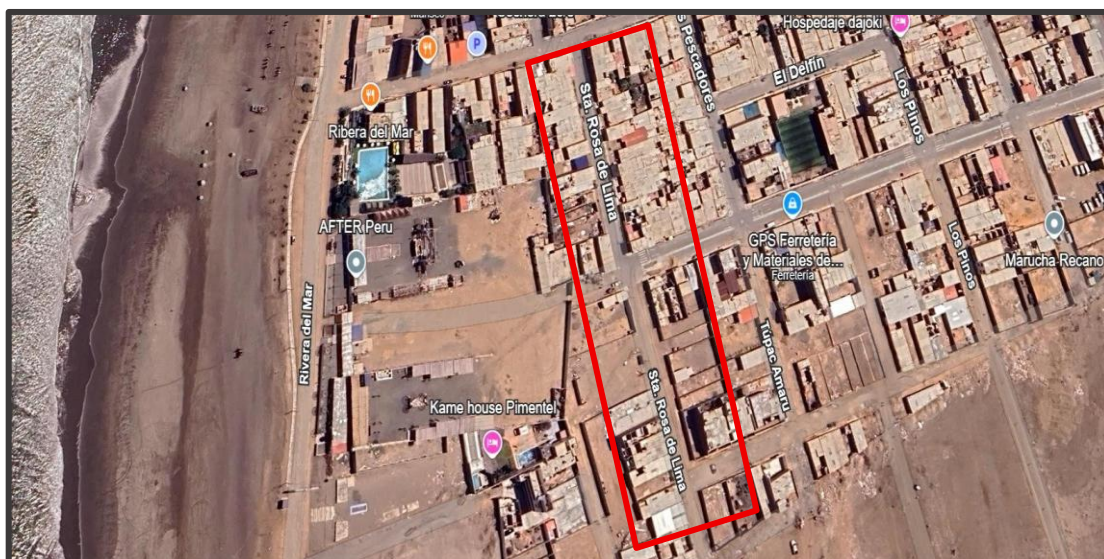
- ✓ *Procedimiento de extracción de muestras*

La extracción de muestras de suelo se llevó a cabo en la calle no pavimentada Santa Rosa de Lima, ubicada en el localizado en el sector Alto Perú, distrito de Pimentel, provincia de Chiclayo, región Lambayeque (Ilustración N°02).

Se ejecutaron tres (3) calicatas conforme a las especificaciones establecidas en la Norma Técnica E.050 “Suelos y Cimentaciones” del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), la cual regula los procedimientos para la investigación del subsuelo con fines de diseño y construcción. Para la selección de los puntos de excavación se consideraron las características topográficas y del terreno, optando por ubicaciones representativas de la zona, elegidas según criterio técnico. Cada calicata alcanzó una profundidad de 1.50 metros y se excavó utilizando instrumentos manuales como barreta, pala recta y pico.

El terreno explorado se caracteriza principalmente por la presencia de suelo de tipo arenoso. De cada calicata se extrajeron aproximadamente nueve (9) sacos de suelo, cada uno con un peso estimado de 45 kilogramos, lo que dio un total de veintisiete (27) sacos de material recolectado para su análisis posterior.

Ilustración 2: Localización del área de extracción de muestras



Fuente: plataforma Google Earth

Ilustración 4: Zona de extracción – C1

Fuente: Autoría propia

Ilustración 3: Zona de extracción – C2

Fuente: Autoría propia

Ilustración 5: Zona de extracción – C3

Fuente: Autoría propia

✓ **Obtención del afirmado**

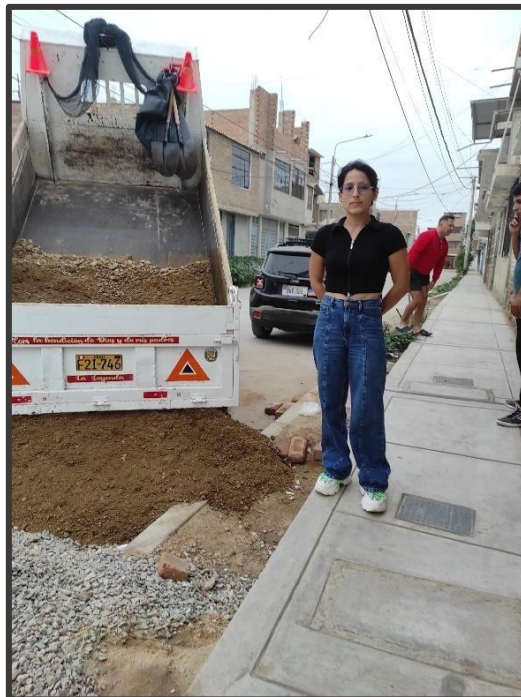
Se recibió en el domicilio un volumen de 1 m³ de material afirmado, transportado por un camión volquete, el cual será empleado como muestra para la realización de los ensayos de laboratorio correspondientes a la presente investigación.

Ilustración 6: Entrega del material a domicilio



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 7: Afirmado para subbase granular



Fuente: Elaboración propia

✓ **Obtención y características de la viruta de acero**

En esta investigación se utiliza viruta de acero calcinada, que es un subproducto industrial que ha sido sometido a un proceso térmico controlado. Dicho proceso elimina impurezas, humedad y componentes volátiles, convirtiendo la viruta metálica en un material con características físicas y químicas más estables y uniformes. La calcinación incrementa la durabilidad y disminuye la reactividad superficial del material, favoreciendo su compatibilidad y comportamiento en la estabilización del suelo. De esta manera, la viruta calcinada permite una mejor integración con el suelo, asegurando resultados más consistentes y confiables en la mezcla estabilizada.

➤ **Justificación para triturar la viruta de acero calcinada**

El material seleccionado fue escogido principalmente por su bajo costo y fácil acceso local, lo que lo convierte en una alternativa viable para la estabilización de suelos en obras viales de carácter práctico.

En su estado inicial, la viruta o escoria de acero presentaba un tamaño promedio de aproximadamente 3/4" (19 mm). No obstante, al tratarse de un subproducto industrial sin control granulométrico, su distribución de tamaños era heterogénea, lo que complicaba su interacción adecuada con la subbase granular y el suelo arenoso natural durante los procesos de mezclado y compactación.

Es importante señalar que, al ser un material reciclado, la viruta de acero no requiere cumplir con especificaciones granulométricas estrictas, ya que dichos criterios se aplican únicamente a materiales sujetos a control de calidad convencional. Sin embargo, con el propósito de optimizar su desempeño y asegurar una gradación continua que favorezca la compactación, la resistencia estructural y la integración con los demás componentes del sistema (subbase y subrasante), se procedió a reducir su tamaño utilizando la máquina de abrasión Los Ángeles.

El procesamiento del material tuvo como finalidades:

- Disminuir el tamaño máximo de las partículas, obteniendo una distribución granulométrica más uniforme y próxima a la recomendada para gravas empleadas en subbases [2], [3].
- Lograr una mezcla homogénea, evitando problemas de segregación, vacíos internos o concentraciones excesivas de material metálico durante los ensayos de laboratorio.

- Facilitar la compactación y mejorar la trabajabilidad del material al combinarlo con la subbase granular y la subrasante arenosa en el acondicionamiento de los moldes para las pruebas de Proctor Mod. y CBR.

Ilustración 9: Trituración de viruta de acero calcinada



Ilustración 8: Viruta de acero calcinada



○ **Procedimiento de ensayos a realizar**

✓ **Ensayos físicos realizados al suelo y la subbase granular**

➤ **Contenido de humedad del suelo:**

Este ensayo consiste en someter una muestra de suelo húmedo a un proceso de secado en un horno a 110 °C, manteniendo esta temperatura hasta que el peso de la muestra permanezca constante. La reducción en el peso durante este proceso se utiliza para la determinación de la humedad del material (C.H.), un parámetro clave para analizar su desempeño en obras de construcción y las propiedades físicas del suelo.

a) Normativa de referencia

Ensayo de laboratorio para la determinación de la humedad del suelo – MTC E108.

b) Materiales y equipos requeridos

- Balanza con un nivel de on una sensibilidad de 0.1 g en muestras superiores a 200 g.
- Horno con temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Guantes capaces de manipular los recipientes calientes después del secado.
- Recipientes resistentes al calor y a la corrosión.

c) *Procedimiento*

Por suelo extraído de cada una de las calicatas, se seleccionó una muestra representativa húmeda de 1000 gr y se pesó antes de iniciar el secado. La muestra es colocada en horno de secado a 110°C, manteniéndola a esta temperatura hasta que su peso se logre estabilizar. Una vez logrado una masa constante, se extrae la muestra del horno y se realiza un nuevo pesaje. Finalmente, el contenido de humedad se determina a partir de la diferencia entre el peso de la muestra húmeda y la seca.

d) *Fórmulas y cálculos*

- La humedad del material se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$W_m = \frac{M_a - M_b}{M_b - M_c} \times 100$$

Donde:

W_m = Porcentaje de humedad (%)

M_a = Peso del recipiente más el suelo en condición húmeda (g)

M_b = Peso del recipiente más el suelo seco en estufa (g)

M_c = Peso del recipiente (g)

e) *Imágenes del proceso de ensayo*

Ilustración 10: Colocación de la muestra al horno



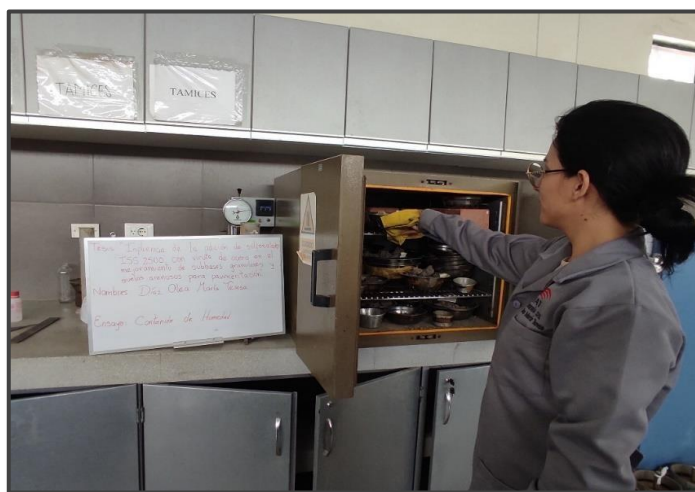
➤ **Ensayo granulométrico por tamizado:**

Este procedimiento permite obtener un perfil granulométrico del suelo, clasificándolo según su composición. Su objetivo es determinar de forma cuantitativa la distribución de los tamaños de las partículas del suelo. Este análisis es esencial en estudios geotécnicos y proyectos de ingeniería, ya que influye en el diseño de cimentaciones.

a) Normativa de referencia

Análisis granulométrico de suelos por tamizado – MTC E 107.

Ilustración 11: Retiro de las muestras del horno



b) Materiales y equipos requeridos

- Balanza con sensibilidad de 0.01g para pesar el material que pase el tamiz N°4.
- Estufa que mantenga una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Tamices normados para análisis granulométrico de suelos (3", 2", 1½", 1", ¾", 3/8", N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°140, N°200)
- Juego de taras o recipientes metálicos.
- Brocha y cepillo.

c) Procedimiento

Se selecciona una fracción representativa del material, entre 500 g y 5 kg, según el tamaño máximo de sus partículas, y se seca en estufa a 110 ± 5 °C para eliminar toda humedad. Una vez seca, se disgrega cuidadosamente con un mortero de goma para separar las partículas sin dañarlas. Se realiza el lavado de finos para remover el material que pasa el tamiz N°200 (0.075 mm), y el material retenido se vuelve a

secar. Luego, se coloca la muestra en una serie de tamices dispuestos de mayor a menor abertura, y se agita mecánica o manualmente hasta alcanzar una separación efectiva. Se registra el peso del material retenido en cada malla y se calculan los porcentajes acumulados de material que pasa y se retiene. Con estos datos se construye la curva granulométrica, que permite analizar la distribución de tamaños y clasificar el tipo de suelo.

d) Fórmulas y cálculos

- El contenido porcentual retenido en el malla se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\%_{retenido} = \frac{P_{ret}}{p_{tot}} \times 100$$

- La fracción de partículas que pasa por la malla, expresada en porcentaje:

$$\%_{pasa} = 100 - \%_{r.ac}$$

- El porcentaje que pasa por la malla N°200:

$$\%_{pasa\ N^{\circ}200} = \frac{P_{tot} - P_{ret\ N^{\circ}200}}{p_{tot}} \times 100$$

Donde:

P_{ret} = P retenida en malla (g).

P_{tot} = Peso total en (g).

$\%_{r.ac}$ = Porcentaje retenido acumulado.

$P_{ret\ N^{\circ}200}$ = P retenido en malla N°200 en (g).

e) Imágenes del proceso de ensayo

Ilustración 12: Lavado de finos previo al secado del material



Ilustración 13: Tamizado de la muestra de suelo



Ilustración 14: Granulometría Gruesa - Afirmado



Ilustración 15: Granulometría Fino - Afirmado



➤ **Determinación del límite líquido:**

Este procedimiento consiste en preparar una muestra en específico y emplear equipo especializado (Copa de Casagrande) para medir el contenido de humedad necesario para que el suelo pase de un estado plástico a líquido.

a) Normativa de referencia

Ensayo para la obtención del límite líquido en suelos – MTC E 110.

b) Materiales y equipos requeridos

- Balanza con sensibilidad de 0.01g.
- Horno capaz de mantener una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Copa de Casagrande; principal instrumento para realizar este ensayo.
- Acanalador; herramienta que ayuda a realizar la ranura en las muestras.
- Recipientes para almacenaje o taras.
- Espátula de 75mm de longitud y 20mm de ancho.

c) Procedimiento

- **Acondicionamiento del material:** Se elige una porción representativa del suelo y se seca en una estufa a una temperatura de 110 ± 5 °C, con el fin de eliminar toda la humedad presente de forma natural.
- **Pulverización y tamizado:** Utilizando un mortero de goma, se tritura cuidadosamente la muestra hasta obtener un material fino y uniforme, sin restos de partículas grandes.

- Adición de agua: Se incorpora agua en pequeñas cantidades (entre 1 y 3 ml), mezclándola con el suelo hasta obtener una consistencia adecuada para cerrar la ranura de la muestra en un rango de 30 a 35 golpes en la copa de Casagrande.
- Creación de la ranura: Con la muestra ya colocada en la cazuela y su superficie nivelada, se utiliza el acanalador para formar una ranura en el centro, dividiendo la mezcla en dos partes iguales.
- Ensayo de cierre: Se levanta la copa de Casagrande de forma repetida hasta que las dos mitades de la muestra se unan en el fondo de la ranura, registrando el número de golpes necesarios para lograrlo.
- Repetición con ajuste de humedad: Si el cierre ocurre con menos de 25 golpes, se añade más agua y se repite el proceso. Este procedimiento se realiza al menos tres veces con distintas cantidades de agua, asegurando que los resultados se encuentren dentro de los rangos aceptables (25–35, 20–30 o 15–25 golpes).
- Determinación del LL: Finalmente, la humedad de la muestra se determina utilizando su pesaje después del secado. Los valores obtenidos en las repeticiones se promedian para establecer el límite líquido del suelo.

d) Fórmulas y cálculos

- El límite de fluidez en función de la humedad del material se evalúa a partir de la siguiente fórmula:

$$LL = W^n \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad LL = kW^n$$

Donde:

N = # de golpes requeridos para cerrar la ranura.

W^n = Contenido de humedad del suelo.

k = Factor normado según la tabla 16.

Tabla 16: Factor “k” según MTC E - 110

N (NUMERO DE GOLPES)	K (FACTOR PARA LÍMITE LÍQUIDO)
20	0,974
21	0,979
22	0,985
23	0,990
24	0,995
25	1,000
26	1,005
27	1,009
28	1,014
29	1,018
30	1,022

e) *Imágenes del proceso de ensayo*

Ilustración 16: Retiro del horno de la muestra representativa



Ilustración 17: Uso del acanalador para formación de ranura

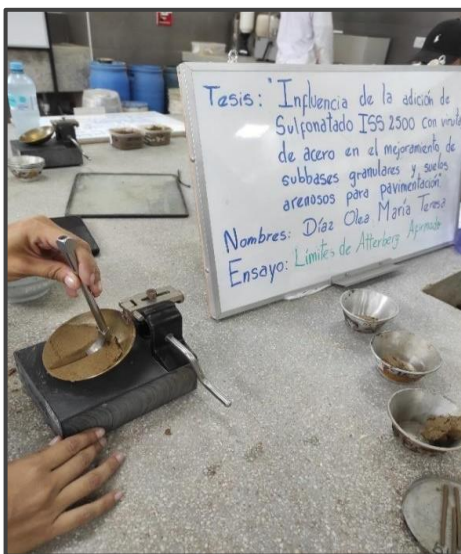
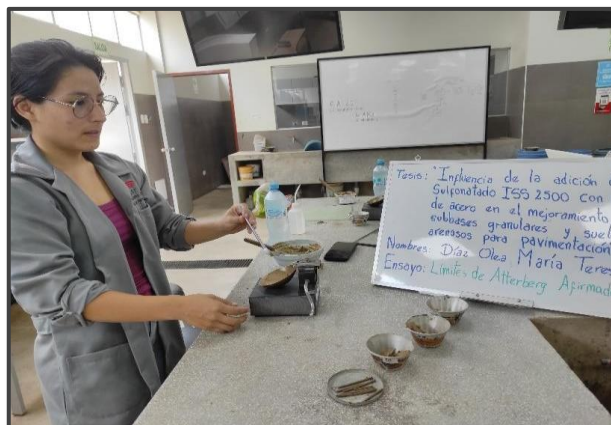


Ilustración 18: Registro de número de golpes necesarios



➤ **Determinación del límite plástico e índice de plasticidad:**

Este ensayo representa el contenido mínimo de agua que el suelo puede retener manteniéndose en un estado plástico. Por su parte, calculado a partir de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, el índice de plasticidad es un parámetro fundamental para la evaluación de la plasticidad del suelo.

a) Normativa de referencia

Evaluación del límite plástico e índice de plasticidad en suelos – MTC E 111

b) Materiales y equipos requeridos

- Equipo de pesaje con exactitud de 0.01g.
- Estufa con temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Tamiz N°40, para garantizar el tamaño adecuado de partículas.
- Superficie de vidrio esmerilado grueso.
- Recipientes para almacenaje o taras.
- Espátula de 75mm de longitud y 20mm de ancho.
- Agua destilada, para asegurar la consistencia plástica del suelo.

c) Procedimiento

- **Preparación del material:** Se elige una porción representativa del suelo previamente seco y se tamiza utilizando el Tamiz N°40, con el fin de obtener únicamente partículas que cumplan con el tamaño requerido para el ensayo.
- **Incorporación de agua:** La muestra tamizada se mezcla cuidadosamente con agua destilada, en pequeñas cantidades, amasando con espátula hasta lograr una consistencia plástica y homogénea.
- **Moldeo de la muestra:** Se toma una parte de la mezcla y se moldea en forma de elipsoide para lograr una distribución homogénea del material.
- **Formación de cilindros:** El elipsoide se rueda de forma manual sobre una superficie lisa hasta formar cilindros que presenta un diámetro de cercano a 3.2 mm (1/8”). Si el cilindro no se desintegra al alcanzar ese grosor, se vuelve a moldear y repetir el proceso hasta que ocurra.
- **Recolección del suelo desintegrado:** Las porciones que se desmoronan se recolectan cuidadosamente en vidrios de reloj, hasta reunir un mínimo de 6 gramos.

- Determinación del contenido de humedad: El material recolectado se analiza para determinar su contenido de humedad, siguiendo los lineamientos de la norma técnica correspondiente.

d) Fórmulas y cálculos

- El límite plástico (LP) se determina mediante la siguiente fórmula:

$$LP = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} \times 100$$

- El índice de plasticidad (IP) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IP = L. \text{Líquido} - L. \text{Plástico}$$

Donde:

LL = Límite líquido.

LP = Límite plástico.

Nota: Ambos valores se expresan como enteros.

e) Imágenes del proceso de ensayo

Ilustración 19: Proceso de tamizado para determinación del LP



Ilustración 20: Amasado con espátula para consistencia requerida



Ilustración 21: Formación de cilindros



➤ **Ensayo de gravedad específica:**

Este ensayo permite determinar la relación entre el peso del suelo seco y el volumen que ocupan sus partículas sólidas, excluyendo vacíos y humedad. Este valor es esencial en estudios geotécnicos porque interviene en el cálculo de parámetros fundamentales como la relación de vacíos, peso unitario seco, porosidad y grado de saturación.

En el caso de materiales de afirmado con una granulometría fina (es decir, cuando más del 50% del material pasa el tamiz N.º 4), se aplica el procedimiento definido en la norma ASTM D854, que utiliza un matraz volumétrico para determinar la gravedad específica mediante el desplazamiento de agua.

a) Normativa de referencia

Método de prueba estándar para gravedad específica de los sólidos del suelo por picnómetro de agua – ASTM D854.

b) Materiales y equipos requeridos

- Balanza con sensibilidad de 0.01g.
- Horno capaz de mantener una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Muestra de agregado grueso previamente preparada y secada según norma.
- Matraz volumétrico de 500ml.
- Agua destilada o desionizada.
- Varilla de vidrio o equipo para desairar.
- Papel toalla o paño absorbente.
- Termómetro.

c) Procedimiento

- Se toma una muestra representativa del afirmado y se seca en estufa a 110 ± 5 °C hasta peso constante. Luego se deja enfriar y se registra la masa del suelo en estado seco (W_s).
- Se introduce el suelo seco dentro del matraz limpio y seco.
- Se agrega agua destilada hasta cubrir el suelo. Posteriormente, se agita con una varilla o se somete a vacío para eliminar las burbujas de aire atrapadas entre las partículas.
- Una vez desairado, se adiciona agua al matraz hasta la línea de aforo (500 ml o la indicada). Se pesa cuidadosamente el matraz con suelo y agua (W_f).
- Finalmente, se llena el matraz únicamente con agua y se pesa (W_w).

d) Fórmulas y cálculos

- La gravedad específica (G_s) se determina mediante la siguiente fórmula:

$$G_s = \frac{W_s}{(W_s + W_w) - W_f}$$

Donde:

W_s = Peso del suelo seco en gramos.

W_w = Peso del matraz con agua en gramos.

W_f = Peso del matraz con suelo seco y agua en gramos.

e) Documentación fotográfica del ensayo

Ilustración 22: Secado de muestra al horno



Ilustración 23: Llenado del matraz con agua destilada

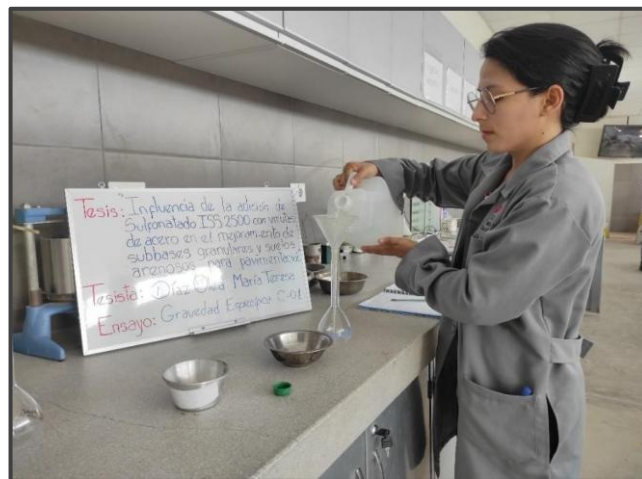


Ilustración 24: Eliminación de burbujas de aire manualmente



➤ **Peso específico y absorción:**

Este ensayo permite conocer características físicas principales de los agregados, incluyendo la densidad relativa y la capacidad de absorción hídrica. Estos valores son claves en el diseño y control de calidad de capas granulares y mezclas como el concreto o el afirmado, ya que inciden en la proporción de materiales, la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad del producto final.

a) Normativa de referencia

Método estándar para el cálculo del peso específico y la capacidad de absorción de agregados gruesos – MTC E 148 - 2017.

b) Materiales y equipos requeridos

- Equipo de pesaje con precisión mínima de 0.1 gramos.
- Horno con temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Recipientes adecuados para sumergir muestras.
- Agua destilada o desionizada.
- Paños o toallas absorbentes.
- Matraz aforado o equipo de desplazamiento de volumen.
- Jeringa o instrumento para eliminar burbujas, si fuera necesario.
- Cesta metálica (para agregados gruesos).

c) Procedimiento

- Se elige una muestra representativa del agregado, asegurando que esté libre de impurezas y con la granulometría adecuada.
- La muestra se seca completamente en horno de secado a 110 ± 5 °C hasta que el peso sea constante.
- Una vez seca, la muestra se enfría a condiciones de ambiente. y se pesa para obtener su masa en estado seco.
- La muestra seca se sumerge completamente en agua a temperatura ambiente durante un período de 24 ± 4 horas para permitir su saturación total.
- Transcurrido el período de inmersión, Se realiza la extracción de la muestra del agua, se deja escurrir y se seca cuidadosamente la superficie con un paño absorbente hasta eliminar el exceso de humedad visible, sin extraer el agua interna.
- Se pesa nuevamente la muestra, registrando su masa en condición saturada superficialmente seca. Posteriormente, se determina el volumen de la muestra

mediante el desplazamiento de agua o utilizando un matraz volumétrico, dependiendo del tipo de agregado.

- Finalmente, con los valores obtenidos se procede a la obtención del peso específico y el contenido de absorción utilizando de referencia las fórmulas establecidas por la norma.

d) Fórmulas y cálculos

- El peso específico se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{W_s}{V}$$

- El contenido de absorción se evalúa a través la siguiente ecuación:

$$\%Abs = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} \times 100$$

Donde:

W_s = Peso del agregado en condiciones secas.

W_{sss} = Peso del agregado en condición saturada y superficialmente seca.

V = Volumen ocupado por la muestra

e) Imágenes del proceso de ensayo

Ilustración 25: Ingreso de la muestra de afirmado al horno



Ilustración 26: *Proceso de saturación de la muestra*



➤ **Ensayo de caras fracturadas:**

Este ensayo evalúa el porcentaje de partículas de agregado grueso con una o más caras fracturadas según los requisitos establecidos en la norma técnica. Una cara fracturada se considera tal si al menos el 25% de su superficie muestra una fractura obtenida por trituración y no por desgaste natural.

a) Normativa de referencia

Procedimiento de ensayo para la evaluación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado – MTC E 210.

b) Materiales y equipos requeridos

- Equipo de pesaje con precisión mínima de 0.01g.
- Recipientes metálicos para contener las muestras.
- Microscopio de inspección, para identificar fracturas en las partículas.
- Calibrados Vernier, para medir las partículas y verificar que cumplan con los límites establecidos en la normativa.
- Plantillas de medición, para definir las dimensiones de las partículas.
- Muestras de agregado grueso de acuerdo con la normativa (Usualmente agregados mayores a 4.75mm o en su defecto que pasen el tamiz N°04).

c) Procedimiento

- Se lleva a cabo el secado de la muestra en estufa a 110 ± 5 °C y luego se separa en fracciones granulométricas conforme a los tamaños establecidos por la norma.
- De cada fracción se seleccionan partículas, asegurando que cumplan con las dimensiones requeridas. Cada partícula es evaluada para determinar la presencia de una, ninguna o múltiples caras fracturadas.
- Las partículas se agrupan en tres categorías: sin caras fracturadas, con una sola superficie fracturada y con dos o más superficies fracturadas.
- Se pesa cada grupo por separado utilizando una balanza de precisión, registrando los valores correspondientes como P1, P2 y Pt.
- Con los datos obtenidos se aplican las fórmulas establecidas para cuantificar la proporción de partículas con una o más superficies fracturadas.
- Este procedimiento se repite con al menos dos muestras representativas, obteniendo como resultado final el valor promedio de las mediciones.

d) Fórmulas y cálculos

- La fracción porcentual de partículas con superficies fracturadas se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de caras fracturadas (una cara)} = \frac{P_1}{P_T} \times 100$$

$$\% \text{ de caras fracturadas (dos caras)} = \frac{P_2}{P_T} \times 100$$

e) Imágenes del proceso de ensayo

Ilustración 27: Evaluación de partículas con caras fracturadas



➤ **Ensayo de partículas chatas y alargadas:**

Este ensayo tiene como objetivo, determinar el porcentaje de partículas con formas no cúbicas en una muestra de agregado grueso. Este ensayo es fundamental porque las partículas con estas características pueden afectar negativamente la trabajabilidad, durabilidad y desempeño resistente de las mezclas de concreto y asfaltos.

a) Normativa de referencia

Determinación de la forma de partículas en agregados – MTC E 223.

b) Materiales y equipos requeridos

- Balanza con exactitud de 0.1g.
- Horno capaz de mantener una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
- Recipientes para contener las fracciones del agregado separadas por tamaño.
- Espátula y brocha.
- Tamices para separar los agregados en fracciones granulométricas.
- Calibrador de partículas laminares y alargadas.
- Muestra de material granular grueso obtenido de acuerdo con normativa.

c) Procedimiento

- La muestra se lleva a secado en horno a 110 ± 5 °C y se procede a su pesaje una cantidad representativa de acuerdo con el tamaño requerido por la granulometría.
- Luego, se clasifica la muestra mediante tamices estándar, separándola en fracciones granulométricas y registrando el peso de cada una por separado.

- En cada fracción, las partículas se evalúan individualmente con el calibrador para identificar aquellas cuya relación entre longitud y espesor supere el valor establecido (mayor a 5:1), considerándolas como partículas chatas o alargadas.
- Las partículas que cumplen con este criterio se aíslan y se pesan por separado para cada fracción.
- Finalmente, se suman los pesos de todas las partículas no conformes y se calcula el porcentaje total de partículas chatas y alargadas aplicando la fórmula correspondiente.

d) Fórmulas y cálculos

- El cálculo del índice de fragmentos planos y alargados se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Índice} = \frac{\text{Peso total de partículas chatas y alargadas (g)}}{\text{Peso total de la muestra (g)}} \times 100$$

e) Imágenes del proceso de ensayo

Ilustración 28: Clasificación de partículas chatas y alargadas



➤ Prueba de equivalente de arena:

El objetivo principal de este ensayo es determinar el porcentaje relativo de material fino (arcillas y limos) presente en un suelo granular o en agregados finos. Este índice es utilizado para analizar la calidad del material en base a su limpieza y contenido de material fino. Un valor elevado de equivalente de arena indica un material más limpio y de mejor calidad para ser utilizado en bases, subbases y mezclas asfálticas.

a) Normativa de referencia

Método de ensayo estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregado fino – MTC E 114, teniendo como referencia la EG - 2000.

b) Materiales y equipos requeridos

- Cilindro graduado con capacidad de 1000 ml, graduado en incrementos de 1 ml, con una escala doble para lecturas de nivel superior e inferior.
- Agitador manual o mecánico para homogenizar la mezcla de la muestra con la solución.

- Solución de trabajo compuesta por agua destilada, hidróxido de calcio y glicerina
- Embudo de llenado para introducir la solución al cilindro.
- Pipeta dosificadora para medir la solución.
- Regla metálica.
- Cronómetro.
- Mezcla de agua destilada, glicerina e hidróxido de calcio.
- Muestra representativa del suelo o agregado fino, previamente tamizado por el tamiz N°04.

c) Procedimiento

- Primero secamos la muestra al aire libre y luego se tamiza mediante el tamiz N.º 4 para obtener el material fino requerido.
- Se llena un cilindro graduado con 4 pulgadas de solución de agua desionizada, utilizando un embudo y una pipeta dosificadora.
- Luego, el cilindro se coloca en el agitador y se agita durante 30 segundos para asegurar una suspensión homogénea.
- Una vez agitado, se deja reposar el cilindro durante 20 minutos sobre una superficie estable y sin vibraciones.
- Transcurrido el tiempo de sedimentación, se toman dos lecturas: la altura de la arena depositada (H_1) y la altura total de sedimento (H_2).
- Se calcula el valor equivalente de arena (EA) utilizando la ecuación correspondiente y se registra el resultado.

d) Fórmulas y cálculos

- El cálculo del equivalente de arena (EA) se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$EA = \frac{H_1}{H_2} \times 100$$

Donde:

H_1 = Altura del sedimento de arena en el cilindro (mm).

H_2 = Altura total del material sedimentado (arena + finos) en el cilindro (mm).

e) *Imágenes del proceso de ensayo*

Ilustración 29: Llenado con agua desionizada



Ilustración 30: Muestra de afirmado en cilindro



➤ **Ensayo de Abrasión:**

Este ensayo mide la capacidad de los agregados de presentar resistencia al desgaste y al deterioro causada por la abrasión mecánica y el impacto. Se realiza utilizando una máquina de los ángeles, que simula las condiciones de abrasión e impacto mediante la rotación de un tambor con agregados y bolas de acero. El resultado se expresa como un porcentaje de pérdida de masa, conocido como el índice de abrasión o pérdida por abrasión.

a) *Normativa de referencia*

Resistencia al desgaste de agregados por la máquina de los Ángeles – MTC E 207.

b) Materiales y equipos requeridos

- Máquina de los Ángeles; compuesta de un tambor rotatorio de acero con dimensiones y características específicas
- Bolas de acero que actúan como agentes abrasivos.
- Tamices normados para clasificar los agregados antes y después del ensayo.
- Balanza con exactitud de 0.1g.
- Estufa de secado con control de temperatura a 110 ± 5 °C.
- Recipientes metálicos para el pesaje de los agregados.

c) Procedimiento

- Primero se procedió al secado de los agregados en un horno a una temperatura de 105 ± 5 °C.
- Luego, seleccionamos una cantidad representativa del material.
- Ahora se procede a colocar los agregados dentro del tambor rotatorio del dispositivo de ensayo de desgaste Los Ángeles.
- Añadimos al equipo de los Ángeles la cantidad de esferas aceradas indicado en la normativa, de acuerdo con el tamaño del agregado.
- Configuramos la máquina para que realice 500 revoluciones a una velocidad de 30-33 rpm.
- Retiramos cuidadosamente el material del tambor.
- Ahora introducimos el material a través de un tamiz N°12 para separar las partículas finas generadas durante el ensayo.
- A continuación, pesamos el material que quedó fracción retenida en el tamiz N°12.
- Finalmente, calculamos el nivel porcentual de pérdida por abrasión utilizando la fórmula establecida.

d) Fórmulas y cálculos

- La fórmula para determinar la pérdida por abrasión es la siguiente:

$$\%_{\text{Pérdida por abrasión}} = \frac{(M_0 - M_f)}{M_0} \times 100$$

Donde:

M_0 = Masa inicial gr.

M_f = Masa final gr.

e) *Documentación fotográfica del ensayo*

Ilustración 31: Colocación de la muestra dentro del tambor rotatorio



Ilustración 32: Esferas de Acero



✓ **Ensayos químicos realizados al suelo y la subbase granular**

➤ **Ensayo de sales, cloruros y sulfatos:**

Este ensayo busca medir la cantidad de estos compuestos en una muestra determinada, garantizando que los materiales empleados en obras de construcción cumplan con los límites establecidos por las normas técnicas. Los resultados permiten evaluar la calidad de los materiales y prevenir problemas como la corrosión de refuerzos o la pérdida de resistencia en elementos estructurales.

Ilustración 33: Retiro de material



a) Normativa de referencia

Método de ensayo para determinar sales solubles en agregados para pavimentos flexibles – MTC E 219.

b) Materiales y equipos requeridos

- Balanza con un nivel de exactitud de 0.1 g.
- Horno de secado capaz de mantener condiciones térmicas constantes a 110 ± 5 °C.
- Reactivos químicos: Nitrato de plata (AgNO_3), Sulfato de bario (BaSO_4) y fenolftaleína o dicromato de potasio.
- Matraces aforados.
- Vasos de precipitado.
- Pipetas y probetas graduadas.
- Papel filtro.

- Embudos.
- Cucharas y espátulas para manipular las muestras.
- Agua destilada para preparar soluciones y diluir muestras.
- Muestras de material a usar como suelo y agregados finos o gruesos.

c) *Procedimiento*

- Secado y tamizado del material: Secamos la muestra de suelo introduciéndola en la estufa a una temperatura de entre 105 y 110 °C de tal forma que logre un peso constante. Posteriormente, se pulveriza si es necesario y se tamiza conforme al número de malla indicado por la norma técnica aplicable.
- Preparación del extracto acuoso: Se mezcla una cantidad específica de suelo con agua destilada en la proporción establecida por la normativa. La mezcla se agita durante un tiempo determinado para asegurar la extracción adecuada de los solutos.
- Filtración del extracto: La solución se filtra para separar la fase sólida de la líquida, recolectando el filtrado en un matraz aforado para su posterior análisis.
- Análisis de cloruros: Se toma una porción (alícuota) del líquido filtrado, se añade un indicador químico apropiado y se valora con una solución de nitrato de plata (AgNO_3) hasta evidenciar un cambio de color que indique el punto final de la reacción.
- Análisis de sulfatos: En otra alícuota del filtrado, se ajusta el pH con ácido clorhídrico y se agrega cloruro de bario (BaCl_2) para precipitar los sulfatos en forma de sulfato de bario (BaSO_4). El precipitado se filtra, luego se seca y por último se pesa para su cuantificación.
- Cálculo de resultados: Finalmente, se aplican las fórmulas establecidas por la normativa para determinar las concentraciones de cloruros y sulfatos presentes en la muestra de suelo.

d) *Fórmulas y cálculos*

- El contenido de cloruros (ppm o %) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\%_{\text{cloruros}} = \frac{N \times V \times E_q}{P} \times F$$

- El contenido de sulfatos (ppm o %) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\%_{sulfatos} = \frac{P_p}{P_m} \times F$$

Donde:

N = Concentración normal del nitrato de plata

V = Volumen consumido de AgNO_3 (ml).

P = P. seco del espécimen en gr.

F = Factor de conversión.

E_q = Equivalente químico de cloruro (35.45 g/mol).

P_p = Peso del precipitado en gr.

P_m = P. del recipiente en gr.

e) *Imágenes del proceso de ensayo*

Ilustración 34: Preparación del extracto acuoso



Ilustración 35: Nitrato de plata - AgNO₃



Fuente: Qingdao Sincero Chemical - Distribuidor

✓ *Ensayos para determinar el valor máximo de densidad seca y humedad de compactación óptima y CBR*

➤ *Ensayo de Proctor Modificado:*

El objetivo de este ensayo es, obtener la densidad seca máxima del suelo y su humedad óptima mediante un proceso estandarizado de compactación. Este procedimiento consiste en compactar una muestra de suelo dentro de un molde utilizando un pisón mecánico que cae desde una altura específica, aplicando 56 golpes por capa en 5 capas. Se trata de un método esencial para determinar la capacidad de carga del suelo en proyectos de construcción y garantizar su estabilidad.

a) *Normativa de referencia*

Compactación de suelos utilizando una energía modificada (Proctor) – MTC E 115.

b) Materiales y equipos requeridos

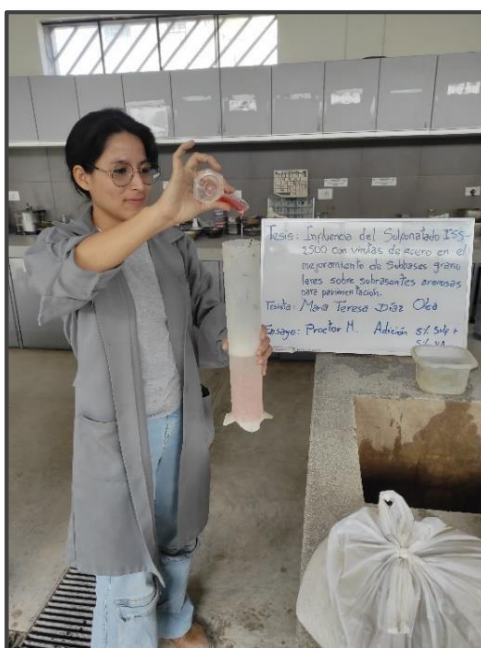
- Recipiente con accesorios. Cada molde debe incluir un collar de ensamblaje (con al menos 2 pulgadas de altura para facilitar la compactación) y una base.
- Moldes de 4 pulgadas.
- Pisón manual o mecánico equipado con una grúa que permita movimientos libres y sin restricciones para asegurar una compactación uniforme.
- Tamiz N°04; utilizado para filtrar suelos finos y eliminar partículas de mayor tamaño.

c) Procedimiento

- Preparación de la muestra: Se selecciona una muestra representativa de suelo, eliminando partículas grandes mediante el tamiz N°04. Luego, la muestra se seca en estufa a 110 ± 5 °C para la eliminación de la humedad contenida en el material.
- Ajuste de humedad: Se pesa el material seco y se mezcla gradualmente con agua destilada, añadiendo pequeñas cantidades mientras se amasa de forma uniforme. El objetivo de este proceso es alcanzar una humedad óptima de compactación, que será determinada en el ensayo.
- Preparación del molde: Se selecciona un molde cilíndrico metálico e introducimos la muestra del suelo en capas de aproximadamente 5cm de espesor.
- Compactación del suelo: Cada capa se compacta aplicando un número de golpes predeterminado, generalmente 56 golpes (energía estándar) y 12 golpes por capa (energía reducida), utilizando un compactador modificado con un martillo de 4.5kg desde 45cm de altura.
- Número de capas y extracción: El procedimiento de compactación se llevó a cabo en cinco capas, asegurando que cada una se adecúe a los parámetros fijados en la norma. Tras la compactación, el suelo se extrae cuidadosamente del recipiente para la evaluación de la densidad y la humedad del material.
- Registro y análisis de datos: Finalmente, se registran los datos obtenidos, incluyendo la masa total, densidad húmeda, porcentaje de humedad y densidad en estado seco. Se determina la máxima densidad seca y la óptima humedad de compactación, valores clave para interpretar el comportamiento del suelo.

- Además, se realizó el ensayo Proctor Modificado sobre el suelo de la Calicata 03, seleccionado por clasificarse según el sistema AASHTO como un suelo tipo A-2-4, correspondiente a una arena limosa con grava. En esta etapa se trabajó con cuatro combinaciones experimentales: 5% ISS 2500 + 5% viruta, 5% ISS 2500 + 10% viruta, 10% ISS 2500 + 5% viruta y 10% ISS 2500 + 10% viruta. Para cada mezcla se elaboraron 3 especímenes, permitiendo determinar los valores de máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad.

Ilustración 36: Combinación de las cuatro adiciones indicadas



d) Fórmulas y cálculos

- La densidad en estado húmedo y seca del material mediante la siguiente ecuación, se calcula:

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_m)}{V} \times 1000$$

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

Donde:

ρ_m = Densidad húmeda del suelo compactado (mg/m³).

M_t = Masa total del suelo húmedo y el molde (kg).

M_m = Masa del molde vacío (kg).

V = Volumen del molde de compactación (m³).

ρ_d = Densidad seca del suelo compactado (mg/m³).

W = Contenido de agua (%).

e) *Imágenes del proceso de ensayo*

Ilustración 37: Introducción del suelo natural al molde



Ilustración 38: Compactación de las muestras



➤ **Ensayo de CBR:**

El procedimiento de ensayo del índice CBR evalúa de manera indirecta la resistencia del suelo a la penetración, un parámetro clave en el diseño de pavimentos y otros proyectos de infraestructura. La prueba consiste en compactar una muestra de suelo

bajo condiciones controladas de densidad y humedad, seguido de la aplicación de una carga a través de un pistón. Posteriormente, se mide la penetración del pistón en el suelo y se calcula el índice CBR, expresado como un porcentaje en comparación con un material estándar de referencia.

a) Normativa de referencia

Ensayo CBR de suelos en laboratorio según la norma MTC E 13

b) Materiales y equipos requeridos

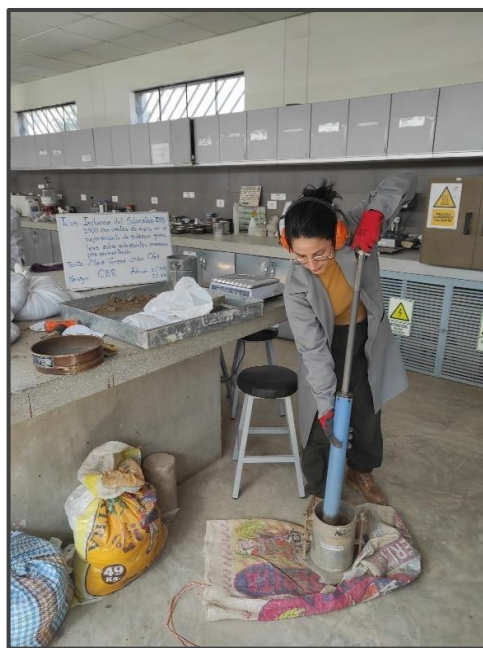
- Equipo de carga de penetración: Equipo utilizado para aplicar la carga al pisón y medir la resistencia del suelo.
- Molde cilíndrico metálico; para contener la muestra del suelo compactado.
- Disco espaciador metálico; para asegurar una distribución uniforme de la carga durante la prueba.
- Pistón de penetración; para medir la resistencia del suelo a la penetración.
- Pesas estándar con una masa de 4.54 ± 0.02 kg; utilizadas para ejercer presión de manera uniforme.
- Tamiz N°04; utilizado para eliminar partículas gruesas y preparar una muestra uniforme de suelo fino.

c) Procedimiento

- Selección y preparación de la muestra: Se selecciona una muestra representativa de suelo a ensayar, asegurándose de eliminar partículas grandes con ayuda del tamiz N°04. Luego, la muestra puede ser evaluada tal como se encuentra en su estado natural o compactada en el laboratorio para alcanzar una densidad y nivel de humedad del material específicos.
- Compactación en el molde: El material se introduce en un molde metálico con dimensiones estándar (152.4 mm de diámetro interno y aproximadamente 178 mm de altura), para luego proceder con la consolidación del material en capas uniformes, siguiendo el total de golpes aplicados indicado en la norma para obtener la densidad requerida. Tras compactar todas las capas, las superficies superior e inferior del suelo se nivelan cuidadosamente.
- Aplicación de confinamiento: Sobre la superficie del suelo compactado se coloca un anillo metálico. A continuación, se aplica un peso estándar de 4.54 kg para simular las condiciones de confinamiento durante el ensayo.

- Saturación de la muestra: En caso de que el ensayo requiera condiciones saturadas, el espécimen compactado dentro del molde se sumerge en agua durante 96 horas. Durante este período, se mide cualquier expansión del suelo, lo que permite calcular el índice de hinchamiento.
 - Montaje en la máquina de ensayo: El molde preparado se coloca en la máquina de ensayo CBR. Se posiciona una placa metálica sobre la muestra y se ajusta el pistón encargado de aplicar la carga. Durante el ensayo, se registran las cargas necesarias para alcanzar penetraciones específicas: 0.625mm, 1.25mm, 2.5mm, 5mm, 7.5mm y 10mm.
 - Cálculo del índice CBR: A partir de las lecturas obtenidas, se calcula el índice CBR para cada profundidad de penetración. El resultado final del ensayo se define como el valor más alto registrado entre todas las penetraciones.
- ✚ De igual manera, se ejecutó el ensayo CBR sobre el suelo de la Calicata 03, clasificado como suelo tipo A-2-4 (arena limosa con grava) según el sistema AASHTO. Para este análisis se trabajó con cuatro combinaciones experimentales de estabilización: 5% ISS 2500 + 5% viruta, 5% ISS 2500 + 10% viruta, 10% ISS 2500 + 5% viruta y 10% ISS 2500 + 10% viruta. En total, se realizaron 15 ensayos CBR por cada combinación, sumando 60 ensayos que permitieron evaluar la mejora en la resistencia de carga de subrasante tratada.

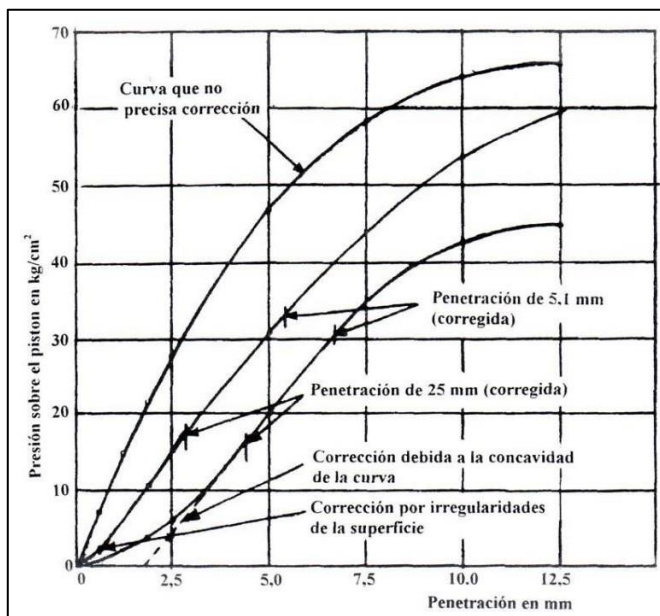
Ilustración 39: CBR del suelo experimental



d) Fórmulas y cálculos

Se traza una curva que relaciona las presiones con las penetraciones para analizar su comportamiento. Si la curva no muestra un punto de inflexión, se consideran los valores correspondientes a penetraciones de 2.54 mm y 5.08 mm. En caso de que la

Ilustración 40: Gráfica utilizada para determinación del CBR . Será necesario realizar las correcciones indicadas en la norma correspondiente



Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones

e) Imágenes del proceso de ensayo

Ilustración 41: Ensayo CBR al suelo natural



Ilustración 42: CBR - Penetración



✓ **Ensayos a las muestras con la dosis óptima**

➤ **Ensayo de Permeabilidad:**

Mediante el ensayo de carga constante se obtiene el coeficiente de permeabilidad (k) de suelos granulares como arenas y gravas. Se fundamenta en la Ley de Darcy, que establece que el caudal de agua que atraviesa un suelo poroso es proporcional al gradiente hidráulico y al área de flujo. Este método se aplica cuando el suelo presenta alta conductividad hidráulica ($k > 10^{-3}$ cm/s).

Tiene como objetivo, evaluar la capacidad del suelo para conducir agua bajo una carga hidráulica constante, identificando su comportamiento drenante y su influencia en obras civiles.

Normativa de referencia

ASTM D2434, AASHTO T 215 y NTP 339.147 Método de Ensayo de Permeabilidad de suelos granulares (carga constante).

a) Materiales y equipos requeridos

- Permeámetro de carga constante
- Cilindro graduado
- Cronómetro
- Manómetro
- Termómetro
- Balanza y moldes para muestra
- Agua, compactador y muestra de suelo.

b) Procedimiento

- Preparar el material secándolo y tamizándolo, eliminando las partículas que excedan el tamaño máximo permitido por el molde.
- Colocar la muestra en el cilindro del permeámetro, compactándola por capas uniformes hasta alcanzar la densidad establecida.
- Saturar completamente la muestra haciendo circular agua lentamente desde la parte inferior, eliminando el aire atrapado.
- Conectar el sistema de flujo de ingreso y egreso de agua, junto con los tubos piezométricos o manómetros para medir la diferencia de carga hidráulica.
- Ajustar la altura del depósito de agua para mantener constante la diferencia de carga entre los extremos del permeámetro.

- Iniciar el ensayo permitiendo el régimen de flujo continuo del tránsito de agua a través del espécimen y recoger el volumen que descarga en un cilindro graduado durante un tiempo medido.
- Repetir las mediciones de volumen y tiempo al menos tres veces, verificando que las condiciones de carga y temperatura permanezcan estables.
- Registrar todos los datos obtenidos, incluyendo el volumen de agua, el tiempo de flujo, la diferencia de carga, las dimensiones del espécimen y la temperatura del agua.

c) Fórmulas y cálculos

- El valor del coeficiente de permeabilidad se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Q \times L}{A \times H \times T}$$

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad (m/s).

Q = Volumen de agua que pasa (m³).

L = Longitud del espécimen (m).

A = Área de sección transversal de la muestra (m²).

H = Altura de la columna de agua (m).

T = Tiempo de medición (s).

d) Imágenes del proceso de ensayo

Ilustración 43: Ensayo de permeabilidad



✓ **Ensayos adicionales**

➤ **Límites de Atterberg con adición 5% y 10% de ISS2500 para la subrasante:**

Se ejecutaron pruebas para determinar la consistencia del suelo en estado fluido y plástico natural, incorporando adiciones del 5% y 10% de ISS 2500. En la evaluación de la consistencia en estado fluido, se empleó el dispositivo de Casagrande, mientras que en la evaluación de la plasticidad del suelo, se elaboraron hilos delgados hasta que se fisuraron. Con los valores correspondientes a ambos análisis se determinó el índice de plasticidad, permitiendo observar el efecto del sulfonato en la consistencia del suelo tratado.

Ilustración 44: Ensayo Límites de Atterberg



➤ **Límites de Atterberg con adición 5% y 10% de ISS2500 para subbase granular:**

Se efectuaron los ensayos para determinar los valores de fluidez y plasticidad del afirmado, incorporando una adición del 5% y 10% de sulfonato ISS 2500.

Ilustración 45: Límite plástico



Resultados y discusión

Los resultados de la presente investigación se obtuvieron a partir de la ejecución de diversos ensayos de laboratorio, los cuales fueron diseñados para determinar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de subbase granular (material afirmado) y del suelo natural correspondiente a la subrasante arenosa, tanto en su condición original como con la incorporación del aditivo sulfonato ISS 2500 y virutas de acero. Dichos ensayos proporcionaron información relevante para la clasificación de los suelos mediante los sistemas SUCS y AASHTO, además de permitir evaluar el impacto generado por ambos materiales estabilizantes en el comportamiento de las subbases y subrasantes mejoradas. Asimismo, se analizó la capacidad portante del suelo con el objetivo de determinar el grado de mejora alcanzado y la influencia de la combinación del aditivo con virutas de acero en el incremento de la resistencia de la subrasante, dentro del contexto de su aplicación en estructuras de pavimento. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, los cuales permitieron alcanzar los objetivos planteados en la presente investigación.

○ Resultados de caracterización para muestras de suelo y afirmado

✓ *Características físicas y químicas de la subrasante (suelo):*

➤ Contenido de Humedad

A continuación, se exponen los resultados de las muestras obtenidas en cada calicata, los cuales muestran una variación moderada, siendo el mayor porcentaje de humedad

el registrado en la muestra de la Calicata N°01, con 7.29%, mientras que la menor humedad corresponde a la Calicata N°03, con 2.80%.

Tabla 17: Humedad en porcentaje correspondiente a las calicatas C-01, C-02 y C-03

Calicata	P. Recipiente (g)	Recipiente + MH (g)	Recipiente + MS (g)	% Humedad
C - 01	223	5000	4680	7.29 %
C - 02	345	5680	5405	5.44 %
C - 03	227	5000	4870	2.80 %

Los valores obtenidos en la tabla reflejan condiciones relativamente secas del terreno al momento del muestreo, lo cual es característico de los suelos de naturaleza arenosa y reducida retención de humedad. Esta información es relevante para definir la energía de compactación y ajustar el óptimo contenido de humedad en los ensayos de Proctor y CBR que serán efectuados posteriormente.

➤ **Granulometría por tamizado**

El estudio granulométrico permite identificar la distribución de partículas en suelos naturales y su respuesta como material de subrasante en pavimentos.

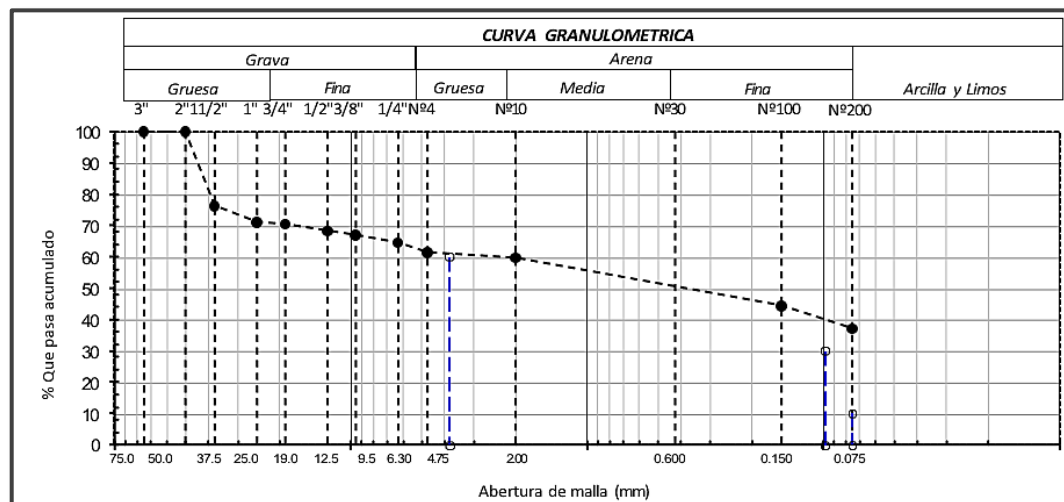
○ **Para el análisis de C1:**

Tabla 18: Ensayo granulométrico por cribas en C1

Cribas		P. Ret. (g)	% Ret. Parcial	% Ret. Acum.	% que pasa
Pulg.	mm				
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0
2 1/2"	63.000	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	50.000	0.00	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	37.500	1115.30	23.8	23.8	76.2
1"	25.000	239.40	5.1	28.9	71.1
3/4"	19.000	32.79	0.7	29.6	70.4
1/2"	12.500	94.93	2.0	31.6	68.4
3/8"	9.500	71.53	1.5	33.1	66.9
1/4"	6.300	105.94	2.3	35.4	64.6
Nº4	4.750	142.93	3.1	38.5	61.5
Nº10	2.360	14.55	1.8	40.3	59.7
Nº20	1.180	24.33	3.0	43.3	56.7
N40	0.600	19.87	2.4	45.7	54.3
Nº50	0.300	11.74	1.4	47.2	52.8
Nº100	0.150	68.80	8.5	55.6	44.4

Nº200	0.075	59.43	7.3	62.9	37.1
< N.º 200	FONDO	301.28	37.1	100.0	0.0

Ilustración 46: Curva granulométrica para Calicata C – 01



La calicata C-1 evidencia un contenido de finos de 37.1% pasantes del tamiz N°200, superior al 35% permitido en algunas normativas para subrasantes sin tratamiento, pudiendo esto influir negativamente en la capacidad de drenaje y resistencia ante humedad. Por otro lado, la proporción significativa de partículas gruesas (mayores a 4.75 mm) indica una granulometría bien graduada en su parte superior, pero los altos finos pueden reducir la capacidad portante y aumentar la plasticidad, especialmente si estos presentan alta actividad.

o Para el análisis de C2:

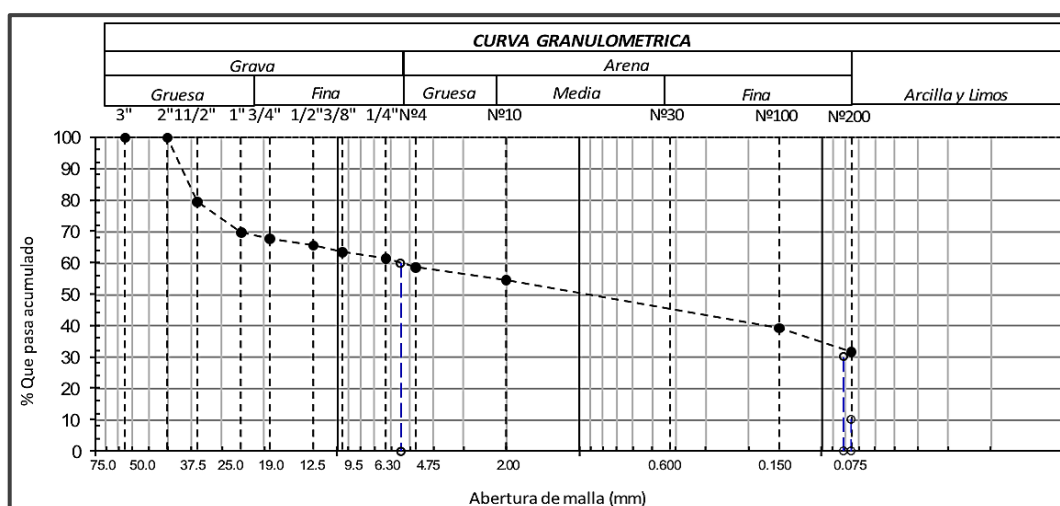
Tabla 19: Ensayo granulométrico por cribas en C2

Cribas		P. Ret. (g)	% Ret. Parcial	% Ret. Acum.	% que pasa
Pulg.	mm				
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0
2 1/2"	63.000	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	50.000	0.00	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	37.500	958.60	20.5	20.5	79.5
1"	25.000	452.60	9.7	30.2	69.8
3/4"	19.000	95.60	2.0	32.2	67.8
1/2"	12.500	102.30	2.2	34.4	65.6
3/8"	9.500	86.90	1.9	36.3	63.7
1/4"	6.300	112.50	2.4	38.7	61.3
Nº4	4.750	115.60	2.5	41.2	58.8
Nº10	2.360	36.50	4.3	45.5	54.5

Nº20	1.180	42.50	5.0	50.5	49.5
N40	0.600	26.30	3.1	53.6	46.4
Nº50	0.300	18.90	2.2	55.8	44.2
Nº100	0.150	42.50	5.0	60.8	39.2
Nº200	0.075	63.50	7.5	68.3	31.7
< N.º 200	FONDO	269.80	31.7	100.0	0.0

Se observa que la Calicata C-2 contiene 31.7% de finos que atraviesan el tamiz N°200, lo cual se mantiene por debajo del 35% permitido por algunas normativas para suelos usados como subrasante sin tratamiento. Esto indica una aceptable capacidad de drenaje y menor riesgo de retención de humedad en comparación con suelos más finos. Además, el porcentaje de partículas gruesas hasta el tamiz N°4 (41.2 %) revela una distribución granulométrica razonablemente equilibrada, lo que favorece una mejor compactación.

Ilustración 47: Curva granulométrica para Calicata C – 02



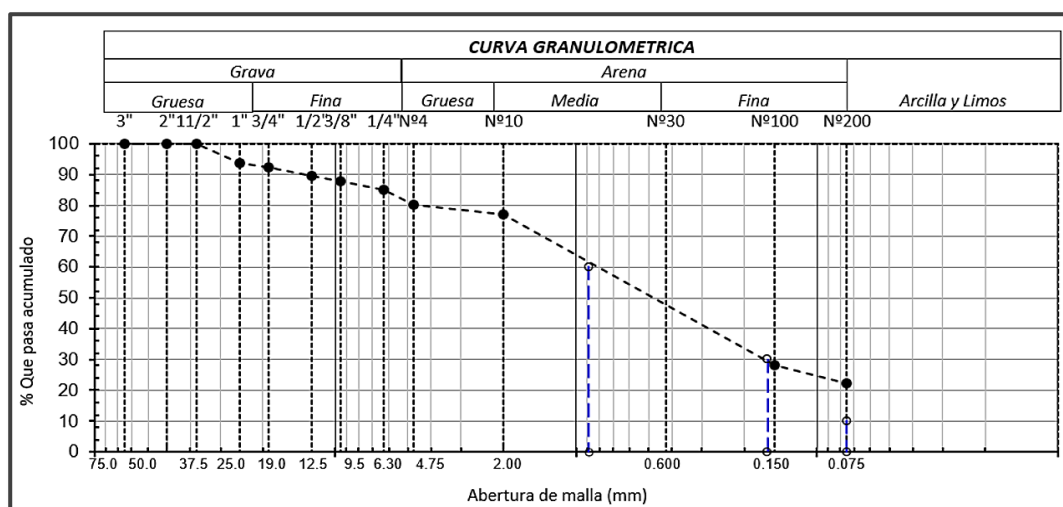
o Para el análisis de C3:

Tabla 20: Ensayo granulométrico por cribas en C3

Cribas		P. Ret. (g)	% Ret. Parcial	% Ret. Acum.	% que pasa
Pulg.	mm				
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0
2 1/2"	63.000	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	50.000	0.00	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	37.500	0.00	0.0	0.0	100.0
1"	25.000	307.80	6.3	6.3	93.7
3/4"	19.000	61.34	1.3	7.6	92.4

1/2"	12.500	129.38	2.7	10.3	89.7
3/8"	9.500	91.40	1.9	12.2	87.8
1/4"	6.300	136.46	2.8	15.0	85.0
Nº4	4.750	229.97	4.7	19.7	80.3
Nº10	2.360	19.74	3.2	22.9	77.1
Nº20	1.180	76.14	12.2	35.1	64.9
N40	0.600	71.64	11.5	46.6	53.4
Nº50	0.300	28.57	4.6	51.2	48.8
Nº100	0.150	128.92	20.7	71.9	28.1
Nº200	0.075	37.25	6.0	77.9	22.1
< N.º 200	FONDO	137.74	22.1	100.0	0.0

Ilustración 48: Curva granulométrica para Calicata C – 03



La calicata C-3 evidencia un contenido de finos del 22.1% pasante por el tamiz N°200, valor aceptable para subrasantes según varias normativas. Su distribución granulométrica muestra una buena proporción de arenas medias y finas, y un 46.6 % retenido hasta el tamiz N°40, lo que indica una estructura interna estable que favorece su desempeño mecánico. Este tipo de suelo arenoso, con bajo contenido de finos plásticos, es adecuado para aplicar mejoras como el sulfonato ISS 2500 y viruta de acero calcinada, como se propone en esta investigación.

➤ **Límites de Atterberg**

Según la Tabla N°21, se observa que la muestra correspondiente a la Calicata C-2 presenta el mayor índice de plasticidad, con un valor de 18% lo cual sugiere un suelo con mayor actividad plástica, mientras que la Calicata C-3 arroja un IP de solo 9.88%. Este valor —por debajo del 10 %— indica una escasa plasticidad, característica típica de suelos con bajo contenido de finos arcillosos, lo que sugiere un comportamiento propio de un suelo arenoso. No obstante, para confirmar esta clasificación es imprescindible complementar el análisis con la curva de granulometría.

Tabla 21 Límites de Atterberg (LL, LP e IP) para las calicatas C-01, C-02 y C-03

Calicata	LL (%)	LP (%)	IP (%)
C1	34.90	22.22	12.68
C2	37.40	19.40	18.00
C3	34.88	25.00	9.88

➤ **Gravedad específica**

Se ejecutó el ensayo de gravedad específica de sólidos (Gs) al material fino (pasante del tamiz N.º04) proveniente de las calicatas C-01, C-02 y C-03, siguiendo la norma NTP 339.131 / ASTM D854 utilizando el método del frasco de Le Chatelier, que permite relacionar el peso de los sólidos del suelo con el peso de un volumen equivalente de agua destilada, siendo clave para los cálculos de compactación, el diseño volumétrico y la comprobación de densidades.

Los valores obtenidos para cada muestra fueron los siguientes:

- Calicata C – 01: 2.62 g/cm³
- Calicata C – 02: 2.72 g/cm³
- Calicata C – 03: 2.64 g/cm³

Tabla 22: Gravedad específica para calicatas C-01, C-02 y C-03

Calicata	Peso de fiola (g)	Peso suelo seco (g)	Peso fiola + suelo + agua (g)	Peso fiola + agua (g)	Gravedad específica (g/cm ³)
C – 01	94.30	50	366.93	336.04	2.616
C – 02	88.45	50	361.78	330.15	2.722
C - 03	89.60	50	371.02	339.95	2.641

Estos resultados se encuentran dentro del rango típico para materiales granulares con predominancia mineral (como arenas silíceas), y reflejan una composición estable sin

indicios de presencia significativa de materia orgánica. Al tratarse de suelos distintos, no se ha considerado un valor promedio, ya que cada resultado representa las características particulares de cada calicata.

➤ **Clasificación mediante sistema AASHTO y SUCS**

“Para la clasificación de los suelos en función a su desempeño como subrasante en pavimentos, se aplicaron los sistemas SUCS y AASHTO, a partir de los resultados de granulometría y de los límites de Atterberg. Dicha etapa de análisis fue clave para definir la muestra empleada en la fase experimental del estudio.

Los resultados obtenidos de las calicatas C-1 y C-2 se presentan en la Tabla 23 fueron clasificadas como gravas arcillosas con arena (GC), con calificaciones “mala” y “regular” según AASHTO. Por otro lado, la Calicata C-3, caracterizada como arena limosa con grava (SM) y ubicada en la clasificación A-2-4 (0) presentó una buena calidad estructural, destacando por su bajo contenido de finos y su granulometría arenosa.

Tabla 23: Clasificación geotécnica SUCS y AASHTO de las calicatas C-01, C-02 y C-03

Calicata	SUCS (Símbolo)	Composición	AASHTO (Grupo)	Clasificación
C - 01	GC	Material de grava con contenido arcilloso y arena	A-6 (1)	Malo
C - 02	GC	Material de grava con contenido arcilloso y arena	A-2-6 (1)	Regular
C - 03	SM	Material arenoso con matriz limosa y grava	A-2-4 (0)	Bueno

Debido a que la Calicata C-3 presenta un suelo mayormente arenoso, con bajo contenido de finos plásticos y mejores características como subrasante (A-2-4), se ha seleccionado esta muestra para el desarrollo de las mezclas estabilizadas con sulfonatado ISS 2500 y virutas de acero. Este tipo de suelo responde adecuadamente a tratamientos estabilizantes, ya que carece de cohesión natural y presenta una baja capacidad de soporte en estado natural. Por tanto, su elección se alinea directamente con el objetivo central de la presente tesis: mejorar el comportamiento mecánico de suelos arenosos mediante adiciones estabilizantes.

➤ **Análisis de cloruros, sulfatos y sales solubles**

Se realizó el análisis químico de las muestras provenientes de las tres calicatas como parte de la caracterización de la subrasante, determinándose los niveles de pH, sales solubles totales, cloruros y sulfatos. Mediante este ensayo se identifica la existencia de agentes agresivos susceptibles de afectar el comportamiento de los materiales estabilizantes convencionales y la vida útil del pavimento.

Tabla 24: Resultados de ensayos químicos para calicatas C-01, C-02 y C-03

Calicata	Sales solubles (ppm)	pH	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
C - 01	3500	2.8	80.0	102.1
C - 02	2850	3.1	91.1	121.3
C - 03	4950	2.5	120.5	127.8

Los resultados muestran que las tres muestras presentan ambientes químicamente agresivos, con valores elevados de sales y un pH muy ácido. Sin embargo, la calicata C-3 presenta los valores más extremos, con el mayor contenido de sales solubles (4950 ppm), mayor concentración de cloruros (120.5 ppm) y sulfatos (127.8 ppm), así como el pH más bajo (2.5), lo que refleja una condición severamente ácida.

Estas características hacen que el suelo de la calicata C-3 represente el escenario más desfavorable, pero también el más desafiante y adecuado para evaluar la eficacia del mejoramiento propuesto. Al tratarse de un suelo arenoso con baja cohesión y fuerte presencia de agentes agresivos, se seleccionó esta muestra para el desarrollo experimental con sulfonatado ISS 2500 y viruta de acero calcinada.

La aplicación de viruta calcinada aporta mayor resistencia a la corrosión frente al ataque de cloruros y sulfatos, mientras que el ISS 2500, al ser un aditivo sulfonado, actúa sobre la estructura del suelo sin depender de condiciones alcalinas, mejorando la compactación y el comportamiento mecánico del material tratado. Por ello, esta combinación de aditivos resulta adecuada para suelos como el de la calicata C-3, donde se busca incrementar la capacidad de soporte, durabilidad y resistencia frente a ambientes químicos hostiles.

✓ ***Características físicas y químicas de la subbase granular (Afirmado):***

➤ **Contenido de Humedad**

La humedad natural es una propiedad clave para evaluar el estado de un suelo granular en condiciones reales de campo. Su determinación permite programar adecuadamente

el proceso de compactación y compararlo con los valores óptimos obtenidos en el ensayo Proctor. El procedimiento se ejecutó siguiendo la NTP 339.127, mediante secado en horno.

Tabla 25: Porcentaje de contenido de humedad para afirmado

Parámetro	Valor
P. de recipiente (Wt)	351 g
P. de recipiente + MH	11 082 g
P. de recipiente + MS	10 273 g
Contenido de humedad (%)	8.15 %

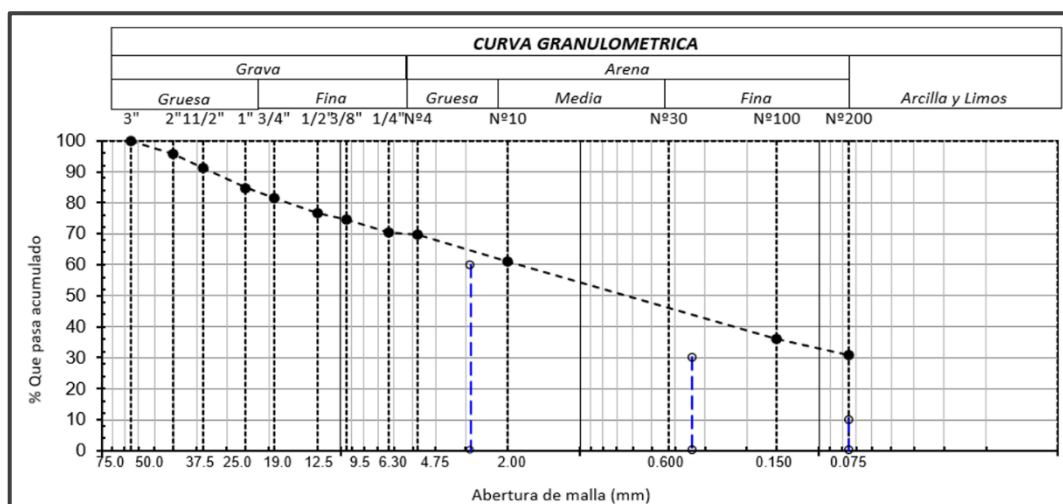
El valor obtenido de 8.15 % de humedad natural indica que el material de afirmado presenta una condición aceptable para ser trabajado en campo, especialmente tratándose de un suelo granular.

➤ Granulometría por tamizado

Tabla 26: Granulometría por tamizado para afirmado

Mallas de ensayo		P Ret. (g)	% Ret. Parcial	% Ret. Acum.	% que pasa
Pulg.	mm				
3"	75.000	0.0	0.0	0.0	100.0
2 1/2"	63.000	0.0	0.0	0.0	100.0
2"	50.000	453.00	4.4	4.4	95.6
1 1/2"	37.500	460.00	4.5	8.9	91.1
1"	25.000	651.00	6.3	15.2	84.8
3/4"	19.000	333.00	3.2	18.4	81.6
1/2"	12.500	497.00	4.8	23.2	76.8
3/8"	9.500	250.00	2.4	25.6	74.4
1/4"	6.300	426.00	4.1	29.7	70.3
Nº4	4.750	57.89	0.6	30.3	69.7
Nº10	2.360	62.17	8.7	39.0	61.0
Nº20	1.180	24.84	3.5	42.4	57.6
N40	0.600	23.19	3.2	45.7	54.3
Nº50	0.300	66.72	9.3	55.0	45.0
Nº100	0.150	63.87	8.9	63.9	36.1
Nº200	0.075	38.00	5.3	69.2	30.8
< N.º 200	FONDO	221.21	30.8	100.0	0.0

Ilustración 49: Curva granulométrica para Afirmado



El material de afirmado analizado presenta un 30.8% de finos que pasan el tamiz Nº200, valor dentro del límite máximo permitido por normativas como el MTC (35%) para capas granulares sin estabilización. Aunque aceptable, este porcentaje se

encuentra cerca del umbral, por lo que el control de humedad y compactación es fundamental para evitar pérdida de capacidad de soporte en condiciones saturadas. La distribución de partículas gruesas entre los tamices de 2" a N°10 muestra una granulometría bien graduada en su fracción gruesa, lo cual favorece una buena compactación y una estructura estable. Esta proporción de agregados gruesos aporta resistencia al esfuerzo cortante y mejora el comportamiento del material bajo carga. Sin embargo, la cantidad de finos podría afectar el drenaje y la plasticidad del suelo, especialmente si son activos. Por esta razón, es conveniente complementar el análisis con los ensayos de límites de Atterberg y equivalente de arena. En general, el afirmado presenta buenas condiciones para su uso como subbase, con potencial de mejoramiento si los finos resultaran ser plásticos.

➤ **Límites de Atterberg**

A continuación, se detallan los resultados obtenidos de los Límites de Atterberg del material afirmado empleado con respecto a la conformación de la subbase. Se determinó un IP de 12.42%, acompañado de un LL de 26.60% y un LP de 14.18%. Estos valores permiten caracterizar la plasticidad del afirmado y su habilidad para conservar la cohesión bajo distintos niveles de humedad, lo cual resulta clave para su desempeño estructural en la base del pavimento.

Tabla 27: Límites de Atterberg para afirmado

Estado de consistencia del material	Valor
LL	26.60
LP	14.18
IP	12.42

➤ **Ensayo de peso específico y absorción de agua**

Los ensayos realizados al afirmado indican un peso específico en condición seca (peso específico masa) de 2.322 g/cm³, valor representativo de un material granular con buena densidad relativa. El peso del material en estado saturado con superficie seca fue de 2.505 g/cm³, mientras que el peso específico aparente alcanzó 2.842 g/cm³, evidenciando que el agregado presenta buena masa sólida en proporción a su volumen total, incluyendo los vacíos internos.

Asimismo, el porcentaje de absorción obtenido fue de 7.88%, un valor relativamente alto, lo cual indica una significativa porosidad interna en las partículas del afirmado. Este dato es importante ya que puede influir en la dosificación de humedad óptima durante la compactación y en la durabilidad del material bajo exposición a la humedad. A pesar de ello, en materiales granulares estabilizados, la presencia de aditivos como el ISS 2500 puede reducir la susceptibilidad a la absorción y mejorar el desempeño mecánico global.

Tabla 28: Evaluación del peso específico y la absorción del afirmado

Parámetro evaluado	Valor obtenido	Unidad	Interpretación
γ _d (peso específico seco)	2.322	g/cm ³	Valor aceptable, indica buena densidad relativa del material.
Peso específico condición SSD	2.505	g/cm ³	Relación útil para calcular volumen real de partículas.
Peso Esp. aparente	2.842	g/cm ³	Considera vacíos internos, refleja masa total.
Porcentaje de Absorción	7.88	%	Elevado, indica alta porosidad del agregado.

➤ **Clasificación mediante método SUCS y AASHTO**

De acuerdo con la clasificación SUCS, el suelo pertenece al grupo SC, esto demuestra un suelo arenoso con contenido arcilloso y presencia de grava, típico de una arena arcillosa de comportamiento cohesivo moderado.

En cuanto a la clasificación AASHTO, el suelo fue ubicado en el grupo A-2-6 (1), lo cual lo posiciona como un material de calificación regular.

Tabla 29: Clasificación SUCS y AASHTO para afirmado

Calicata	SUCS (Símbolo)	Composición	AASHTO (Grupo)	Clasificación
Afirmado	SC	Arena arcillosa con grava	A-2-6 (1)	Regular

➤ **De cloruros, sulfatos y sales solubles, su evaluación**

El material de afirmado, destinado a la subbase granular, presentó un entorno químicamente agresivo. Se determinó una concentración de sales solubles totales de 5210 ppm, lo que indica una alta presencia de sales que puede afectar la interacción con aditivos estabilizantes. El pH fue de 4.2, reflejando un medio ácido que podría

reducir la eficacia de estabilizantes tradicionales. En cuanto a los cloruros, se obtuvieron 22.4 ppm, y para los sulfatos, 56.2 ppm, ambos en niveles moderados, pero con potencial corrosivo o expansivo dependiendo del tipo de estabilizante. Estas condiciones respaldan el uso de aditivos como el ISS 2500 y la viruta calcinada, que ofrecen mejor desempeño en suelos con agresividad química.

Tabla 30: Resultados de ensayos químicos para afirmado

Parámetro evaluado	Valor obtenido	Unidad	Interpretación
Sales solubles	5210	Ppm	Nivel elevado, indica ambiente químicamente agresivo.
pH	4.2	-	Ácido, puede afectar estabilizantes convencionales.
Cloruros	22.4	Ppm	Moderado, potencialmente corrosivo para elementos.
Sulfatos	56.2	Ppm	Moderado, puede inducir expansión con ciertos aglutinantes.

➤ **Determinación de Caras fracturadas**

Este ensayo es fundamental para determinar la angularidad del agregado, ya que un mayor porcentaje de caras fracturadas se traduce en un mejor entramado entre partículas favoreciendo el aumento de la resistencia al corte, la compactación y la estabilidad de las capas granulares. El análisis se realizó sobre fracciones de agregado grueso mayores a 3/8", evaluando partículas con una superficie fracturada y con dos o más superficies fracturadas. Los resultados muestran que el material presenta un 16.4% de partículas con una superficie fracturada y un 17.4% con dos superficies fracturadas, alcanzando un total combinado del 33.8% de partículas angulares.

Tabla 31: Porcentaje de caras fracturadas para afirmado

Parámetro evaluado	Valor obtenido	Unidad	Interpretación
Con una cara fracturada	16.4	%	Moderado; contribuye parcialmente a la estabilidad del agregado.
Con 2 caras fracturadas	17.4	%	Moderado; indica partículas parcialmente angulares.
Total, de partículas con caras fracturadas	33.8	%	Aceptable, aunque inferior al ideal >50% (subbases de alto rendimiento).
Norma de referencia	ASTM D5821	-	Evalúa forma angular de agregados gruesos mediante observación visual.

El porcentaje total de partículas con caras fracturadas (33.8%) es aceptable para una subbase granular, aunque se encuentra por debajo del valor ideal recomendado (>50%) para vías de alto tránsito. No obstante, esta deficiencia puede ser compensada mediante el uso de estabilizantes como el ISS 2500 y la viruta de acero, los cuales mejoran la cohesión y el desempeño mecánico del material tratado.

➤ **Determinación de chatas y alargadas (partículas)**

El ensayo permite evaluar las formas irregulares que podrían influir negativamente en la trabajabilidad, la compactación y el desempeño estructural del material en capas de subbase.

A partir de una muestra de 880 g, se obtuvo un 4.89% de partículas chatas y un 4.92% de partículas alargadas, resultando en un 9.81% del total de partículas con formas no cúbicas. Estos valores se encuentran dentro del rango permitido para subbases granulares (máximo 25%), según criterios técnicos del MTC y especificaciones internacionales.

Tabla 32: Porcentaje de partículas chatas y alargadas para afirmado

Parámetro evaluado	Valor obtenido	Unidad	Interpretación
Partículas chatas	4.89	%	Dentro del límite aceptable; indica moderada deformidad morfológica.
Partículas alargadas	4.92	%	Aceptable, sin riesgo de inestabilidad estructural.
Total, de partículas chatas y alargadas	9.81	%	Apto como subbase, no supera el límite crítico del 25%.
Norma de referencia	ASTM D4791	-	Aplicable a agregados gruesos para evaluar geometría.

A pesar de que las partículas chatas o alargadas pueden reducir la resistencia al esfuerzo cortante del material granular, para este caso el porcentaje es aceptable. Además, la futura aplicación de estabilizantes como el sulfonato ISS 2500 y viruta de acero calcinada contribuirá a mejorar la cohesión del conjunto, mitigando los efectos de la geometría no ideal del agregado.

➤ **Equivalente de arena**

Se ejecutó la prueba de equivalente de arena al material fino del afirmado (pasante del tamiz N.º 4), con el fin de evaluar la proporción de partículas plásticas o arcillosas presentes en el agregado, en conformidad con la norma MTC E-114, contenida en el Manual de Carreteras – EG-2000.

Los resultados obtenidos de las tres muestras analizadas mostraron valores de 26.73%, 25.71% y 23.36%, respectivamente, obteniéndose un promedio de equivalente de arena de 26%. Este valor está significativamente por debajo del mínimo requerido por la normativa (60% como valor de referencia), lo que indica una alta presencia de finos perjudiciales que podrían afectar la trabajabilidad, la capacidad de drenaje y la estabilidad volumétrica del material.

Tabla 33: Resultados de equivalente de arena para afirmado

Muestra	Altura límite del material fino (cm)	Valor máximo de altura de la arena (cm)	Equivalente de Arena (%)
M - 01	10.10	2.70	26.73
M - 02	10.50	2.70	25.71
M - 03	10.70	2.50	23.36
Valor Promedio			26
Valor Mínimo según MTC E - 114			60

Este resultado nos indica que el afirmado contiene materiales finos no deseables, posiblemente arcillas o limos plásticos, que pueden reducir la resistencia y aumentar la retención de agua en la subbase. Por ello, se justifica el uso de aditivos estabilizantes como el ISS 2500, que actúa modificando las propiedades fisicoquímicas de los suelos, y la viruta de acero calcinada, que aporta estructura y reduce la influencia de los finos en el comportamiento mecánico del conjunto granular.

➤ **Desgaste por abrasión**

Se empleó una muestra de 5000 g de agregado grueso con granulometría comprendida entre 3/4" y 3/8", tal como exige el método. Luego de 500 revoluciones, el peso residual fue 3908 g, obteniéndose una pérdida por abrasión del 21.8%. Este valor está dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa para capas de subbase, donde usualmente se exige un desgaste menor o igual a 50% (según el MTC).

Tabla 34: Resultado de desgaste por abrasión para afirmado

Parámetro evaluado	Valor obtenido	Unidad	Interpretación
Peso inicial de la muestra	5000	g	Muestra representativa para ensayo.
Peso final después de 200 Rev.	4650	g	-
Peso final después de 500 Rev.	3908	g	-
Desgaste por abrasión (500 Rev.)	21.8	%	Aceptable; cumple especificaciones MTC para subbase (<50%).
Uniformidad del ensayo	0.3	%	Buena consistencia entre pesos registrados.
Norma de referencia	ASTM C131	-	Ensayo de abrasión de agregados.

El resultado indica que el afirmado presenta una resistencia aceptable al desgaste, lo cual es favorable para su uso en capas sometidas a cargas repetidas o tránsito moderado. Además, la uniformidad del ensayo fue de 0.3%, lo que refleja una buena consistencia del material durante el proceso.

○ Resultados de ensayos para muestras patrón

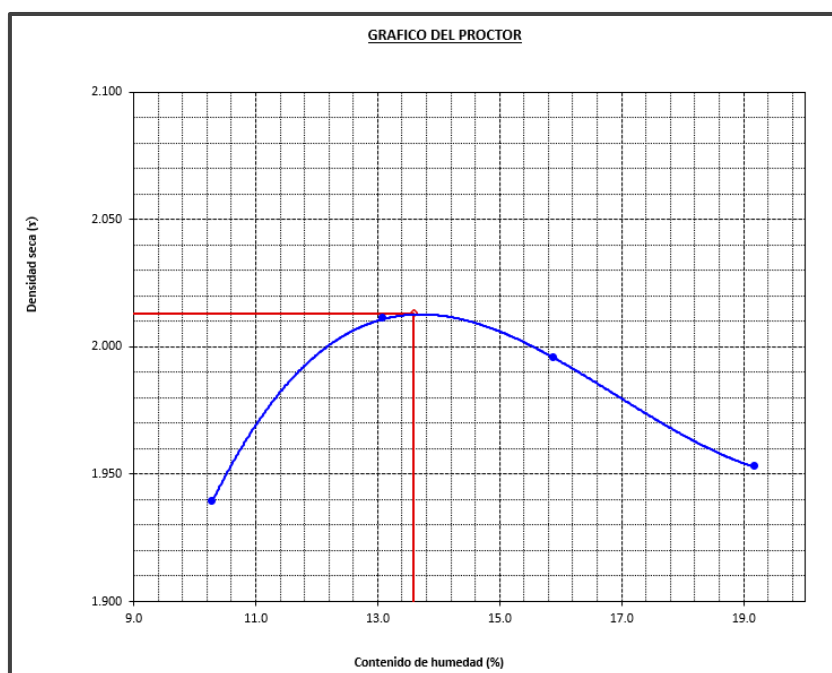
✓ Proc. Mod. → Muestra (subrasante) – Calicata N°03:

Tabla 35: P.M. para muestra patrón subrasante – Cali. N°03

Muestras de Proctor	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Proctor N°01	2.007	14.00
Proctor N°02	2.005	14.50
Proctor N°03	2.021	12.89
PROMEDIO	2.013	13.59

El ensayo N°1 alcanzó una DMS de 2.007 g/cm³ con un COH de 14.00 %. Por otro lado, el ensayo N°2 presentó una DMS de 2.005 g/cm³ y un COH de 14.50 %, mientras que el ensayo N°3 registró la mayor DMS de 2.021 g/cm³ con un OCH de 12.89 %. A partir de estos datos, se calculó un promedio general de DMS = 2.013 g/cm³ y COH = 13.59 %, valores representativos del comportamiento global del suelo natural frente a la compactación. Los resultados muestran que el suelo presenta un comportamiento estable y reproducible, con una variación mínima, lo que es característico de los suelos granulares no cohesivos. Por otro lado, el contenido óptimo de humedad se mantiene en un intervalo reducido, permitiendo definir con mayor precisión las condiciones ideales de compactación en campo.

Ilustración 50: Proctor modificado promedio para muestra patrón de suelo - Calicata N°03



La forma parabólica de las curvas de compactación confirma el buen comportamiento del suelo ante variaciones de humedad, siendo eficiente su densificación en condiciones moderadas. Estos datos serán empleados como parámetro de comparación para evaluar la estabilización con ISS 2500 y viruta de acero en los siguientes apartados.

✓ **CBR** → Muestra del suelo (subrasante) – Calicata N°03:

Tabla 36: CBR para muestra patrón del suelo - Calicata N°03

Ensayo	Densidad Seca (g/cm ³)		Contenido óptimo de humedad (%)	CBR al 100%		CBR al 95%	
	100%	95%		2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	2.007	1.907	14	23%	29%	18%	21%
CBR 02	2.007	1.907	14	25%	29%	22%	26%
CBR 03	2.007	1.907	14	26%	30%	22%	25%
PROMEDIO				24.7%	29.3%	20.7%	24.0%

Se observaron valores de CBR que oscilan entre el 23% y 30% para compactación de la densidad máxima seca al 100%, y entre 18% y 26% para compactación al 95%. Estas cifras ubican al suelo dentro de un rango aceptable para ser utilizado como subrasante o subbase de baja exigencia, aunque no ideal sin mejora previa. Si bien el comportamiento mecánico supera el umbral mínimo requerido para subrasantes (usualmente $\geq 8\%$), aún se encuentra lejos de los valores típicos de materiales estabilizados o tratados, lo que justifica su posterior mejora en esta investigación.

Ilustración 51: CBR 01 espécimen patrón subrasante

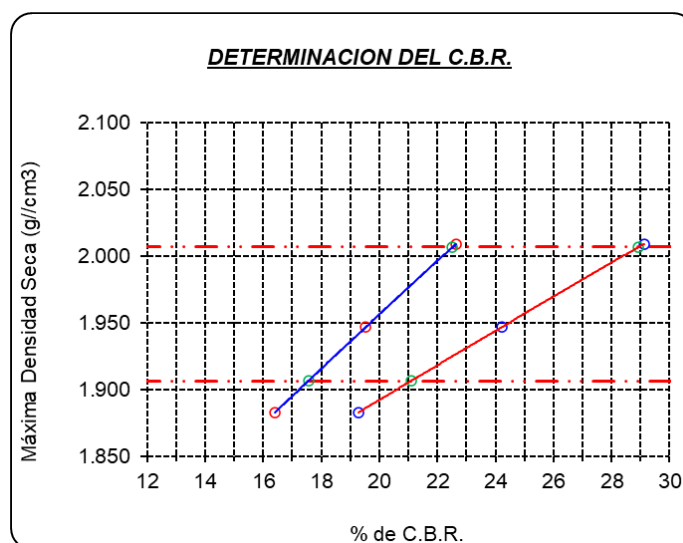


Ilustración 52: CBR 02 espécimen patrón subrasante

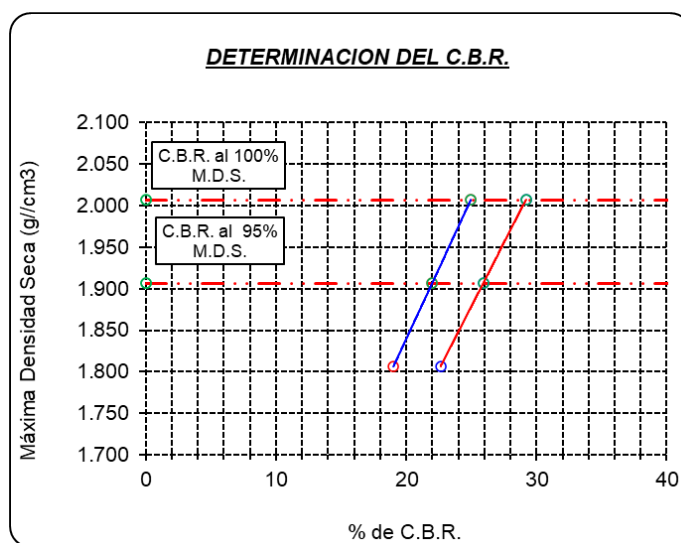
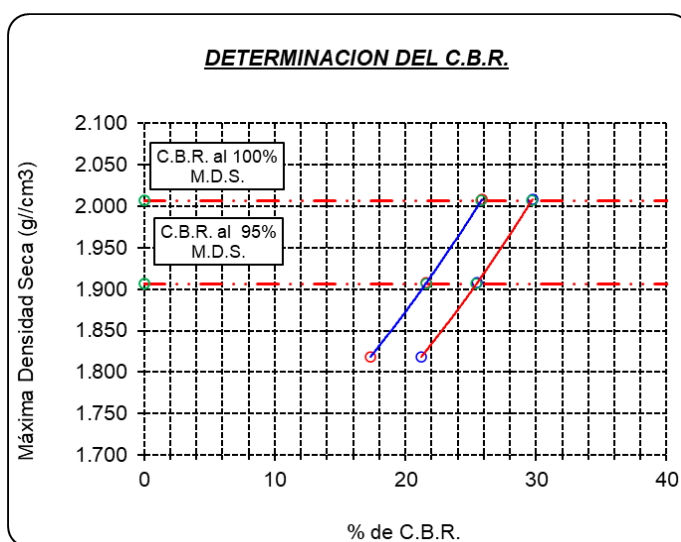


Ilustración 53: CBR 03 espécimen patrón subrasante



✓ **Proctor Mod.** → **Muestra de Afirmado (subbase granular):**

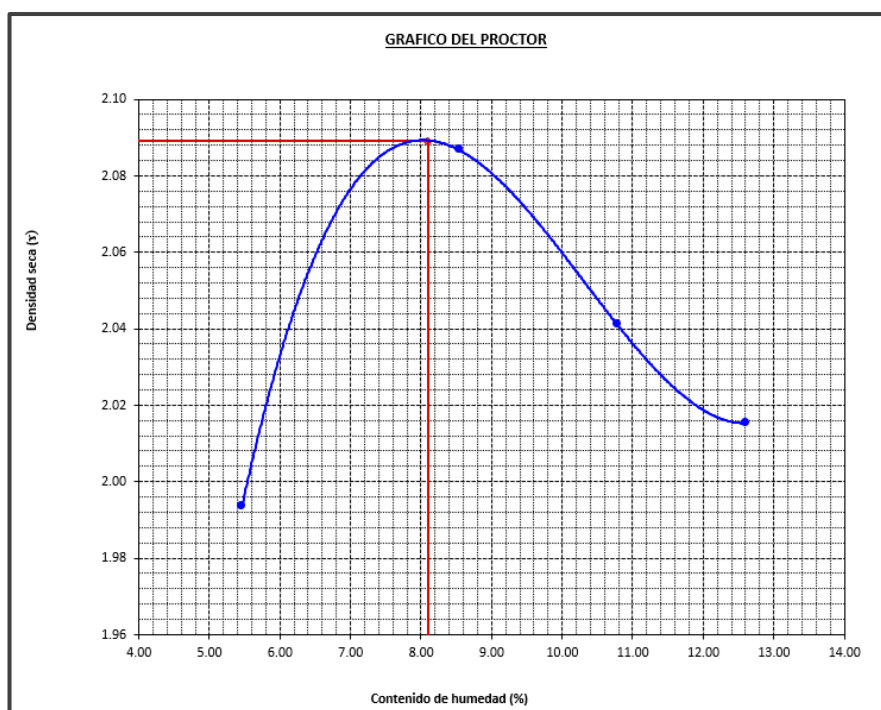
Este ensayo realizado sobre el afirmado sin adición permite establecer una línea base para comparar su respuesta frente a futuros tratamientos estabilizantes.

Tabla 37: Proctor modificado para muestra patrón del afirmado

Muestras de Proctor	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Proctor N°01	2.066	9.35
Proctor N°02	2.110	7.80
Proctor N°03	2.086	8,30
PROMEDIO	2.089	8.10

La densidad máxima seca promedio fue de 2.089 g/cm^3 , valor adecuado para un material granular, aunque no destaca como excepcional. Si bien se encuentra dentro del rango admisible para su uso como subbase, su valor cercano al límite inferior puede afectar su resistencia mecánica a largo plazo frente a cargas repetitivas del tránsito, especialmente en zonas con suelos de soporte débiles. El OCH promedio fue de 8.10%, con ligeras variaciones entre los ensayos. Este contenido relativamente bajo implica que el material no requiere mucha agua para alcanzar su máxima compactación, lo cual puede ser una ventaja. Sin embargo, también puede indicar una estructura granular poco cohesiva, que tiende a desestabilizarse ante humedad excesiva o escasa adherencia entre partículas.

Ilustración 54: Proctor modificado promedio para muestra patrón de afirmado



✓ **CBR** → Muestra de Afirmado (subbase granular):

Tabla 38: CBR para muestra patrón de afirmado

Ensayo	Densidad Seca (g/cm^3)		Contenido óptimo de humedad (%)	CBR al 100%		CBR al 95%	
	100%	95%		2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	2.066	1.963	9.35	19%	21%	15%	17%
CBR 02	2.066	1.963	9.35	19%	23%	13%	16%
CBR 03	2.066	1.963	9.35	21%	23%	15%	17%
PROMEDIO				19.7%	22.3%	14.3%	16.7%

Los tres ensayos CBR ejecutados en el material de afirmado en condición natural mostraron valores de resistencia entre 19% y 23% al someterse a una compactación que alcanza el 100% de la MDS, y entre 13% y 17% al 95% de la MDS. Estas cifras indican una capacidad portante moderada, que, si bien cumple con los mínimos establecidos para una subbase granular según el MTC, puede no ser suficiente ante sollicitaciones mayores o condiciones adversas de humedad. La densidad máxima seca (2.066 g/cm^3) y el óptimo contenido de humedad (9.35%) se mantuvieron constantes para las comparaciones, asegurando uniformidad en el análisis.

Por otro lado, durante los ensayos se evidenció que, aunque la respuesta a la penetración inicial (2.54 cm) fue relativamente favorable, en la segunda penetración (5.08 cm) algunos moldes mostraron una disminución proporcional en la resistencia, lo cual refleja cierta susceptibilidad del material a deformaciones acumulativas. Esta tendencia es especialmente notoria en los moldes CBR 01 y 02, lo que podría deberse a una variabilidad en la compactación o una distribución de humedad menos eficiente.

En resumen, aunque el afirmado natural presenta una resistencia aceptable como subbase, sus valores moderados y cierta tendencia a la deformación justifican la necesidad de mejorarlo. Por ello, se propone la adición de Sulfonato ISS 2500 y virutas de acero para aumentar su capacidad portante y estabilidad frente a cargas y humedad.

Ilustración 55: CBR 01 para espécimen afirmado

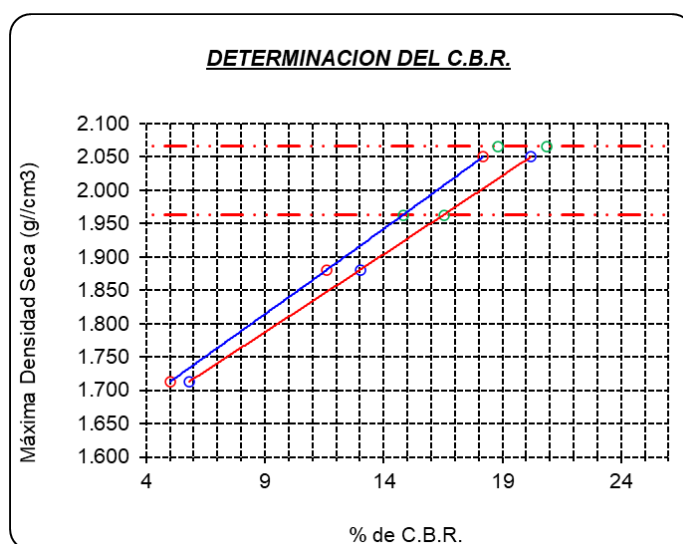


Ilustración 56: CBR 02 para espécimen afirmado

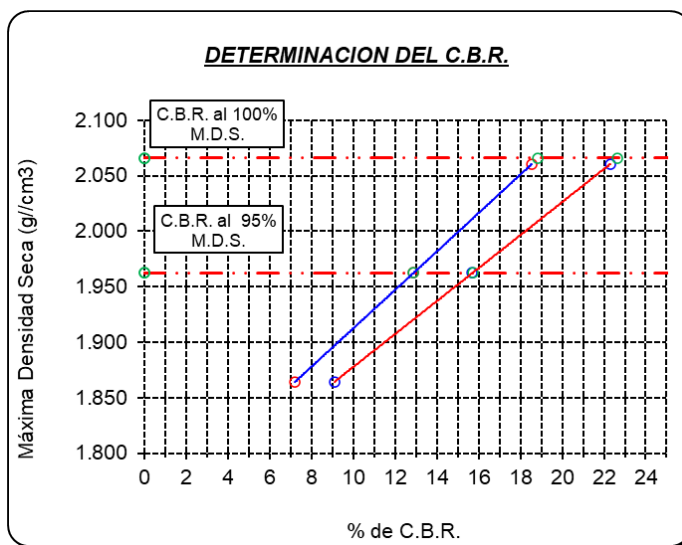
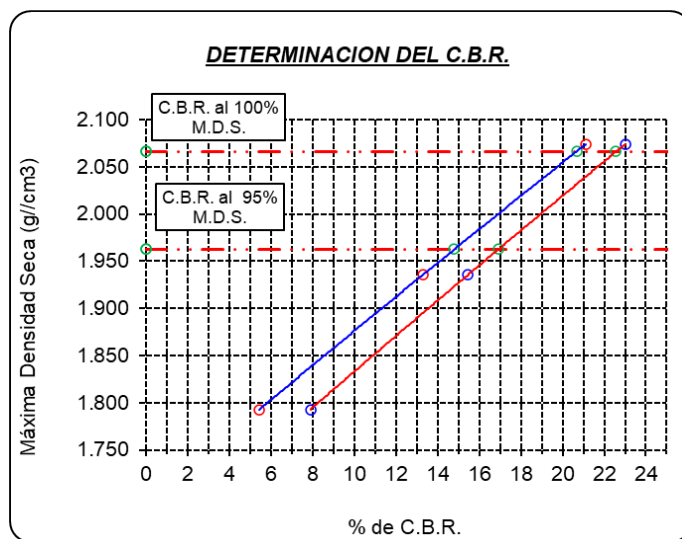


Ilustración 57: CBR 03 para espécimen afirmado



○ Resultados de ensayos para muestras con adición

✓ Límites de Atterberg → **Suelo: con 5% y 10% de aditivo ISS 2500**

Tabla 39: Límites de Atterberg para muestras de suelo con 5% y 10% de ISS2500

Dosificación de Sulfonato ISS2500	LL(%)	LP (%)	IP
5%	32.06	22.34	9.71
10%	33.39	26.92	6.47

Los resultados muestran un comportamiento particular ante la incorporación del aditivo. Con el 5% de sulfonato, Con un LP de 22.34% y un LL de 32.06%, se obtuvo un IP de 9.71, indicando una plasticidad baja, típica de suelos arenosos con ligera actividad arcillosa inducida por el aditivo. Al aumentar la dosificación al 10%, el límite líquido se incrementó ligeramente a 33.39%, pero el límite plástico subió más significativamente a 26.92%, reduciendo el índice de plasticidad a 6.47. Este comportamiento sugiere que el sulfonato tiene un efecto modificador sobre la plasticidad del suelo, reduciendo la diferencia entre estados de consistencia, lo cual puede favorecer su trabajabilidad y estabilidad en campo.

Ilustración 58: Límite de Atterberg para muestra de suelo con 5% de ISS2500

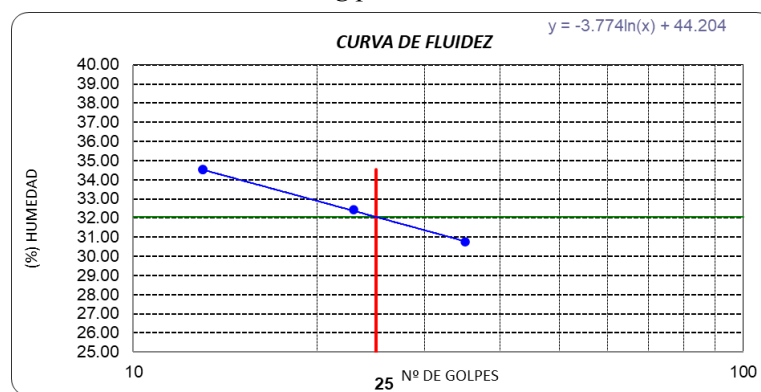
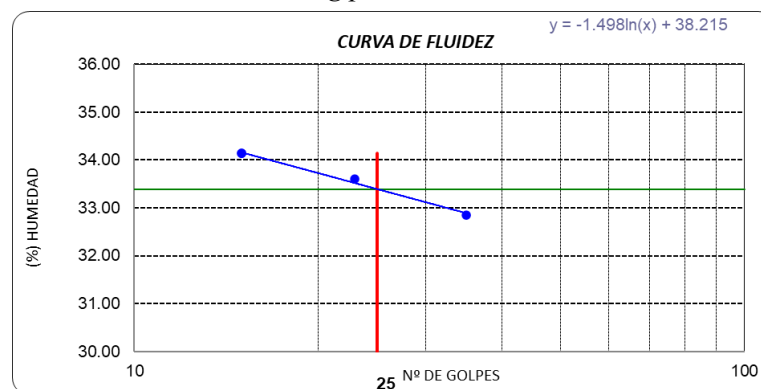


Ilustración 59: Límite de Atterberg para muestra de suelo con 10% de ISS2500



✓ **Proctor Modificado** → **Suelo: con 5% de ISS 2500 + 5% de Viruta de acero**

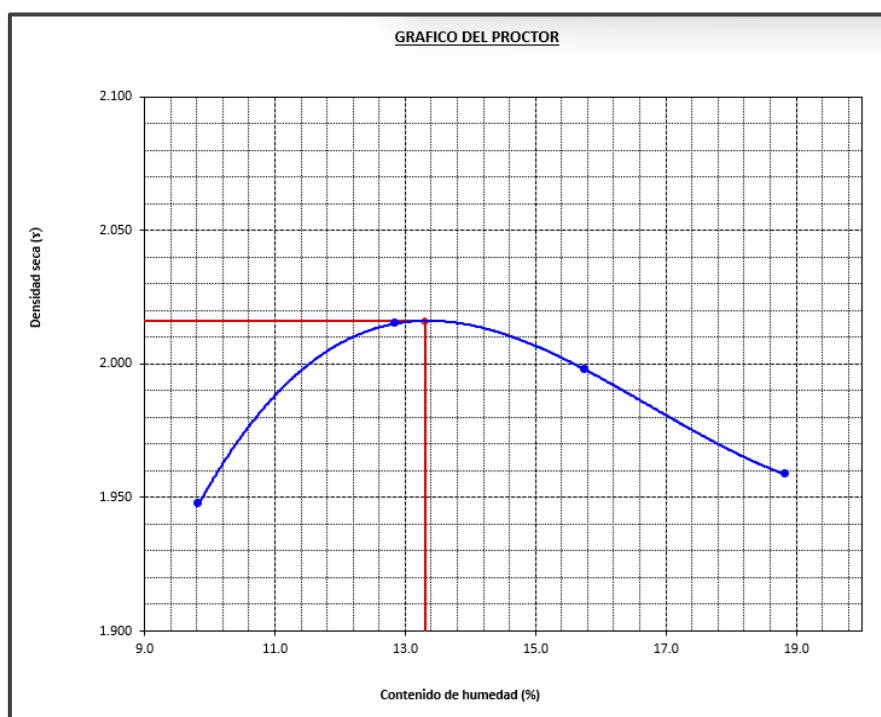
Tabla 40: Proctor modificado para 1er grupo experimental - Calicata N°03

Muestras de Proctor	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Proctor N°01	2.020	12.90
Proctor N°02	2.005	14.50
Proctor N°03	2.021	12.89
PROMEDIO	2.016	13.30

Los valores promedios muestran una máxima densidad seca de 2.016 g/cm³ y un óptimo contenido de humedad de 13.30%, lo cual refleja una mejora en el comportamiento de compactación respecto al suelo natural no modificado, que presentó una densidad seca promedio inferior de 2.013 g/cm³ con mayor requerimiento de agua (13.59%).

Esto sugiere que la combinación de ISS 2500 y viruta de acero no solo reduce la humedad necesaria para alcanzar la máxima compactación, además de mejorar la resistencia estructural de la subrasante tratada, también se observa un aumento de la densidad seca. Esta condición es favorable en obras de pavimentación, ya que permite trabajar con menor contenido de agua sin sacrificar densidad ni resistencia, optimizando la eficiencia constructiva.

Ilustración 60: Proctor modificado promedio para 1er grupo experimental - Calicata N°03



✓ **CBR** → **Suelo: con 5% de ISS 2500 + 5% de Viruta de acero**

Tabla 41: CBR para 1er grupo experimental - Calicata N°03

Ensayo	CBR al 100%		CBR al 95%	
	2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	24%	31%	21%	27%
CBR 02	26%	33%	21%	25%
CBR 03	27%	33%	25%	29%
CBR 04	24%	31%	22%	27%
CBR 05	34%	39%	27%	30%
CBR 06	28%	34%	24%	29%
CBR 07	34%	42%	29%	34%
CBR 08	32%	39%	27%	31%
CBR 09	28%	34%	22%	26%
CBR 10	28%	33%	17%	20%
CBR 11	31%	35%	25%	28%
CBR 12	28%	33%	22%	26%
CBR 13	33%	38%	25%	28%
CBR 14	32%	36%	25%	27%
CBR 15	31%	38%	23%	25%
Promedio	29.33%	35.27%	23.67%	27.47%

Los resultados obtenidos indican una optimización importante en la capacidad resistente en relación con su condición natural, del suelo. La densidad al 100 % muestra valores de CBR para penetraciones de 2.54 cm y 5.08 cm que oscilan entre 24% a 34% y entre 31% a 42%, respectivamente. Por otro lado, la densidad al 95 % muestra valores de CBR que varían entre 17% y 29% (para 2.54 cm) y entre 20% y 34% (para 5.08 cm). El análisis en conjunto de los 15 ensayos refleja un desempeño promedio con valores de CBR de 29.3% a 2.54 cm de penetración y 35.27% a 5.08 cm de penetración para la densidad al 100 %, y de 23.67% a 2.54 cm y 27.47% a 5.08 cm para la densidad al 95 %. Estos promedios evidencian una mejora clara frente al suelo natural, cuyos valores promedio se encuentran entre 24.7 % y 29.3 % (100 % D.M.S.) y entre 20.7 % y 24.0 % (95 % D.M.S.).

En conclusión, la mezcla estabilizada con 5 % de Sulfonato ISS 2500 y 5 % de viruta de acero incrementa la capacidad portante del suelo arenoso C-03, mejorando sustancialmente su desempeño mecánico como subrasante. Esta combinación ofrece una alternativa viable para el reforzamiento de suelos en obras de pavimentación,

proporcionando una base más resistente y estable frente a deformaciones y sollicitaciones mecánicas.

Ilustración 61: Índice de CBR 01 para 1er grupo experimental de suelo

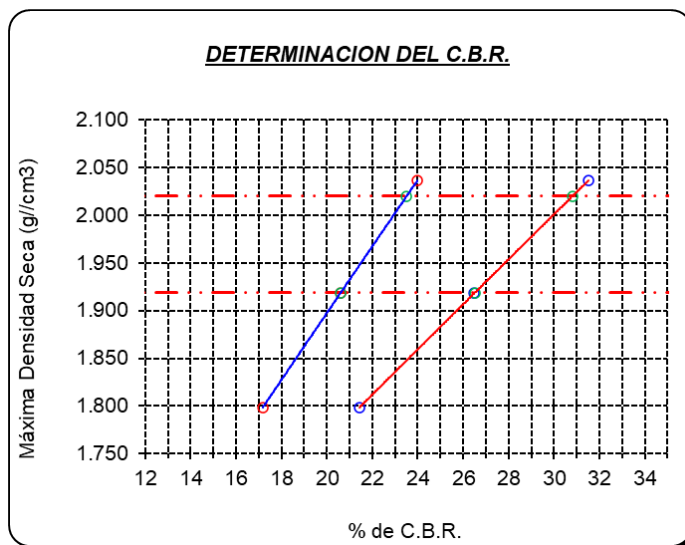
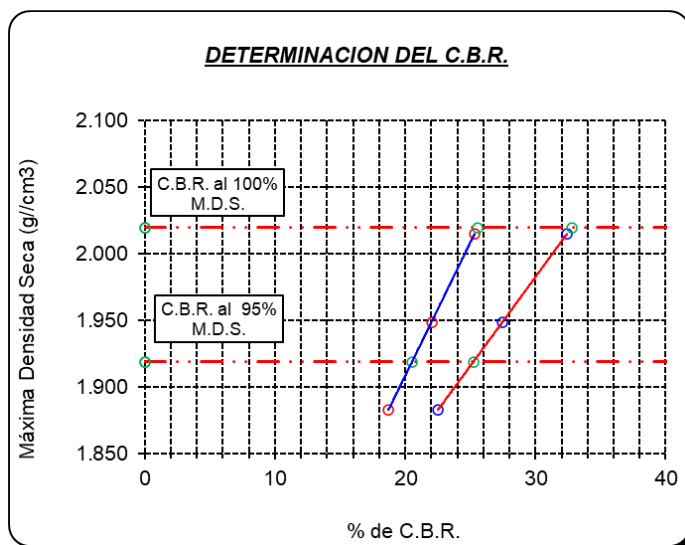


Ilustración 62: Índice de CBR 02 para 1er grupo experimental de suelo



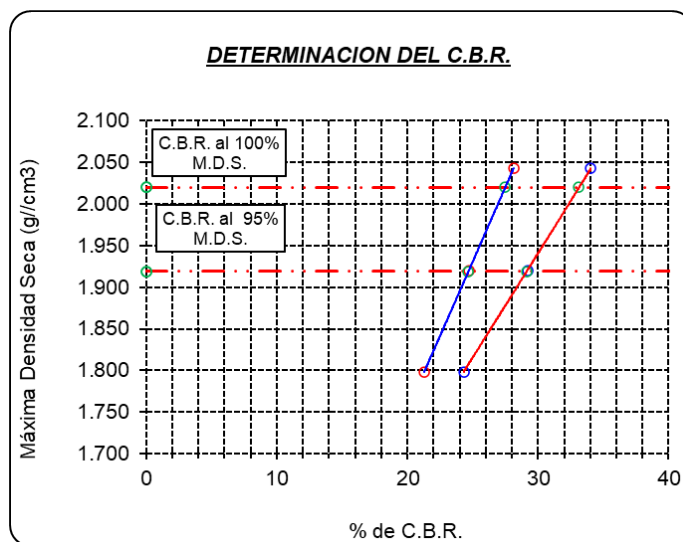
✓ Proctor Modificado → Suelo: con 5% de ISS 2500 + 10% de Viruta de acero

Tabla 42: P.M. para 2do grupo experimental - Calicata N°03

Muestras de Proctor	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Proctor N°01	2.040	13.70
Proctor N°02	2.068	13.00
Proctor N°03	2.068	13.50
PROMEDIO	2.060	13.30

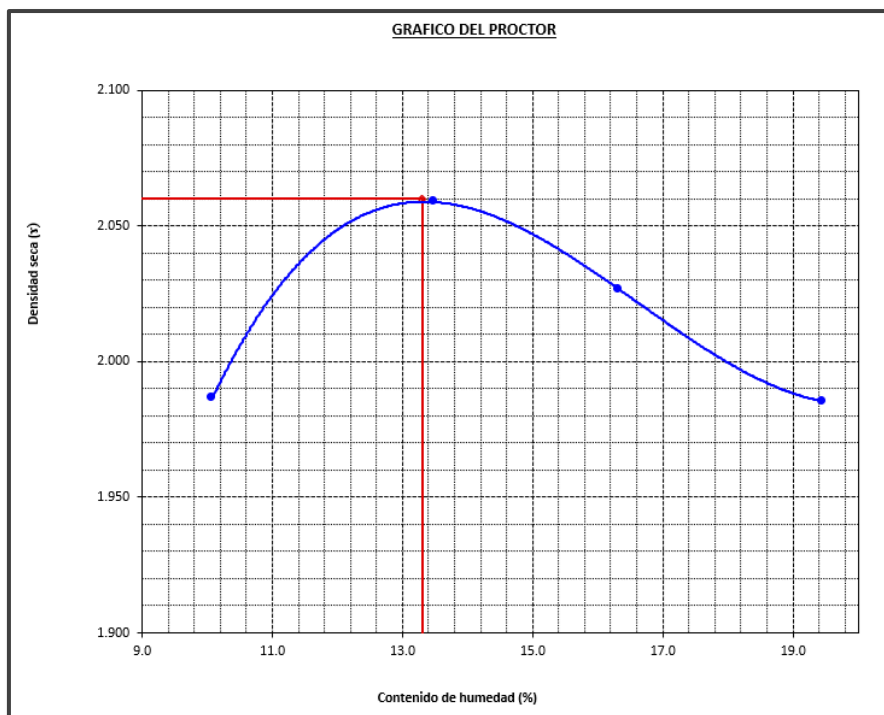
Se determina que la estabilización del suelo mediante 5 % de sulfonato ISS 2500 y 10

Ilustración 63: Índice de CBR 03 para 1er grupo experimental de suelo



% de viruta de acero permite alcanzar una densidad máxima seca promedio de 2.060 g/cm³ con un contenido óptimo de humedad de 13.30 %. Esta mejora respecto al suelo sin estabilizar sugiere que los aditivos aumentan la eficiencia de compactación del material, promoviendo una estructura más densa y estable. Además, esta mezcla requiere menor contenido de humedad para alcanzar la compactación máxima comparado con el suelo natural, lo que implica ventajas constructivas como mayor rapidez en la ejecución y menor consumo de agua. En conjunto, los resultados respaldan el uso de esta combinación como técnica efectiva para el mejoramiento de subrasantes en proyectos de pavimentación, mejorando la resistencia y capacidad portante del terreno tratado.

Ilustración 64: Proctor modificado promedio para 2do grupo experimental - Calicata N°03



✓ **CBR** → **Suelo:** con 5% de ISS 2500 + 10% de Viruta de acero

Tabla 43: CBR para 2do grupo experimental - Calicata N°03

Ensayo	CBR al 100%		CBR al 95%	
	2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	25%	32%	23%	28%
CBR 02	26%	33%	24%	28%
CBR 03	29%	35%	27%	31%
CBR 04	26%	33%	24%	29%
CBR 05	33%	37%	26%	28%
CBR 06	29%	34%	27%	31%
CBR 07	34%	42%	25%	29%
CBR 08	30%	35%	29%	32%
CBR 09	22%	25%	19%	20%
CBR 10	24%	27%	21%	22%
CBR 11	26%	28%	24%	25%
CBR 12	24%	26%	21%	23%
CBR 13	34%	38%	28%	31%
CBR 14	27%	28%	23%	22%
CBR 15	33%	41%	27%	32%
Promedio	28.13%	32.93%	24.53%	27.40%

Se registra una mejora significativa de la resistencia en comparación con el suelo en condición natural. Con una densidad al 100 %, los valores de CBR oscilaron entre 22% y 34% (para 2.54 cm) y entre 25% y 42% (para 5.08 cm). Por otro lado, la densidad seca al 95% muestra valores de CBR que varían entre 19% y 29% (para 2.54 cm) y entre 20% y 32% (para 5.08 cm). El análisis en conjunto de los 15 ensayos refleja un desempeño promedio con valores de CBR de 28.13% a 2.54 cm de penetración y 32.93% a 5.08 cm de penetración para una densidad al 100 %, y de 24.53% a 2.54 cm de penetración y 27.40% a 5.08 cm de penetración para una densidad al 95 %. Estos promedios evidencian una mejora clara frente al suelo natural, cuyos valores promedio se encuentran entre 24.7 % y 29.3 % (100 % D.M.S.) y entre 20.7 % y 24.0 % (95 % D.M.S.).

En conclusión, el tratamiento del suelo con 5 % de Sulfonato ISS 2500 y 10 % de viruta de acero resulta favorable desde el punto de vista del desempeño mecánico. La mezcla estabilizada supera consistentemente los valores del suelo natural, lo que se traduce en una subrasante más estable, resistente y con mayor capacidad de carga. Esto reduce el riesgo de deformaciones plásticas y mejora sustancialmente la vida útil del pavimento, justificando su aplicación en proyectos viales que requieren soluciones eficientes.

Ilustración 65: Índice de CBR 04 para 2do grupo experimental de suelo

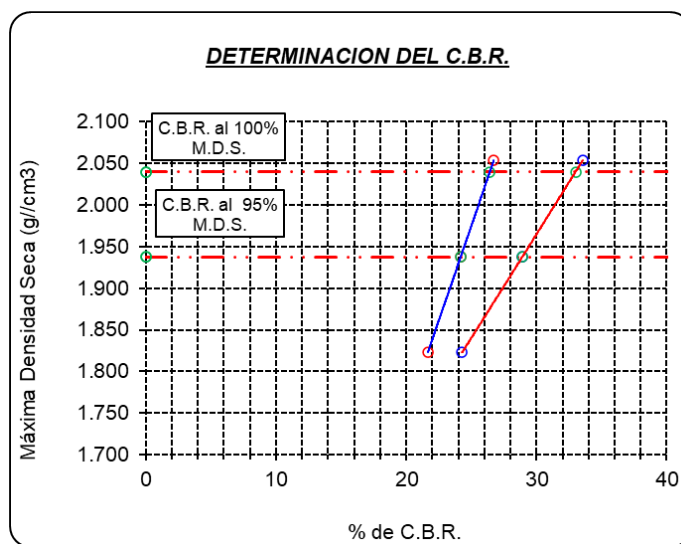


Ilustración 66: Índice de CBR 05 para 2do grupo experimental de suelo

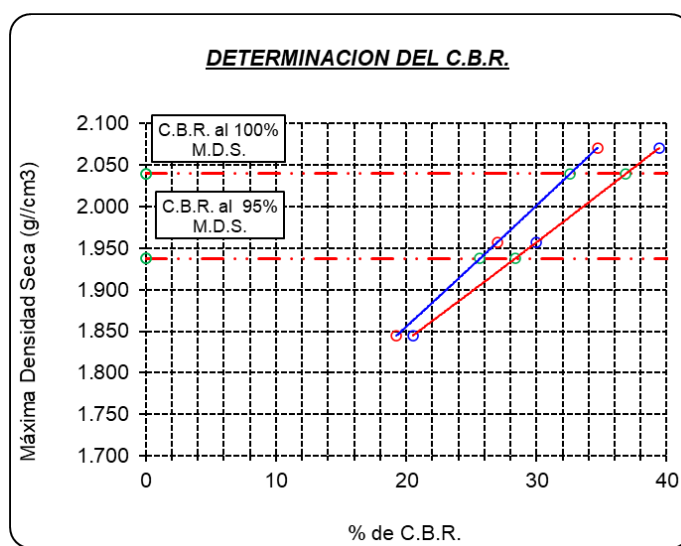
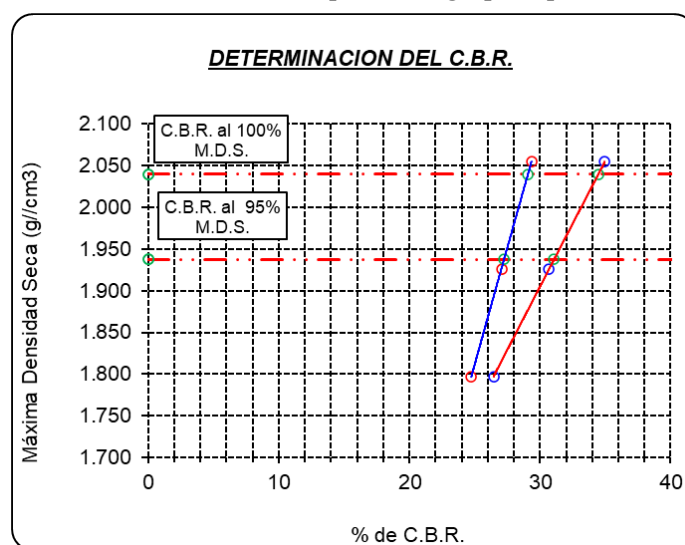


Ilustración 67: Índice de CBR 06 para 2do grupo experimental de suelo



✓ Proctor Modificado → **Suelo:** con 10% de ISS 2500 + 5% de Viruta de acero

Tabla 44: Proctor modificado para 3er grupo experimental - Calicata N°03

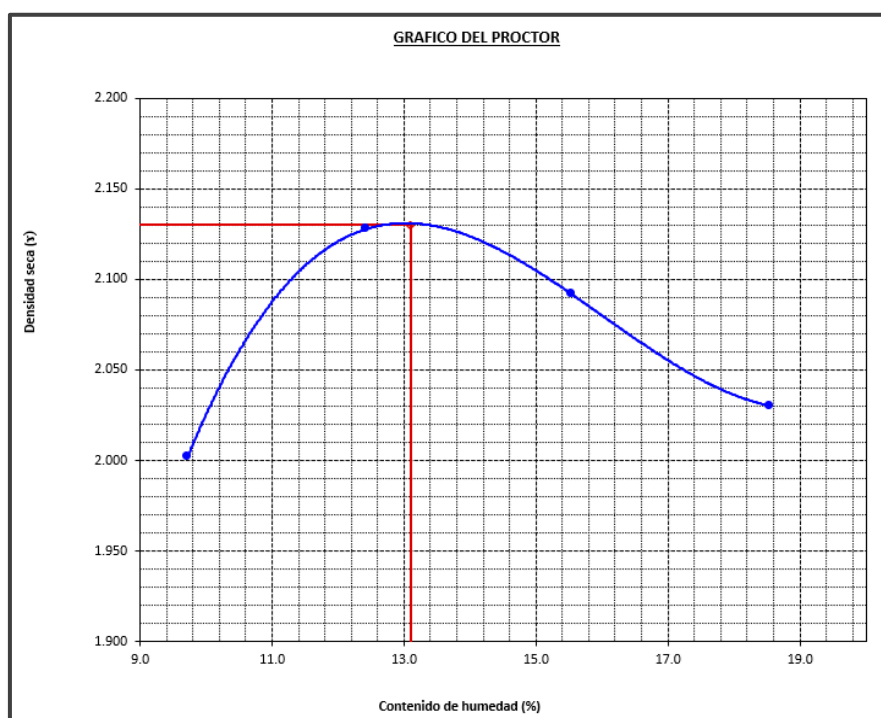
Muestras de Proctor	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Proctor N°01	2.155	13.70
Proctor N°02	2.146	12.00
Proctor N°03	2.104	13.50
PROMEDIO	2.130	13.10

Se determina que el tratamiento del suelo con 10 % de sulfonato ISS 2500 y 5 % de viruta de acero permite alcanzar una densidad máxima seca promedio de 2.130 g/cm³ con un contenido óptimo de humedad de 13.10 %. Estos valores respecto al suelo sin

estabilizar (2.013g/cm^3 y 13.59% , respectivamente) sugiere que los aditivos aumentan la eficiencia de compactación del material, promoviendo una estructura más estable.

Esta mejora implica una mayor eficiencia en la compactación, ya que se logra una mayor densificación con menor contenido de agua. Por otro lado, la viruta de acero contribuye al aumento de la rigidez del esqueleto granular, mientras que el sulfonato actúa como agente aglomerante, haciendo que el suelo tratado sea más resistente, uniforme y adecuado para aplicaciones en capas de subrasante o subbase en pavimentos.

Ilustración 68: Proctor modificado promedio para 3er grupo experimental - Calicata N°03



✓ **CBR** → **Suelo: con 10% de ISS 2500 + 5% de Viruta de acero**

Tabla 45: CBR para 3er grupo experimental - Calicata N°03

Ensayo	CBR al 100%		CBR al 95%	
	2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	32%	38%	26%	30%
CBR 02	33%	38%	29%	33%
CBR 03	42%	47%	37%	41%
CBR 04	40%	47%	33%	38%
CBR 05	36%	41%	27%	30%
CBR 06	37%	40%	31%	33%
CBR 07	34%	41%	28%	33%
CBR 08	38%	41%	33%	35%
CBR 09	33%	40%	25%	30%

CBR 10	33%	40%	27%	31%
CBR 11	37%	42%	29%	32%
CBR 12	34%	40%	25%	29%
CBR 13	34%	39%	27%	30%
CBR 14	36%	42%	29%	33%
CBR 15	35%	41%	27%	30%
Promedio	35.60%	41.13%	28.87%	32.53%

Se evidencia una ligera mejora en el desempeño resistente respecto al suelo natural. Con una densidad al 100 %, los valores de CBR oscilaron entre 32 % y 42 % (para 2.54 cm) y entre 38 % y 47 % (para 5.08 cm). Por otro lado, la densidad al 95 % muestra valores de CBR que varían entre 25 % y 37 % (para 2.54 cm) y entre 29 % y 41 % (para 5.08 cm). El análisis en conjunto de los 15 ensayos refleja un desempeño promedio con valores de CBR de 35.60 % a 2.54 cm de penetración y 41.13 % a 5.08 cm de penetración para una densidad al 100 %, y de 28.87 % a 2.54 cm de penetración y 32.53 % a 5.08 cm de penetración para una densidad al 95 %. Estos promedios evidencian una mejora frente al suelo natural, para un CBR al 95% cuyos valores promedio se encuentran entre 20.7 % y 24.0 %, mientras que para un CBR al 100% presenta incrementos más elevados de su resistencia frente al suelo natural con valores entre 24.70 % y 29.30 %.

En conclusión, el tratamiento del suelo con 10 % de Sulfonato ISS 2500 y 5 % de viruta de acero presenta resultados muy favorables en términos de desempeño mecánico para la subrasante.

Ilustración 69: Índice de CBR 07 para 3er grupo experimental de suelo

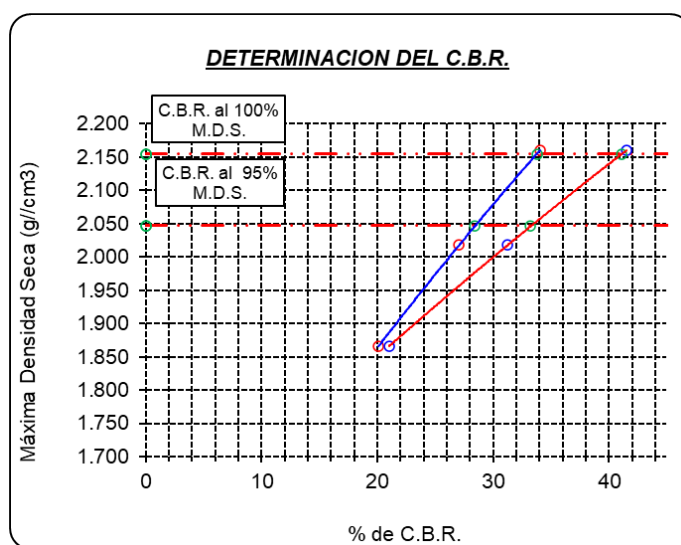


Ilustración 70: Índice de CBR 08 para 3er grupo experimental de suelo

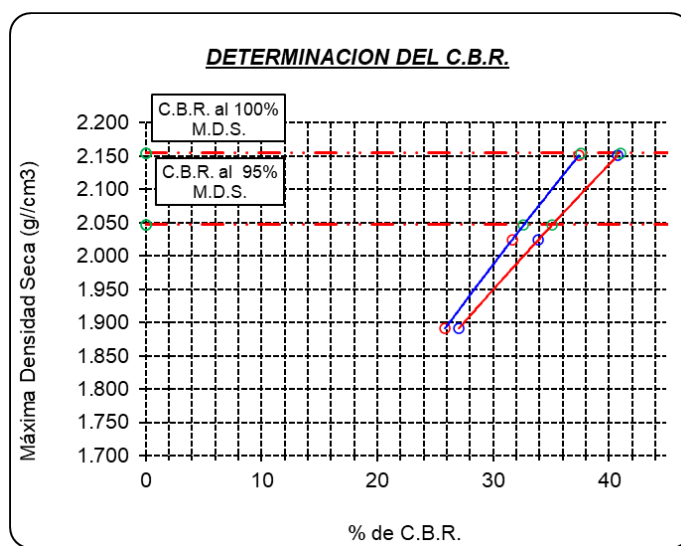
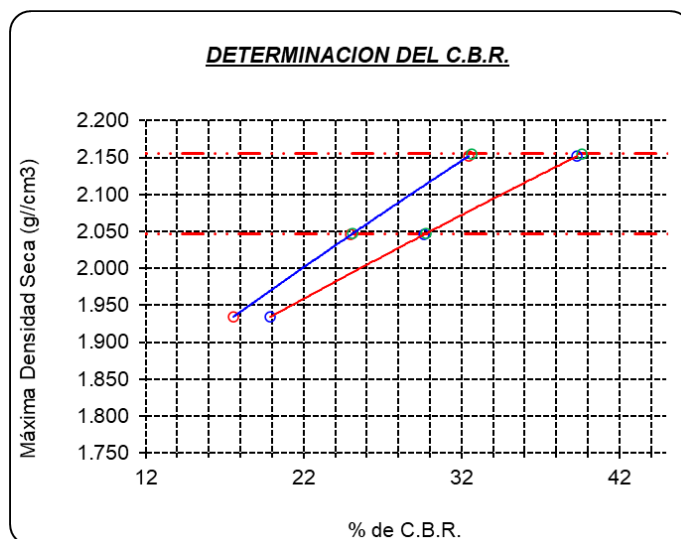


Ilustración 71: Índice de CBR 09 para 3er grupo experimental de suelo



✓ Proctor Modificado → **Suelo:** con 10% de ISS 2500 + 10% de Viruta de acero

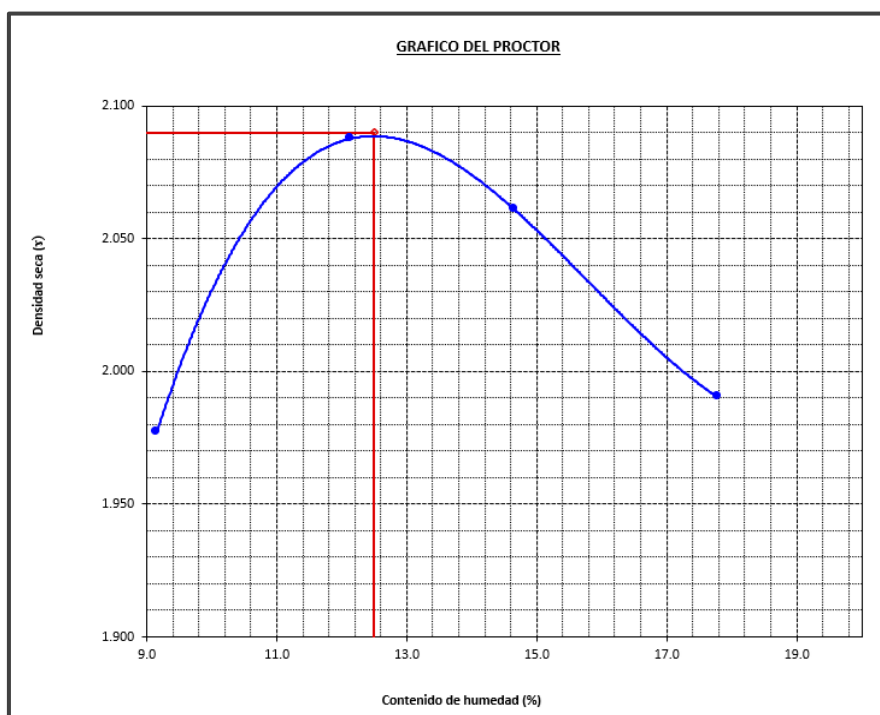
Tabla 46: P.M. para 4to grupo experimental - Calicata N°03

Muestras de Proctor	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Proctor N°01	2.086	12.80
Proctor N°02	2.110	12.00
Proctor N°03	2.070	13.25
PROMEDIO	2.090	12.50

Se observa que la estabilización del suelo mediante 10 % de sulfonato ISS 2500 y 10 % de viruta de acero permite alcanzar una máxima densidad seca promedio de 2.090 g/cm³ con un óptimo contenido de humedad de 12.50 %. Estos valores respecto al suelo

sin estabilizar (2.013g/cm^3 y 13.59% , respectivamente) indican que la adición combinada no solo favorece la compacidad del material, sino que también disminuye ligeramente la dosificación de agua requerida para llegar al punto óptimo, traduciéndose en una mayor eficiencia estructural en el diseño de subrasantes. Por otro lado, durante los ensayos se observó que El aumento del contenido de humedad provocó un incremento en la densidad seca del suelo, alcanzando un punto máximo. Desde este punto en adelante, la densidad comienza a disminuir, lo cual es característico del comportamiento de suelos bien gradados.

Ilustración 72: Proctor modificado promedio para 4to grupo experimental - Calicata N°03



✓ **CBR** → **Suelo: con 10% de ISS 2500 + 10% de Viruta de acero**

Tabla 47: CBR para 4to grupo experimental - Calicata N°03

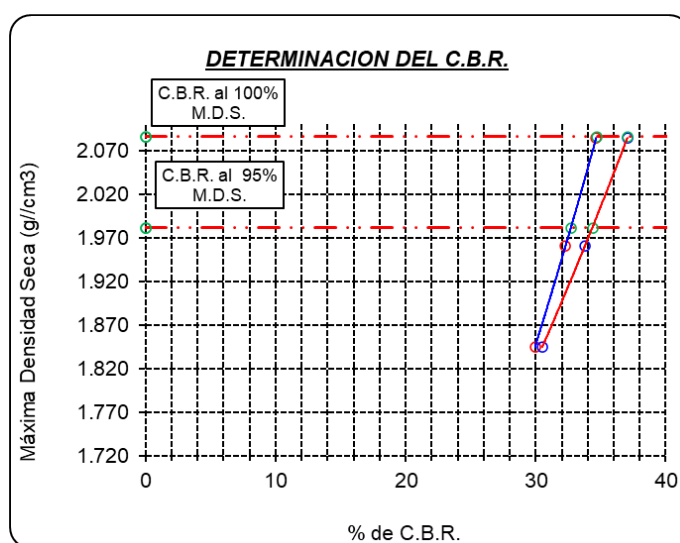
Ensayo	CBR al 100%		CBR al 95%	
	2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	34%	38%	31%	34%
CBR 02	35%	39%	32%	34%
CBR 03	39%	41%	36%	37%
CBR 04	36%	39%	33%	35%
CBR 05	35%	40%	27%	30%
CBR 06	39%	41%	36%	37%
CBR 07	34%	40%	29%	33%
CBR 08	40%	42%	38%	39%

CBR 09	33%	36%	31%	33%
CBR 10	35%	37%	33%	34%
CBR 11	37%	39%	35%	36%
CBR 12	35%	37%	32%	34%
CBR 13	35%	39%	27%	30%
CBR 14	37%	39%	35%	35%
CBR 15	35%	41%	27%	31%
Promedio	35.93%	39.20%	32.13%	34.13%

Los resultados evidencian un incremento significativo de la resistencia respecto al suelo en estado natural. Con una densidad al 100 %, los valores de CBR oscilaron entre 33 % y 40 % (para 2.54 cm) y entre 36 % y 42 % (para 5.08 cm). Por otro lado, la densidad al 95 % muestra valores de CBR que varían entre 27 % y 38 % (para 2.54 cm) y entre 30 % y 39 % (para 5.08 cm). El análisis en conjunto de los 15 ensayos refleja un desempeño promedio con valores de CBR de 35.93 % a 2.54 cm de penetración y 39.20 % a 5.08 cm de penetración para una densidad al 100 %, y de 32.13 % a 2.54 cm de penetración y 34.13 % a 5.08 cm de penetración para una densidad al 95 %. Estos promedios evidencian una mejora clara frente al suelo natural, cuyos valores promedio se encuentran entre 24.7 % y 29.3 % (100 % D.M.S.) y entre 20.7 % y 24.0 % (95 % D.M.S.).

En conclusión, el tratamiento del suelo con 10 % de Sulfonato ISS 2500 y 10% de viruta de acero resulta favorable en términos de desempeño mecánico. La mezcla estabilizada no solo alcanza, sino que en muchos casos supera los valores de CBR del suelo natural, proporcionando una subrasante más estable, resistente y adecuada para su uso en pavimentación, con menor riesgo de deformaciones plásticas a largo plazo.

Ilustración 73: Índice de CBR 10 para 4to grupo experimental de suelo



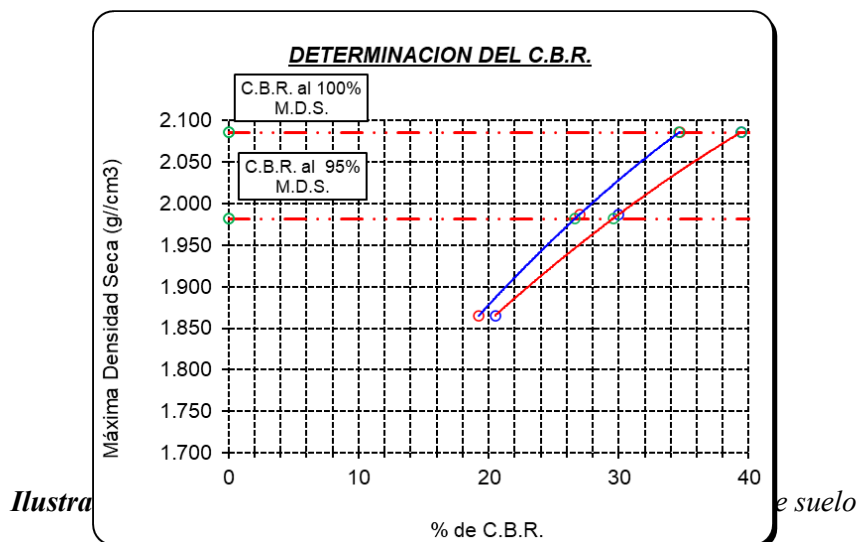
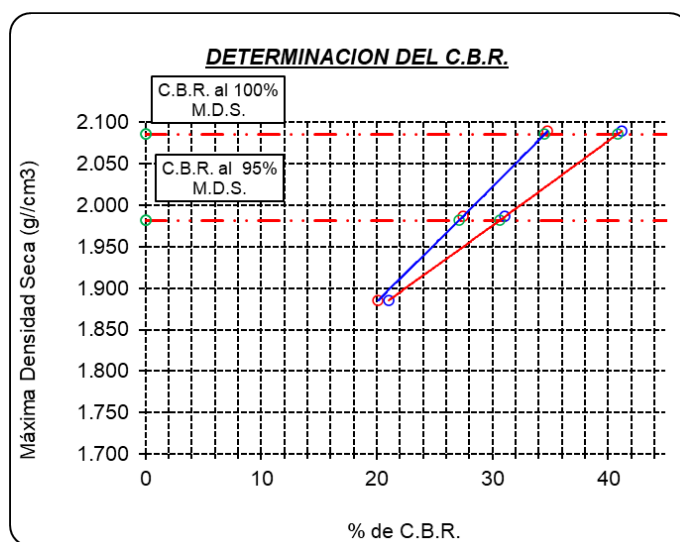


Ilustración 75: Índice de CBR 15 para 4to grupo experimental de suelo



✓ Límites de Atterberg → **Afirmado: con 5% y 10% de aditivo ISS 2500**

Tabla 48: Límites de Atterberg para muestras de afirmado con 5% y 10% de ISS2500

Dosificación de Sulfonato ISS2500	LL (%)	LP (%)	IP
5%	21.25	16.92	4.32
10%	21.64	14.13	7.51

Los resultados muestran un comportamiento particular ante la incorporación del aditivo. Con el 5% de sulfonato, se determinaron valores de 21.25% para el límite líquido, 16.92% para el límite plástico y 4.32 para el índice de plasticidad, indicando una plasticidad baja. Al aumentar la dosificación al 10%, el límite líquido se incrementó

ligeramente a 21.64%, mientras que el límite plástico incrementó significativamente a 14.13%, aumentando también el índice de plasticidad a 7.51. Este comportamiento reafirma que el sulfonato tiene un efecto modificador sobre la plasticidad del afirmado, incrementando los estados de consistencia, volviendo al material más cohesivo y compresible.

Ilustración 76: Límite de Atterberg para muestra de afirmado con 5% de ISS2500

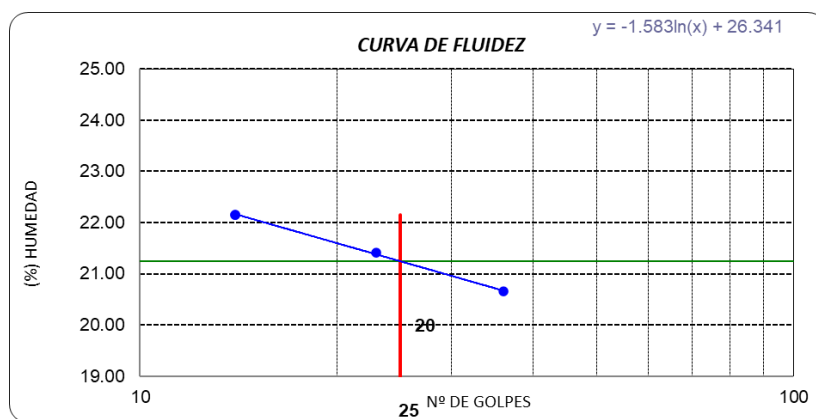
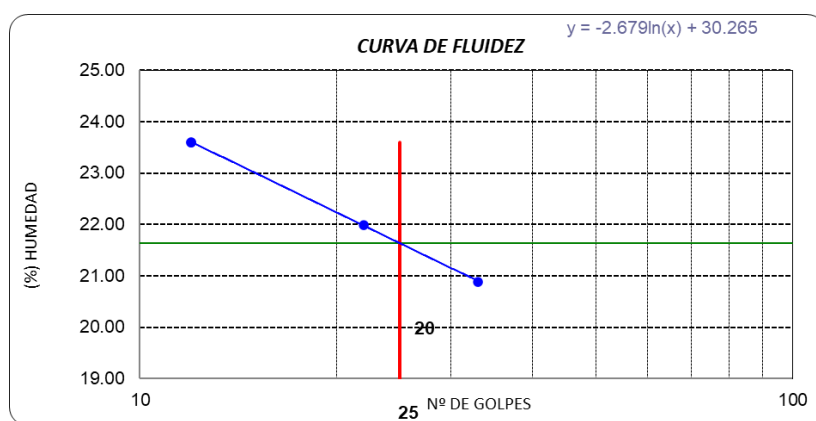


Ilustración 77: Límite de Atterberg para muestra de afirmado con 10% de ISS2500



✓ Proctor Modificado → **Afirmado: con 5% de ISS 2500 + 5% de Viruta de acero**

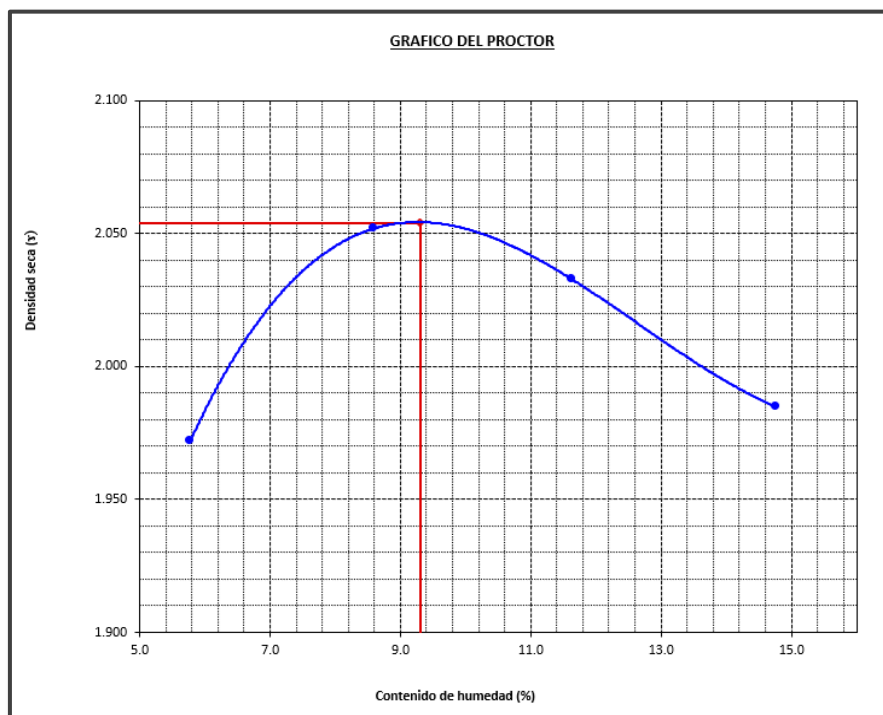
Tabla 49: P.M. para 1er grupo experimental - Afirmado

Muestras de Proctor	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Proctor N°01	2.091	8.80
Proctor N°02	2.028	10.00
Proctor N°03	2.045	8.50
PROMEDIO	2.054	9.30

Los valores promedios muestran una densidad máxima seca de 2.054 g/cm³ y un contenido óptimo de humedad de 9.30%, lo que evidencia una reducción en la capacidad de compactación respecto a la muestra patrón (sin adición), que presentó una densidad en condición seca promedio superior de 2.089 g/cm³ con menor requerimiento de agua (8.10%).

Esto sugiere que la combinación de del 5% de ISS 2500 + 5% de viruta de acero no genera mejoras en la resistencia estructural de la subbase granular tratada. Esta condición no favorece a los resultados que se esperan, ya que va a permitir trabajar con mayor contenido de agua obteniendo una menor densidad y resistencia.

Ilustración 78: Proctor modificado promedio para 1er grupo experimental - Afirmado



✓ **CBR** → **Afirmado: con 5% de ISS 2500 + 5% de Viruta de acero**

Tabla 50: CBR para 1er grupo experimental - Afirmado

Ensayo	CBR al 100%		CBR al 95%	
	2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	50%	62%	44%	53%
CBR 02	52%	64%	43%	51%
CBR 03	54%	64%	48%	56%
CBR 04	54%	66%	49%	59%
CBR 05	35%	40%	27%	30%
CBR 06	54%	65%	48%	56%
CBR 07	36%	40%	28%	31%
CBR 08	56%	66%	49%	56%
CBR 09	54%	61%	45%	50%
CBR 10	56%	63%	46%	50%
CBR 11	58%	63%	48%	52%
CBR 12	55%	62%	44%	49%
CBR 13	34%	39%	27%	30%
CBR 14	58%	63%	48%	51%
CBR 15	36%	40%	28%	31%
Promedio	49.47%	57.20%	41.47%	47.00%

Los resultados indican un mejor desempeño en términos de capacidad resistente del afirmado respecto a su estado natural. La densidad al 100 % muestra valores de CBR para penetraciones de 2.54 cm y 5.08 cm que oscilan entre 34 % a 58 % y entre 39 % a 66 %, respectivamente. Por otro lado, la densidad al 95 % muestra valores de CBR que varían entre 27 % y 49 % (para 2.54 cm) y entre 30 % y 59 % (para 5.08 cm). El análisis en conjunto de los 15 ensayos refleja un desempeño promedio con valores de CBR de 49.5% a 2.54 cm de penetración y 57.2 % a 5.08 cm de penetración para la densidad al 100 %, y de 41.47 % a 2.54 cm y 47.00 % a 5.08 cm para la densidad al 95 %. Estos promedios evidencian una mejora frente al afirmado natural, cuyos valores promedio se encuentran entre 19.7 % y 22.3 % (100 % D.M.S.) y entre 14.3 % y 16.7 % (95 % D.M.S.).

En conclusión, la mezcla estabilizada con 5 % de Sulfonato ISS 2500 y 5 % de viruta de acero incrementa la capacidad portante del afirmado, mejorando sustancialmente su desempeño mecánico como subbase granular. Esta combinación ofrece una alternativa viable para el reforzamiento de subbases en obras de pavimentación, proporcionando resistencia y estabilidad frente a deformaciones y sollicitaciones mecánicas.

Ilustración 79: Índice de CBR 01 para 1er grupo experimental de afirmado

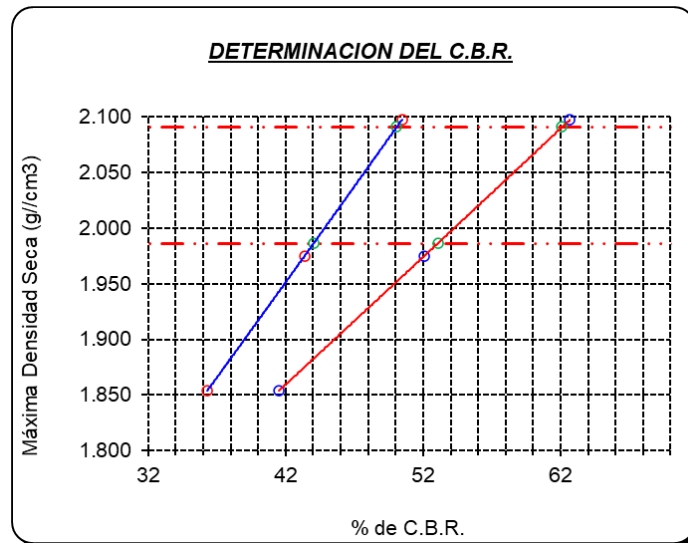


Ilustración 80: Índice de CBR 02 para 1er grupo experimental de afirmado

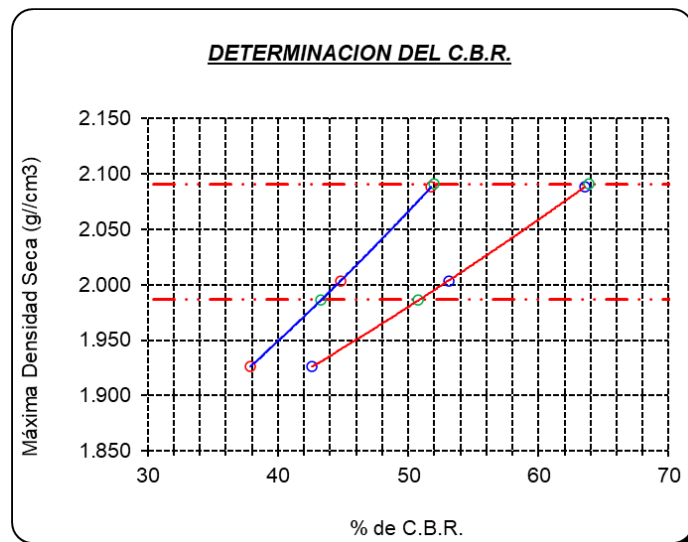
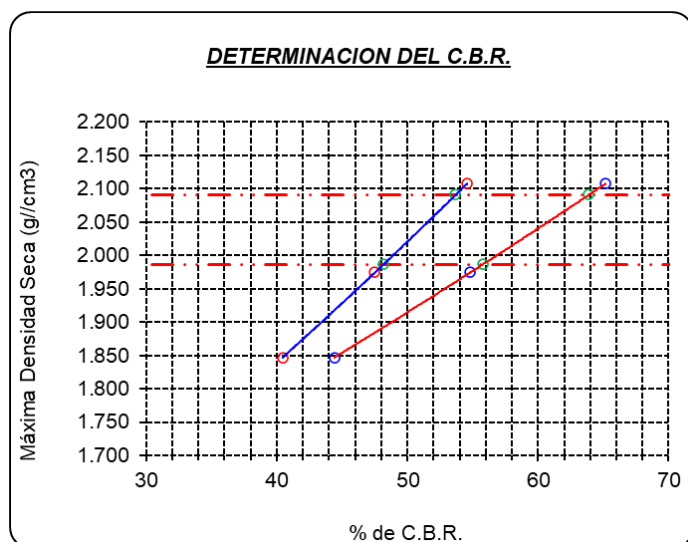


Ilustración 81: Índice de CBR 03 para 1er grupo experimental de afirmado



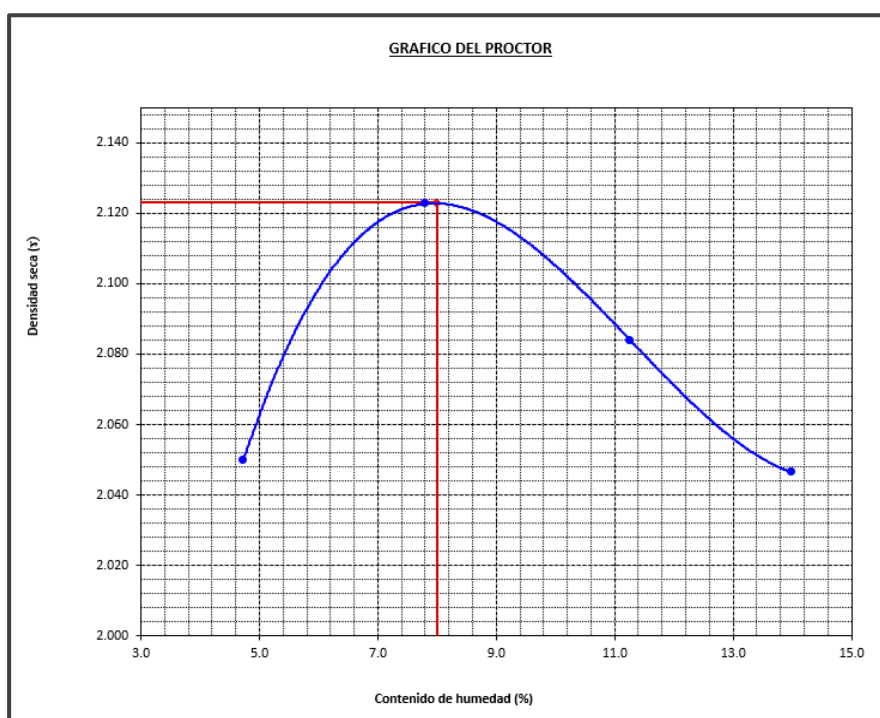
✓ Proctor Modificado → **Afirmado: con 5% de ISS 2500 + 10% de Viruta de acero**

Tabla 51: Proctor modificado para 2do grupo experimental - Afirmado

Muestras de Proctor	Densidad máxima seca (g/cm ³)	Contenido óptimo de humedad (%)
Proctor N°01	2.108	7.80
Proctor N°02	2.118	8.50
Proctor N°03	2.138	8.00
PROMEDIO	2.123	8.00

Los resultados indican que la estabilización de la subrasante con 5 % de sulfonato ISS 2500 y 10 % de viruta de acero permite alcanzar una densidad máxima seca promedio de 2.123 g/cm³ con un contenido óptimo de humedad de 8.00 %. Esta mejora respecto al afirmado sin estabilizar sugiere que los aditivos aumentan la eficiencia de compactación del material, promoviendo una estructura más densa y estable. Además, esta mezcla requiere menor contenido de humedad para alcanzar la compactación máxima comparado con la muestra patrón, lo que implica ventajas constructivas como mayor rapidez en la ejecución y menor consumo de agua. En conjunto, los resultados respaldan el uso de esta combinación como técnica efectiva para mejorar su resistencia y capacidad portante de las subbases granulares para proyectos de pavimentación.

Ilustración 82: Proctor modificado promedio para 2do grupo experimental - Afirmado



✓ **CBR** → **Afirmado: con 5% de ISS 2500 + 10% de Viruta de acero**

Tabla 52: CBR para 2do grupo experimental - Afirmado

Ensayo	CBR al 100%		CBR al 95%	
	2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	68%	62%	56%	52%
CBR 02	69%	62%	57%	53%
CBR 03	72%	64%	60%	55%
CBR 04	69%	62%	57%	54%
CBR 05	35%	39%	27%	30%
CBR 06	72%	64%	60%	55%
CBR 07	35%	41%	28%	31%
CBR 08	73%	65%	61%	56%
CBR 09	73%	65%	59%	55%
CBR 10	74%	66%	61%	57%
CBR 11	76%	68%	63%	58%
CBR 12	74%	67%	60%	56%
CBR 13	35%	40%	27%	30%
CBR 14	77%	68%	64%	59%
CBR 15	35%	41%	28%	31%
Promedio	62.47%	58.27%	51.20%	48.80%

Los resultados evidencian un incremento significativo de la resistencia respecto al suelo en estado natural. Con una densidad al 100 %, los valores de CBR oscilaron entre 35% y 77% (para 2.54 cm) y entre 39% y 68% (para 5.08 cm). Por otro lado, la densidad al 95 % muestra valores de CBR que varían entre 27% y 64% (para 2.54 cm) y entre 30% y 59% (para 5.08 cm). El análisis en conjunto de los 15 ensayos refleja un desempeño promedio con valores de CBR de 62.47% a 2.54 cm de penetración y 58.27% a 5.08 cm de penetración para una densidad al 100 %, y de 51.20% a 2.54 cm de penetración y 48.80% a 5.08 cm de penetración para una densidad al 95 %. Estos promedios evidencian una mejora clara frente al afirmado natural, cuyos valores promedio se encuentran entre 19.7 % y 22.3 % (100 % D.M.S.) y entre 14.3 % y 16.7 % (95 % D.M.S.).

En conclusión, el tratamiento del suelo con 5 % de Sulfonato ISS 2500 y 10 % de viruta de acero resulta favorable desde el punto de vista del desempeño mecánico. La mezcla estabilizada supera consistentemente los valores del afirmado natural, lo que se traduce en una subbase granular más estable, resistente y con mayor capacidad de carga. Esto reduce el riesgo de las deformaciones plásticas y mejora la vida útil del pavimento, justificando su aplicación en proyectos viales que requieren soluciones eficientes.

Ilustración 83: Índice de CBR 07 para 2do grupo experimental de afirmado

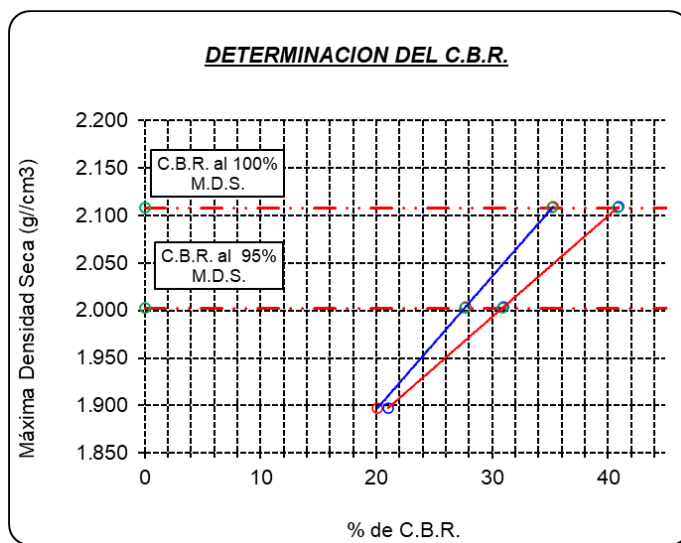


Ilustración 84: Índice de CBR 08 para 2do grupo experimental de afirmado

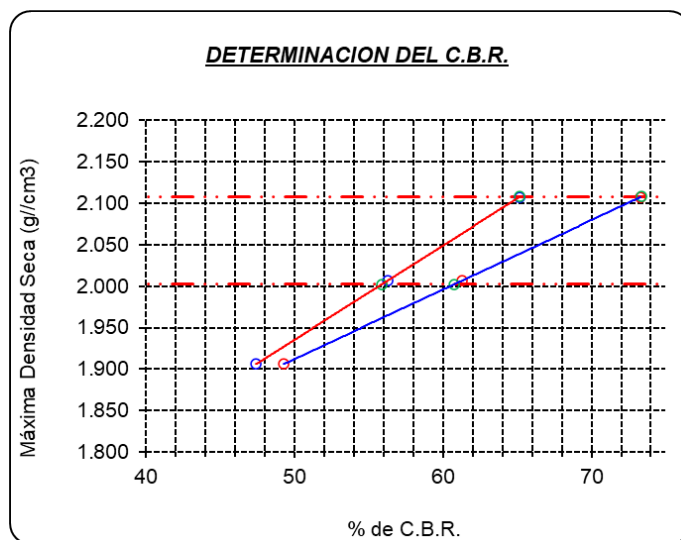
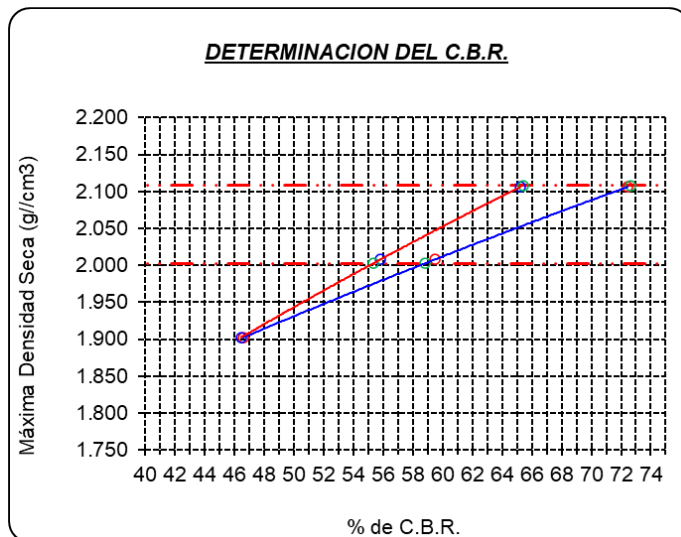


Ilustración 85: Índice de CBR 09 para 2do grupo experimental de afirmado



✓ Proctor Modificado → **Afirmado: con 10% de ISS 2500 + 5% de Viruta de acero**

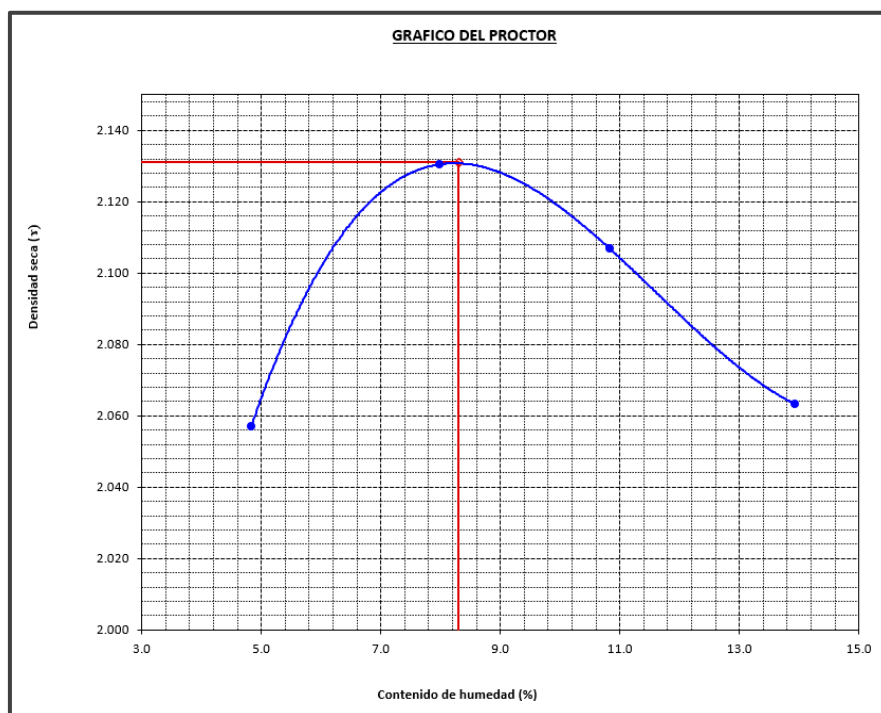
Tabla 53: Proctor modificado para 3er grupo experimental - Afirmado

Muestras de Proctor	Máxima densidad seca (g/cm ³)	Óptimo contenido de humedad (%)
Proctor N°01	2.111	8.62
Proctor N°02	2.146	8.50
Proctor N°03	2.147	7.60
PROMEDIO	2.131	8.30

Los resultados nos muestran que la estabilización de la subbase granular con 10 % de sulfonato ISS 2500 y 5 % de viruta de acero permite alcanzar una densidad máxima seca promedio de 2.131 g/cm³ con un contenido óptimo de humedad de 8.30 %. Estos valores respecto al afirmado sin estabilizar (2.089g/cm³ y 8.10 %, respectivamente) nos confirman que los aditivos empleados aumentan la eficiencia de compactación del material, generando que la estructura sea más estable.

Esta mejora implica una mayor eficiencia en la compactación, ya que se logra una mayor densificación con un menor contenido de agua. Por otro lado, la viruta de acero contribuye al aumento de la rigidez granular, mientras que el sulfonato ISS2500 actúa como agente aglomerante, haciendo que la subbase tratada sea más resistente, uniforme y adecuado para aplicaciones de la carpeta asfáltica en pavimentos.

Ilustración 86: Proctor modificado promedio para 3er grupo experimental - Afirmado



✓ **CBR** → **Afirmado: con 10% de ISS 2500 + 5% de Viruta de acero**

Tabla 54: CBR para 3er grupo experimental - Afirmado

Ensayo	CBR al 100%		CBR al 95%	
	2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	71%	63%	60%	55%
CBR 02	73%	64%	60%	55%
CBR 03	75%	66%	62%	57%
CBR 04	73%	65%	62%	57%
CBR 05	35%	40%	27%	30%
CBR 06	75%	66%	63%	57%
CBR 07	35%	40%	27%	30%
CBR 08	75%	65%	62%	57%
CBR 09	71%	63%	58%	54%
CBR 10	72%	64%	61%	56%
CBR 11	74%	65%	63%	58%
CBR 12	77%	69%	63%	58%
CBR 13	33%	38%	24%	27%
CBR 14	73%	64%	61%	56%
CBR 15	34%	39%	26%	28%
Promedio	63.07%	58.07%	51.93%	49.00%

Se evidencia un mejor desempeño en términos de resistencia respecto al material de afirmado en condición natural. Con una densidad al 100 %, los valores de CBR oscilaron entre 33 % y 77 % (para 2.54 cm) y entre 38 % y 69 % (para 5.08 cm). Por otro lado, la densidad al 95 % muestra valores de CBR que varían entre 24 % y 63 % (para 2.54 cm) y entre 27 % y 58 % (para 5.08 cm). El análisis en conjunto de los 15 ensayos refleja un desempeño promedio con valores de CBR de 63.07 % a 2.54 cm de penetración y 58.07 % a 5.08 cm de penetración para una densidad al 100 %, y de 51.93 % a 2.54 cm de penetración y 49.00 % a 5.08 cm de penetración para una densidad al 95 %. Estos promedios evidencian una mejora frente al afirmado natural, cuyos valores promedio se encuentran entre 19.7 % y 22.3 % (100 % D.M.S.) y entre 14.3 % y 16.7 % (95 % D.M.S.).

En conclusión, el tratamiento de la subbase con 10 % de Sulfonato ISS 2500 y 5 % de viruta de acero resulta favorable en términos de desempeño mecánico. La mezcla estabilizada no solo alcanza, sino que en muchos casos supera los valores de CBR del afirmado natural, proporcionando una subbase más estable, resistente y adecuada para su uso en pavimentación, con menor riesgo de deformaciones plásticas a largo plazo.

Ilustración 87: Índice de CBR 10 para 3er grupo experimental de afirmado

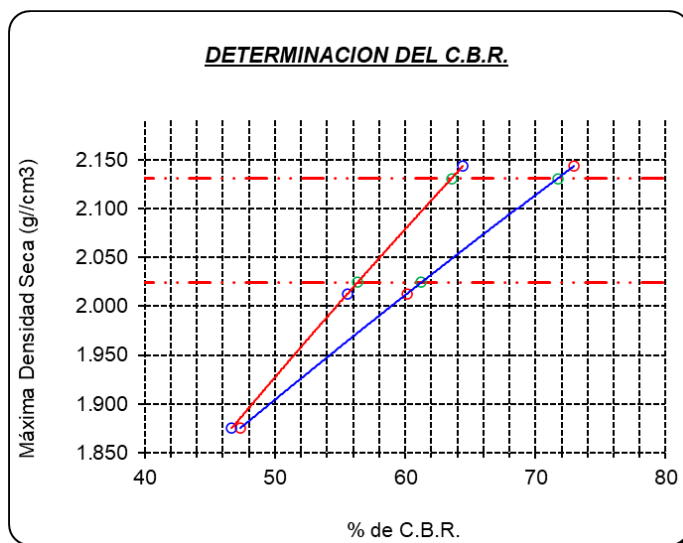


Ilustración 88: Índice de CBR 11 para 3er grupo experimental de afirmado

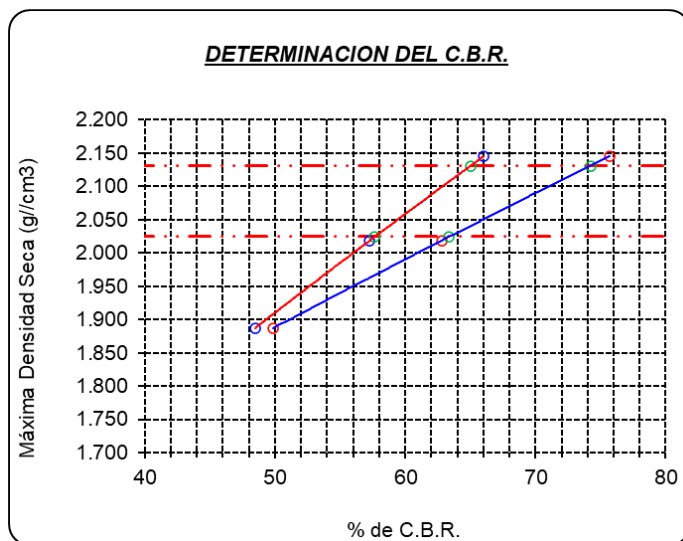
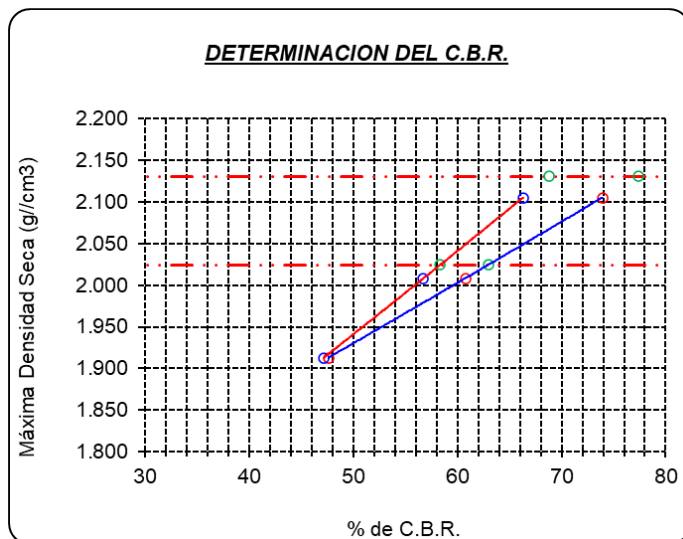


Ilustración 89: Índice de CBR 12 para 3er grupo experimental de afirmado



✓ Proctor Modificado → **Afirmado: con 10% de ISS 2500 + 10% de Viruta de acero**

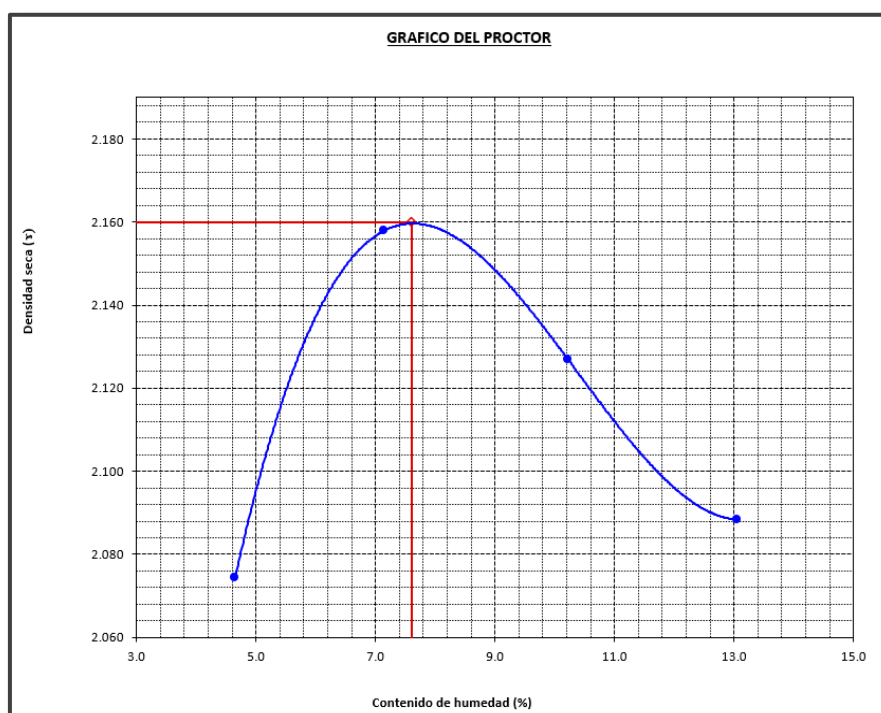
Tabla 55: Proctor modificado para 4to grupo experimental - Afirmado

Muestras de Proctor	Densidad seca máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)
Proctor N°01	2.165	6.85
Proctor N°02	2.158	8.10
Proctor N°03	2.154	8.40
PROMEDIO	2.160	7.60

Los resultados indican que la estabilización de la subbase con 10 % de sulfonato ISS 2500 y 10 % de viruta de acero permite obtener la máxima densidad seca promedio de 2.160 g/cm³ con un porcentaje óptimo de humedad de 7.60 %. Estos valores respecto al afirmado sin estabilizar (2.089g/cm³ y 8.10 %, respectivamente) nos confirman que los aditivos empleados aumentan la eficiencia de compactación del material, generando que la estructura sea más estable.

Esta mejora implica una mayor eficiencia en la compactación, ya que se logra una mayor densificación con un menor contenido de agua. Por otro lado, la viruta de acero contribuye al aumento de la rigidez granular, mientras que el sulfonato ISS2500 actúa como agente aglomerante, haciendo que la subbase tratada sea más resistente, uniforme y adecuado para aplicaciones de la carpeta asfáltica en pavimentos.

Ilustración 90: Proctor modificado promedio para 4to grupo experimental - Afirmado



✓ **CBR** → **Afirmado: con 10% de ISS 2500 + 10% de Viruta de acero**

Tabla 56: CBR para 4to grupo experimental - Afirmado

Ensayo	CBR al 100%		CBR al 95%	
	2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
CBR 01	77%	69%	67%	61%
CBR 02	79%	70%	69%	63%
CBR 03	83%	73%	72%	64%
CBR 04	80%	71%	71%	65%
CBR 05	35%	39%	28%	31%
CBR 06	80%	70%	71%	64%
CBR 07	34%	39%	27%	30%
CBR 08	84%	73%	73%	65%
CBR 09	74%	64%	61%	56%
CBR 10	78%	67%	68%	61%
CBR 11	80%	68%	70%	62%
CBR 12	82%	70%	69%	61%
CBR 13	72%	64%	61%	54%
CBR 14	79%	68%	68%	61%
CBR 15	71%	63%	62%	55%
Promedio	72.53%	64.53%	62.47%	56.87%

Se evidencia un desempeño superior en términos de resistencia respecto al afirmado en condición natural. Con una densidad al 100 %, los valores de CBR oscilaron entre 34 % y 84% (para 2.54 cm) y entre 39 % y 73% (para 5.08 cm). Por otro lado, la densidad al 95 % muestra valores de CBR que varían entre 27% y 73% (para 2.54 cm) y entre 30% y 65% (para 5.08 cm). El análisis en conjunto de los 15 ensayos refleja un desempeño promedio con valores de CBR de 72.53% a 2.54 cm de penetración y 64.53% a 5.08 cm de penetración para una densidad al 100 %, y de 62.47% a 2.54 cm de penetración y 56.87% a 5.08 cm de penetración para una densidad al 95 %. Estos promedios evidencian una mejora frente al afirmado natural, cuyos valores promedio se encuentran entre 19.7 % y 22.3 % (100 % D.M.S.) y entre 14.3 % y 16.7 % (95 % D.M.S.).

En conclusión, el tratamiento de la subbase con 10 % de Sulfonato ISS 2500 y 10% de viruta de acero resulta favorable, siendo este diseño, el que mejores resultados obtuvo en comparación con las otras adiciones trabajadas.

Ilustración 91: Índice de CBR 13 para 4to grupo experimental de afirmado

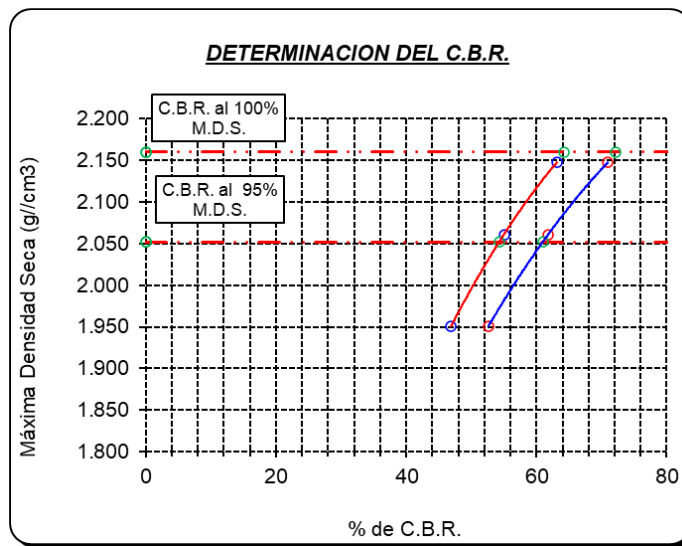


Ilustración 92: Índice de CBR 14 para 4to grupo experimental de afirmado

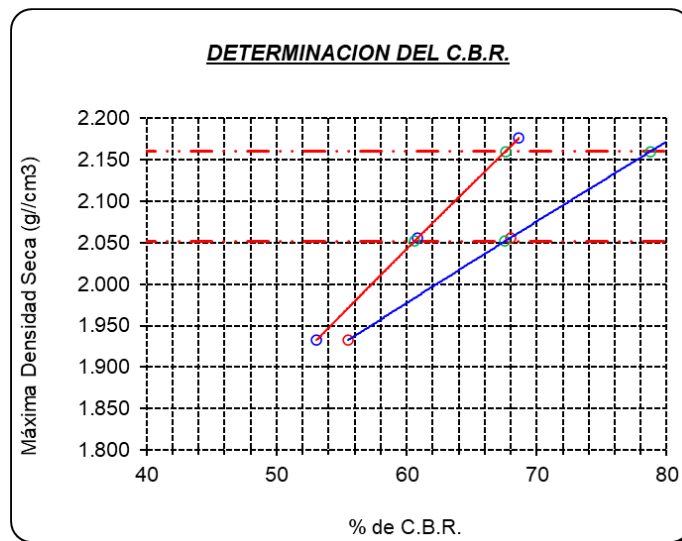
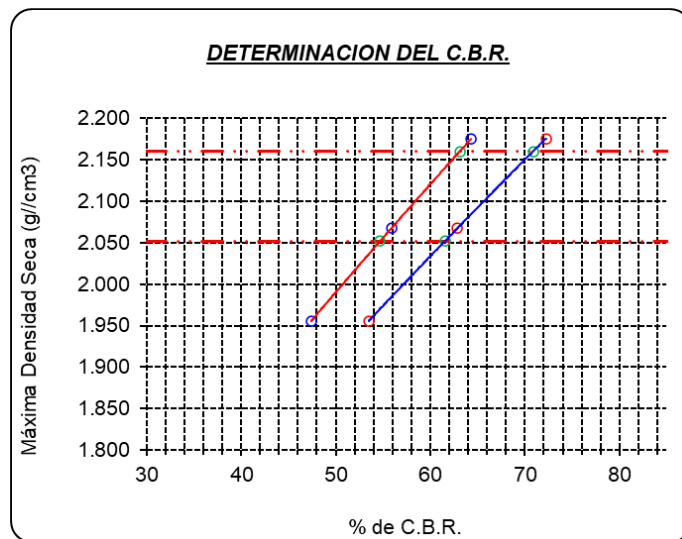


Ilustración 93: Índice de CBR 15 para 4to grupo experimental de afirmado



○ Determinación de dosis óptima experimental

✓ Para subrasante → **Suelo – Calicata N°03**

Tabla 57: Comparación porcentual del CBR para los distintos diseños de la subrasante

Estado del material	MDS (g/cm ³)	OCH (%)	CBR al 100%		CBR al 95%	
			2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
Suelo Natural	2.013	13.59	24.70%	29.30%	20.70%	24.00%
5% ISS 2500 + 5% VA	2.016	13.30	29.33%	35.27%	23.67%	27.47%
5% ISS 2500 + 10% VA	2.060	13.30	28.13%	32.93%	24.53%	27.40%
10% ISS 2500 + 5% VA	2.130	13.10	35.60%	41.13%	28.87%	32.53%
10% ISS 2500 + 10% VA	2.090	12.50	35.93%	39.20%	32.13%	34.13%

Tabla 58: Incremento porcentual del CBR para el diseño óptimo de la subrasante

DISEÑO ÓPTIMO	MDS (g/cm ³)	OCH (%)	CBR al 100%		CBR al 95%	
			2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
Suelo Natural	2.013	13.59	24.70%	29.30%	20.70%	24.00%
10% ISS 2500 + 10% VA	2.090	12.50	35.93%	39.20%	32.13%	34.13%
Incremento (%)	+ 3.93	- 9.42	+ 45.47	+ 33.79	+ 55.22	+ 42.21

En la tabla 57 se puede apreciar que el 4to grupo experimental (10 % de ISS2500 + 10% de Viruta de acero) es el que mejores resultados brinda en comparación con los demás diseños trabajados en esta investigación.

Por otro lado, la tabla 58 por otra parte, la Tabla 58 presenta una comparación entre el diseño óptimo y el suelo sin tratamiento. Se evidencia que para un CBR al 100% se genera un crecimiento porcentual del 45.47% y 33.79% para una penetración de 2.54cm y 5.08cm respectivamente, mientras que para un CBR al 95% se genera un crecimiento porcentual del 55.22% y 42.21% para una penetración de 2.54cm y 5.08cm correlativamente.

✓ Para subbase granular → **Afirmado**

Tabla 59: Comparación porcentual del CBR para los distintos diseños de la subbase

Estado del material	MDS (g/cm ³)	OCH (%)	CBR al 100%		CBR al 95%	
			2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
Suelo Natural	2.089	8.10	19.67%	22.33%	14.33%	16.67%
5% ISS 2500 + 5% VA	2.054	9.30	49.47%	57.20%	41.47%	47.00%
5% ISS 2500 + 10% VA	2.123	8.00	62.47%	58.27%	51.20%	48.80%
10% ISS 2500 + 5% VA	2.131	8.30	63.07%	58.07%	51.93%	49.00%
10% ISS 2500 + 10% VA	2.160	7.60	72.53%	64.53%	62.47%	56.87%

Tabla 60: Incremento porcentual del CBR para el diseño óptimo de la subbase

DISEÑO ÓPTIMO	MDS (g/cm ³)	OCH (%)	CBR al 100%		CBR al 95%	
			2.54 cm	5.08 cm	2.54 cm	5.08 cm
Suelo Natural	2.089	8.10	19.67%	22.33%	14.33%	16.67%
10% ISS 2500 + 10% VA	2.160	7.60	72.53%	64.53%	62.47%	56.87%
Incremento (%)	+ 3.40	- 6.17	+ 268.7	+ 188.9	+ 335.9	+ 241.2

En la tabla 59 se puede apreciar que el 4to grupo experimental (10 % de ISS2500 + 10% de Viruta de acero) es el que mejores resultados brinda en comparación con los demás diseños trabajados en esta investigación.

Por otro lado, la tabla 60 nos muestra una comparación entre este diseño óptimo y la muestra de afirmado natural. Se observa que para un CBR al 100% se genera un crecimiento porcentual del 268.7% y 188.9% para una penetración de 2.54cm y 5.08cm respectivamente, mientras que para un CBR al 95% se genera un crecimiento porcentual del 335.9% y 241.2% para una penetración de 2.54cm y 5.08cm correlativamente.

○ Ensayo de permeabilidad aplicando el diseño óptimo

✓ Para subrasante → **Suelo:** Muestra patrón y diseño óptimo

Tabla 61: Ensayo de permeabilidad para muestra patrón y diseño óptimo – subrasante

Descripción	Muestra patrón (Sin adición)	Diseño óptimo (10% de ISS2500 + 10% VA)
Volumen de agua que pasa (cm ³)	90.00	75.00
Longitud de la muestra (cm)	26.50	26.50
Área transversal de la muestra (cm ²)	31.17	31.17
Altura de columna de agua (cm)	136	136
Tiempo de medición (s)	1596	2270
Coefficiente de permeabilidad	0.000352489	0.000206524

✓ Para subbase granular → **Afirmado:** Muestra patrón y diseño óptimo

Tabla 62: Ensayo de permeabilidad para muestra patrón y diseño óptimo – subbase granular

Descripción	Muestra patrón (Sin adición)	Diseño óptimo (10% de ISS2500 + 10% VA)
Volumen de agua que pasa (cm ³)	45.00	105.00
Longitud de la muestra (cm)	26.50	26.50
Área transversal de la muestra (cm ²)	31.17	31.17
Altura de columna de agua (cm)	136	136
Tiempo de medición (s)	2256	6318
Coefficiente de permeabilidad	0.000124684	0.000103883

Los resultados muestran una reducción del 41.4% de permeabilidad para la muestra de suelo al emplear el diseño óptimo (10% de sulfonado ISS2500 + 10% de Viruta de acero) al contrastarlo con la muestra de referencia, mientras que para el afirmado correspondiente a la subbase granular presenta una reducción del 16.68%.

○ Análisis de costos

✓ Para subrasante → **Suelo: Muestra patrón (sin adición)**

Tabla 63: Análisis de costos por m2 para subrasante – muestra patrón (sin adición)

Partida: Preparación de la subrasante c/equipo						
Rendimiento:	3700	m2/día	N° horas:	8	Unidad	m2
Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	P. Unitario	P. Parcial	
MANO DE OBRA						
Operario	hh	1.00	0.0022	27.63	0.06	
Peón	hh	7.00	0.0151	19.68	0.30	
					0.36	
EQUIPOS Y/O HERRAMIENTAS						
Herramientas (3%)	%MO		0.0300	0.36	0.00	
Camión cisterna 4x2 (Agua) 2000 Gal	hm	1.00	0.0022	260.03	0.56	
Motoniveladora 130 - 135 HP	hm	1.00	0.0022	282.40	0.61	
Rodillo liso vibr. Autop. 10-12 ton	hm	1.00	0.0022	245.18	0.53	
					1.70	
COSTO UNITARIO DIRECTO POR 1m²						2.06

✓ Para subrasante → **Suelo: Diseño óptimo (10% de ISS2500 + 10%VA)**

Tabla 64: Análisis de costos por m2 para subrasante – Diseño óptimo (10%ISS2500 + 10%VA)

Partida: Preparación de la subrasante c/equipo						
Rendimiento:	3700	m2/día	N° horas:	8	Unidad	m2
Descripción	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	P. Unitario	P. Parcial	
MANO DE OBRA						
Operario	hh	1.00	0.0022	27.63	0.06	
Peón	hh	7.00	0.0151	19.68	0.30	
					0.36	
MATERIALES						
Aceite sulfonado	l		0.06	76.48	4.58	
Viruta de acero calcinada	kg		0.48	15.00	7.18	
					11.76	
EQUIPOS Y/O HERRAMIENTAS						
Herramientas (3%)	%MO		0.0300	0.36	0.00	
Camión cisterna 4x2 (Agua) 2000 Gal	hm	1.00	0.0022	260.03	0.56	
Motoniveladora 130 - 135 HP	hm	1.00	0.0022	282.40	0.61	
Rodillo liso vibr. Autop. 10-12 ton	hm	1.00	0.0022	245.18	0.53	
					1.70	
COSTO UNITARIO DIRECTO POR 1m²						13.82

✓ **Para subbase granular → Afirmado: Muestra patrón (sin adición)**

Tabla 65: Análisis de costos por m² para subbase granular – muestra patrón (sin adición)

Partida: Subbase granular e=0.20m c/equipo							
Rendimiento:		450 m ² /día	N° horas:		8	Unidad	m ²
Descripción		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	P. Unitario	P. Parcial	
MANO DE OBRA							
Operario		hh	1.00	0.0178	27.63	0.49	
Peón		hh	7.00	0.1244	19.68	2.45	
						2.94	
MATERIALES							
Material granular A-2-6(1) AASHTO		m ³		0.80	27.00	21.65	
						21.65	
EQUIPOS Y/O HERRAMIENTAS							
Herramientas (3%)		%MO		0.0300	0.00	0.00	
Camión cisterna 4x2 (Agua) 2000 Gal		hm	1.00	0.0178	260.03	4.62	
Motoniveladora 130 - 135 HP		hm	1.00	0.0178	282.40	5.02	
Rodillo liso vibr. Autop. 10-12 ton		hm	1.00	0.0178	245.18	4.36	
						14.00	
COSTO UNITARIO DIRECTO POR 1m²						38.59	

✓ **Para subbase granular → Afirmado: Diseño óptimo (10% de ISS2500 + 10%VA)**

Tabla 66: Análisis de costos por m² para subbase granular – Diseño óptimo (10%ISS2500 + 10%VA)

Partida: Subbase granular e=0.20m c/equipo							
Rendimiento:		450 m ² /día	N° horas:		8	Unidad	m ²
Descripción		Unidad	Cuadrilla	Can t.	P. Unitario	P. Parcial	
MANO DE OBRA							
Operario		hh	1.00	0.0178	27.63	0.49	
Peón		hh	7.00	0.1244	19.68	2.45	
						2.94	
MATERIALES							
Material granular A-2-6(1) AASHTO		m ³		0.80	27.00	21.65	
Aceite sulfonado		l		0.04	76.48	2.78	
Viruta de acero calcinada		kg		0.48	15.00	7.18	
						31.62	
EQUIPOS Y/O HERRAMIENTAS							
Herramientas (3%)		%MO		0.0300	2.94	0.00	
Vehículo cisterna 4x2 Agua 2000 Gal		hm	1.00	0.0178	260.03	4.62	
Equipo motonivelador 130 - 135 HP		hm	1.00	0.0178	282.40	5.02	
Rodillo liso vibr. Autop. 10-12 ton		hm	1.00	0.0178	245.18	4.36	
						14.00	
COSTO UNITARIO DIRECTO POR 1m²						48.56	

- *Discusión de resultados*

- ✓ *Para ensayo de Proctor Modificado y CBR*

Según el objetivo; en especímenes convencionales y modificados, se determinarán el CBR, el contenido de humedad óptimo y la densidad máxima en condición seca, los resultados obtenidos indican una resistencia favorable en todas las adiciones trabajadas; sin embargo, la incorporación del 10% ISS 2500 + 10% de viruta de acero, es el diseño más destacable para la subrasante ya que nos muestra un mayor incremento de resistencia a comparación de los otros diseños. En la tabla 58 (para subrasante) en comparación con el diseño de referencia, se evidencia un aumento en la densidad máxima y una disminución en el porcentaje de humedad. Por otro lado, los datos obtenidos para el CBR al 100% de M.D.S. de las muestras control (sin adición) fueron del 24.7% y 29.3% para una penetración de 2.54cm y 5.08cm respectivamente, mientras que las muestras con incorporación del 10% ISS 2500 + 10% VA obtuvieron valores de 35.93% y 39.20% para una penetración de 2.54cm y 5.08cm respectivamente. Asimismo, en la tabla 60 (para subbase granular) Se observa un aumento de la densidad máxima y una disminución del contenido de humedad en comparación con el diseño de referencia; mientras que, los datos obtenidos para el CBR al 100% de M.D.S. de las muestras control (sin adición) fueron del 19.67% y 22.33% para una penetración de 2.54cm y 5.08cm respectivamente, mientras que las muestras con incorporación del 10% ISS 2500 + 10% VA obtuvieron valores de 72.53% y 64.53% para una penetración de 2.54cm y 5.08cm respectivamente. Estos datos concuerdan con la investigación realizada por L. Pacheco Moya [12], el cual hace mención que la incorporación del 7% de ISS 2500 es la cantidad óptima para emplear, brindándole un incremento del CBR para la subrasante de 5.80% a 48.30 %, además de reducir significativamente la plasticidad del suelo tratado.

En conclusión, los resultados evidencian que la adición de agente sulfonado y partículas de acero ejerce un efecto favorable en el mejoramiento de suelos proporcionando una subrasante más estable, resistente y adecuada para su uso en pavimentación, con menor riesgo de deformaciones plásticas a largo plazo. No obstante, es necesario realizar un análisis de influencia en los límites de Atterberg, donde E. J. Castañeda Niño [1] en su investigación destaca que el incorporar sulfonato a la subrasante no solo incrementa su CBR, sino también genera un incremento de índice de plasticidad evidenciando de esta manera también la mejora de otras propiedades generando una mayor compactación y resistencia del suelo tratado.

✓ **Para ensayo de Permeabilidad**

Según el objetivo; determinar la permeabilidad convencional y experimental según dosis óptima para subrasante y subbase granular, los resultados muestran una reducción del 41.4% de permeabilidad para la muestra de suelo al emplear el diseño óptimo (10% de sulfonado ISS2500 + 10% de Viruta de acero) respecto a la muestra patrón, en tanto que para el material de afirmado (subbase granular) presenta una reducción del 16.68%. Estos resultados hacen concluir que la incorporación del Sulfonado y la viruta de acero reducen la permeabilidad de suelos, proporcionando también una reducción de su plasticidad. Por otro lado, es interesante realizar un análisis de permeabilidad con algún otro aditivo similar, donde S. F. Leyva Mateos [11] en su investigación destaca que el incorporar CONSOLID C444 a la subrasante reduce significativamente la permeabilidad del suelo trayendo como consecuencia una mayor resistencia a la filtración del agua.

✓ **Para análisis comparativo de costos**

Los resultados que responden al objetivo específico de estimar una evaluación económica comparativa entre el tratamiento de la subrasante empleando la dosificación óptima de agente sulfonado en combinación con material de acero y la estabilización de suelo por el método tradicional, indican un aumento poco considerable de los costos al aplicar estos materiales. En las tablas 63-64 se puede observar que el costo para la preparación de 1m² de subrasante sin adición es de 2.06 soles, mientras que para una subrasante con adición del 10% de ISS2500 + 10% de viruta de acero calcinada es de 13.82 soles. Por otro lado, las tablas 65 y 66 se aprecia que el costo para la preparación de 1m² de subbase granular sin adición es de 38.59 soles, mientras que para la subbase granular con adición del porcentaje óptimo de sulfonado y viruta de acero es de 48.56 soles, lo que representa un incremento del 25.8%. Sin embargo, los ensayos realizados en esta investigación revelan una mejora en las propiedades del suelo adicionando estos materiales en comparación con un suelo o afirmado tradicional, lo que permite concluir que la incorporación del sulfonado y la viruta de acero calcinada le brindan a la subrasante y subbase una mayor durabilidad incrementando sus valores de CBR a un costo adicional no muy elevado. Es así como la justificación de este incremento en el costo requiere de una evaluación exhaustiva y detallada de los beneficios a lo largo del tiempo que ofrece el uso de la viruta de acero calcinada y el sulfonado en la estabilización de suelos y subbases granulares con fines de pavimentación.

Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en esta investigación, se concluye que todos los diseños con adición propuestos optimizaron las propiedades de la subbase y la subrasante. Es así como de los diseños evaluados, el cuarto diseño se destacó por presentar mejores resultados, alcanzando un incremento del CBR del 33.73% y 188.9% con un grado de compactación del 100% respecto a la densidad seca máxima para la subrasante y subbase granular respectivamente, además de una mejora notable en la eficiencia de la compactación logrando una mayor densificación reduciendo el porcentaje del contenido de agua.

Los ensayos para la caracterización física de la muestra de suelo C-03 nos brindó un valor de contenido de humedad del 2.80% lo que refleja las condiciones secas del terreno al momento del muestreo. Por otro lado, su granulometría presentó un 22.1% de finos que atraviesan la malla #200; así como un límite líquido y plástico del 34.88% y 25.00% respectivamente y un índice de plasticidad de 9.88%, lo cual evidencia una limitada plasticidad del material. Estos resultados permitieron clasificar la muestra según SUCS como arena limosa con grava (SM) y “buena” dentro del grupo A-2-4 (0) según AASHTO.

Por otro lado, para los ensayos de caracterización del afirmado nos brindó un contenido de humedad del 8.15% lo que indica que el material presenta una condición aceptable para trabajar en campo. Su granulometría presentó un 30.8% de finos que atraviesan la malla #200; así como un límite líquido y plástico del 26.60% y 14.18% respectivamente y un índice de plasticidad del 12.42%. Estos resultados permitieron clasificar la muestra según SUCS como arena arcillosa con grava (SC) y “regular” dentro del grupo A-2-6 (1) según AASHTO.

Para el ensayo de CBR, el cuarto diseño (10% de ISS2500 + 10% de viruta de acero) fue quien mejor destacó presentando resultados correspondiente al 100% de la densidad seca máxima del 39.20% frente a un 29.30% del diseño patrón para el análisis de la subrasante. Asimismo, este cuarto diseño presentó un incremento para la muestra de afirmado del 64.53% de CBR al 100% de su máxima densidad seca frente al diseño patrón que obtuvo un valor de CBR del 22.33%.

El ensayo de permeabilidad mostró una reducción del 41.4% y 16.68% para la muestra de subrasante y subbase granular respectivamente al emplear el diseño óptimo (10% de sulfonado ISS2500 + 10% de Viruta de acero) en comparación con la muestra patrón.

Los análisis de costos determinaron que el uso del ISS2500 junto a la viruta de acero calcinada es económicamente viable además de mejorar las propiedades tanto de resistencia como de durabilidad, pues para elaborar 1m² de subbase granular el costo incrementa de 10 soles por cada m² lo que representa un 25.8% de incremento en comparación con una subbase granular natural lo que hace que el incremento de costos sea económicamente viable.

En general, se logró demostrar que el incorporar ISS2500 junto a la viruta de acero calcinada en el mejoramiento de suelos con aplicaciones en infraestructura vial, incrementa sus valores del CBR, además de lograr una mejor compactación con un menor porcentaje de contenido de humedad. Por otro lado, existe una ventaja relacionada con el costo de estos materiales, lo cual reafirma el beneficio positivo que se consigue al utilizarlos.

Recomendaciones

Para los próximos investigadores es aconsejable continuar con el estudio de estabilización de suelos empleando el aceite sulfonado y la viruta de acero, pero con adiciones mayores a las utilizadas en esta investigación para de esta manera poder conocer el porcentaje idóneo de adición que evidencie un mejor desempeño en términos de sus propiedades y capacidad resistente.

Para enriquecer esta investigación, es recomendable aplicar el diseño óptimo de adiciones en un tramo de prueba y corroborar si el comportamiento tanto de la subrasante como de la subbase granular es el esperado según los resultados obtenidos en este estudio.

Se recomienda el uso de equipos de protección personal (guantes, mascarillas, etc) al momento de emplear el sulfonado ya que la exposición directa de este material puede provocar irritación a la piel y ojos e incluso vías respiratorias al inhalar partículas minúsculas de viruta de acero.

Referencias

- [1] E. Castañeda Niño y J. Ladron de Guevara, «Aplicación de poliacrilamida aniónica - polycom y sulfonato ISS2500 para estabilización de subrasante, Av. Playa Hermosa, Puente Piedra,» Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2022.
- [2] S. Onyejekwe y G. Ghataora, « Estabilización de suelos utilizando estabilizadores químicos líquidos patentados: aceite sulfonado y un polímero,» Abuja, Nigeria, 2016.
- [3] A. Soltani, « Ingeniería de sistemas de arcillas reactivas mediante el reemplazo con caucho molido y el tratamiento con poliacrilamida,» Australia, 2019.
- [4] V. Yepes, «Los suelos y su estabilización,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2014.
- [5] K. Guerra Armas, «Capacidad de soporte (CBR) en tres suelos arcillosos mediante la adición de fibra de pseudotallo de plátano en distintas proporciones,» UPN, Cajamarca, Perú, 2019.
- [6] P. Vettorelo y J. Clariá, «Suelos reforzados con fibras: revisión del estado del arte y sus aplicaciones, Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, pp. 27-34, 2014.
- [7] J. Manrique Reynaga, «Uso de aceite sulfonado para el mejoramiento de la subrasante en la Av. La Cultura, ubicada en el distrito de Pacucha, Andahuaylas, Apurímac,» Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2021.
- [8] M. Á. Ospina-García, S. B. Chaves Pabón y L. M. Jiménez Sicachá, «Mejoramiento de subrasantes arcillosas mediante la incorporación de escoria de acero.,» Rev.investig.desarro.innov, pp. 185-196, 2020.
- [9] L. N. Cardona Pico y J. S. Sánchez Gómez, «Evaluación de una mezcla suelo-cemento con inclusión de viruta de acero,» Universidad de La Salle, Bogotá, 2018.
- [10] J. E. Páez Ruano y L. F. Díaz Cruz, «Efecto de la adición de aceite sulfonado en el comportamiento dinámico a pequeñas deformaciones de suelos arcillosos.,» Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2019.
- [11] S. F. Leyva Mateos, «Optimización de la impermeabilidad y mitigación de la erosión en obras de drenaje superficial de vías no pavimentadas mediante la aplicación del sistema Consolid», Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/8510?mode=full>
- [12] Y. L. Pacheco Moya, «Uso combinado de aceite sulfonado y cemento para la estabilización de suelos cohesivos en subrasantes,» Universidad Peruana Los Andes, Lima, Perú, 2023.
- [13] S. T. Guizado Pecho y M. D. Hurtado Inga, «Incorporación de fragmentos metálicos reciclados para analizar la estabilización de la subrasante en el circuito vial Azapampa – Huancayo,» Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2021.
- [14] A. G. Galvez Cooper, «Estabilización de suelos arcillosos en subrasantes mediante el uso de emulsión asfáltica y viruta de acero en el sector La Victoria, Lambayeque (2021),» Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú, 2024.
- [15] D. E. Sinarahua Alarcon, «Evaluación de aditivos Perma Zyme 30x y ConAid para la estabilización de subrasante en vías urbanas no pavimentadas de la urbanización Urrunaga

- sector 1 en el distrito de José Leonardo Ortiz, Chiclayo 2020,» Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú, 2021.
- [16] P. I. Flores León, «Análisis de la incorporación de fibras PET recicladas de botellas en la subrasante del suelo del área de estacionamiento de la clínica USAT durante el periodo 2018–2019,» Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú, 2019.
- [17] Comunicaciones, Ministerio de transportes y comunicaciones (MTC), Manual de carreteras: suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos: sección suelos y pavimentos, Lima, Perú, 2014.
- [18] Ministerio de transportes y Comunicaciones (MTC), Manual de ensayos de materiales, Lima, Perú, 2016.
- [19] Ministerio de transportes y Comunicaciones (MTC), Manual De Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción, Lima, Perú, 2013.
- [20] Instituto de la Construcción y Gerencias, «CE.010. Pavimentos Urbanos,» 2010. [En línea]. Available: <https://acortar.link/BJpSGY>
- [21] Norma Técnica Peruana E.050, Suelos y Cimentaciones, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones, 2018.
- [22] Norma Técnica Peruana CE.020, Estabilización de suelos y taludes, Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones, 2018.
- [23] A. Montejo, «Diseño y análisis de pavimentos para carreteras,» Agora, Bogotá, 2002.
- [24] E. Juárez Badillo, «Mecánica de suelos 1: Fundamentos de la mecánica de suelos,» Limusa (3ra edición), México, 2005.
- [25] L. Rucks, F. García., A. Kaplán, J. Ponce de León y M. Hill, «Propiedades físicas del suelo,» Universidad de la República, Uruguay, 2004.
- [26] H. Urdanivia Roque, «Correlación entre la clasificación de suelos (SUCS y AASHTO) y el comportamiento de asentamiento, para la evaluación de asentamientos diferenciales en cimentaciones de concreto armado,» Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú, 2019.
- [27] Ministerio de Economía y Finanzas, «Lineamientos metodológicos para la elaboración de alternativas de pavimentación en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública en carreteras,» SNIP-PERÚ, Lima, Perú, 2015.
- [28] R. Zapata, «Clasificación de suelos: estudio de las propiedades de suelos arcillosos y limosos» Universidad Nacional de Rosario, Lima, Perú, 2018.
- [29] C. Crespo, Fundamentos de mecánica de suelos aplicados al diseño de cimentaciones, 5ta edición, México: Limusa, 2004.
- [30] ABC Geotechnical Consulting, «Límites Atterberg,» 2024. [En línea]. Available: <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/limites-atterberg/>
- [31] A. Montejo Fonseca, Diseño de pavimentos aplicados a carreteras, 2th ed., Colombia, 2002.
- [32] L. A. Keilich Patsy, «Mejoramiento de la subrasante del suelo natural mediante la incorporación de polímeros en el camino vecinal Maras–Moray, Cusco,» Universidad Continental, Cusco, Perú, 2021.

- [33] Ministerio de Economía y Finanzas, Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras, Lima, Perú, 2015.
- [34] CONAR SAC., «¿Que es la estabilización del suelo y cómo se hace?,» 1 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://conarsac.com/blog/estabilizacion-de-suelo/>
- [35] H. M. Mendoza Guerrero, «Análisis de los métodos de estabilización de suelos empleados para optimizar las propiedades físicas de subrasantes en Cajamarca,» Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú, 2020.
- [36] S. K. Jaico Pereyra y L. M. Villanueva Reyna, «Estabilización de suelos mediante la incorporación de viruta de acero y su influencia en las propiedades físicas y mecánicas: revisión bibliográfica,» Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú, 2024.
- [37] J. I. Ruiz Uribe, «Estabilización de suelos con aceite sulfonado,» Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1993.
- [38] J. U. Canaza Canaza, «Análisis de las propiedades de los materiales de base y subbase destinados a pavimentos en el distrito de José Luis Bustamante y Rivero,» Universidad Continental, Arequipa, Perú, 2020.
- [39] E. Yana Quispe, «Efecto de la dosificación controlada de agregados granulares en las propiedades físico-mecánicas para el diseño de pavimentos flexibles,» Universidad César Vallejo, Callao, Perú, 2023.
- [40] M. Esteban, A. Díaz, J. Díaz, J. Cantero y M. Migueléz, «Ingeniería mecánica aplicada,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2019.
- [41] E. G. Chumbe Isuiza y G. R. Reategui Lozano, «Estudio comparativo del estabilizador iónico ISS 2500 y la ceniza de cáscara de yuca para el mejoramiento de la subrasante en la carretera Rayazapa, Loreto,» Universidad César Vallejo, Loreto, Perú, 2024.
- [42] S. M. Villanueva Flores, «Propuesta de estabilización para carreteras de bajo volumen de tránsito en zonas de sierra por encima de los 2000 m s. n. m., mediante el uso de poliacrilamida aniónica, organosilano y un agente sulfonatado.,» Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, 2017.
- [43] J. Sucasaire Pilco, «Orientaciones para la selección y el cálculo del tamaño de la muestra en investigación,» Jorge Sucasaire, Lima, Perú, 2022.

Anexos

CONFORMIDAD DE ASESOR

SEMINARIO DE TESIS II

Chiclayo, 31 de octubre del 2025.

Señor

ING. ROBERTO CARLOS CASTILLO VELARDE
Escuela Profesional de Ingeniería Civil-USAT
Presente.

Le expreso mi saludo y en mi condición de asesor doy mi **CONFORMIDAD** a la tesis **TITULADA : INFLUENCIA DEL SULFONATADO ISS 2500 CON VIRUTAS DE ACERO EN EL MEJORAMIENTO DE SUBBASES GRANULARES SOBRE SUBRASANTES ARENOSAS PARA PAVIMENTACIÓN** presentado por el estudiante **DÍAZ OLEA MARÍA TERESA** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Civil**, de esta manera se cumple con uno de los requisitos para su pase a sustentación del informe de tesis de acuerdo con el art.32 de reglamento de elaboración y sustentación del trabajo de investigación para optar el título profesional.

Atentamente.



Ing. **MERINO RONCERO JUAN**
Docente Asesor

UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

- LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIENTOS
- CONCRETO Y ASFALTO

INFORME N° **LEM USAT 041-2025-II**

FECHA: **31 de Octubre 2025**

VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ESTUDIANTE: María Teresa Díaz Olea

TITULO DE LA TESIS: : Influencia del Sulfonato ISS 2500 con virutas de acero en el mejoramiento de subbases granulares sobre subrasantes arenosas para pavimentación

El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil, verifica y da conformidad que los siguientes ensayos de laboratorio realizados por el indicado estudiante se han efectuado en las instalaciones de la USAT, asimismo valida los ensayos realizados fuera de nuestras instalaciones siempre que no se puedan realizar en esta universidad:

- Contenido de Humedad
- Granulometría por Tamizado
- Límite Líquido
- Límite Plástico
- Gravedad Específica
- Clasificación de suelos
- Sales, Cloruros y Sulfatos
- Peso Específico y Absorción
- Caras Fracturadas
- Partículas Chatas y Alargadas
- Equivalente de Arena
- Abrasión de Los Ángeles
- Proctor Modificado
- Capacidad de Soporte CBR
- Permeabilidad



Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.

Observación: Adjunto

Henry Rivadeneyra Oblitas
Responsable de Lab Ing. Civil