

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**Mejoramiento del material granular marginal con aditivo Polycom para la
subbase de pavimentos**

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

AUTOR

Miguel Eduardo Baldarrago Gastulo

ASESOR

Ruben Eli Estrada Chunga

<https://orcid.org/0000-0001-8648-5640>

Chiclayo, 2026

**Mejoramiento del material granular marginal con aditivo
Polycom para la subbase de pavimentos**

PRESENTADA POR

Miguel Eduardo Baldarrago Gastulo

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

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Joaquin Hernan Rojas Oblitas
PRESIDENTE

Mario Antonio Martinez Fiestas
SECRETARIO

Ruben Eli Estrada Chunga
VOCAL

Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mi familia, especialmente a mis padres, Liliana Gastulo y Juan Baldarrago, y a mi hermano, Andrés Baldarrago, por su apoyo desde el inicio hasta el final de mi formación profesional. Gracias por sus consejos, su confianza y el amor que siempre me brindaron. También dedico este trabajo a mi mascota, Otto, por acompañarme en cada momento mientras realizaba mis trabajos y recordarme que nunca estaba solo.

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios, a mi familia, a mi mascota y a todos los amigos que han formado parte de mi vida universitaria, por su apoyo y darme las fuerzas necesarias para nunca rendirme pese a las adversidades. También agradecer a mi asesor de tesis, el Ing. Estrada Chunga Rubén por darme las herramientas necesarias para la realización de esta investigación. Además, al Ing. López Carranza Atilio por su constante disposición, asesoramiento y valiosas observaciones que contribuyeron al fortalecimiento de esta tesis.

Mejoramiento del material granular marginal con aditivo Polycom para la subbase de pavimentos.

003

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3618:140083567

Fecha de entrega

22 may 2026, 18:40 GMT-5

Fecha de descarga

22 may 2026, 18:51 GMT-5

Nombre del archivo

Mejoramiento del material granular marginal con aditivo Polycom para la subbase de pavimentos..pdf

Tamaño del archivo

11.5 MB

171 páginas

30.072 palabras

164.979 caracteres



Página 1 de 177 - Portada

Identificador de la entrega trn:oid:::3618:140083567



Página 2 de 177 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::3618:140083567

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 5% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

ÍNDICE

Resumen	13
Abstract	14
Introducción	15
Revisión de la literatura	19
Antecedentes	19
Bases teóricas	24
Bases legales	47
Materiales y métodos	48
Materiales	48
Métodos	49
Tipo y nivel de investigación	49
Población, muestra y muestreo	49
Operacionalización de variables	56
Matriz de consistencia	57
Procedimiento	58
Resultados y discusión	83
Conclusiones	136
Recomendaciones	137
Referencias	138
Anexos	143

LISTADO DE TABLAS

Tabla I: Tipos de material de acuerdo con su granulometría	25
Tabla II: Tipos de suelo de acuerdo con su índice de plasticidad	26
Tabla III: Correlación de tipos de suelo	33
Tabla IV: Tipos de suelo de acuerdo con su equivalente de arena	33
Tabla V: Granulometría para subbases	38
Tabla VI: Especificaciones de ensayos especiales para subbase	38
Tabla VII: Cantidades de materia orgánica.....	42
Tabla VIII: Colapso admisible	42
Tabla IX: Hinchamiento para cada tipo de suelo	42
Tabla X: Datos de tamaño de muestra para los puntos de exploración.....	50
Tabla XI: Ensayos de caracterización	51
Tabla XII: Ensayos físicos para muestra patrón y con adición	51
Tabla XIII: Ensayos mecánicos para muestras patrón y con adición.....	51
Tabla XIV: Análisis de antecedentes de la investigación	53
Tabla XV: Técnicas e instrumentos de recolección de datos	54
Tabla XVI: Operacionalización de variables	56
Tabla XVII: Matriz de consistencia	57
Tabla XVIII: Resultados del contenido de humedad de muestras naturales.....	83
Tabla XIX: Resultados del contenido de humedad de muestras naturales	83
Tabla XX: Resultados de los límites de consistencia de muestras naturales	84
Tabla XXI: Clasificación de suelo de muestras naturales.....	85
Tabla XXII: Contenido de humedad de muestras sin adición.....	88
Tabla XXIII: Resultados Equivalente de arena C-01	88
Tabla XXIV: Resultados Equivalente de arena C-02.....	88
Tabla XXV: Resultados Equivalente de arena C-03	89
Tabla XXVI: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0% Polycom.....	89
Tabla XXVII: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.01% Polycom.....	89
Tabla XXVIII: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.02% Polycom	89
Tabla XXIX: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.03% Polycom.....	90
Tabla XXX: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.04% Polycom	90
Tabla XXXI: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0% Polycom.....	93
Tabla XXXII: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.01% Polycom.....	93

Tabla XXXIII: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.02% Polycom	93
Tabla XXXIV: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.03% Polycom.....	94
Tabla XXXV: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.04% Polycom	94
Tabla XXXVI: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0% Polycom	96
Tabla XXXVII: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.01% Polycom.....	97
Tabla XXXVIII: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.02% Polycom	97
Tabla XXXIX: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.03% Polycom.....	97
Tabla XL: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.04% Polycom.....	97
Tabla XLI: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0% Polycom.....	100
Tabla XLII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0.01% Polycom	100
Tabla XLIII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0.02% Polycom.....	101
Tabla XLIV: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0.03% Polycom.....	101
Tabla XLV: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0.04% Polycom	101
Tabla XLVI: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0% Polycom.....	102
Tabla XLVII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0.01% Polycom.....	102
Tabla XLVIII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0.02% Polycom	102
Tabla XLIX: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0.03% Polycom.....	103
Tabla L: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0.04% Polycom.....	103
Tabla LI: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0% Polycom.....	103
Tabla LII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0.01% Polycom	104
Tabla LIII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0.02% Polycom	104
Tabla LIV: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0.03% Polycom.....	104
Tabla LV: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0.04% Polycom.....	104
Tabla LVI: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0% Polycom.....	105
Tabla LVII: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0.01% Polycom.....	105
Tabla LVIII: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0.02% Polycom	105
Tabla LIX: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0.03% Polycom	106
Tabla LX: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0.04% Polycom	106
Tabla LXI: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0% Polycom.....	109
Tabla LXII: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0.01% Polycom.....	109
Tabla LXIII: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0.02% Polycom	109
Tabla LXIV: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0.03% Polycom	110
Tabla LXV: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0.04% Polycom.....	110
Tabla LXVI: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0% Polycom	113

Tabla LXVII: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0.01% Polycom.....	113
Tabla LXVIII: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0.02% Polycom.....	113
Tabla LXIX: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0.03% Polycom.....	114
Tabla LXX: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0.04% Polycom.....	114
Tabla LXXI: Resultados de CBR C-01 – 0% Polycom.....	117
Tabla LXXII: Resultados de CBR C-01 – 0.01% Polycom.....	117
Tabla LXXIII: Resultados de CBR C-01 – 0.02% Polycom.....	118
Tabla LXXIV: Resultados de CBR C-01 – 0.03% Polycom.....	118
Tabla LXXV: Resultados de CBR C-01 – 0.04% Polycom.....	118
Tabla LXXVI: Resultados de CBR C-02 – 0% Polycom.....	121
Tabla LXXVII: Resultados de CBR C-02 – 0.01% Polycom.....	121
Tabla LXXVIII: Resultados de CBR C-02 – 0.02% Polycom.....	121
Tabla LXXIX: Resultados de CBR C-02 – 0.03% Polycom.....	122
Tabla LXXX: Resultados de CBR C-02 – 0.04% Polycom.....	122
Tabla LXXXI: Resultados de CBR C-03 – 0% Polycom.....	125
Tabla LXXXII: Resultados de CBR C-03 – 0.01% Polycom.....	125
Tabla LXXXIII: Resultados de CBR C-03 – 0.02% Polycom.....	125
Tabla LXXXIV: Resultados de CBR C-03 – 0.03% Polycom.....	126
Tabla LXXXV: Resultados de CBR C-03 – 0.04% Polycom.....	126

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Clasificación SUCS [31].	32
Ilustración 2: Clasificación AASHTO [31].	32
Ilustración 3: Clasificación de los suelos en el PG-3/75 (1976) según su plasticidad [29].	40
Ilustración 4: Clasificación de los suelos en el PG-3 (2002) según su plasticidad [29].	41
Ilustración 5: Propiedades del polímero [34].	45
Ilustración 6: Producto Polycom.	46
Ilustración 7: Flujograma de hipótesis.	55
Ilustración 8: Visita a la zona de estudio.	58
Ilustración 9: Visita a la zona de estudio.	59
Ilustración 10: Extracción de Calicata 01.	59
Ilustración 11: Extracción de Calicata 02.	60
Ilustración 12: Extracción de Calicata 03.	60
Ilustración 13: Perfil Estratigráfico Calicata 01.	61
Ilustración 14: Perfil Estratigráfico Calicata 02.	61
Ilustración 15: Perfil Estratigráfico Calicata 03.	62
Ilustración 16: Peso de las muestras evaluadas.	62
Ilustración 17: Muestras húmedas.	63
Ilustración 18: Muestras secadas en el horno.	63
Ilustración 19: Muestras lavadas.	64
Ilustración 20: Juego de tamices.	64
Ilustración 21: Determinación del peso retenido en cada tamiz.	65
Ilustración 22: Preparación de las muestras a evaluar.	65
Ilustración 23: Uso de la copa de Casagrande.	66
Ilustración 24: Contenido de humedad de las muestras.	66
Ilustración 25: Ejecución del ensayo.	67
Ilustración 26: Muestras secas.	67
Ilustración 27: Preparación de las muestras.	68
Ilustración 28: Preparación de las probetas para colocar las muestras.	68
Ilustración 29: Reposo de las muestras en las probetas.	69
Ilustración 30: Preparación de la muestra en el permeámetro.	69
Ilustración 31: Aplicación de un nivel constante de carga hidráulica.	70
Ilustración 32: Registro del volumen de agua.	70

Ilustración 33: Saturación de las muestras.	71
Ilustración 34: Penetración en 5 capas.	71
Ilustración 35: Peso de la muestra penetrada + molde.	72
Ilustración 36: Penetración 5 capas.	73
Ilustración 37: Medición de expansión.	73
Ilustración 38: Moldes compactados en saturación 4 días.	74
Ilustración 39: Peso de la muestra + molde pasando los 4 días.	74
Ilustración 40: Penetración.	75
Ilustración 41: Aditivo Polycom.	75
Ilustración 42: Aditivo Polycom.	76
Ilustración 43: Preparación de la muestra + Adición.	76
Ilustración 44: Instrumentos empleados.	77
Ilustración 45: Ejecución del ensayo experimental.	77
Ilustración 46: Preparación de la muestra con aditivo Polycom	78
Ilustración 47: Preparación de la muestra con aditivo Polycom en el permeámetro.	78
Ilustración 48: Registro del volumen de agua de la muestra con aditivo Polycom.	79
Ilustración 49: Adición de aditivo Polycom + agua.	79
Ilustración 50: Solución agua con aditivo Polycom.	80
Ilustración 51: Preparación de la muestra + Adición.	80
Ilustración 52: Adición aditivo Polycom a la muestra.	81
Ilustración 53: Penetración 5 capas muestras con aditivo Polycom.	81
Ilustración 54: Registro de penetración muestra con aditivo Polycom.	82
Ilustración 55: Curva Granulométrica de las tres calicatas.	84
Ilustración 56: Límites de Consistencia de las tres calicatas.	85
Ilustración 57: Curva Granulométrica de la muestra C-01 y límites según el MTC.	86
Ilustración 58: Curva Granulométrica de la muestra C-02 y límites según el MTC.	87
Ilustración 59: Curva Granulométrica de la muestra C-03 y límites según el MTC.	87
Ilustración 60: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0% Polycom.	91
Ilustración 61: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.01% Polycom.	91
Ilustración 62: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.02% Polycom.	92
Ilustración 63: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.03% Polycom.	92
Ilustración 64: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.04% Polycom.	93
Ilustración 65: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0% Polycom.	94
Ilustración 66: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.01% Polycom.	95

Ilustración 67: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.02% Polycom.....	95
Ilustración 68: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.03% Polycom.....	96
Ilustración 69: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.04% Polycom.....	96
Ilustración 70: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0% Polycom.....	98
Ilustración 71: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.01% Polycom.....	98
Ilustración 72: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.02% Polycom.....	99
Ilustración 73: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.03% Polycom.....	99
Ilustración 74: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.04% Polycom.....	100
Ilustración 75: Resultados curva de compactación C-01 – 0% Polycom.....	107
Ilustración 76: Resultados curva de compactación C-01 – 0.01% Polycom.....	107
Ilustración 77: Resultados curva de compactación C-01 – 0.02% Polycom.....	108
Ilustración 78: Resultados curva de compactación C-01 – 0.03% Polycom.....	108
Ilustración 79: Resultados curva de compactación C-01 – 0.04% Polycom.....	109
Ilustración 80: Resultados curva de compactación C-02 – 0% Polycom.....	111
Ilustración 81: Resultados curva de compactación C-02 – 0.01% Polycom.....	111
Ilustración 82: Resultados curva de compactación C-02 – 0.02% Polycom.....	112
Ilustración 83: Resultados curva de compactación C-02 – 0.03% Polycom.....	112
Ilustración 84: Resultados curva de compactación C-02 – 0.04% Polycom.....	113
Ilustración 85: Resultados curva de compactación C-03 – 0% Polycom.....	115
Ilustración 86: Resultados curva de compactación C-03 – 0.01% Polycom.....	115
Ilustración 87: Resultados curva de compactación C-03 – 0.02% Polycom.....	116
Ilustración 88: Resultados curva de compactación C-03 – 0.03% Polycom.....	116
Ilustración 89: Resultados curva de compactación C-03 – 0.04% Polycom.....	117
Ilustración 90: Resultados de CBR C-01 – 0% Polycom.....	119
Ilustración 91: Resultados de CBR C-01 – 0.01% Polycom.....	119
Ilustración 92: Resultados de CBR C-01 – 0.02% Polycom.....	120
Ilustración 93: Resultados de CBR C-01 – 0.03% Polycom.....	120
Ilustración 94: Resultados de CBR C-01 – 0.04% Polycom.....	121
Ilustración 95: Resultados de CBR C-02 – 0% Polycom.....	123
Ilustración 96: Resultados de CBR C-02 – 0.01% Polycom.....	123
Ilustración 97: Resultados de CBR C-02 – 0.02% Polycom.....	124
Ilustración 98: Resultados de CBR C-02 – 0.03% Polycom.....	124
Ilustración 99: Resultados de CBR C-02 – 0.04% Polycom.....	125
Ilustración 100: Resultados de CBR C-03 – 0% Polycom.....	127

Ilustración 101: Resultados de CBR C-03 – 0.01% Polycom.....	127
Ilustración 102: Resultados de CBR C-03 – 0.02% Polycom.....	128
Ilustración 103: Resultados de CBR C-03 – 0.03% Polycom.....	128
Ilustración 104: Resultados de CBR C-03 – 0.04% Polycom.....	129
Ilustración 105: Costos unitarios para 1 m ³ de subbase sin estabilizar.	129
Ilustración 106: Costos unitarios para 1 m ³ estabilizado con 0.01% de aditivo Polycom. ...	130
Ilustración 107: Costos unitarios para 1 m ³ estabilizado con 0.02% de aditivo Polycom. ...	130
Ilustración 108: Costos unitarios para 1 m ³ estabilizado con 0.03% de aditivo Polycom. ...	131
Ilustración 109: Costos unitarios para 1 m ³ estabilizado con 0.04% de aditivo Polycom. ...	131

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1: Límite líquido [30].	28
Ecuación 2: Límite plástico [30].	29
Ecuación 3: Contenido de Humedad [30].	30
Ecuación 4: Permeabilidad [30].	31
Ecuación 5: Equivalente de arena [30].	34
Ecuación 6: Densidad húmeda [31].	35
Ecuación 7: Densidad seca [31].	35
Ecuación 8: Porcentaje de agua [31].	37

Resumen

Esta investigación busca explorar la viabilidad de utilizar material granular marginal, que no cumple con las normas del Ministerio del Transporte y Comunicaciones (MTC) estabilizado con aditivo Polycom para que puedan ser utilizadas como material para subbase. Para ello, se evaluaron tres calicatas (C-01, C-02 y C-03) en estado natural y luego con adiciones de 0.01%, 0.02%, 0.03% y 0.04% de Polycom respecto al peso del material. Se realizaron ensayos físicos de Contenido de humedad, Granulometría, Equivalente de arena, Límites de Atterberg y Permeabilidad y ensayos mecánicos de Proctor Modificado y CBR. Los resultados mostraron que con 0.04% de aditivo, las muestras C-01 y C-02 redujeron su índice de plasticidad a 4.80% y 5.98%, cumpliendo con los estándares del MTC; además, la muestra C-01 alcanzó un límite líquido de 24.91%, dentro del estándar. Además, las muestras C-01, C-02 Y C-03, arrojando valores iniciales de CBR de 5.480%, 5.020% y 4.363% respectivamente, para una MDS del 100%, siendo estos valores menores al 40% que es el estándar establecido por el MTC para capa de subbase. Sin embargo, a partir de la dosificación de 0.03% de aditivo Polycom, se obtuvieron mejoras significativas en las muestras C-01, C-02 Y C-03 incrementando el CBR a 41.91%, 49.97% y 36.39% respectivamente, convirtiéndolas en aptas mecánicamente para ser usadas en capas de subbase superando el 40%, a excepción de la muestra C-03, que logró superar dicho estándar en la dosificación 0.04% alcanzando un valor de CBR de 65.22%. Estos resultados evidencian la eficacia del aditivo Polycom para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

Palabras clave: Material granular marginal, aditivo Polycom, mejoramiento de suelos, subbase de pavimento y MTC.

Abstract

This research aims to explore the feasibility of using marginal granular material, which does not meet the standards of the Ministry of Transportation and Communications (MTC), stabilized with Polycom additive to be used as subbase material. To this end, three test pits (C-01, C-02, and C-03) were evaluated in their natural state and then with Polycom additions of 0.01%, 0.02%, 0.03%, and 0.04% relative to the material's weight. Physical tests were conducted, including moisture content, granulometry, sand equivalent, Atterberg limits, and permeability, as well as mechanical tests such as Modified Proctor and CBR. The results showed that with 0.04% additive, samples C-01 and C-02 reduced their plasticity index to 4.80% and 5.98%, respectively, meeting MTC requirements; additionally, sample C-01 achieved a liquid limit of 24.91%, within the standard. Furthermore, samples C-01, C-02, and C-03 had initial CBR values of 5.480%, 5.020%, and 4.363%, respectively, at 100% MDD, which are below the 40% standard set by the MTC for subbase layers. However, starting from a 0.03% Polycom dosage, significant improvements were observed in samples C-01, C-02, and C-03, increasing CBR values to 41.91%, 49.97%, and 36.39%, respectively, making them mechanically suitable for use in subbase layers by exceeding the 40% threshold, except for sample C-03, which surpassed this standard at a 0.04% dosage, reaching a CBR value of 65.22%. These results demonstrate the effectiveness of the Polycom additive in improving the physical and mechanical properties of soils.

Keywords: Marginal granular material, Polycom additive, soil improvement, pavement subbase, MTC.

Introducción

La degradación de los pavimentos es un problema global que afecta la infraestructura vial, generando altos costos de mantenimiento y afectando la movilidad en zonas urbanas y rurales. Este deterioro está estrechamente relacionado con la calidad de los materiales granulares utilizados en las capas inferiores, como la subbase, que son responsables de soportar las cargas y distribuir las adecuadamente a lo largo del pavimento. Cuando estos materiales no presentan las propiedades adecuadas de resistencia y estabilidad, los pavimentos tienden a desarrollar fallas estructurales, como fisuras, baches y deformaciones [1], [2]. Debido a su susceptibilidad a daños severos que comprometen significativamente la transitabilidad, es esencial seleccionar agregados de alta resistencia para prevenir fallas prematuras en la estructura del pavimento [3]. Para identificar posibles canteras o fuentes de material cercanas a la obra y evaluar su utilización como agregados, debemos realizar una serie de ensayos. Estos, nos proporcionan información detallada sobre las propiedades del material, lo que nos permitirá determinar si cumple con las especificaciones técnicas indicadas en los manuales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Sin embargo, en muchas regiones, los materiales granulares disponibles localmente no cumplen con los estándares normativos, denominados materiales marginales, lo que limita su uso en proyectos viales. Esta problemática conlleva la necesidad de recurrir a materiales de préstamo, lo que incrementa costos y prolonga los tiempos de construcción [4].

En el ámbito internacional, la escasez de materiales granulares que cumplan con las normas técnicas para la construcción de pavimentos es un problema recurrente, especialmente en regiones con condiciones geológicas adversas. En Sudáfrica, las regiones semiáridas también enfrentan dificultades para acceder a materiales que cumplan con los estándares técnicos para subbases. Un estudio del Department of Transport of South Africa indicó que el 35% de las carreteras que utilizan materiales marginales presentan fallas prematuras en un período de 5 a 10 años [5]. Mientras tanto, en India, un país con una creciente red de infraestructuras viales, la falta de materiales granulares de calidad ha sido un obstáculo considerable. Según el Indian Roads Congress, aproximadamente el 50% de las carreteras rurales no cumplen con los estándares requeridos para subbases, lo que provoca deformaciones y fallas en los primeros cinco años de uso [6]. En el ámbito nacional, en la región de Cusco, los suelos locales presentan altas concentraciones de arcilla y limo, los materiales granulares no son adecuados para cumplir con los estándares del MTC para la construcción de subbases. Esta situación obliga a las constructoras a transportar material de préstamo de otras regiones, lo que eleva los costos de

transporte en un 40% y retrasa significativamente la ejecución de los proyectos viales [7]. Por otro lado, Chota, los materiales granulares empleados en la construcción de pavimentos suelen extraerse de canteras cercanas sin una evaluación previa de su calidad. Aunque cumplen con los requisitos mínimos para afirmados, estos materiales no poseen las características necesarias para ser utilizados como subbase o base, debido a su alta plasticidad [8]. En el ámbito local, en Chiclayo, los suelos locales presentan altas concentraciones de finos (arcilla y limo), lo que limita la disponibilidad de materiales granulares que cumplan con las especificaciones del MTC para la construcción de subbases haciendo uso de canteras [9].

Ante esta problemática, el uso de aditivos químicos ha demostrado ser una herramienta eficaz en la construcción. La modificación de las normativas del MTC para incluir su uso en subrasantes y bases ha abierto nuevas posibilidades en el sector. La incorporación de diversos aditivos en materiales granulares marginales permite una optimización de sus propiedades físicas y mecánicas, promoviendo la utilización de materiales que de otro modo serían descartados. Esta práctica reduce la explotación de canteras y la necesidad de extracción de materiales de préstamo, lo que disminuye los tiempos y costos de construcción, y promueve actividades más sostenibles [9]. La presente investigación estudia la incorporación de aditivo Polycom en el mejoramiento del material granular marginal para la subbase de pavimentos, abordando los desafíos técnicos y económicos que implica el uso de materiales locales no aptos. Buscando obtener un material que cumpla con los estándares requeridos por el MTC, lo cual contribuirá no solo a la mejora de la calidad y durabilidad de los pavimentos, sino también a promover un enfoque más sostenible en la construcción vial. Este estudio busca optimizar el uso de los recursos disponibles, garantizando infraestructuras más eficientes y duraderas.

Como justificación teórica de esta investigación, el mejoramiento de suelos es una técnica utilizada para mejorar la resistencia, la durabilidad y el desempeño estructural de capas de pavimento. Tradicionalmente se han usado métodos como el uso de cal o cemento; sin embargo, estos pueden generar altos costos o un alto impacto ambiental. Por ello, la investigación propone explorar estabilizadores modernos como los polímeros, entre ellos Polycom, que surgen como alternativas innovadoras capaces de modificar las propiedades físico-mecánicas del suelo con menor dosificación y mayor eficiencia. De esta manera, la aplicación de métodos de estabilización no convencionales permite optimizar el uso de materiales marginales, reducir la necesidad de préstamos de cantera [9].

En cuanto a la justificación técnica, es importante señalar que uno de los factores fundamentales en el diseño de pavimentos es la disponibilidad de materiales en la zona de ejecución, ya que esto influye directamente en el costo de la infraestructura vial. Las localidades

que carecen de agregados granulares adecuados cercanos según las normativas se ven obligadas a utilizar material de préstamo para lograr una construcción de pavimento que cumpla con los estándares de calidad. Esta situación es especialmente crítica, ya que los materiales granulares marginales son una causa frecuente de fallas tempranas en pavimentos, afectando la durabilidad de las vías y generando costos adicionales de mantenimiento y reparación [10].

En cuanto a la justificación económica, la optimización de proyectos viales en zonas con limitada disponibilidad de materiales granulares cercanos exige la mejora de las propiedades de aquellos materiales que no cumplen con los requisitos de subbase de pavimentos establecidos por el MTC, con el fin de reducir los costos de construcción. En estos casos, los costos de transporte de materiales de préstamo pueden representar un alto porcentaje del presupuesto, incrementando el costo total del proyecto en hasta un 30% [11]. Por esa razón, esta investigación contribuye a mejorar propiedades físico-mecánicas de los materiales granulares marginales por medio del aditivo Polycom para hacer uso de los materiales locales que en un principio serían descartados, para que sean usados como subbases en las obras de pavimentos. Esta alternativa propone a disminuir la dependencia de materiales de préstamo, los cuales implican costos elevados de extracción y transporte.

En cuanto a la justificación social, los beneficiarios de esta investigación incluyen tanto a las empresas de construcción como a las entidades gubernamentales responsables de la infraestructura vial, quienes se verán beneficiados con menores costos operativos al utilizar materiales locales y duraderos. En este contexto, el uso de estabilizantes podría reducir hasta en un 20% los costos de transporte y adquisición de materiales de préstamo, optimizando el uso de recursos locales y aligerando el presupuesto destinado al transporte de materiales desde canteras distantes [12]. Si bien, la inversión inicial con el aditivo Polycom puede ser mayor en comparación con métodos tradicionales de estabilización, los beneficios económicos a largo plazo son significativos. Ya que, al mejorar las propiedades de resistencia y durabilidad de los materiales extendemos la durabilidad del pavimento, minimizando las intervenciones de mantenimiento, lo cual significaría un ahorro considerable en recursos que pueden ser usados en otros proyectos de infraestructura.

En cuanto a la justificación ambiental, los principales beneficiarios de esta investigación serán ingenieros civiles, proyectistas y constructores de infraestructura vial, quienes podrán emplear estos conocimientos para optimizar el aprovechamiento de recursos locales y contribuir a la sostenibilidad de sus proyectos. Además, los responsables de políticas de infraestructura y normativas del MTC pueden incorporar los hallazgos de esta investigación en sus regulaciones para fomentar prácticas más ecológicas y efectivas en el sector de la construcción vial. Al

proponer el Polycom como una solución de mejora para subbases granulares, se fomenta prácticas más sostenibles, ya que el transporte de un aditivo es considerablemente menos impactante que el traslado de grandes volúmenes de material de préstamo. Disminuyendo las emisiones de CO₂ en un 40% los gases de efecto invernadero asociadas a proyectos viales [12]. Además, se minimiza la necesidad de explotar materiales de préstamo, lo que ayuda a reducir el impacto sobre los ecosistemas locales.

En base a lo expuesto, la presente investigación formula la siguiente interrogante: ¿En qué medida la incorporación del aditivo Polycom mejora las propiedades físico-mecánicas de los materiales granulares marginales para que cumplan con los requerimientos mínimos establecidos en el Manual de Carreteras EG-2013? Para ello, planteamos la siguiente hipótesis: La adición de aditivo Polycom mejorará las propiedades físico-mecánicas de los materiales granulares marginales para que cumplan con los requerimientos mínimos del Manual de Carreteras EG-2013.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente la presente investigación tiene como objetivo general: Mejorar las propiedades físicas y mecánicas del material granular marginal con aditivo Polycom para su uso en subbases de pavimentos. El cual se cumplirá mediante los siguientes objetivos específicos: Clasificar las muestras del material granular marginal por medio del sistema SUCS y AASHTO. Determinar las propiedades físicas de granulometría, plasticidad, contenido de humedad, contenido de partículas finas y permeabilidad del material granular marginal natural y estabilizada con aditivo Polycom. Determinar las propiedades mecánicas mediante los ensayos de California Bearing Ratio (CBR) y Proctor Modificado del material granular marginal natural y estabilizada con aditivo Polycom. Desarrollar un análisis de costos de la estabilización del material granular marginal con aditivo Polycom.

Revisión de la literatura

Antecedentes

Jordy Santillan y Frank Véliz Arévalo, [13] en su tesis titulada “Influencia del polímero Polycom en la capacidad portante de la base para la carretera de Acos Vinchos – Colpa en Ayacucho”, realizada en el año 2023 tuvieron como objetivo el efecto del aditivo Polycom en la resistencia portante de la capa base de una vía., con la finalidad de mejorar el desempeño del CBR en mezclas de suelos y proponer su uso como alternativa de estabilización. La investigación fue de tipo aplicada y experimental, donde se tomaron muestras de suelo de la cantera Colpa, la cantera Km 11+150 y de la mezcla de ambos mediante un muestreo no probabilístico. Los resultados iniciales indicaron que la cantera Colpa presentó un CBR de 98.96%, mientras que la cantera ubicada en el km 11+150 obtuvo un valor de 53.63%. Al mezclar los suelos de ambas canteras, el CBR alcanzó 71.0%. Posteriormente, la incorporación del aditivo Polycom en una dosificación de 0.0026% elevó el CBR hasta 105%. Estos hallazgos concluyen que, si bien ambas canteras cumplían con el CBR mínimo exigido para subrasantes y subbases según las normas del MTC, únicamente con la adición de Polycom fue posible superar el 80% requerido para la capa base.

Walter Isla, [14] en su tesis titulada “Influencia de la incorporación de Polycom en la estabilidad del afirmado para el mejoramiento de los pavimentos, Huanta Ayacucho – 2021”, tuvo como objetivo analizar el efecto de la adición del aditivo Polycom en la estabilidad del afirmado destinado al mejoramiento de pavimentos, empleando dosificaciones de 0,01 %, 0,02 % y 0,03 %. El estudio fue de tipo aplicado, con nivel explicativo y diseño cuasiexperimental, donde se evaluaron muestras de afirmado extraídas entre el km 17+500 y el km 18+000 del camino Puerto Amargura–Pampas mediante un muestreo no probabilístico, incorporando Polycom en distintas dosificaciones. Los resultados obtenidos demostraron que la dosificación óptima de Polycom 0.03% resultó en un incremento del Índice de Soporte Califórnico (CBR) en un 101%. Además, se observó una disminución del 1.22% en la humedad óptima, lo que sugiere una mayor compactibilidad y estabilidad del afirmado tratado. Estos hallazgos concluyen que, el uso de Polycom en la dosificación 0.03% permite mejorar significativamente las características mecánicas de los suelos, haciéndolos más adecuados para la construcción de vías en zonas con suelos de baja calidad.

Carlos Delgado y Paula Renilla, [15] en su tesis titulada “Aplicación del estabilizador Polycom en el material tipo afirmado para carreteras no pavimentadas de San Ignacio-Cajamarca”, realizada en el año 2024 tuvieron como objetivo mejorar el material granular tipo

afirmado utilizado en las carreteras no pavimentadas de San Ignacio- Cajamarca mediante la incorporación de Polycom en dosificaciones de 0.01g/kg, 0.02g/kg y 0.03g/kg. La investigación fue de tipo experimental cuasiexperimental, donde se tomaron muestras de la cantera La libertad de San Ignacio mediante un muestreo no probabilístico. Los resultados han evidenciado un aumento del CBR de 12.2 % a 19.75 %, 22.43 % y hasta 61.13 % según la dosificación, además de incrementar la Máxima Densidad Seca y reducir el Contenido Óptimo de Humedad, lo que evidenció una mejor compactación. En conclusión, se determinó que el Polycom mejora la resistencia y el comportamiento mecánico del suelo, convirtiéndose en una alternativa técnicamente viable para el mejoramiento de afirmados.

Joel León y Dennis Marín, [16] en su tesis titulada “Evaluar el Uso de Polímeros Reciclados para el Mejoramiento de Vías no Pavimentadas del Distrito de José Leonardo Ortiz - Chiclayo – 2021”, tuvieron como objetivo determinar el efecto de la incorporación de polímero reciclado en dosificaciones de 1%, 3% y 5% en el mejoramiento de la subrasante de avenidas no pavimentadas. La investigación fue de tipo aplicada, con un diseño experimental y un enfoque cuantitativo, donde se extrajeron calicatas en las avenidas mediante un muestreo no probabilístico. Los resultados han evidenciado que el polímero PET reciclado mejoró notablemente las propiedades de la subrasante, elevando el CBR de menos del 10 % en estado natural a cerca de 25 % con 3 % de adición y a más de 40 % con 5 %, además de aumentar la densidad seca y reducir la humedad necesaria para la compactación. En conclusión, se determinó que el polímero PET incrementa la resistencia y estabilidad del suelo, siendo una alternativa técnicamente viable para vías no pavimentadas.

José Poma, [17] en su tesis titulada “Aplicación del polímero poliacrilamida (PAM) en la estabilización del suelo en las carreteras vecinales de la provincia de Angaraes – Huancavelica”, realizada en el año 2021 tuvo como objetivo evaluar el impacto del uso del polímero Polycom en la estabilización de los suelos de caminos vecinales. El estudio fue de tipo descriptivo – explicativo, donde se extrajeron muestras de la cantera ubicada en el km 3+780 de la carretera Lircay–Jatumpata, las cuales posteriormente fueron sometidas a ensayos de laboratorio. Los resultados mostraron que al incorporar 0.03 gramos de Polycom por kilogramo de suelo, el índice de plasticidad se redujo de 14.79% a 11.94%, el contenido óptimo de humedad disminuyó de 10.69% a 9.38% y la densidad seca máxima aumentó de 1.904 a 2.221 g/cm³. Asimismo, el CBR al 100% de la máxima densidad seca se incrementó de 26.70% a 43.10%. Estos hallazgos permiten concluir que el uso de Polycom mejora de forma significativa las propiedades físicas y mecánicas del suelo, contribuyendo a prolongar los intervalos de mantenimiento de las carreteras afirmadas.

Karlo Contoguris y Marco Pasmiño, [18] en su tesis titulada “Estabilización de suelos finos mediante el uso del polímero Polycom en subrasantes para caminos de baja transitabilidad en la ciudad de Iquitos, 2020”, tuvieron como objetivo evaluar el efecto del polímero Polycom con dosificaciones de 0.10, 0.20, 0.30 kg/m³ en la mejora de subrasantes cohesivos para caminos de baja transitabilidad. El estudio aplicó un método experimental, donde se realizaron tres calicatas en la zona para obtener muestras de suelo de suelo mediante un muestreo no probabilístico, las cuales fueron analizadas en laboratorio tanto en su estado natural como estabilizadas con el polímero Polycom. Los resultados demostraron que la adición óptima de Polycom (0.30 kg/m³) incrementó el Índice de Soporte Califórico (CBR) en un 44%. Además, se observó que reduce la plasticidad desde 43.65% hasta 30.95% por cada 0.10kg/m³ de polímero agregado, transformando el suelo arcilloso de alta plasticidad a un suelo con menor plasticidad. Estos hallazgos concluyen que, existe una mejora significativa en las propiedades físicas y mecánicas de suelos limo-arcillosos, lo que lo convierte en una alternativa viable para la conformación de estructuras de pavimento.

Sharon Manuyama y Andrew Najar, [19] en su tesis titulada “Estabilización química de suelos areno limo arcillosos en selva baja. aplicación de aditivo Terrasil para mejoramiento de material de base en vía de acceso Villa Milagritos - San Juan Bautista, Perú, 2022”, tuvieron como objetivo mejorar las características físicas y mecánicas del suelo areno-limo-arcilloso de una cantera ubicada en el km 8+000 de la vía Villa Milagritos, para su uso en la base y subbase de una vía no pavimentada de bajo tránsito. La investigación fue de tipo aplicada, con diseño cuasi-experimental, utilizando proporciones de 0,3%, 0,5%, 0,75% y 1,0% de Terrasil, junto con una dosificación fija de 0,5% de cemento Portland, aplicando estadística descriptiva e inferencial para el análisis de los datos. La muestra estuvo conformada por especímenes de suelo extraídos de la cantera, cuyos valores iniciales fueron un pH de 5,94%, un índice de plasticidad (IP) de 9,93%, máxima densidad seca (MDS) de 1,895 gr/cm³ y un CBR al 100% de 27,29%. Los resultados indicaron que la mejor estabilización se obtuvo con la adición de 0,5% de cemento Portland y 1,0% de Terrasil, logrando un IP de 8,35%, una MDS de 1,886 gr/cm³ y un CBR al 95% de 42,31%. Se determinó que la mezcla de Terrasil con cemento Portland produce una mejora notable en las propiedades físicas y mecánicas del suelo, demostrando que su aplicación es técnicamente viable para la construcción de las capas de base y subbase de la vía de penetración Villa Milagritos.

Diego Balbuena y Erlin Clavo, [20] en su tesis titulada “Estabilización de bases granulares con cal y con cemento portland para mejorar las propiedades físico mecánicas en carreteras”, realizada en el año 2022 tuvieron como objetivo mejorar las propiedades físico-mecánicas de

bases granulares empleando cal y cemento Portland del suelo de la cantera Chuyabamba. Se aplicó un diseño experimental con dosificaciones de 0%, 2,5%, 5% y 7,5% de cal o cemento respecto al peso del suelo y se aplicó un método no probabilístico para las obtenciones de las muestras. Los resultados evidenciaron que la estabilización con cal o cemento redujo el índice de plasticidad y aumentó la densidad seca máxima y el CBR, corrigiendo las deficiencias del suelo natural que, pese a cumplir con la gradación B, presentaba IP mayor al 4% y CBR de 76,80%, inferior a lo exigido por la norma. Se concluyó que la adición de 7,5% de cal o cemento permite cumplir con las exigencias para carreteras de primera y segunda clase, alcanzando valores de CBR de 101% y 107,2% respectivamente; en tanto concluyen que las dosificaciones de 2,5% y 5% son aptas para carreteras de tercera clase al superar el CBR del 80 %, aunque con 2,5% el índice de plasticidad aún excede el máximo normativo.

Kevin Huamán y Miguel Troncos, [21] en su tesis titulada “Influencia de la adición de concha de abanico en el afirmado proveniente de la cantera la obrilla para estabilización de subbase de pavimentos, castilla, Piura” realizada en el año 2021 tuvieron como objetivo determinar el porcentaje óptimo de concha de abanico que, al añadirse al material de afirmado proveniente de la cantera La Obrilla, posibilita su utilización como material para la subbase de pavimentos. Se empleó un diseño de investigación de tipo correlacional, evaluando inicialmente el material de afirmado por separado, para luego analizarlos en dos mezclas combinadas de 35 y 50% de conchas de abanico. Los resultados mostraron que la mezcla 1, con 35% de concha de abanico y 65% de material de afirmado, cumplió con los requisitos de la EG-2013, mejorando el CBR hasta un 53,8%, reduciendo el índice de plasticidad en 6% y ajustándose a la gradación B exigida para subbases en lugares menores a 3000 msnm. Se concluyó que esta dosificación es técnicamente viable para su aplicación en la construcción de subbases de pavimento.

Sheikh Hazin et al. [22] en su artículo titulado “Investigación de laboratorio y evaluación del rendimiento de campo de la subbase tratada con cemento estabilizado químicamente” realizado en el año 2024 tuvieron como objetivo evaluar el efecto de aditivos nanoquímicos en las propiedades de mezclas de subbase tratadas con cemento (CTSB) elaboradas con suelos locales, con el fin de optimizar su desempeño en pavimentos. La metodología fue de tipo experimental para determinar el CBR y la resistencia a la compresión no confinada (UCS), utilizando como muestra suelo, cemento y aditivos nanoquímicos disponibles en la zona. Los resultados mostraron que la adición de nanoquímicos incrementó el UCS en un 103,4% y elevó el CBR en un 219% respecto a la mezcla solo con cemento, además de evidenciar una mayor densificación de la matriz gracias a la formación de fases adicionales de etringita, confirmada

por medio de la difracción de rayos X y microscopía electrónica. Finalmente, el análisis de pavimento y el estudio económico concluyeron que la subbase tratada con 3% de cemento y $1,2 \text{ kg/m}^3$ de nanoquímico representó la dosificación óptima, logrando un mejor comportamiento estructural y mayor rentabilidad para su aplicación en obras viales.

Isabel Zambrano et al., [23] en su artículo titulado “Materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos” realizado en el año 2020 tuvieron como objetivo evidenciar el aumento de la resistencia CBR en un material granular de alta plasticidad mediante la adición de emulsión asfáltica catiónica. Se empleó una metodología empírico-mecanicista. En un estudio se evaluó un suelo arcilloso que, en su estado natural, no cumplía con los estándares para subbase de pavimentos debido a su alto límite líquido (35,4%) e índice de plasticidad (10,8%), además de una baja resistencia CBR tras la inmersión, aunque presentaba buena dureza (coeficiente de desgaste Los Ángeles de 19%). Al estabilizarlo con un 5% de emulsión asfáltica catiónica, alcanzó los requisitos para su uso como subbase, concluyendo que existe un desempeño adecuado en diseños de pavimentos flexibles y semirrígidos, con menores espesores de capa y un comportamiento similar al de estructuras convencionales.

María Meza y Eduardo Tejeda, [24] en su artículo titulado “Materiales granulares tratados con emulsión asfáltica para su empleo en bases o subbases de pavimentos flexibles” realizado en el 2019 tuvieron como objetivo impulsar la utilización de emulsiones asfálticas en la estabilización de materiales granulares para las capas de los pavimentos. Se empleó una metodología experimental, donde se extrajeron muestras de las canteras San José y Megarok en Ecuador. Los resultados evidenciaron que los materiales granulares de la cantera Megarok, al ser tratado con emulsión catiónica, alcanzó los requisitos establecidos en las normativas técnicas, especialmente en términos de resistencia a la humedad y durabilidad. Estos hallazgos concluyen la importancia de la estabilización con emulsiones asfálticas como una alternativa técnica y ambientalmente sostenible para la construcción de infraestructura vial en zonas con recursos limitados.

Sujit Pradhan y Gurukalyana Biswal, [25] en su artículo titulado “Utilización de pavimento de asfalto recuperado (RAP) como material de subbase granular en la construcción de carreteras” realizado en el año 2022 tuvieron como objetivo evaluar la viabilidad del uso de material de pavimento asfáltico recuperado (RAP) para mejorar la resistencia de la capa de subbase granular (GSB). La metodología consistió en reemplazar el agregado natural (NA) por RAP en diferentes proporciones (0%, 25%, 35%, 45%, 55%, 65% y 75%), realizando ensayos de compactación modificada para determinar el contenido óptimo de humedad y preparar las

muestras para el ensayo de CBR empapado a 7 y 14 días. Los resultados mostraron que el valor de CBR empapado del RAP aumentó de 32% hasta 100% al mezclarse con agregados naturales en proporciones óptimas, volviéndolo apto para su uso como subbase en pavimentos flexibles. La conclusión fue que la proporción de RAP recomendada para la capa de subbase no debe exceder el 55%, ya que en este porcentaje se logran propiedades mecánicas.

Bases teóricas

Pavimento

El pavimento es una componente ingenieril compuesta por múltiples capas, diseñada para aguantar las cargas del tráfico vehicular y proporcionar una superficie de rodamiento segura y confortable. Sobre el terreno natural, se construye una subbase que sirve como soporte primario, distribuyendo las cargas hacia el suelo. Sobre esta, se coloca una base, cuya función principal es proporcionar estabilidad y rigidez a la estructura. Finalmente, la capa de rodadura, en contacto directo con los neumáticos, asegura una superficie uniforme y con alta resistencia al desgaste, mejorando así la seguridad de los conductores [26].

Características fundamentales de los pavimentos

De acuerdo con Montejo Fonseca, los pavimentos deben cumplir requerimientos mínimos, tales como:

- ✓ Capacidad portante: Deben soportar las cargas del tráfico durante su vida útil.
- ✓ Resistencia a la intemperie: Deben resistir los efectos del clima y el paso del tiempo.
- ✓ Textura adecuada: La superficie debe ofrecer un agarre óptimo según la velocidad del tránsito.
- ✓ Buen drenaje: Deben permitir la evacuación eficiente del agua.
- ✓ Regularidad superficial: La superficie debe ser uniforme tanto en sentido horizontal como vertical.
- ✓ Rentabilidad y durabilidad: Deben ser económicos y tener una larga vida útil [27].

Estructuración de un pavimento

- ✓ Carpeta (capa de rodadura): La capa superiorizada del pavimento debe ofrecer una superficie homogénea y resistente, con un acabado superficial adecuado. Es fundamental que sea impermeable para evitar la infiltración de agua y los daños asociados a la humedad. Además, debe poseer una alta resistencia mecánica para aguantar las cargas de los vehículos y contribuir a la durabilidad general de la estructura [27].
- ✓ Base granular: La base granular tiene la función fundamental de actuar como una capa de soporte que distribuye las cargas del tráfico de manera gradual hacia las capas inferiores,

reduciendo la intensidad de los esfuerzos. De esta manera, se optimiza el rendimiento de la carpeta asfáltica y se prolonga el tiempo útil del pavimento. Al igual que la subbase soporta a la base, la base granular contribuye a reducir el espesor y, por tanto, el costo de la carpeta asfáltica, optimizando el uso de materiales y disminuyendo los costos de construcción [27].

- ✓ **Sub-base granular:** La subbase granular cumple múltiples funciones en la construcción de pavimentos. Con respecto a lo económico, permite optimizar la utilización de materiales, al ubicar los de mayor calidad en las zonas de mayor esfuerzo. A nivel técnico, esta capa es esencial para distribuir las cargas, prevenir deformaciones y garantizar un drenaje adecuado. Además, actúa como una barrera protectora, evitando la mezcla de materiales y preservando la calidad de las capas superiores [27].

Materiales granulares de subbase de pavimentos

Los materiales de subbase granular se refieren a aquellos agregados compuestos por una mezcla de partículas de diversos tamaños, incluyendo gravas, arenas y finos, los cuales pueden ser de origen natural o generados a través de procesos de trituración. Estos materiales desempeñan un rol importante en la construcción de infraestructura vial, especialmente en la formación de las capas inferiores de pavimentos y terraplenes. [28].

Tipos de materiales granulares

Los materiales granulares se dividen en diversas categorías. Los naturales, obtenidos directamente de la naturaleza y debidamente ajustados en su granulometría para cumplir con los requisitos específicos, son una opción común. Por otro lado, los agregados triturados, producidos a partir de la fragmentación mecánica de rocas, ofrecen mayor control sobre sus propiedades. Los materiales artificiales, derivados de residuos industriales o de la construcción, son una alternativa sostenible. Finalmente, los materiales marginales son aquellos que no alcanzan con las normas establecidas de acuerdo al país donde se rige [29].

Ensayos estándar para el material granular de subbase

✓ **Granulométrica por tamizado – MTC E 107**

Determina la separación de las partículas que componen un suelo por su tamaño. Esta información es esencial para caracterizar el material y predecir su comportamiento. Los suelos se clasifican en gravas, arenas, limos y arcillas según el tamaño de sus partículas, lo que a su vez influye en propiedades como la densidad, la porosidad y la permeabilidad [30].

Tabla I: Tipos de material de acuerdo con su granulometría

Tipo de Material	Tamaño de las partículas
------------------	--------------------------

Grava	75 mm – 4.75 mm
Arena	Arena gruesa: 4.75 mm – 2.00 mm
	Arena media: 2.00 mm – 0.425 mm
	Arena fina: 0.425 mm – 0.075 mm
Material Fino	Limo 0.075 mm – 0.005 mm
	Arcilla Menor a 0.005 mm

Fuente: Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos [30].

Herramientas y materiales

- Balanzas, con una precisión según normativa (± 0.01 g).
- Estufa, con la capacidad de conservar una temperatura estable de 110 ± 5 °C.
- Juego de Tamices.

Procedimiento

- Se lava la muestra de suelo seleccionada con abundante agua utilizando un tamiz N°200, evitando la pérdida de cualquier partícula retenida.
- Asimismo, se recoge el material retenido en el tamiz N°200 en una tara para llevarlo a secar al horno.
- Posteriormente, se saca la muestra del horno, se pesa y luego se procede a tamizar por la malla N°4 – N°10 – N°20 – N°40 – N°50 – N°100 y N°200.
- Finalmente, se pesan y registran los pesos de los materiales retenidos en cada tamiz [30].

Resultados del Ensayo

- Calcular el porcentaje total de material retenido y el porcentaje total que atraviesa cada tamiz.
- Identificar los porcentajes correspondientes a agregados gruesos, finos, limos y arcillas.
- Obtener el coeficiente de uniformidad y el módulo de fineza.

✓ Plasticidad

Es una característica inherente a sus partículas finas, principalmente arcillas y limos. Estas partículas, al interactuar con el agua, confieren al suelo la capacidad de deformarse sin romperse dentro de ciertos límites de humedad. A diferencia de las partículas gruesas, que no influyen en esta propiedad, las partículas finas son las responsables del comportamiento plástico del suelo [30].

Tabla II: Tipos de suelo de acuerdo con su índice de plasticidad

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

Fuente: Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos [30].

✓ Límite Líquido (LL) - MTC E 110

Cantidad máxima de humedad a partir de la cual el suelo puede moldearse sin presentar fracturas.

Herramientas y materiales

- Acanalador
- Espátula, de acuerdo con especificaciones establecidas por la norma.
- Calibrador
- Balanza de precisión de ± 0.01 gramos.
- Horno diseñado para alcanzar temperatura de 110 ± 5 °C.
- Copa Casagrande

Procedimiento

- Primero se comienza preparando la muestra 24 horas antes triturando el suelo y se pasa por un tamiz N°40 y se humedece.
- Al día siguiente, se pone una muestra del suelo previamente preparado en la copa Casagrande, hasta alcanzar una profundidad de 10 mm en el punto más profundo.
- Luego se utiliza el acanalador y se crea una separación en la muestra formando una abertura entre el punto más alto y bajo en el borde de la copa.
- Posteriormente se eleva y se suelta la copa girando el mango hasta que las dos mitades del suelo se unan por una longitud de 13 mm. Se verifica constantemente que no haya residuos de suelo debajo de la copa.
- Se debe anotar el número de golpes necesarios para que la abertura se cierre y se extrae una porción de suelo del ancho de la espátula y se debe colocar en una tara cuyo peso es conocido, para que luego secarla en el horno.
- El suelo restante en la copa se regresa a la placa mezcladora y se debe limpiar la copa y el ranurador y se prepara la mezcla para realizar la prueba siguiente.

- Por último, luego de 24 horas, se debe retirar las muestras del horno y se debe anotar el peso [30].

Resultados del Ensayo

Se calculará el límite líquido de cada muestra en función de su contenido de humedad, aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Límite líquido [30].

$$LL = W^n \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad \text{o} \quad LL = KW^n$$

Donde:

N: Cantidad de golpes requeridos para que la ranura se cierre al correspondiente contenido de humedad.

W^n : Contenido de humedad del suelo.

K: factor de acuerdo con el número de golpes.

✓ Límite Plástico (LP) – MTC E 111

Cantidad mínima de humedad a partir de la cual el suelo puede moldearse sin presentar grietas.

Herramientas y materiales

- Tamiz de N°40
- Superficie de trabajo
- Recipientes para poder encontrar la humedad
- Espátula

Procedimiento

- Se toma aproximadamente 2 g de la muestra preparada en el ensayo anterior y se moldea en forma de elipsoide.
- Luego, se aplica presión con los dedos sobre una superficie plana para formar cilindros de unos 3.2 mm de diámetro, asegurándose de que se desmoronen.
- Primero se anota el peso del recipiente vacío y posteriormente el peso del recipiente conteniendo la muestra húmeda.
- Finalmente, se secan las muestras en el horno, se retiran y se anota el peso seco de cada muestra [30].

Resultados del Ensayo

Se determinará el límite plástico para cada espécimen para el contenido de humedad, usando la siguiente ecuación:

Ecuación 2: Límite plástico [30].

$$LP = \frac{\sum_{i=1}^n W_{hi}}{n}$$

Donde:

W_{hi} : Contenido de humedad de cada muestra individual en el momento en que se agrieta al formar cilindros de 3 mm.

N: Número de muestras.

LP: Límite Plástico, expresado en porcentaje (%).

✓ Contenido de humedad - MTC E108

La humedad natural de un suelo, al ser comparado con el contenido de humedad óptimo en el ensayo Proctor, permite evaluar el grado de saturación del material y su potencial de compactación. Si el grado de saturación es bajo, se requerirá adicionar agua para alcanzar la densidad máxima. En caso contrario, se pueden implementar tratamientos como la compactación con energía adicional o la sustitución del material para mejorar sus características [30].

Herramientas y materiales

- Horno, capaz de mantener temperaturas de 110 ± 5 °C.
- Balanzas, con una precisión según normativa (± 0.01 g).
- Recipientes adecuados que sean resistentes tanto a la corrosión como al calor.

Procedimiento

- Se registra el peso del recipiente limpio y seco.
- Se toma una pequeña porción de la muestra.
- La muestra se deposita en un recipiente y se determina el peso del suelo en estado húmedo.
- Luego, se procede a secarla en el horno durante un período de 24 horas.
- Después del secado, se retira la muestra del horno y se deja enfriar para poder manipular el recipiente con la muestra.
- Finalmente, se pesa la muestra ya seca y se analizan los resultados.

Resultados del Ensayo

Se determinará el contenido de humedad, usando la siguiente ecuación:

Ecuación 3: *Contenido de Humedad [30].*

$$W\% = \left(\frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} \right) \times 100$$

Donde:

M_{CWS} : Peso del recipiente + muestra húmeda.

M_{CS} : Peso del recipiente + muestra seca.

M_C : Peso del recipiente vacío.

✓ Permeabilidad - NTP 339.147

Evalúa la capacidad de un suelo o material granular para permitir el flujo de agua a través de sus poros. El procedimiento consiste en aplicar una carga de agua sobre una muestra del suelo y medir el volumen que atraviesa el material en un tiempo específico, con lo cual se determina el coeficiente de permeabilidad (k), expresado en unidades de velocidad (cm/s). Este coeficiente refleja la facilidad con la que el agua circula por el suelo bajo determinadas condiciones de presión y gradiente hidráulico. [30].

Herramientas y materiales

- Permeámetro de compactación
- Cronómetro
- Probeta graduada
- Regla o cinta métrica

Procedimiento

- Se elige una muestra del suelo que sea representativa de sus características generales, preferentemente granular o de baja cohesión, y se prepara adecuadamente para el ensayo.
- La muestra se coloca dentro del cilindro del permeámetro. Si es necesario, se compacta en capas uniformes y se aseguran los extremos con capas filtrantes o arena limpia para evitar pérdida de partículas.
- Se procede a saturar completamente la muestra, ya sea aplicando agua de forma ascendente o utilizando el aire contenido en los poros.
- Se arma el sistema de permeabilidad conectando el permeámetro a la fuente de agua, asegurando una diferencia de altura constante entre entrada y salida.

- Se mide la diferencia de carga hidráulica entre los extremos superior e inferior del permeámetro utilizando tubos piezométricos o manómetros.
- Se abre la válvula de entrada para iniciar el flujo de agua, permitiendo que esta atraviese la muestra bajo una carga hidráulica constante.
- Una vez que el flujo se estabiliza, se registra el tiempo que tarda en pasar un volumen determinado de agua, utilizando un cronómetro y un cilindro graduado.
- Se mide la temperatura del agua durante el ensayo, ya que esta puede influir en el resultado por efecto de la viscosidad.
- Finalmente, se determina el coeficiente de permeabilidad (k) empleando la fórmula correspondiente y los valores registrados durante el procedimiento [30].

Resultados del Ensayo

Se determinará el coeficiente de permeabilidad (k), usando la siguiente ecuación:

Ecuación 4: Permeabilidad [30].

$$LP = \frac{Q L}{A h t}$$

Donde:

k: Coeficiente de permeabilidad (cm/s o m/s).

Q: Volumen de agua recogido (cm³ o m³).

L: Longitud de la muestra de suelo (cm o m).

A: Área transversal de la muestra (cm² o m²).

h: Carga hidráulica constante o diferencia de altura entre entrada y salida (cm o m).

t: Tiempo durante el cual se recogió el volumen de agua (s).

✓ **Clasificación SUCS**

Es un método estándar en ingeniería geotécnica que permite categorizar los suelos según sus propiedades físicas y propiedades. Esta clasificación se basa en las dimensiones de las partículas, la plasticidad y el nivel de compuestos orgánicos en la muestra [30].

	Grava bien graduada, mezcla de grava con poco o nada de materia fina, variación en tamaños granulares		Materiales finos sin plasticidad o con plasticidad muy bajo
	Grava mal graduada, mezcla de arena-grava con poco o nada de material fino		Arena arcillosa, mezcla de arena-arcillosa
	Grava limosa, mezcla de grava, arena limosa		Limo orgánico y arena muy fina, polvo de roca, arena fina limosa o arcillosa o limo arcilloso con ligera plasticidad
	Grava arcillosa, mezcla de grava-arena-arcilla; grava con material fino cantidad apreciable de material fino		Limo orgánico de plasticidad baja o mediana, arcilla grava, arcilla arenosa, arena limosa, arcilla magra
	Arena bien graduada, arena con grava, poco o nada de material fino. Arena limpia poco o nada de material fino, amplia variación en tamaños granulares y cantidades de partículas en tamaños intermedios		Limo orgánico y arcilla limosa orgánica, baja plasticidad
	Arena mal graduada con grava poco o nada de material fino. Un tamaño predominante o una serie de tamaños con ausencia de partículas intermedias		Limo inorgánico, suelo fino gravoso o limoso, micacea o diatometacea, limo elástico
	Arcilla inorgánica de elevada plasticidad, arcilla gravosa		
	Arcilla orgánica de mediana o elevada plasticidad, limo orgánico		
	Turba, suelo considerablemente orgánico		

Ilustración 1: Clasificación SUCS [31].

✓ **Clasificación AASHTO**

Es un sistema empleado en el diseño de pavimentos. A diferencia del SUCS, que se enfoca en una clasificación más general de los suelos, el AASHTO está diseñado específicamente para evaluar el comportamiento de los suelos para su uso en proyectos de carreteras [30].

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		

Ilustración 2: Clasificación AASHTO [31].

✓ Correlación del sistema SUCS y AASHTO

Tabla III: Correlación de tipos de suelo

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

Fuente: Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos [30].

Ensayos especiales para el material granular de subbase

✓ Equivalente de arena - MTC E 114

Sirve para cuantificar la proporción de finos plásticos o arcillosos en un suelo, proporcionando una indicación aproximada de su plasticidad. Esta prueba, estandarizada como MTC E 114, es especialmente valorada por su rapidez y facilidad de ejecución, utilizada para la evaluación preliminar de materiales en campo [30].

Tabla IV: Tipos de suelo de acuerdo con su equivalente de arena

Equivalente de Arena	Características
Si $EA > 40$	El suelo no es plástico, es arena
Si $40 > EA > 20$	El suelo es poco plástico y no heladizo
Si $EA < 20$	El suelo es plástico y arcilloso

Fuente: Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos [30].

Herramientas y materiales

- Probeta previamente graduada
- Tubo flexible, que permita cortar el paso del líquido
- Tubo irrigador de acero
- Reloj
- Tampón macizo para ajustar la probeta

- Dos botellas de 1 galón

Procedimiento

- Se vierte una solución de cloruro de calcio en un cilindro graduado hasta $4 \pm 0,1''$
- Luego se añade la muestra de ensayo con un embudo y se golpea el cilindro para eliminar burbujas de aire. Se deja reposar 10 ± 1 minutos.
- Después, se tapa el cilindro, se invierte parcialmente y se agita para liberar el material del fondo. Luego, se agita horizontalmente con 90 ciclos en 30 segundos.
- Tras la agitación, se coloca el cilindro vertical, se retira el tapón y se realiza la irrigación con un tubo, lavando el material adherido y elevando los finos.
- Se ajusta el nivel a $15''$ y se deja reposar durante 20 minutos ± 15 segundos. Finalmente, se registra el nivel de la suspensión arcillosa [30].

Resultados del Ensayo

Se determinará el porcentaje de equivalente de arena, usando la siguiente ecuación:

Ecuación 5: Equivalente de arena [30].

$$SE = \left(\frac{H_s}{H_c} \right) \times 100$$

Donde:

SE: Equivalente de arena (%).

Hs: Altura de la columna de arena sedimentada (en mm).

Hc: Altura total de la columna de suspensión (arena + finos, en mm).

✓ **Proctor Modificado – MTC E115**

Busca establecer la densidad máxima alcanzable por un determinado tipo de suelo. al aplicarle una energía de compactación elevada. Para ello, es compactada una muestra de suelo dentro de un molde de mayor volumen que el utilizado en el ensayo estándar, utilizando un pisón más pesado y aplicando más golpes. Este procedimiento permite simular condiciones de campo más exigentes y obtener una curva de compactación que refleja la capacidad que tiene el suelo de aguantar cargas mayores [31].

Herramientas y materiales

- Montaje del molde
- Molde de 6 pulgadas
- Pisón manual

Procedimiento

- Se miden las dimensiones del molde para calcular su volumen.
- Se prepara la muestra triturándola y pasándola por el tamiz N°4 hasta obtener la cantidad necesaria de tierra para los cuatro puntos requeridos para trazar la curva de humedad óptima.
- Se utiliza una cantidad de 3000 g de muestra natural para cada punto del ensayo, generando 4 puntos para elaborar la curva de compactación.
- Se eligen los porcentajes de agua para los 4 puntos, asegurando que se encuentren dentro del rango de humedad óptima.
- Tras determinar los porcentajes de humedad, se mezcla cada porcentaje de agua con la muestra respectiva en una bandeja grande para lograr la máxima uniformidad.
- Después de la mezcla, se divide la muestra en 5 partes, que corresponden a las 5 capas compactadas del ensayo.
- Se toma una muestra del cuarteo realizado para determinar el contenido de humedad de la muestra.
- Posteriormente, se compacta capa por capa con 25 golpes hasta completar las 5 capas.
- Posteriormente, se nivela el suelo al borde del molde, se limpia el molde y finalmente se pesa [31].

Resultados del Ensayo

El objetivo principal es trazar la gráfica de compactación, relacionando el contenido de humedad (%) con la densidad seca (g/cm^3). A partir de esta curva, se determinará el contenido óptimo de humedad (OCH) y la máxima densidad seca (MDS).

Ecuación 6: Densidad húmeda [31].

$$\rho_m = \frac{Mt - M_{md}}{V} \times 1000$$

Donde:

ρ_m : Densidad húmeda del espécimen compactado, en gr/cm^3

Mt: corresponde a la masa conjunta del suelo compactado en condición húmeda y del molde, expresada en gramos.

Mmd: representa la masa del molde de compactación vacío, medida en gramos.

V: indica el volumen del molde utilizado en el proceso de compactación, expresado en centímetros cúbicos (cm^3).

h: se refiere al contenido de humedad natural presente en la muestra, expresado en gramos.

Ecuación 7: Densidad seca [31].

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

Donde:

ρ_d : Densidad seca de la muestra de suelo ya compactado, en gr/cm³

W: Cantidad de agua contenida en la muestra, expresada en gramos.

✓ **California Bearing Ratio (CBR) - MTC E132**

Permite medir la capacidad que tiene un suelo para aguantar las cargas. Implica la compresión de una muestra de suelo dentro de un molde estándar, saturarla y someterla a una carga puntual. La humedad del suelo es un factor crucial en este ensayo, ya que influye directamente en la resistencia del material. Para ello, se ajusta el contenido de agua de la muestra para alcanzar la humedad óptima de compactación y obtener así el máximo valor de CBR [31].

Herramientas y materiales

- Cilindro metálico para moldear
- Disco separador de metal
- Pesas con un peso de $4,54 \pm 0,02$ kg
- Émbolo de penetración
- Prensa empleada para la penetración de una muestra
- Papel filtro
- Aparato medidor de expansión

Procedimiento

- Preparación de la muestra: Se prepara el suelo con el contenido óptimo de humedad. Luego, se compacta en un molde cilíndrico estándar en capas de igual espesor, utilizando un pisón para lograr la densidad requerida.
- Una vez finalizado el proceso de compactación, se retira el collar y se nivela la superficie del espécimen utilizando un enrasador o una cuchilla de hoja firme y recta.
- Posteriormente, se desmonta el molde, se vuelve a ensamblar en posición invertida, omitiendo el disco espaciador y colocando un papel filtro entre la base y el molde. Luego, se procede a realizar el pesaje correspondiente.
- Saturación: Se sumerge la muestra compactada en agua durante 96 horas (4 días) para simular las condiciones de saturación que puede experimentar el suelo en el terreno.

- Se realiza la lectura inicial del hinchamiento colocando el trípode de medición sobre los bordes del molde, alineando el vástago del reloj comparador con el de la placa perforada.
- Luego, el molde se retira y se deja drenar durante un periodo de 15 minutos en su posición habitual; posteriormente, se retiran la sobrecarga y la placa perforada.
- Finalmente, se efectúa el pesaje inmediato del molde y se continúa con el ensayo de penetración conforme al procedimiento descrito en el numeral siguiente.
- Aplicación de la carga: se coloca un pistón sobre la superficie de la muestra compactada y se aplica una carga de penetración a una velocidad constante de 1,27 mm por minuto, con el fin de evaluar la resistencia del suelo frente a la penetración.
- Medición de la resistencia: se registran las cargas necesarias para alcanzar penetraciones de 2,5 mm y 5 mm, comparando posteriormente estos valores con las cargas estándar establecidas.
- Determinación del valor CBR: el valor del CBR se obtiene dividiendo la carga de penetración del suelo entre la carga estándar correspondiente y multiplicando el resultado por 100, tomando como referencia el valor más alto entre las penetraciones de 2,5 mm y 5 mm.[31].

Resultados del Ensayo

La humedad de compactación se expresa como el porcentaje de agua que debe incorporarse al suelo durante el proceso de compactación. Este valor no considera la humedad natural presente en la muestra, por lo que debe restarse del contenido óptimo de humedad determinado.

Ecuación 8: Porcentaje de agua [31].

$$\% \text{ de agua a añadir} = \left(\frac{H - h}{100 - h} \right) \times 100$$

Donde:

H: corresponde a la humedad establecida previamente para la muestra, expresada en gramos.

h: representa el contenido de humedad natural presente en la muestra, medido en gramos.

Manual de Carreteras EG-2013

El Capítulo IV del Manual de Carreteras EG-2013 establece los criterios técnicos y los parámetros de aceptación para los agregados empleados en la construcción de bases y subbases de pavimentos en el Perú. Este documento normativo detalla los ensayos a realizar, los límites

de los valores obtenidos y los estándares de calidad que deben tener los materiales para garantizar la durabilidad y el desempeño de las obras viales [32].

Material granular para la subbase

Los materiales granulares destinados a conformar la subbase deberán ajustarse a los parámetros granulométricos establecidos en la tabla anexa. Cabe destacar que la gradación tipo A está restringida a aquellas zonas cuya altitud se encuentre por encima de los 3000 m.s.n.m [32].

Tabla V: Granulometría para subbases

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm (2'')	100	100	-	-
25 mm (1'')	-	75-95	100	100
9.5 mm (3/8'')	30-65	40-75	50-85	60-100
4.75 mm (N°4)	25-55	30-60	35-65	50-85
2.0 mm (N°10)	15-40	20-45	25-50	40-70
425 µm (N°40)	8-20	15-30	15-30	25-45
75 µm (N°200)	2-8	5-15	5-15	8-15

Fuente: *Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción* [32].

El MTC exige que la curva de granulometría mantenga una distribución uniforme y se adhiera estrechamente a los límites presentados.

Para garantizar un adecuado desempeño del pavimento, los materiales empleados en la subbase granular deberán cumplir con los estándares establecidos en la normativa vigente. Además de los criterios granulométricos detallados en la sección anterior, el material deberá satisfacer los estándares de calidad especificados en la Tabla VI. Es notable destacar que las cifras de CBR indicados corresponden a una densidad seca máxima de 100% y una penetración de carga de 2.5 mm, lo cual asegura una adecuada capacidad portante del material [32].

Tabla VI: Especificaciones de ensayos especiales para subbase

ENSAYO	NORMA MTC	NORMA ASTM	NORMA ASSHTO	Requerimiento	
				< 3000 msnm	> 3000 msnm
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	T 96	50 % máx.	50 % máx.
CBR	MTC E 132	D 1883	T 193	40 % min	40 % min

Límite Líquido	MTC E 110	D 4318	T 89	25 % máx.	25 % máx.
Índice de Plasticidad	MTC E 111	D 4318	T 90	6 % máx.	4 % máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	D 2419	T 176	25 % min	35 % min
Sales Solubles	MTC E 219	-	-	1 % máx.	1 % máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-	D 4791	-	20 % máx.	20 % máx.

Fuente: Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción [32].

Materiales granulares marginales

Los materiales que no satisfacen los criterios de aceptación establecidos en las normativas técnicas para su empleo en obras viales son catalogados como materiales marginales [29]. En las normativas peruanas no encontramos la denominación de “material marginal”; sin embargo, se entiende que todo material que no cumpla con las especificaciones mínimas de ensayos presentados en el Manual de Carreteras (Tabla VI) son denominados marginales. En las normativas de otros países si encontramos la denominación “marginal”.

La normativa española realizó un cambio de los criterios de clasificación de los suelos para su uso de carreteras en el PG-3/75 del año 1976, específicamente el artículo 330 del PG-3, en el año 2002 que hasta el día de hoy es vigente. Esto con la finalidad de hacer uso de los suelos naturales en la construcción de carreteras, provenientes de procesos industriales o manipulaciones humanas, siempre que cumplan con ciertos requisitos técnicos establecidos, principalmente la plasticidad del suelo. En los criterios de clasificación de los suelos en el PG-3/75 del año 1976 para su uso en proyectos de pavimentos, categoriza los materiales en cuatro grupos: seleccionados, adecuados, tolerables, e inadecuados [29].

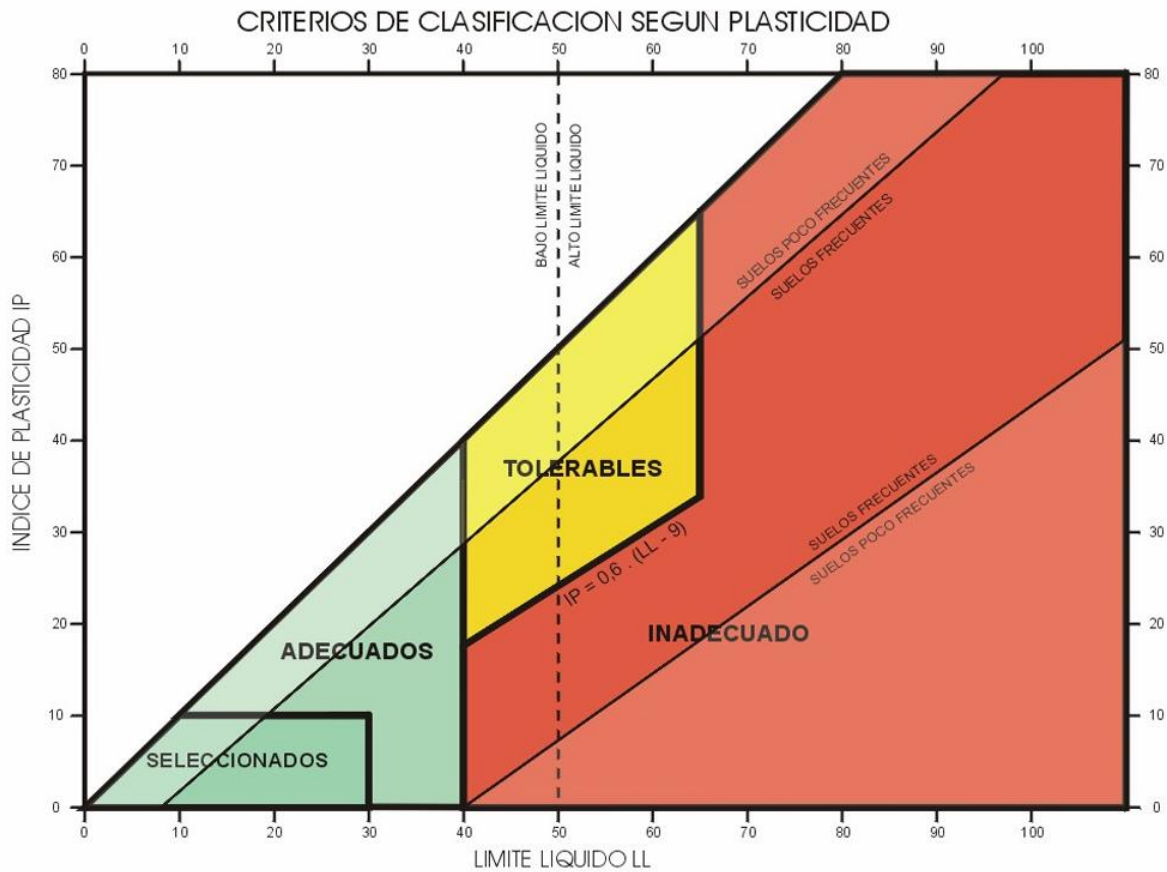


Ilustración 3: Clasificación de los suelos en el PG-3/75 (1976) según su plasticidad [29].

En los criterios de clasificación de los suelos en PG-3 del año 2002 para su uso en proyectos de pavimentos, categoriza los materiales ya no en cuatro grupos, sino cinco, agregando al grupo de materiales marginales: seleccionados, adecuados, tolerables, marginales e inadecuados [29].

Como resumen de los criterios del PG-3 para saber si un suelo es adecuado para formar terraplenes, se muestran en las figuras 4 y 5 los límites según la carta de Casagrande, tanto de la norma actual como de la versión de 1975. La diferencia principal entre ambas es que, en 1975, muchos suelos se consideraban inadecuados, pero hoy se aceptan como suelos marginales, especialmente en el caso de arcillas y limos de media y alta plasticidad (CL, CH, ML y MH). Sin embargo, las arcillas con un límite líquido mayor a 90 ($LL > 90$) siguen siendo consideradas no aptas.

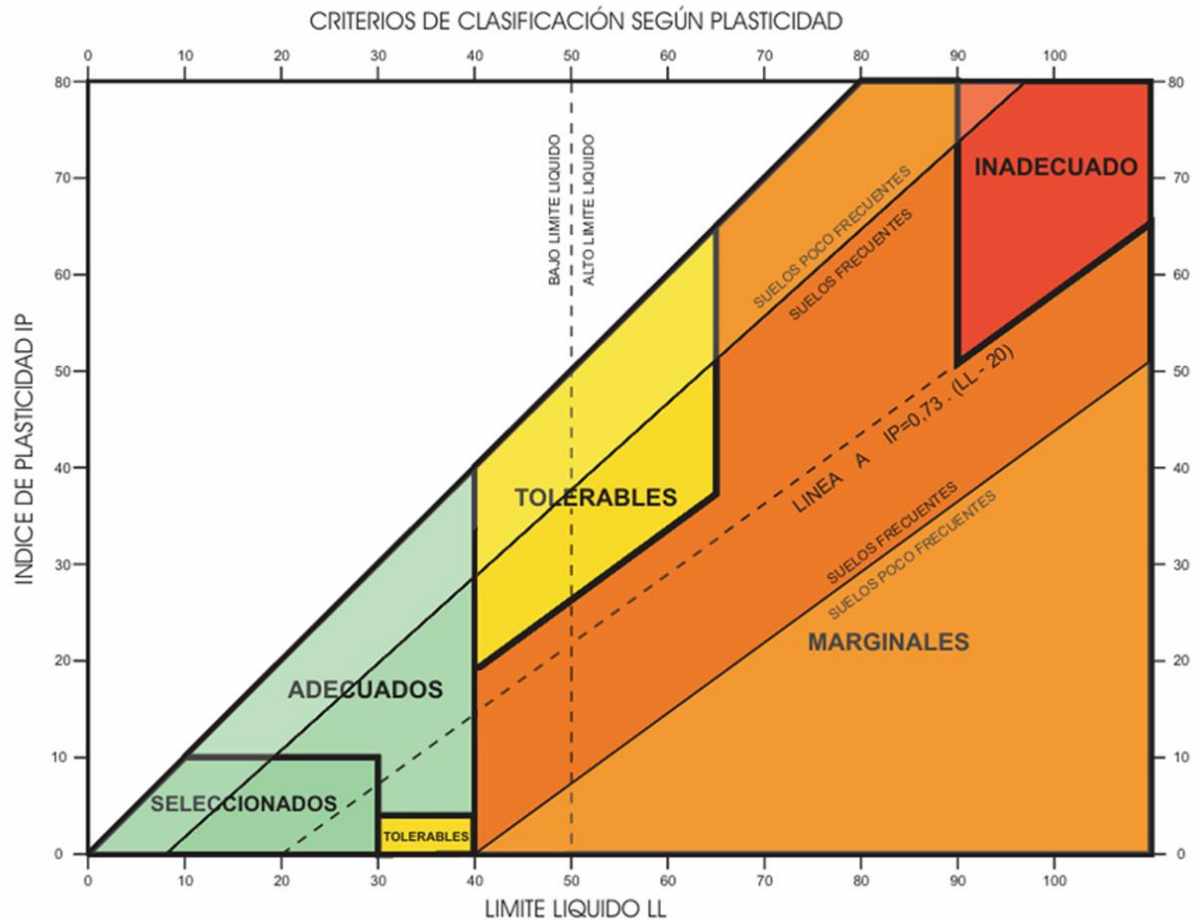


Ilustración 4: Clasificación de los suelos en el PG-3 (2002) según su plasticidad [29].

✓ Arcillas (CL, CH)

CL (Arcillas de media plasticidad): Suelos con plasticidad baja a moderada, susceptibles a deformaciones bajo carga.

CH (Arcillas de alta plasticidad): Suelos con un alto índice de plasticidad, que pueden sufrir deformaciones significativas y son inadecuados para pavimentación.

✓ Limos (ML, MH):

ML (Limos de media plasticidad): Tienen una capacidad de carga limitada y son propensos a problemas de compactación.

MH (Limos de alta plasticidad) Son más complicados debido a su elevada plasticidad y limitada capacidad de carga.

Además, normativa española para la construcción de carreteras, específicamente el artículo 330 del PG-3, define las características técnicas de diferentes tipos de suelos.

A. Cantidad de materia orgánica

El PG-3 fija los límites máximos de contenido orgánico máximos para cada tipo de suelo.

Tabla VII: Cantidades de materia orgánica

Tipo de suelo	Contenido máximo de materia orgánica (%)
Seleccionado	0.2 %
Adecuado	1 %
Tolerable	2 %
Marginal	Según apartado 330.4.4.5, pero siempre < 5%

Fuente: Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías [29].

B. Colapsabilidad

La alta porosidad de suelos poco densos y secos los hace susceptibles al colapso por inundación, es decir, a un asentamiento repentino del terreno. El PG-3 establece los límites máximos de asentamiento para cada tipo de suelo, considerando su susceptibilidad a este fenómeno [29].

Tabla VIII: Colapso admisible

Tipo de suelo	Asiento en el ensayo de colapso (%)
Seleccionado	-
Adecuado	-
Tolerable	< 1 %
Marginal	> 1%

Fuente: Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías [29].

C. Expansibilidad

Estos suelos, caracterizados por su alta plasticidad y contenido de coloides, experimentan variaciones volumétricas significativas al variar su contenido de humedad. Su comportamiento expansivo puede generar daños estructurales, especialmente en condiciones de humedad variable. La normativa PG-3 establece los límites permisibles para las propiedades de estos suelos, considerando su susceptibilidad a cambios volumétricos [29].

Tabla IX: Hinchamiento para cada tipo de suelo

Tipo de suelo	Hinchamiento libre (HL %)
Seleccionado	-

Adecuado	-
Tolerable	HL < 3 %
Marginal	3% < HL < 5 %

Fuente: Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías [29].

D. CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo CBR es el método de prueba estándar para determinar la resistencia de los suelos utilizados en la construcción de vías. La normativa PG-3 permite el empleo de suelos clasificados como marginales, siempre que cumplan con el requisito de un valor de CBR mínimo de 3, lo que garantiza una adecuada capacidad portante para soportar las cargas vehiculares [29].

Métodos de Estabilización en Capas Granulares de Pavimentos

La estabilización tiene como objetivo potenciar las características geotécnicas de los materiales granulares empleados en las bases inferiores del pavimento, tales como la base, subbase y, en algunos casos, la subrasante. Se destacan dos tipos de métodos, la estabilización física y química.

- ✓ Estabilización Mecánica: Se enfoca en modificar las propiedades físicas del suelo sin alterar su composición química. Los procesos involucrados en este tipo de estabilización consisten principalmente en [33]:

Compactación: Aumenta la densidad del suelo, reduciendo su porosidad y mejorando su capacidad portante.

Mezcla de suelos: Combina suelos de diferentes granulometrías para optimizar la distribución de tamaños de partículas y mejorar las características mecánicas del material resultante.

Reemplazo de suelos: Sustituye suelos de baja calidad por materiales más adecuados, mejorando así las características del terreno.

- ✓ Estabilización Química: La estabilización química, por su parte, implica la modificación de las características del suelo a través de reacciones químicas. Se logra mediante la adición de agentes químicos que interactúan con los componentes del suelo, formando nuevos compuestos y mejorando sus características. Los principales mecanismos de acción de los estabilizantes químicos incluyen [33]:

Floculación: Aglomera las partículas del suelo, disminuyendo la plasticidad y optimizando la permeabilidad.

Cementación: Forma enlaces químicos entre las partículas del suelo, creciendo su cohesión y resistencia.

Cristalización: Induce la formación de nuevos cristales que rellenan los poros del suelo, mejorando su rigidez.

La estabilización química es una técnica ampliamente utilizada en la construcción de pavimentos para mejorar las propiedades de los suelos de fundación. De acuerdo con el Capítulo III del Manual de Carreteras EG-2013, los materiales susceptibles de ser estabilizados químicamente incluyen materiales de afirmado, productos de escarificación de capas existentes, suelos naturales de excavaciones o préstamos, agregados locales y combinaciones de estos. La elección del material a estabilizar dependerá de las propiedades del suelo existente, el clima y los requerimientos del proyecto [32].

Estabilización de subbases de pavimentos

Es una técnica fundamental en la construcción de pavimentos, ya que permite mejorar notablemente las propiedades de los materiales utilizados. El objetivo primordial de la estabilización de capas granulares es optimizar su respuesta estructural ante las sollicitaciones impuestas por el tráfico y las condiciones climáticas. De esta manera, se logra aumentar el desempeño del pavimento y reducir los costos de mantenimiento [33]. Estas técnicas permiten:

- **Aumento de la capacidad portante y reducción de espesores:** La estabilización permite optimizar el diseño de pavimentos, reduciendo los espesores requeridos de las capas de base y subbase. Al mejorar la resistencia de los materiales, se disminuye la necesidad de grandes espesores para soportar las cargas del tráfico. Además, la reducción de espesores implica un menor consumo de materiales y, por ende, un ahorro significativo en los costos de construcción [33].
- **Solución de problemas de drenaje y estabilidad:** Los estabilizantes químicos disminuyen la permeabilidad de los suelos, evitando problemas de inestabilidad causados por la humedad. La estabilización mejora la durabilidad de las estructuras, prolongando el desempeño y reduciendo los costos de mantenimiento a largo plazo. Esta técnica es especialmente útil en zonas con problemas de drenaje o en suelos de baja calidad, donde la estabilización permite obtener resultados satisfactorios [33].
- **Valorización de materiales marginales:** La estabilización permite utilizar materiales de baja calidad o marginales que, de otra manera, serían descartados. Al aprovechar recursos locales y reducir la necesidad de extraer nuevos materiales, se contribuye a la sostenibilidad de los proyectos viales. La utilización de materiales marginales estabilizado representa una alternativa económica y eficiente [33].

Polímeros

Son moléculas gigantes formadas por la cohesión consecutiva de unidades más pequeñas denominadas monómeros. Estas pueden tener estructuras diversas, desde cadenas lineales hasta redes tridimensionales, y sus propiedades varían ampliamente dependiendo de la naturaleza de los monómeros y de cómo se unen. Los polímeros están presentes en numerosos productos cotidianos, como plásticos, textiles y alimentos, y desempeñan un papel fundamental en diferentes campos de la rama de ciencia y la tecnología [34].

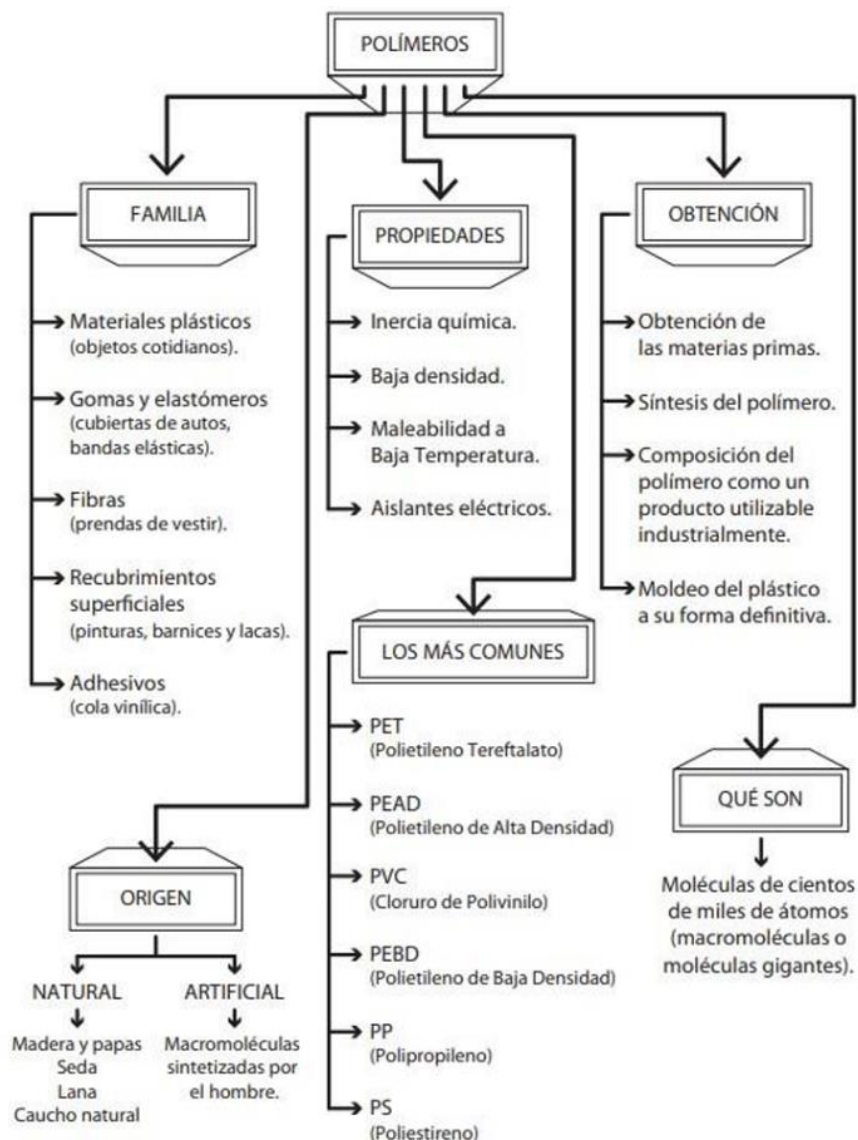


Ilustración 5: Propiedades del polímero [34].

Polycom

Originario de Australia, Polycom es un polvo concentrado a base de acrilamida que, al contactar con el agua, se convierte en una solución polimérica capaz de mejorar

significativamente las propiedades de ingeniería de suelos y gravas. Esta innovadora solución, al fortalecer la estructura interna de estos materiales, reduce la necesidad de mantenimiento en proyectos de construcción como carreteras, ferrocarriles y obras de infraestructura en general. Además, Polycom ofrece resultados consistentes y una mejora de calidad en una amplia variedad de suelos, lo que lo convierte en una opción atractiva desde el punto de vista económico y técnico. Sin embargo, a pesar de sus múltiples beneficios, la información técnica disponible sobre Polycom aún es limitada en comparación con otros polímeros más empleados en la industria de la construcción. Viene en presentaciones de 2 Kg en cada botella [10].

Propiedades del polímero Polycom

Cuenta con las siguientes propiedades [10]:

- Composición molecular: Basada en la repetición de unidades de acrilamida, representada por la fórmula $(C_3H_5NO)_n$.
- Solubilidad: Alta solubilidad en agua.
- pH: Ligeramente ácido, con un valor de 6.9 a 25°C.
- Inflamabilidad: Punto de inflamación a 93°C.
- Estabilidad: Se mantiene constante bajo condiciones normales de temperatura y presión.



Ilustración 6: Producto Polycom.

Bases legales

Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos [30].

Este documento, desarrollado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, actúa como una guía integral para el diseñar, construir y mantener las carreteras, poniendo especial atención en el comportamiento del suelo, los aspectos geotécnicos y las características de los pavimentos. Su propósito es asegurar la durabilidad de la pavimentación. Para lograrlo, el manual detalla métodos de diseño y técnicas de estabilización de suelos, pruebas geotécnicas, así como la exploración del terreno. Además, incluye criterios para el diseño de distintos tipos de pavimentos, con especial énfasis en las capas que constituyen estas estructuras.

Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción [32].

Este manual ofrece una guía fundamental para la construcción, conservación y rehabilitación de carreteras, estableciendo criterios específicos en aspectos como la calidad de los materiales utilizados, el movimiento de tierras, la compactación, los sistemas de drenaje, las alcantarillas, los puentes y las estructuras de contención. En términos generales, abarca todo lo relacionado con la ejecución de proyectos viales. También incluye pautas para brindar la seguridad y durabilidad de la pavimentación, promoviendo una adecuada señalización y la supervisión de la calidad de los insumos utilizados.

Manual de Ensayo de Materiales [31].

Este manual establece directrices y procedimientos para llevar a cabo pruebas que permitan evaluar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los materiales y productos empleados en la industria de la construcción, tales como suelos, concreto, acero y agregados. Su propósito es asegurar que estos materiales sean apropiados con los estándares mínimos de calidad exigidos por diversas estructuras de ingeniería, como carreteras, puentes y edificaciones. Además, el manual incluye instrucciones detalladas para la ejecución de distintas pruebas, tales como resistencia, durabilidad, densidad, granulometría, compactación y absorción de agua, entre otras. Asimismo, especifica los equipos necesarios para cada prueba, las condiciones requeridas en cada ensayo y los criterios de aceptación de los materiales, garantizando que estos cumplan con las especificaciones establecidas en las normas de construcción.

Materiales y métodos

Materiales

Clasificación de las muestras del material granular marginal

De acuerdo con el Manual de Carreteras, se llevará a cabo un estudio geotécnico mediante la excavación de calicatas. Los datos obtenidos servirán para la clasificación del suelo (SUCS y AASTHO).

Determinación de las propiedades del material granular marginal con y sin Polycom

Para el análisis de las características físicas y mecánicas del material granular marginal con o sin Polycom, se tendrá en cuenta rigurosamente las normas técnicas vigentes para subbases granulares. Por ello, se usará los manuales del MTC. En particular, se llevarán a cabo los ensayos para detallar las características físico-mecánicas de los materiales granulares, tales como:

- ✓ Manual de Ensayos de Materiales, Manual de Carreteras: Suelos Geología, Geotecnia y Pavimentos.
- ✓ Equipo de seguridad para laboratorio: guardapolvos, botas punta de acero, guantes de látex, guantes para el calor y gafas de protección.
- ✓ Ensayo de Contenido de Humedad (MTC E-108): balanza, recipientes y horno de secado.
- ✓ Análisis Granulométrico por Tamizado (MTC E-107): Tamices, brochas de limpieza, recipientes y balanza.
- ✓ Determinación del Límite Líquido de los Suelos (MTC E-110): Cuchara de Casagrande, ranurador, balanza, horno de secado, recipientes, tamiz N°40, espátula flexible y agua destilada.
- ✓ Determinación del Límite Plástico e Índice de Plasticidad (MTC E-111): Espátula, balanza, horno de secado, tamiz N°40, superficie de vidrio esmerilado, agua destilada, recipientes.
- ✓ Ensayo de Proctor Modificado (MTC E-115): Molde, pisón o martillo de compactación, enrazador, horno de secado y balanza.
- ✓ Ensayo de CBR (MTC E-132): Prensa de penetración, molde de metal, disco espaciador de metal, pisón o martillo compactador, aparato medidor de expansión, pesas, pesas ranuradas de metal, tanque de agua, enrazador, recipientes, horno de secado y balanza.

Métodos

Tipo y nivel de investigación

✓ Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo experimental, a través de ensayos de laboratorio se medirán las propiedades físico-mecánicas de los materiales granulares marginales (variable dependiente) al adicionar diferentes porcentajes de aditivo Polycom (variable independiente). La hipótesis será confirmada si se observa una variación en las variables dependientes como consecuencia de la manipulación de las variables independientes [35].

✓ Nivel de investigación

La presente investigación es de nivel explicativo, ya que no solo describe un fenómeno, sino que busca responder al por qué y cómo ocurre [35]. Dado que el objetivo es determinar la relación causal existente entre la adición de aditivo Polycom y las variaciones en las propiedades físico-mecánicas del suelo. Se pretende no solo identificar cambios mecánicos como el CBR o la máxima densidad seca, sino también establecer las razones por las que la estabilización con polímeros contribuye el comportamiento del suelo.

✓ Enfoque de investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que busca establecer una base numérica sólida para realizar inferencias estadísticas y extrapolar los resultados a un contexto real más amplio [35]. Dado que se fundamenta en la recolección de datos numéricos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio, con la finalidad de establecer patrones de comportamiento y realizar comparaciones estadísticas que permitan demostrar la efectividad del aditivo Polycom en la estabilización del suelo natural para capa de subbase de pavimento.

Población, muestra y muestreo

Población

Para efectos de la presente investigación, la población de estudio es el distrito La Victoria, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.

Muestra

La muestra de estudio son calicatas extraídas de a lo largo de la vía de acceso Pachacamac, cuyas distancias fueron escogidas a criterio. La determinación de la cantidad de muestras se basó en un método estadístico, dado que se consideró una población infinita. Se calculó el tamaño de la muestra para estimar la proporción necesaria, de la siguiente manera:

$$n = \frac{Z^2 pq}{e^2}$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra.

p: Probabilidad poblacional que presenta cierta característica.

q: Probabilidad poblacional que no presenta la característica.

e: Máximo error de estimación de p .

Z: Valor relacionado al nivel de confianza.

Tabla X: Datos de tamaño de muestra para los puntos de exploración.

Tamaño de muestra para puntos de exploración	
e	En investigaciones 5% representa un error tolerable bastante aceptable.
Z	Nivel de confianza deseada (95%), donde para cada nivel existe un valor Z asociado, siendo 1.96 el que le corresponde. Se estima una probabilidad de ocurrencia del 0.998 en la zona de estudio, respaldada por un estudio del INDECI en Chiclayo que reporta la presencia de suelos arcillosos con variados índices de plasticidad. Esta información se detalla en el Anexo 02.
p	INDECI en Chiclayo que reporta la presencia de suelos arcillosos con variados índices de plasticidad. Esta información se detalla en el Anexo 02.
q	Se estima una probabilidad de ocurrencia de 0.002 de que la zona no contenga suelo arcilloso.

Entonces:

$$n = \frac{(1.96)^2(0.998)(0.02)}{(0.05)^2} = \mathbf{3.067}$$

Bajo los cálculos precisados anteriormente se contó con un total de 3.067 calitas a explorar, redondeando el resultado obtenido, los puntos de investigación tomados fueron de tres calicatas de 1.50 metros de profundidad, de acuerdo con la norma CE.10 de Pavimentos Urbanos

Muestreo

Las muestras fueron sometidas a respectivos ensayos de laboratorio para identificar a que clasificación de suelo pertenece de acuerdo con el sistema SUCS y AASHTO. Posteriormente se realizaron ensayos físicos y mecánicos a las muestras patrón y con adición, con la finalidad de establecer una tendencia del mejoramiento del material granular marginal con aditivo Polycom para su uso en subbase de pavimentos. Para definir la cantidad de ensayos se empleó un muestreo no probabilístico, considerando como referencia los criterios utilizados en investigaciones antecedentes.

Ensayos de Laboratorio para caracterizar las muestras extraídas:

Tabla XI: Ensayos de caracterización

ENSAYOS	C-01	C-02	C-03	
Contenido de Humedad	1	1	1	
Granulometría	1	1	1	TOTAL
Límites de Atterberg	1	1	1	
	3	3	3	9

Ensayos Físicos de Laboratorio para las muestras patrón y con adición:

Tabla XII: Ensayos físicos para muestra patrón y con adición

ENSAYOS	C-01					C-02					C-03					
	%					%					%					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0	0.1	0.2	0.3	0.4	
Granulometría	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	
Contenido de Humedad	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	
Contenido de Partículas Finas	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	TOTAL
Límites de Atterberg	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Permeabilidad	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	7	4	4	4	4	7	4	4	4	4	7	4	4	4	4	69

Ensayos Mecánicos de Laboratorio para las muestras patrón y con adición:

Tabla XIII: Ensayos mecánicos para muestras patrón y con adición.

ENSAYOS	C-01					C-02					C-03					
	%					%					%					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0	0.1	0.2	0.3	0.4	
Proctor Modificado	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
CBR	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	TOTAL
	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	90

Finalmente, para la evaluación del costo de producción del material granular marginal estabilizado con Polycom, se llevó a cabo un análisis exhaustivo que abarcó tanto los costos directos como los indirectos involucrados en el proceso de estabilización. Seguidamente, se

evaluarán los costos asociados a la compra del aditivo Polycom y su incorporación en el material, considerando las cantidades requeridas para lograr la estabilización.

Criterios de Selección

Los criterios de selección para los puntos de estudio se escogieron a nivel estadístico donde se evaluaron tres calicatas, con una profundidad mínima de 1.50 m. En la presente investigación se empleó el aditivo Polycom, fabricado y distribuido por la empresa Austlatin. Su adquisición se realizó contactando los números telefónicos de atención al cliente a nivel nacional proporcionados en la ficha técnica del aditivo (Anexo 05).

La dosificación del aditivo Polycom se determinó en función de los resultados óptimos y los ensayos evaluados en la literatura previa citada. Todos los datos recopilados en la Tabla 13 permitieron seleccionar los porcentajes de adición para esta investigación, las cuales fueron de 0.01%, 0.02% y 0.03% respecto al peso del material. Con el objetivo de optimizar aún más los resultados, esta investigación propuso la inclusión de un porcentaje adicional de 0.04%, siguiendo un incremento constante de 0.01%. La elección de dichos porcentajes se basa en:

- 0.1% de Polycom: De acuerdo con el antecedente [18], esta dosificación logró reducir significativa el índice de plasticidad. Sin embargo, el antecedente [14] señala que el polímero en ninguna dosificación evidencia mejoras. Por ello, este estudio evaluará las posibles condiciones del suelo o características del material que podrían influir en estos resultados contrastantes.
- 0.2% de Polycom: De acuerdo con el antecedente [14], es recomendable utilizar el aditivo en una dosificación mínima de 0.02%, ya que esta mejora las propiedades del Proctor modificado, especialmente al reducir la humedad óptima, y permite un incremento del CBR. Por ello, este estudio evaluará si esta dosificación también resulta ser la mínima para mejorar las propiedades físicas y mecánicas específicamente en su aplicación como subbase en estructuras de pavimento.
- 0.3% de Polycom: De acuerdo con los antecedentes [14] - [15], esta dosificación mejora significativamente la Capacidad de Soporte (CBR) de un suelo. Por ello, esta investigación evaluará si esta dosificación mejora también el CBR del material marginal como mínimo en un 40%, de acuerdo con el Manual de Carreteras.
- 0.4% de Polycom: Esta investigación propone una nueva dosificación para estimar que el material marginal mejore sus características físicas y mecánicas, a fin de que cumpla todos los estándares evaluados del Manual de carreteras, presentados en la Tabla VI.

Tabla XIV: Análisis de antecedentes de la investigación

Autor	Objetivo	Muestra	Dosificaciones	Propiedades estudiadas	Ensayos realizados	Resultados
Isla [14]	Evaluar la influencia del polímero PolyCom en afirmados para el mejoramiento de los pavimentos en Huanta – Ayacucho.	Se extrajeron especímenes de afirmado de cantera.	Evaluaron el efecto del polímero Polycom con dosificaciones de 0.01, 0.02 y 0.03 %	Índice de plasticidad Propiedades mecánicas	Límites de Atterberg CBR	No varía el índice de plasticidad significativamente. La dosificación 0.03% aumenta en aproximadamente 211.32% el valor de CBR.
Contoguris et al., [15]	Explicar la estabilización de suelos finos mediante el uso del polímero Polycom en subrasantes cohesivas para caminos de baja transitabilidad.	Se extrajeron tres calicatas de suelos limo-arcillosos.	Evaluaron el efecto del polímero Polycom con dosificaciones de 0.01, 0.02 y 0.03 %	Índice de plasticidad Propiedades mecánicas	Límites de Atterberg CBR	La dosificación 0.01% de polímero logró reducir el índice de plasticidad en un 25.3%. La dosificación 0.03% aumentó en aproximadamente 633.3% el valor de CBR.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En el presente estudio, la recopilación de información se realizó mediante la técnica de la observación. Dentro del campo de la ingeniería, la observación constituye un método directo cuyos datos deben ser sistemáticamente registrados en formatos apropiados para su análisis posterior. Los instrumentos utilizados para este propósito comprendieron fichas de registro de datos elaboradas conforme a los procedimientos establecidos en el Manual de Materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Además, se aplicó la observación directa durante la ejecución de los ensayos de laboratorio. Del mismo modo, se realizó un análisis documental de fuentes primarias y secundarias, empleando fichas de registro y organización de información para dicho fin.

Tabla XV: Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnica	Instrumento	Aplicación
Observación Experimental	Ficha de registro de datos	Ensayos de laboratorio
Análisis de documentos	Fichas de registros	Fuentes de información

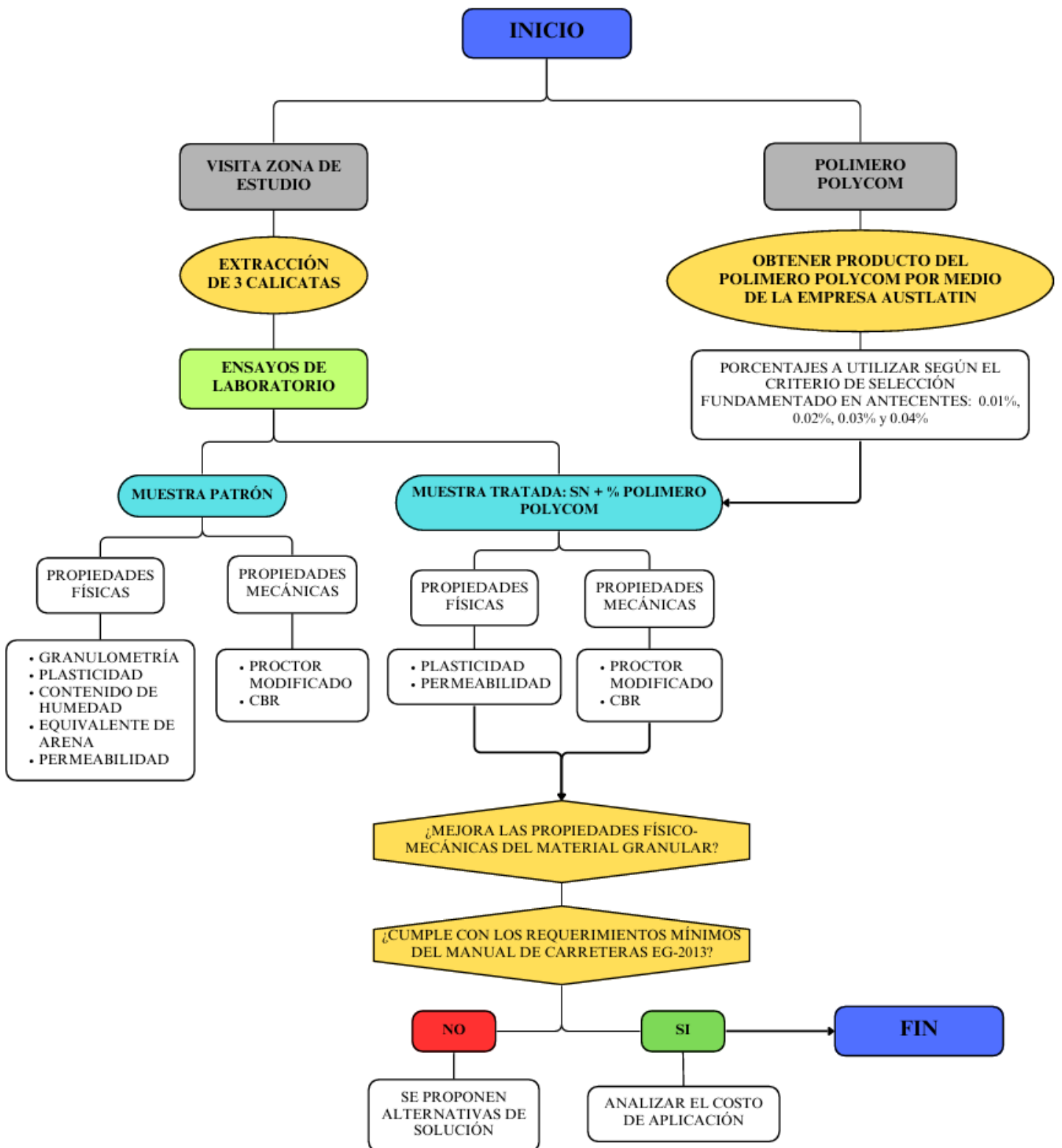


Ilustración 7: Flujo de hipótesis.

Operacionalización de variables

Tabla XVI: Operacionalización de variables

Tipo de Variable	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad de Medida	Escala de Medición	Instrumento
Independiente Adición de aditivo Polycom	Polycom es un polvo concentrado a base de acrilamida que, al contactar con el agua, se convierte en una solución polimérica resistente [10].	El aditivo Polycom será dosificado en diferentes porcentajes de 0.01%, 0.02%, 0.03% y 0.04% de acuerdo con el peso del material.	Dosificación	Cantidad de aditivo Polycom	%	Rango	Balanza Elec. Aproximación a 0.1 g
Dependiente Mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas del material granular marginal	Los materiales granulares que no cumplen los criterios de aceptación establecidos en las normativas técnicas del MTC para su empleo en capas de subbase o base de pavimentos son catalogados como materiales granulares marginales.	Los materiales granulares marginales se evaluarán en función de su comportamiento.	Propiedades físicas	Tamaño de partículas	mm	Rango	Ensayo Granulométrico NTP 339.128, ASTM D-422
				Plasticidad	%	Rango	Ensayo para determinar LL, LP e IP NTP 339.129, ASTM D-4318
				Contenido de humedad	%	Rango	Ensayo de Contenido de Humedad NTP 339.127, ASTM D-2216
				Contenido de partículas finas	%	Rango	Ensayo de Equivalente de Arena NTP 339.146, ASTM D-2419
				Permeabilidad	%	Rango	Ensayo de Permeabilidad NTP 339.147, ASTM D5084
			Propiedades mecánicas	% Óptimo contenido de humedad	% de peso	Rango	Ensayo Proctor Modificado NTP 339.141, ASTM D-1557
				Máxima densidad seca	gr/cm ³		
	Grado de compactación	%	Rango	Ensayo CBR (California Bearing Ratio) 339.145, ASTM D-1883			

Matriz de consistencia

Tabla XVII: Matriz de consistencia

MEJORAMIENTO DEL MATERIAL GRANULAR MARGINAL CON ADITIVO POLYCOM PARA LA SUBBASE DE PAVIMENTOS					
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología	Población y Muestra
En varias regiones, los materiales granulares locales no cumplen con los estándares normativos, lo que limita su uso en proyectos viales y obliga a recurrir a materiales de préstamo. Esto incrementa costos, extiende los tiempos de construcción y aumenta la explotación de canteras.	Mejorar las propiedades físicas y mecánicas del material granular marginal con aditivo Polycom para su uso en subbases de pavimentos.	La adición de aditivo Polycom mejorará las propiedades físico - mecánicas de los materiales granulares marginales para que cumplan con los requerimientos mínimos del Manual de Carreteras EG-2013.	VARIABLE INDEPENDIENTE Adición de aditivo Polycom	METODOLOGÍA TIPO: Experimental NIVEL: Explicativo ENFOQUE: Cuantitativo MÉTODOS Ensayo Granulométrico NTP 339.128, ASTM D-422, Ensayo para determinar LL, LP e IP NTP 339.129, ASTM D-4318, Ensayo de Contenido de Humedad NTP 339.127, ASTM D-2216, Ensayo de Equivalente de Arena NTP 339.146, ASTM D-2419, Ensayo de Permeabilidad NTP 339.147, ASTM D5084, Ensayo Proctor Modificado NTP 339.141, ASTM D-1557, Ensayo CBR 339.145, ASTM D-1883 MATERIALES Equipo de bioseguridad, útiles de escritorio y aseo personal, laptop, tamices, balanza, bandejas metálicas, equipo de seguridad para laboratorio, lonas y sacos, equipo para el ensayo de análisis granulométrico por tamizado, equipo para el ensayo de CBR, equipo para el ensayo de Proctor Modificado, equipo para el ensayo de abrasión, hojas de cálculo de excel, aditivo Polycom	POBLACIÓN Para efectos de la presente investigación, la población de estudio es el distrito La Victoria, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque. MUESTRA Se seleccionaron tres calicatas de suelo natural mediante un muestreo no probabilístico. A estas muestras se les aplicará el aditivo Polycom en concentraciones de 0.01%, 0.02%, y 0.03%, como sugieren antecedentes en la literatura. Además, esta investigación propone evaluar una concentración adicional de 0.04% para mejorar aún más los resultados, manteniendo el incremento en 0.01%
	Clasificar las muestras del material granular marginal por medio del sistema SUCS y AASHTO.				
	Determinar las propiedades físicas – mecánicas del material granular marginal, mediante los ensayos establecidos en el Manual de Carreteras.}				
	Determinar las propiedades físicas – mecánicas del material granular marginal con aditivo Polycom, mediante los ensayos establecidos en el Manual de Carreteras.				
	Desarrollar un análisis de costos de la estabilización del material granular marginal con aditivo Polycom.				

Procedimiento

Obtención de las muestras

Primero, visitamos el sitio de estudio en la vía de acceso Pachacamac para evaluar sus características y el estado actual del área. Esta etapa inicial fue fundamental para entender a fondo las condiciones del terreno, lo que nos permitió planificar con mayor precisión las siguientes fases del trabajo. Posteriormente, realizamos excavaciones manuales en tres calicatas con el objetivo de recolectar muestras de suelo inalteradas. Cumpliendo con la normativa CE.010 de pavimentos urbanos, cada calicata tuvo una profundidad mínima de 1.5 metros. Esta profundidad fue crucial para obtener muestras representativas que reflejaran las condiciones del suelo en sus diferentes estratos.

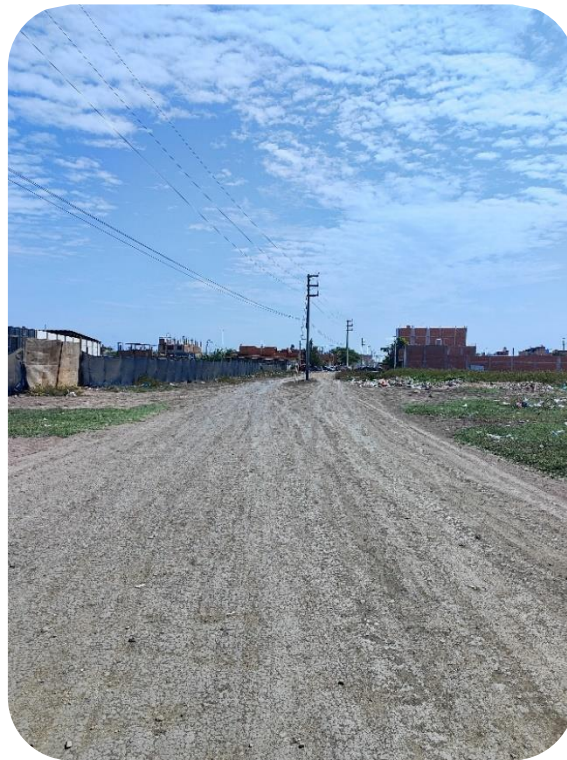


Ilustración 8: Visita a la zona de estudio.



Ilustración 9: Visita a la zona de estudio.



Ilustración 10: Extracción de Calicata 01.



Ilustración 11: Extracción de Calicata 02.



Ilustración 12: Extracción de Calicata 03.

A continuación, se presentan los perfiles estratigráficos de cada calicata:

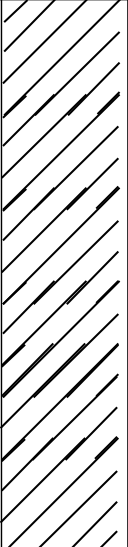
Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra Nº	Símbolo	Clasificación SUCS	Descripción visual (IN-SITU)
0.10	A C I E L O A B I E R T O	C - 1		CL A-6 (6)	Arcilla arenosa de baja plasticidad Limite líquido : 40.6% Limite plástico : 24.4% Índice de plasticidad : 16.3% Humedad natural : 12.7%
1.50					

Ilustración 13: Perfil Estratigráfico Calicata 01.

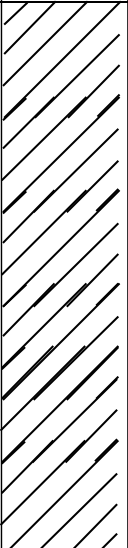
Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra Nº	Símbolo	Clasificación SUCS	Descripción visual (IN-SITU)
0.10	A C I E L O A B I E R T O	C - 2		CL A-7-6 (7)	Arcilla arenosa de baja plasticidad Limite líquido : 42.9% Limite plástico : 24.6% Índice de plasticidad : 18.4% Humedad natural : 15.1%
1.50					

Ilustración 14: Perfil Estratigráfico Calicata 02.

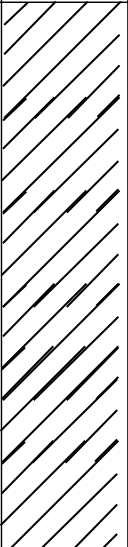
Profundidad 0.0 (cm)	Tipo de Excavación	Muestra Nº	Símbolo	Clasificación SUCS	Descripción visual (IN-SITU)
0.10	A C I E L O A B I E R T O	C - 3		CL A-7-6 (10)	Arcilla arenosa de baja plasticidad Limite liquido : 45.0% Limite plástico : 23.9% Índice de plasticidad : 21.1% Humedad natural : 19.4%
1.50					

Ilustración 15: Perfil Estratigráfico Calicata 03.

Ensayos de Laboratorio a las muestras de suelo extraídas: Muestra Patrón

Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad del suelo, primero pesamos muestras húmedas de aproximadamente 1 kg. Luego, las secamos en un horno por 24 horas. Una vez secas, las dejamos enfriar a temperatura ambiente y pesamos las muestras.



Ilustración 16: Peso de las muestras evaluadas.



Ilustración 17: Muestras húmedas.



Ilustración 18: Muestras secadas en el horno.

Granulométrica por tamizado

Para este ensayo, comenzamos lavando una muestra de suelo previamente secada (del ensayo de contenido de humedad) con bastante agua, usando un tamiz N°200 para asegurarnos evitando la pérdida de partículas retenidas. Después de lavarla, la muestra se lleva nuevamente al horno para secarla completamente. Una vez seca, la muestra se pasa por diferentes tamices, donde registramos y pesamos el material que queda retenido en cada uno. Esto nos da una visión detallada de la granulometría del suelo y sus características. Este proceso es clave porque

conocer cómo se distribuyen los tamaños de las partículas nos ayuda a entender las propiedades físicas del suelo, lo cual es fundamental para predecir su comportamiento.



Ilustración 19: Muestras lavadas.



Ilustración 20: Juego de tamices.



Ilustración 21: Determinación del peso retenido en cada tamiz.

Límite Líquido

Preparamos una muestra de suelo seco de 200 gramos, la tamizamos con un tamiz N°40 y la colocamos en un recipiente. Luego, le agregamos agua destilada suficiente para crear una mezcla homogénea, la cual vertimos en el centro de la Copa de Casagrande. Después de alisar la superficie, usamos una herramienta especial (acanalador) para hacer un corte en el centro de la muestra, dividiéndola en dos. Registramos el número de golpes necesarios para que las dos partes se juntaran, y tomamos una porción del centro de la muestra para analizarla. Finalmente, secamos esta porción en el horno para determinar su contenido de humedad.

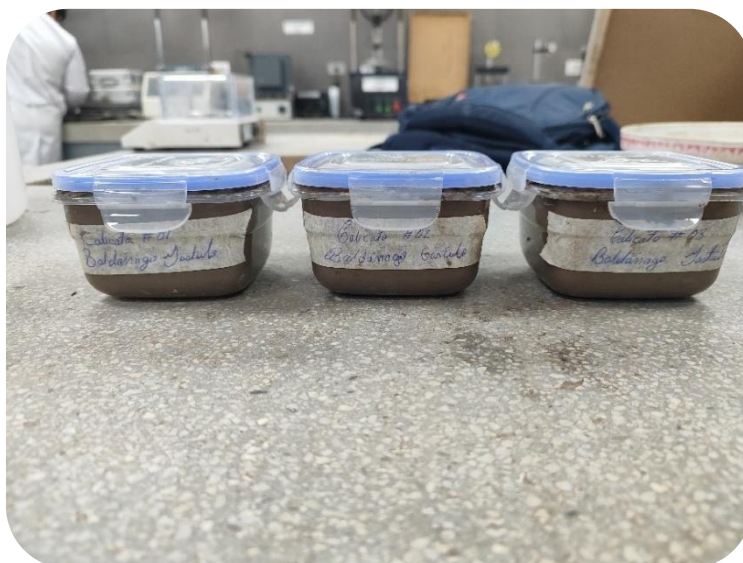


Ilustración 22: Preparación de las muestras a evaluar.



Ilustración 23: Uso de la copa de Casagrande.



Ilustración 24: Contenido de humedad de las muestras.

Límite Plástico

Para este ensayo, tomamos aproximadamente 20 gramos de la muestra de suelo utilizada para el límite líquido. Amasamos la muestra y la dejamos secar gradualmente hasta que su consistencia nos permitiera formar pequeños rollitos. Continuamos este proceso de enrollado hasta que el rollito comenzara a agrietarse o se rompiera. Si no aparecían grietas, volvíamos a amasar y a formar los rollitos hasta lograrlo. Finalmente, las muestras de los rollitos se llevaron al horno para determinar su porcentaje de contenido de humedad.



Ilustración 25: Ejecución del ensayo.



Ilustración 26: Muestras secas.

Equivalente de Arena

En primer lugar, el agregado se somete a un tamizado empleando la malla N°10, seleccionándose una muestra de 500 g con el propósito de separar las fracciones finas de las gruesas. Posteriormente, se humedece la muestra empleando un rociador con agua destilada. De forma paralela, se prepara un galón de agua destilada (aproximadamente 3,78 L) al que se añaden 557 ml de solución de Stock, y se alistan las probetas donde se llevará a cabo el ensayo. A continuación, la muestra se introduce en las probetas y se compacta aplicando 25 golpes con

la ayuda de una tara pequeña. Luego, mediante una manguera y un tubo de inmersión, se llenan las probetas con el agua previamente preparada. Se deja reposar durante 2 minutos y, seguidamente, se agitan las probetas a 100 revoluciones para garantizar la mezcla y homogenización del agua con la arena. Cada probeta se deja en reposo por 30 minutos. Finalmente, utilizando un indicador de lectura, se miden los niveles de arena y arcilla presentes en la muestra.



Ilustración 27: Preparación de las muestras.



Ilustración 28: Preparación de las probetas para colocar las muestras.



Ilustración 29: Reposo de las muestras en las probetas.

Permeabilidad

Para este ensayo, preparamos y compactamos la muestra de suelo en el permeámetro. Posteriormente, saturamos la muestra aplicando vacío y haciendo circular agua hasta eliminar el aire de los poros. Una vez lista, establecimos un nivel constante de carga hidráulica y dejamos que el agua fluyera a través de la muestra. Registramos el volumen de agua que pasaba en intervalos de tiempo conocidos hasta alcanzar un flujo estable. Con estos datos, calculamos el coeficiente de permeabilidad.



Ilustración 30: Preparación de la muestra en el permeámetro.



Ilustración 31: Aplicación de un nivel constante de carga hidráulica.



Ilustración 32: Registro del volumen de agua.

Proctor modificado

Preparamos cuatro muestras de suelo, cada una de 3 kg, asegurándonos de que estuvieran secas, sueltas y pasaran por el tamiz N°4. Luego, a cada muestra le agregamos diferentes cantidades de agua y las dejamos reposar por un día para que el agua se distribuyera bien. Después, pesamos el molde y colocamos la primera de cinco capas de suelo, aplicando 25 golpes uniformemente. Repetimos este proceso para las cuatro capas restantes, asegurando que cada una tuviera el mismo espesor y recibiera la misma cantidad de golpes (25 golpes por minuto). Adicionalmente, tomamos una pequeña porción de cada muestra para determinar su

contenido de humedad y la llevamos al horno. Todo esto se hizo para evaluar la relación entre la densidad y la humedad del suelo, lo que nos permite determinar su máxima densidad seca y el contenido de humedad óptimo.

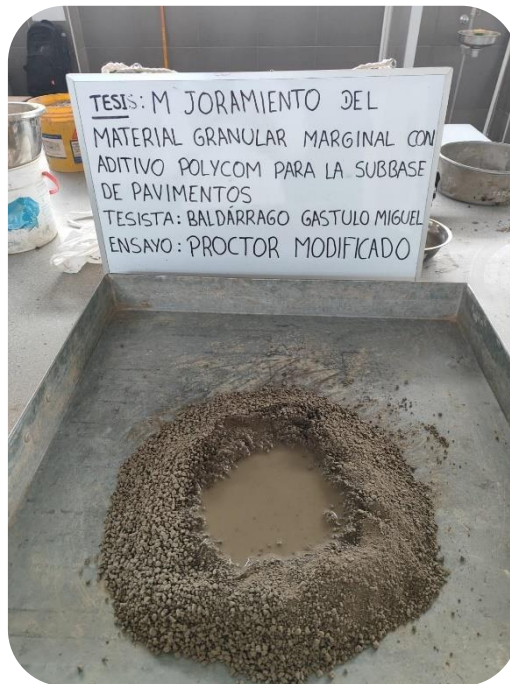


Ilustración 33: Saturación de las muestras.



Ilustración 34: Penetración en 5 capas.



Ilustración 35: Peso de la muestra penetrada + molde.

CBR

Para este ensayo, preparamos un total de 15 kg de suelo seco que pasó la malla N°4, dividiéndolo en tres porciones de 5 kg para cada punto de CBR. Cada una de estas muestras se preparó con el contenido de humedad óptimo que obtuvimos en el ensayo de Proctor modificado. Compactamos cada muestra en cinco capas, aplicando diferentes niveles de energía en cada punto: 56, 25 y 12 golpes, respectivamente. Después de registrar el volumen del molde, sumergimos los moldes preparados en agua durante cuatro días para asegurar su completa saturación.

Posteriormente, colocamos un trípode en los bordes del molde y alineamos el vástago de la placa perforada con el medidor de dial, señalando la ubicación de las patas del trípode en el borde del molde. Durante las 96 horas de inmersión, registramos las lecturas de expansión cada 24 horas. Una vez finalizado el periodo de inmersión, retiramos los moldes y los dejamos escurrir por 15 minutos. Finalmente, procedimos a realizar la penetración, tomando 10 lecturas de carga según las indicaciones del Manual de Ensayos de Materiales del MTC.



Ilustración 36: Penetración 5 capas.



Ilustración 37: Medición de expansión.



Ilustración 38: Moldes compactados en saturación 4 días.



Ilustración 39: Peso de la muestra + molde pasando los 4 días.



Ilustración 40: Penetración.

Obtención del aditivo Polycom

Su adquisición se realizó contactando los números telefónicos de atención al cliente a nivel nacional proporcionados en la ficha técnica del aditivo. Se adquirió un total de 100 gramos de aditivo Polycom, suficiente para la realización de todos los ensayos especificados.



Ilustración 41: Aditivo Polycom.



Ilustración 42: Aditivo Polycom.

Ensayos de Laboratorio muestra Patrón + Adición

Limite Liquido y Límite plástico – Con adición Polycom 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04%

Se realizó dos repeticiones para cada calicata, usando cuatro dosificaciones diferentes de aditivo Polycom: 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04% con relación al peso de la muestra. Para esto, preparamos una mezcla según la norma y le añadimos el estabilizador en las proporciones indicadas, dejándola saturar por 24 horas.



Ilustración 43: Preparación de la muestra + Adición.

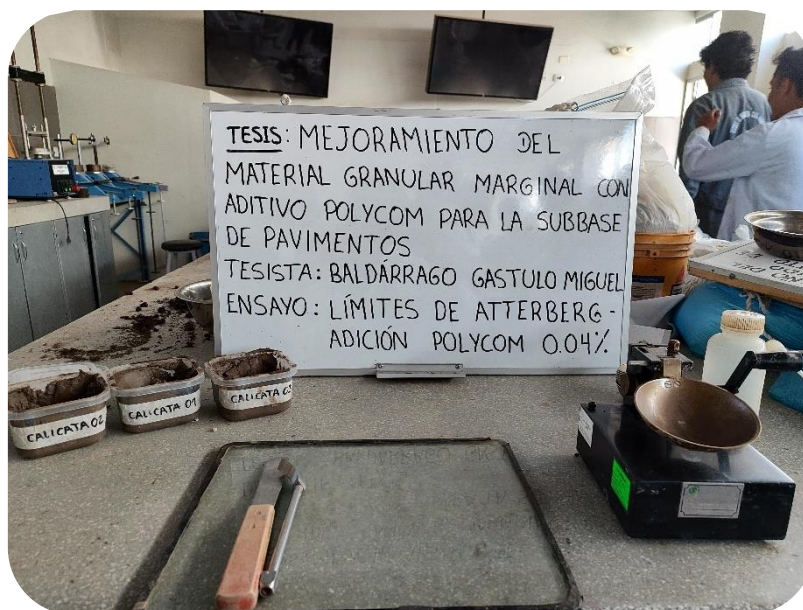


Ilustración 44: Instrumentos empleados.



Ilustración 45: Ejecución del ensayo experimental.

Permeabilidad – Con adición Polycom 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04%

Se realizó dos repeticiones para cada calicata, usando cuatro dosificaciones diferentes de aditivo Polycom: 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04% con relación al peso de la muestra. Para esto, preparamos una mezcla y le añadimos el estabilizador en las proporciones indicadas.



Ilustración 46: Preparación de la muestra con aditivo Polycom



Ilustración 47: Preparación de la muestra con aditivo Polycom en el permeámetro.



Ilustración 48: Registro del volumen de agua de la muestra con aditivo Polycom.

Proctor Modificado – Con adición Polycom 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04%

Se realizó tres repeticiones para cada calicata, usando cuatro dosificaciones diferentes de aditivo Polycom: 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04% con relación al peso de la muestra. Para esto, preparamos una mezcla y le añadimos el estabilizador en las proporciones indicadas.



Ilustración 49: Adición de aditivo Polycom + agua.

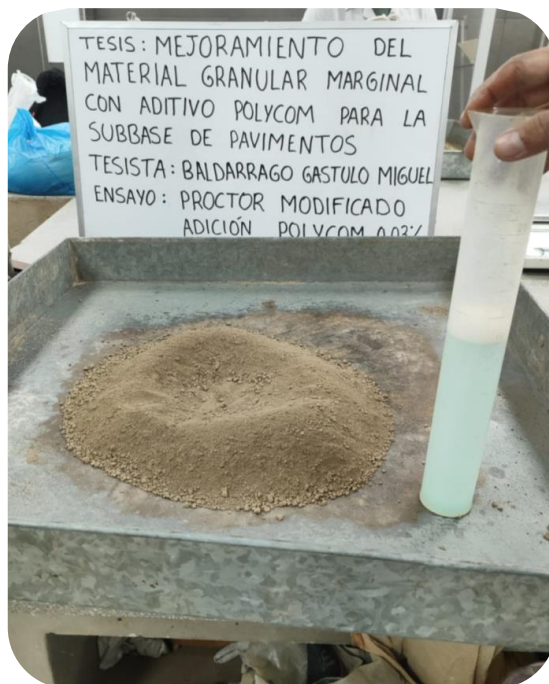


Ilustración 50: Solución agua con aditivo Polycom.

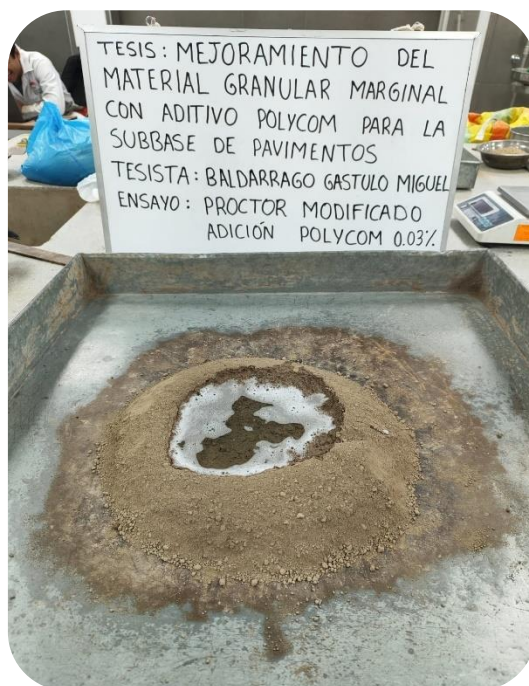


Ilustración 51: Preparación de la muestra + Adición.

CBR – Con adición Polycom 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04%

Se realizó tres repeticiones para cada calicata, usando cuatro dosificaciones diferentes de aditivo Polycom: 0.01, 0.02, 0.03 y 0.04% con relación al peso de la muestra. Para esto, preparamos una mezcla y le añadimos el estabilizador en las proporciones indicadas.

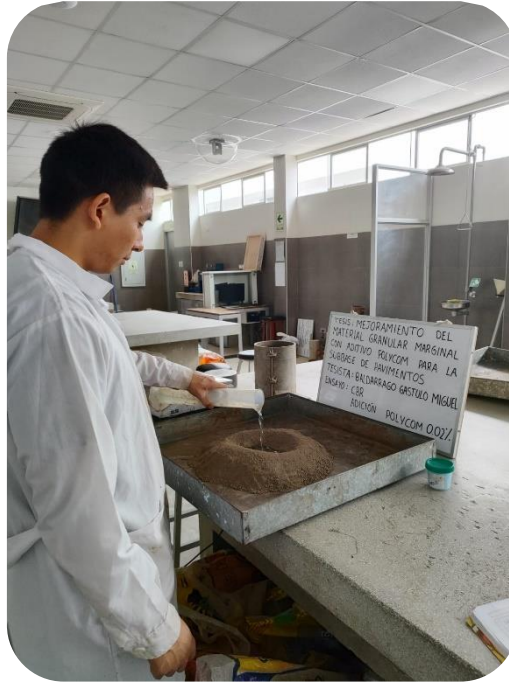


Ilustración 52: Adición aditivo Polycom a la muestra.



Ilustración 53: Penetración 5 capas muestras con aditivo Polycom.



Ilustración 54: Registro de penetración muestra con aditivo Polycom.

Resultados y discusión

Resultados

Caracterización de las tres calicatas extraídas

Las muestras de suelo se tomaron cuidadosamente de las calicatas C-1, C-2 y C-3, asegurándonos de no alterar su estado natural. El objetivo fue determinar sus características físicas y mecánicas. Los resultados de estos análisis se presentan a continuación.

✓ Contenido de humedad - MTC E108

Realizamos este ensayo en las tres calicatas, siguiendo estrictamente la normativa MTC E108. Fue fundamental usar muestras inalteradas para obtener resultados precisos, los cuales se muestran en la Tabla XVIII.

Tabla XVIII: Resultados del contenido de humedad de muestras naturales

Contenido de Humedad		
Calicata	Profundidad (m)	Humedad (%)
C-01	1.5	12.70
C-02	1.5	15.10
C-03	1.5	19.40

Se ha observado una variación significativa en los niveles de humedad del suelo dentro de la zona de estudio. Contenidos de humedad altos, como el 19.40%, son indicativos de suelos más plásticos, lo que presenta un desafío para lograr una compactación adecuada. En contraste, los valores bajos, como el 12.70%, corresponden a suelos secos y frágiles, comprometiendo su cohesión y dificultando los procesos de estabilización.

✓ Granulometría por tamizado – MTC E 107

Este ensayo se llevó a cabo siguiendo la normativa MTC E107 para las tres calicatas, como se muestra en la Tabla XIX.

Tabla XIX: Resultados del contenido de humedad de muestras naturales

Granulometría por tamizado-muestras naturales			
Calicata	Grava (%) 75.00-4.75 mm	Arena (%) 4.75-0.075 mm	Limo/Arcilla (%)
C-01	1.40%	45.40%	53.20%
C-02	0.90%	47.00%	52.10%
C-03	2.20%	37.70%	60.10%

En general, las muestras analizadas revelan una alta proporción de material fino, oscilando entre el 52.10% y el 60.10%. La calicata C-03 destaca por su elevada cantidad de finos, algo típico en suelos arcillosos. Aunque la C-02 contiene menos finos que la C-01, su composición

también incluye partículas gruesas. Ambas características son comunes en suelos arcillosos o limosos.

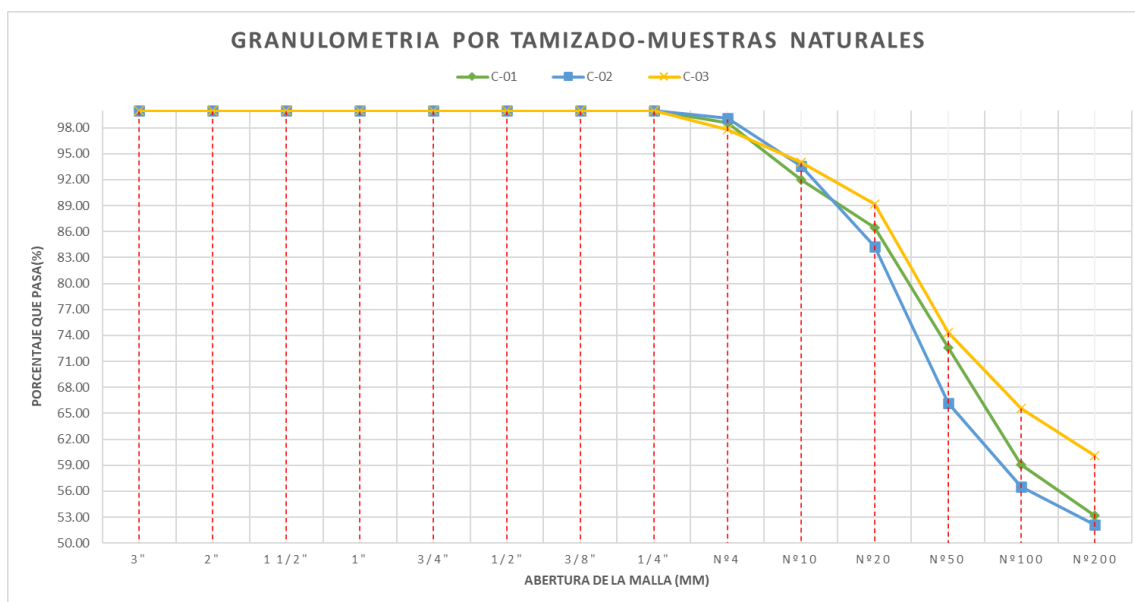


Ilustración 55: Curva Granulométrica de las tres calicatas.

La calicata C-03 muestra una alta proporción de material fino, evidenciada por una curva granulométrica muy empinada en el rango de partículas menores a 0.0075 mm. Esta pendiente pronunciada sugiere un alto contenido de humedad. En contraste, las calicatas C-01 y C-02 presentan una pendiente menos pronunciada, lo que indica una posible predominancia de partículas más gruesas.

✓ Límite Líquido (LL) - MTC E 110 y Límite Plástico (LP) – MTC E 111

Este ensayo se realizó de acuerdo con las normativas establecidas MTC E110 y MTC E111 para las cinco calicatas, cuyos resultados se presentan en la Tabla XX.

Tabla XX: Resultados de los límites de consistencia de muestras naturales

Límites de Consistencia			
Calicata	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
C-01	40.62%	24.36%	16.26%
C-02	42.92%	24.56%	18.36%
C-03	45.00%	23.91%	21.09%

Las calicatas C-01, C-02 y C-03 presentan límites líquidos y plásticos relativamente altos, lo que indica una elevada plasticidad y gran capacidad de deformación.

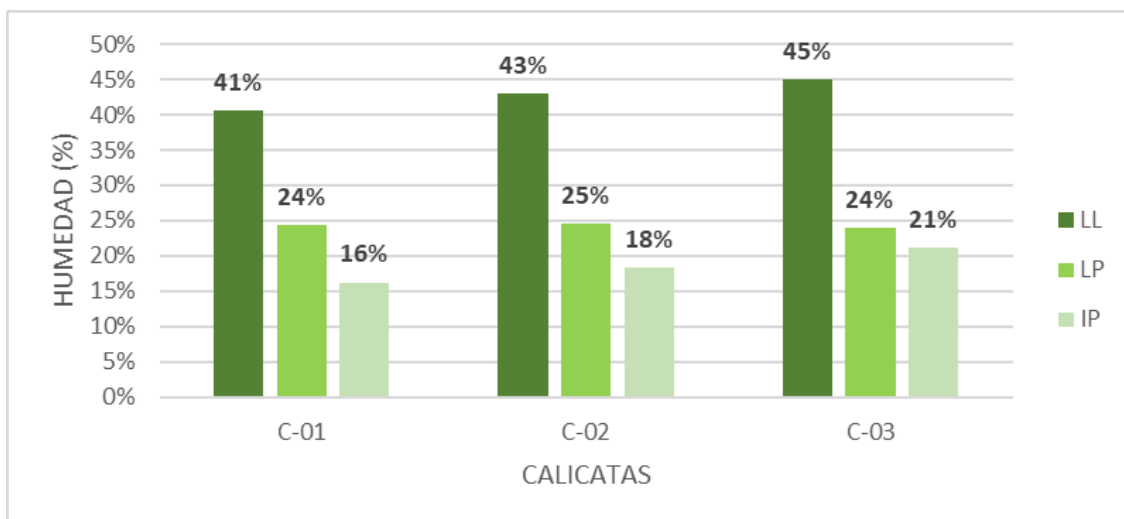


Ilustración 56: Límites de Consistencia de las tres calicatas.

Los resultados revelan una variedad en el comportamiento plástico de los suelos extraídos, algunos con mayor plasticidad que otros. Estos hallazgos, obtenidos mediante ensayos estandarizados, indican que, según la normativa del MTC, se trata de suelos arcillosos a muy arcillosos.

✓ Clasificación de suelo por el sistema SUCS Y AASHTO

De acuerdo con los resultados anteriormente presentados, se realizó la clasificación de cada una de las calitas extraídas, representadas en la Tabla XXI.

Tabla XXI: Clasificación de suelo de muestras naturales

Clasificación de las muestras extraídas			
Calicata	Profundidad	ASSHTO	SUCS
C-01	1.50 m	A-6 (6)	CL
		Malo	Arcilla arenosa de baja plasticidad
C-02	1.50 m	A-7-6 (7)	CL
		Malo	Arcilla arenosa de baja plasticidad
C-03	1.50 m	A-7-6 (10)	CL
		Malo	Arcilla arenosa de baja plasticidad

Podemos observar que las tres muestras de suelo extraídas son de tipo CL (Arcilla arenosa de baja plasticidad) con diferentes índices de plasticidad. Si observamos los valores obtenidos de límite líquido e índice de plasticidad de cada una de las muestras y las comparamos con la Ilustración 04. Podemos decir que las tres muestras extraídas son catalogadas como material marginal o que no cumplen con las normativas vigentes para su uso en subbase de pavimentos.

Ensayos Físicos de muestras experimentales: SN + Adición Polycom

Los ensayos físicos realizados en las muestras experimentales fueron los siguientes: Granulometría, Contenido de humedad, Contenido de partículas finas, Límites de Atterberg y Permeabilidad. Sin embargo, solo se ha evaluado las muestras con adición de Polycom en los ensayos de Límites de Atterberg y Permeabilidad, ya que el aditivo no afectará el contenido de humedad ni el tamaño de las partículas finas o gruesas de la muestra natural.

✓ Granulométrica por tamizado – MTC E 107

La curva granulométrica obtenida del ensayo realizado de cada una de las muestras, fueron comparadas con los límites de gradación granulométrica B, C y D del Manual de Carreteras presentada en la Tabla V.

Calicata 01

Los resultados se muestran en la Ilustración 57. Se observa que la granulometría de la muestra no cumple con ninguna de las gradaciones para subbase según el MTC.

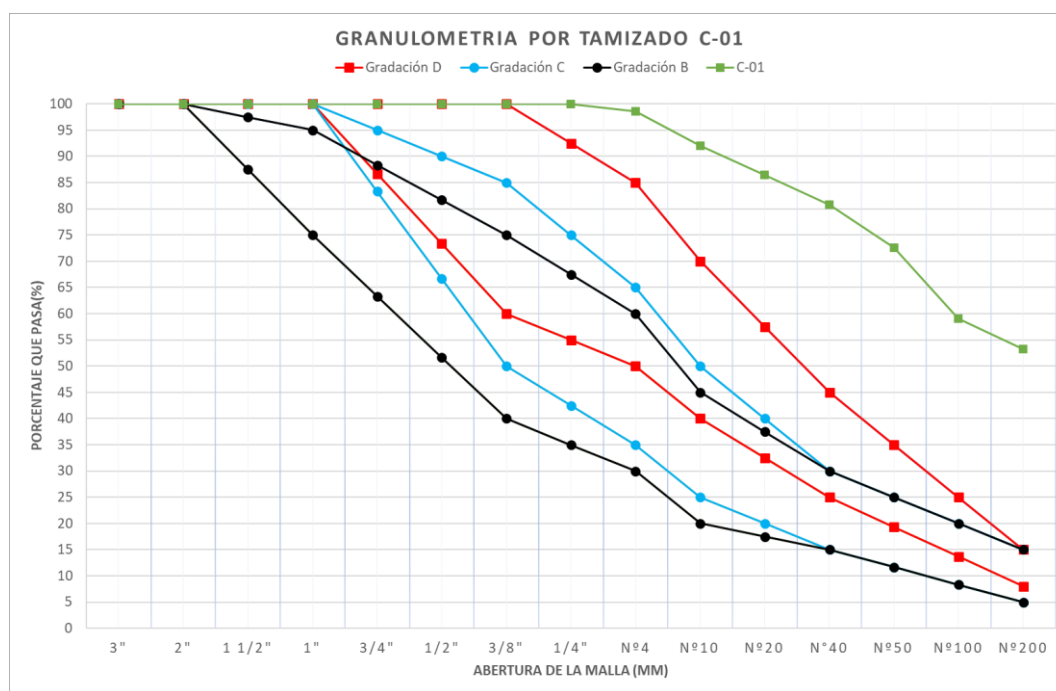


Ilustración 57: Curva Granulométrica de la muestra C-01 y límites según el MTC.

Calicata 02

Los resultados se muestran en la Ilustración 58. Se observa que la granulometría de la muestra no cumple con ninguna de las gradaciones para subbase según el MTC.

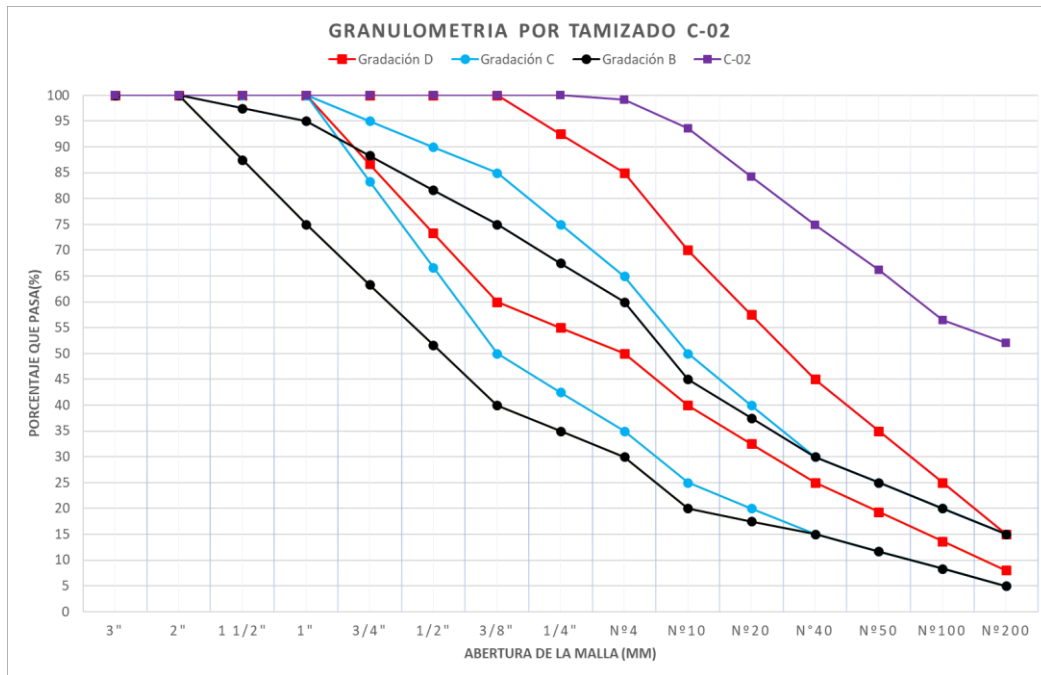


Ilustración 58: Curva Granulométrica de la muestra C-02 y límites según el MTC.

Calicata 03

Los resultados se muestran en la Ilustración 59. Se observa que la granulometría de la muestra no cumple con ninguna de las gradaciones para subbase según el MTC.

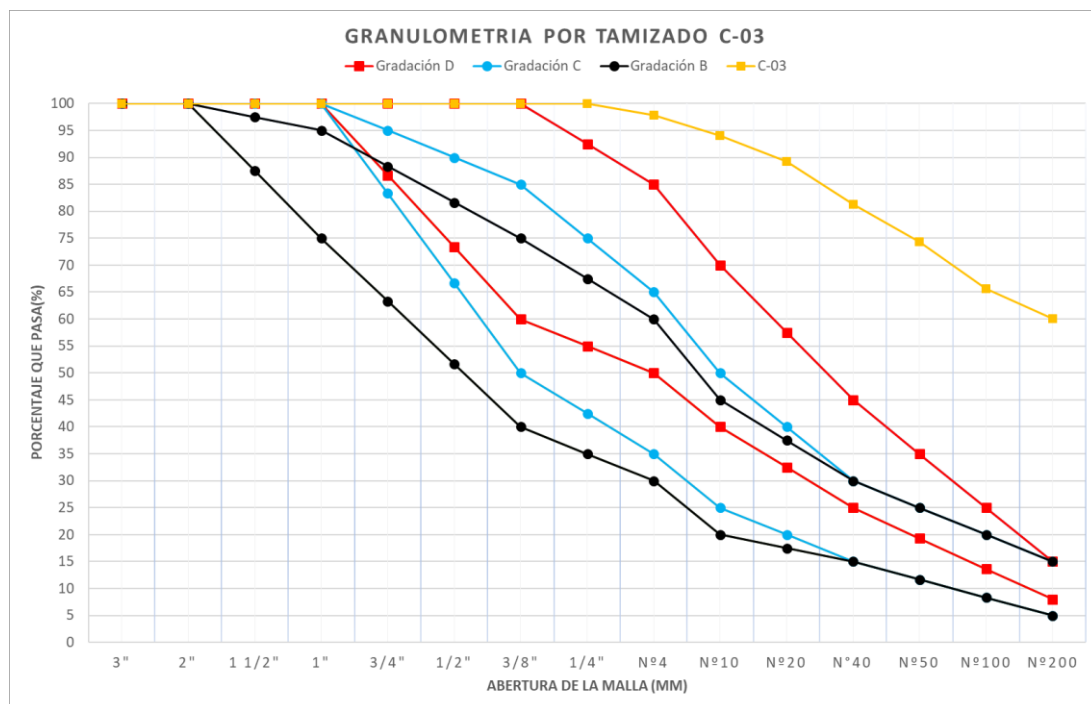


Ilustración 59: Curva Granulométrica de la muestra C-03 y límites según el MTC.

✓ **Contenido de humedad - MTC E108**

Realizamos este ensayo en las tres calicatas sin adición, siguiendo la normativa MTC E108. Fue fundamental usar muestras inalteradas para obtener resultados precisos, los cuales se muestran en la Tabla XXII.

Tabla XXII: Contenido de humedad de muestras sin adición

Contenido de Humedad	
Calicata	Humedad (%)
C-01	12.70
C-02	15.10
C-03	19.40

✓ Equivalente de Arena –MTC E 114

Realizamos este ensayo para cada una de las tres calicatas sin adición, siguiendo la normativa MTC E114. Fue fundamental usar muestras inalteradas para obtener resultados precisos.

Calicata 01

Tabla XXIII: Resultados Equivalente de arena C-01

C-01 + 0.00% Polycom			
Muestra N°	1	2	3
Tamaño máximo (mm.)	N° 4	N° 4	N° 4
Altura máxima del material fino (cm.)	8.60	8.80	8.80
Altura máxima de la arena (cm.)	1.70	1.60	1.70
Equivalente de arena	19.77%	18.18%	19.32%
Promedio		19.09%	

Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla XXIII, evidencian que el valor de equivalente de arena de la muestra C-01 es inferior al mínimo requerido (25%) establecido por el MTC para materiales de subbase.

Calicata 02

Tabla XXIV: Resultados Equivalente de arena C-02

C-02 + 0.00% Polycom			
Muestra N°	1	2	3
Tamaño máximo (mm.)	N° 4	N° 4	N° 4
Altura máxima del material fino (cm.)	8.80	8.70	8.80
Altura máxima de la arena (cm.)	1.50	1.60	1.60
Equivalente de arena	17.05%	18.39%	19.32%
Promedio		17.87%	

Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla XXIV, evidencian que el valor de equivalente de arena de la muestra C-02 es inferior al mínimo requerido (25%) establecido por el MTC para materiales de subbase.

Calicata 03

Tabla XXV: Resultados Equivalente de arena C-03

C-03 + 0.00% Polycom			
Muestra N°	1	2	3
Tamaño máximo (mm.)	N° 4	N° 4	N° 4
Altura máxima del material fino (cm.)	8.70	8.90	8.80
Altura máxima de la arena (cm.)	1.50	1.50	1.50
Equivalente de arena	17.24%	16.85%	17.05%
Promedio	17.05%		

Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla XXV, evidencian que el valor de equivalente de arena de la muestra C-03 es inferior al mínimo requerido (25%) establecido por el MTC para materiales de subbase.

✓ Límite Líquido (LL) - MTC E 110 y Límite Plástico (LP) – MTC E 111

Este ensayo físico experimental se llevó a cabo para las muestras patrón y con adición de aditivo Polycom siguiendo la normativa MTC E 110 y MTC E 111.

Calicata 01

Tabla XXVI: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0% Polycom

C-01 + 0% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	40.62%	24.36%	16.26%
V2	41.03%	24.18%	16.85%
Promedio	40.83%	24.27%	16.56%

Tabla XXVII: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.01% Polycom

C-01 + 0.01% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	31.78%	23.02%	8.76%
V2	30.95%	22.57%	8.38%
Promedio	31.37%	22.80%	8.57%

Tabla XXVIII: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.02% Polycom

C-01 + 0.02% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	29.09%	21.72%	7.37%
V2	29.81%	21.63%	8.18%
Promedio	29.45%	21.68%	7.78%

Tabla XXIX: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.03% Polycom

C-01 + 0.03% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	27.51%	20.86%	6.65%
V2	27.09%	21.09%	6.00%
Promedio	27.30%	20.98%	6.33%

Tabla XXX: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.04% Polycom

C-01 + 0.04% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	24.98%	20.22%	4.76%
V2	24.83%	20.00%	4.83%
Promedio	24.91%	20.11%	4.80%

Las Tablas XXVI - XXX ilustran cómo los cambios en la dosificación de Polycom influyen en los límites de consistencia de la calicata C-01, mostrando una disminución en los valores del índice de plasticidad a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo. Sin embargo, se evidencia una disminución significativa en la dosificación de 0.01% de Polycom, en comparación a las otras dosificaciones.

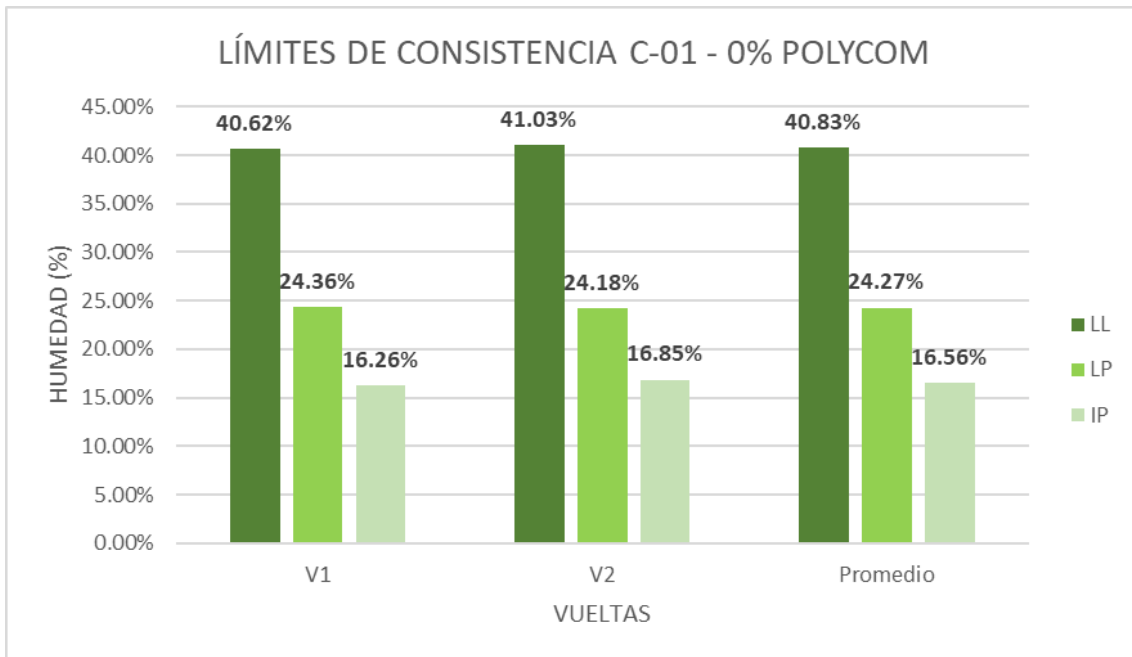


Ilustración 60: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0% Polycom.

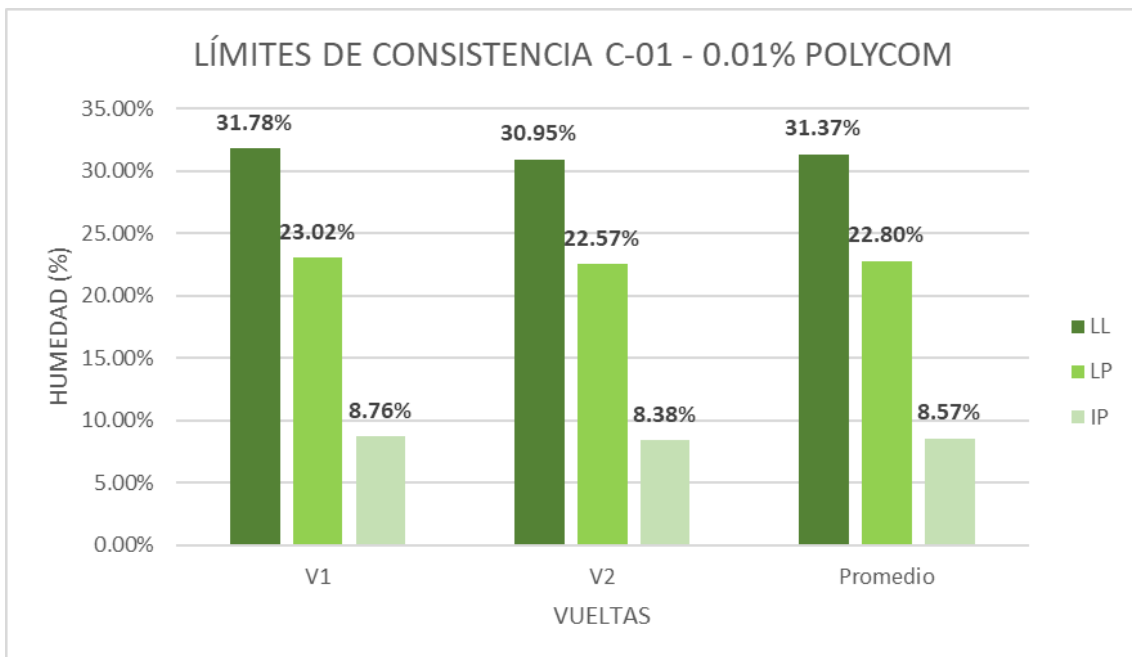


Ilustración 61: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.01% Polycom.

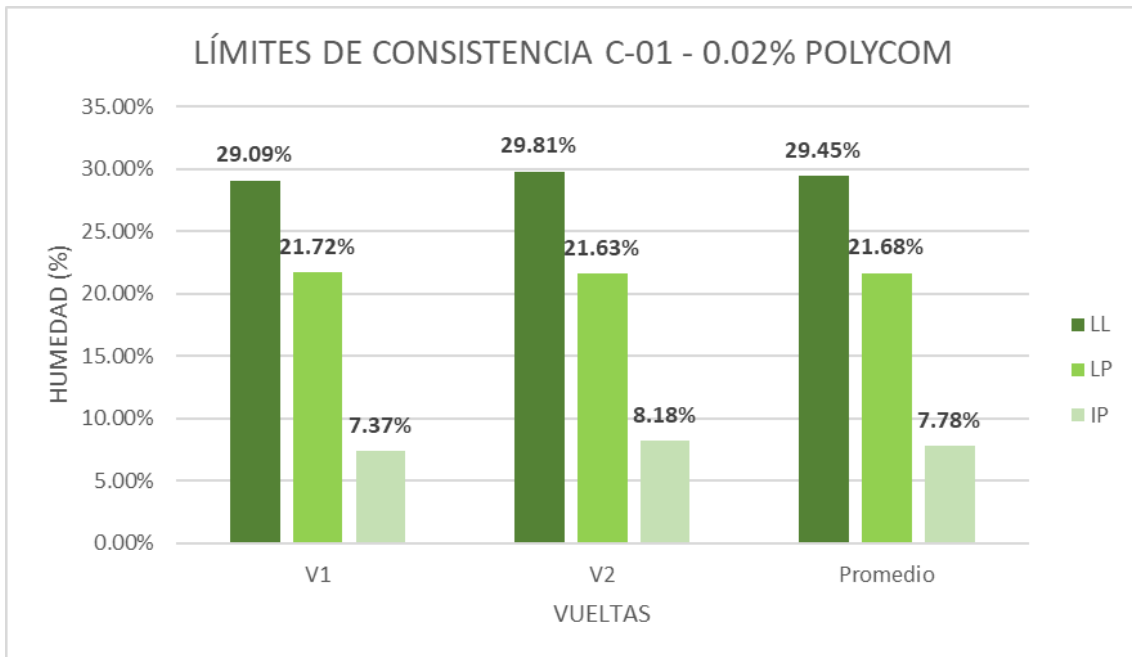


Ilustración 62: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.02% Polycom.

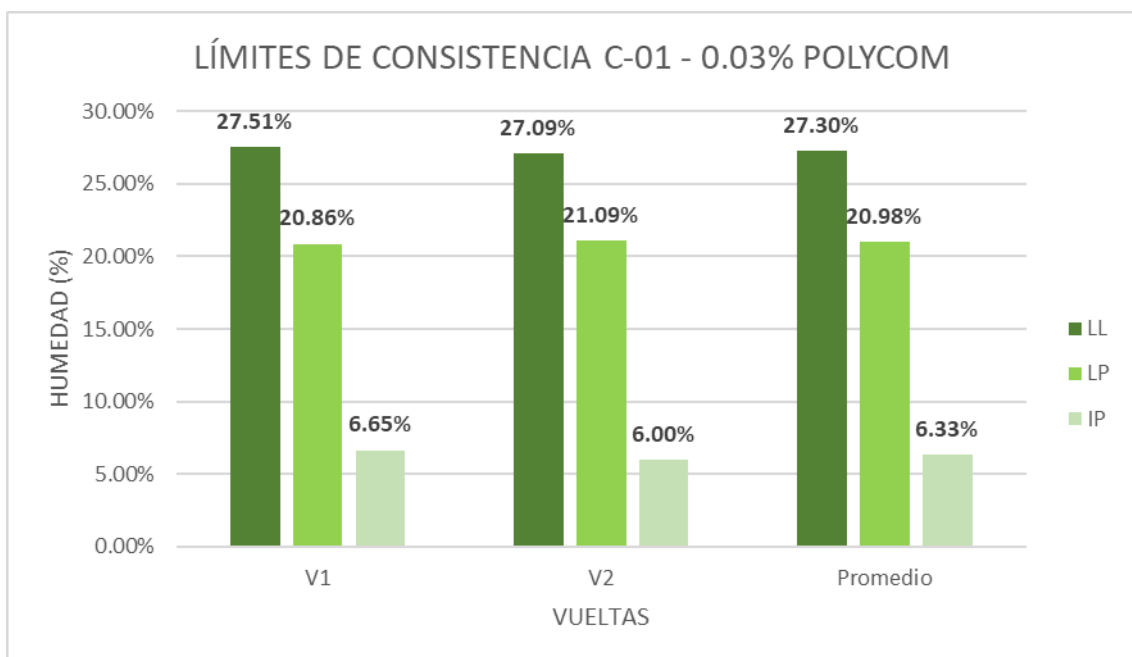


Ilustración 63: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.03% Polycom.

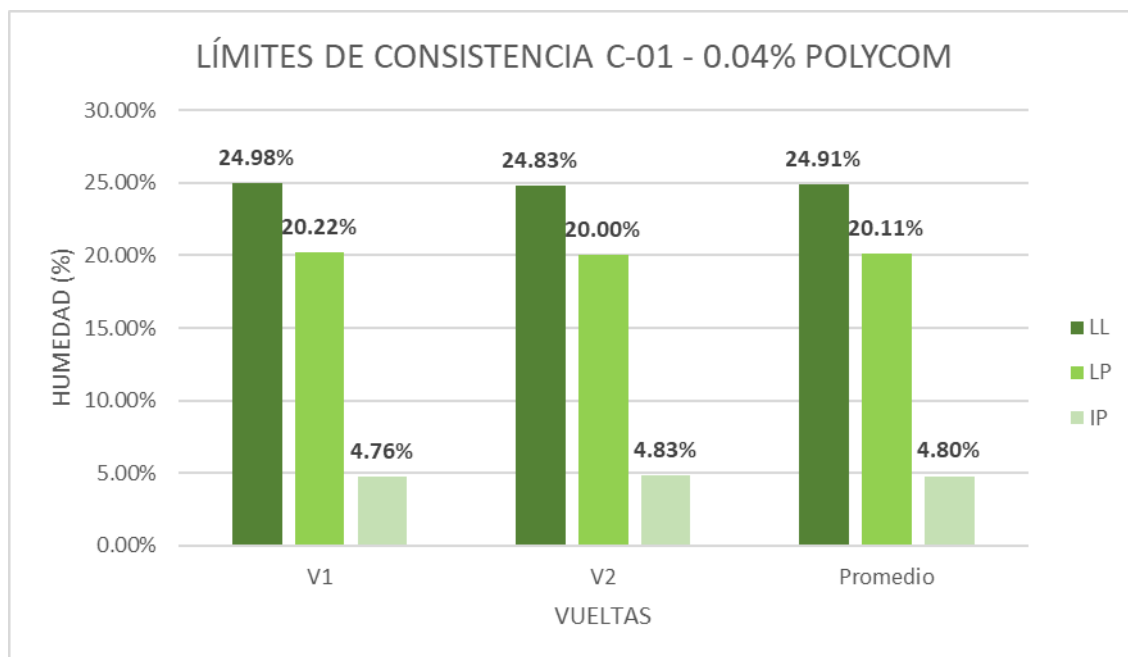


Ilustración 64: Resultados de los límites de consistencia C-01 – 0.04% Polycom.

En general, en las Ilustraciones 60 - 64 se observa a mayor detalle la disminución del índice de plasticidad de la muestra, evidenciando una mayor disminución en la dosificación 0.01% en comparación a otras dosificaciones.

Calicata 02

Tabla XXXI: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0% Polycom

C-02 + 0% Polycom			
Nº Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	42.92%	24.56%	18.36%
V2	43.11%	24.33%	18.78%
Promedio	43.02%	24.45%	18.57%

Tabla XXXII: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.01% Polycom

C-02 + 0.01% Polycom			
Nº Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	34.03%	23.86%	10.17%
V2	33.58%	22.99%	10.59%
Promedio	33.81%	23.43%	10.38%

Tabla XXXIII: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.02% Polycom

C-02 + 0.02% Polycom			
Nº Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	32.97%	22.09%	10.88%

V2	32.23%	22.52%	9.71%
Promedio	32.60%	22.31%	10.30%

Tabla XXXIV: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.03% Polycom

C-02 + 0.03% Polycom			
Nº Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	29.67%	21.26%	8.41%
V2	28.95%	20.93%	8.02%
Promedio	29.31%	21.10%	8.22%

Tabla XXXV: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.04% Polycom

C-02 + 0.04% Polycom			
Nº Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	26.40%	20.55%	5.85%
V2	27.05%	20.95%	6.10%
Promedio	26.73%	20.75%	5.98%

Las Tablas XXXI - XXXV demuestran cómo los cambios en la dosificación de Polycom influyen en los límites de consistencia de la calicata C-02, mostrando una disminución en los valores del índice de plasticidad a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo. Sin embargo, al igual que la calicata C-01 se evidencia una disminución significativa en la dosificación de 0.01% de Polycom, en comparación a las otras dosificaciones.

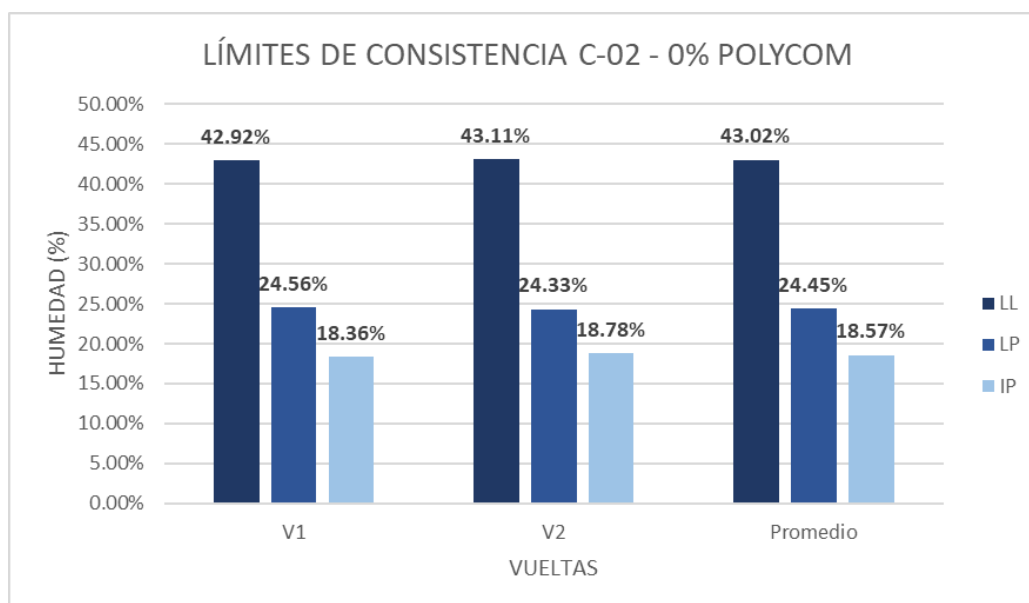


Ilustración 65: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0% Polycom.

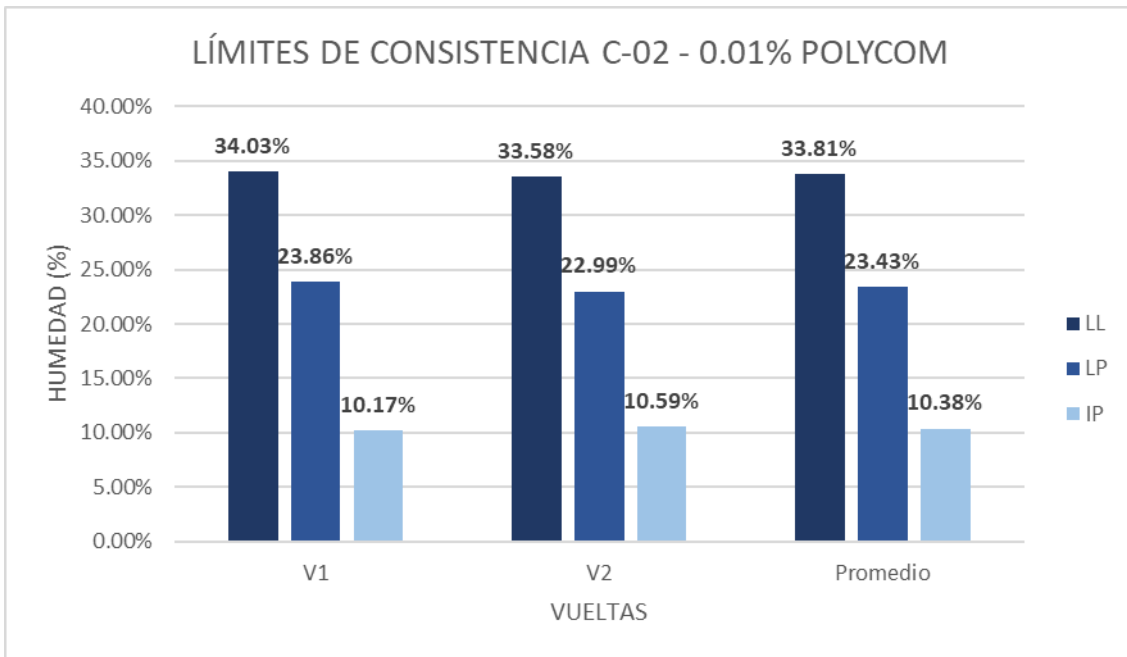


Ilustración 66: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.01% Polycom.

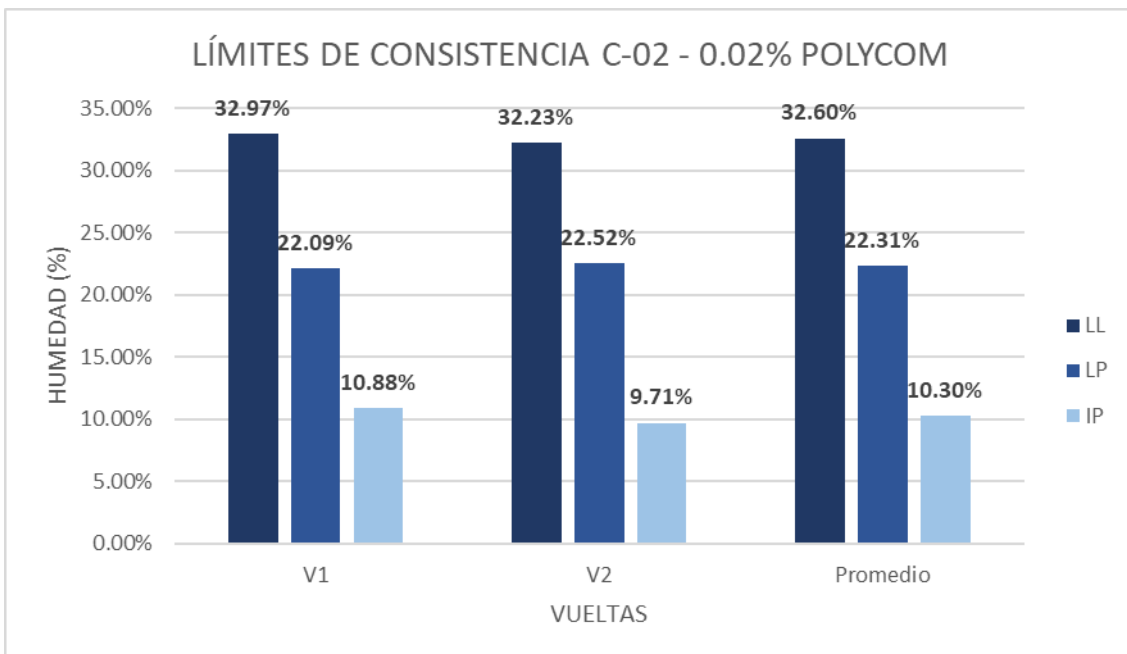


Ilustración 67: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.02% Polycom.

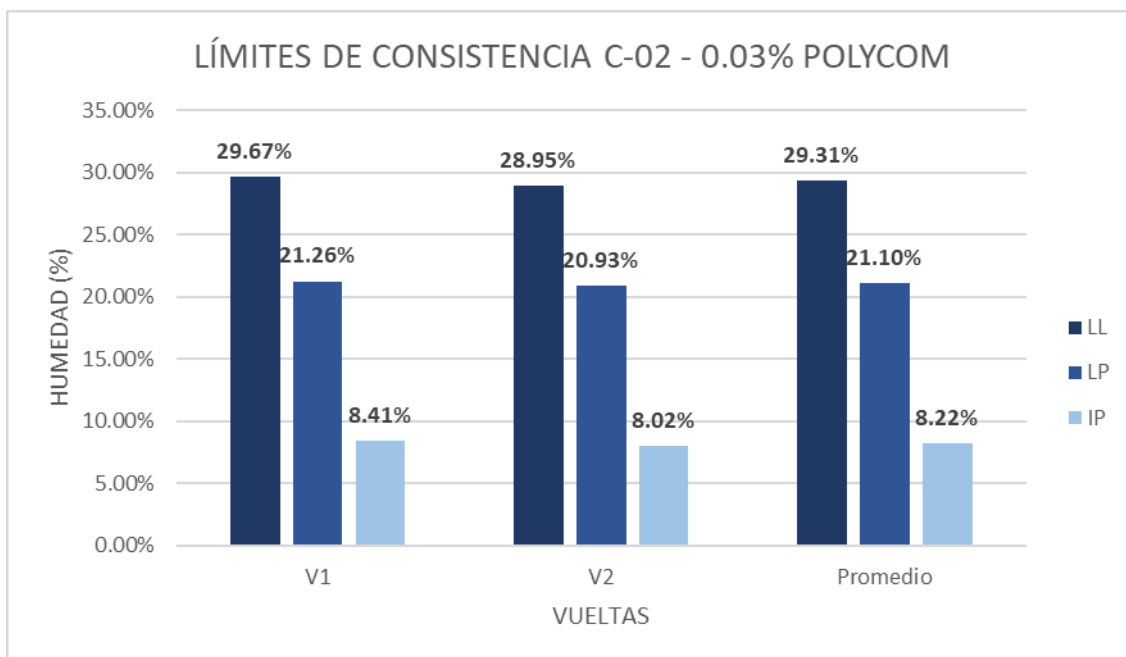


Ilustración 68: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.03% Polycom.

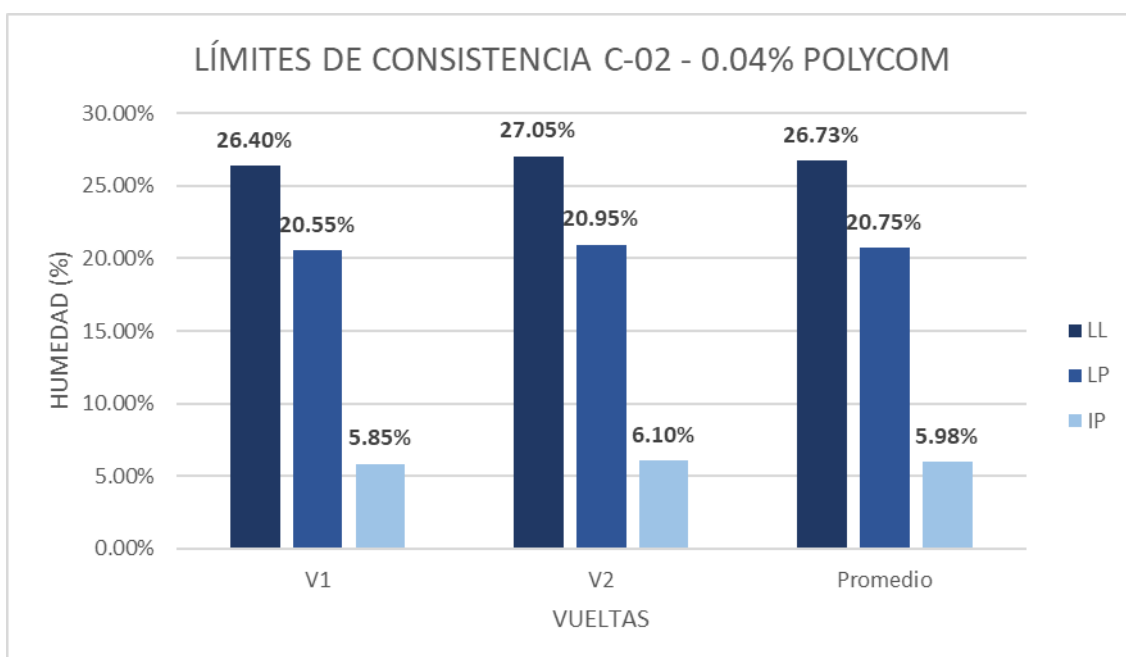


Ilustración 69: Resultados de los límites de consistencia C-02 – 0.04% Polycom.

En general, en las Ilustraciones 65 - 69 se observa a mayor detalle la disminución del índice de plasticidad de la muestra, evidenciando una mayor disminución en la dosificación 0.01%, al igual que la calicata C-01, en comparación a otras dosificaciones.

Calicata 03

Tabla XXXVI: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0% Polycom

C-03 + 0% Polycom

N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	45.00%	23.91%	21.09%
V2	44.93%	23.97%	20.96%
Promedio	44.97%	23.94%	21.03%

Tabla XXXVII: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.01% Polycom

C-03 + 0.01% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	36.53%	22.65%	13.88%
V2	35.91%	21.83%	14.08%
Promedio	36.22%	22.24%	13.98%

Tabla XXXVIII: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.02% Polycom

C-03 + 0.02% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	34.29%	20.57%	13.72%
V2	35.02%	20.63%	14.39%
Promedio	34.66%	20.60%	14.06%

Tabla XXXIX: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.03% Polycom

C-03 + 0.03% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	32.39%	19.44%	12.95%
V2	32.61%	19.85%	12.76%
Promedio	32.50%	19.65%	12.86%

Tabla XL: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.04% Polycom

C-03 + 0.04% Polycom			
N° Vueltas	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
V1	30.50%	18.28%	12.22%
V2	29.92%	18.12%	11.80%
Promedio	30.21%	18.20%	12.01%

Las Tablas XXXVI - XL evidencian cómo los cambios en la dosificación de Polycom influyen en los límites de consistencia de la calicata C-03, mostrando una disminución en los valores del índice de plasticidad a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo. Sin embargo, al igual que las calicatas C-01 y C-02 se evidencia una disminución significativa en la dosificación de 0.01% de Polycom, en comparación a las otras dosificaciones.

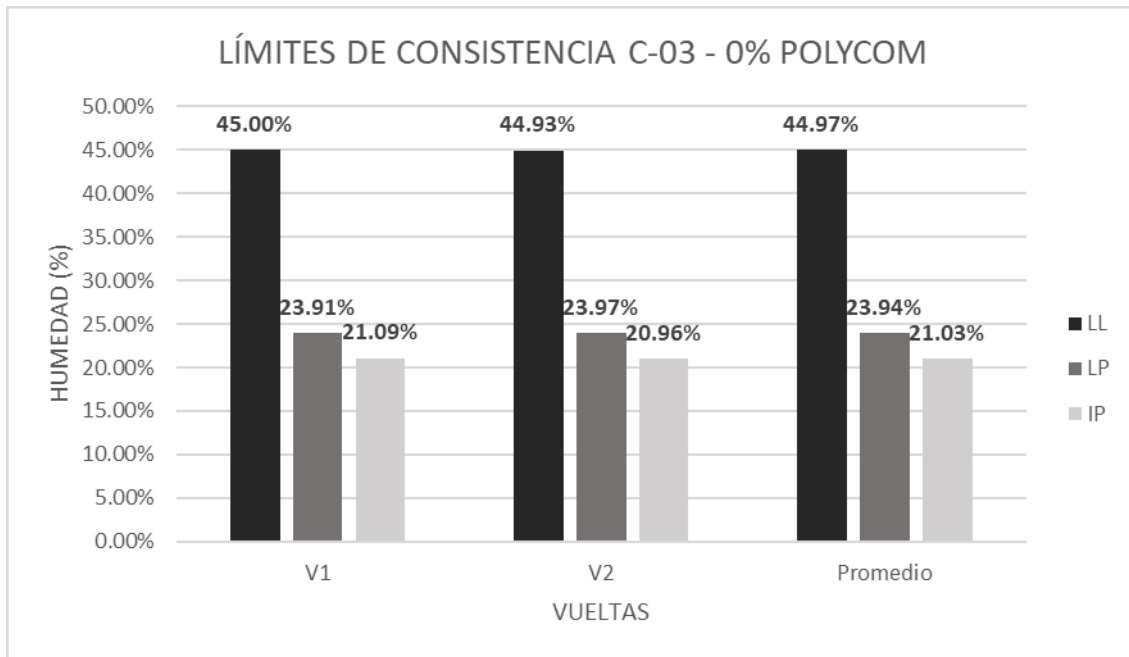


Ilustración 70: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0% Polycom.

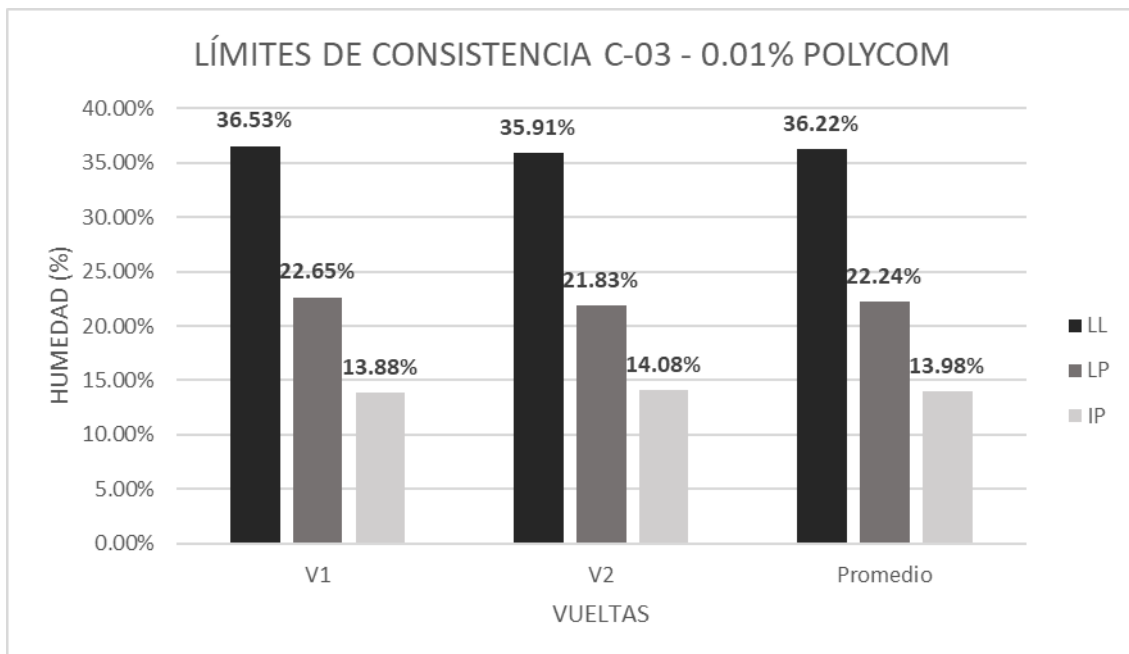


Ilustración 71: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.01% Polycom.

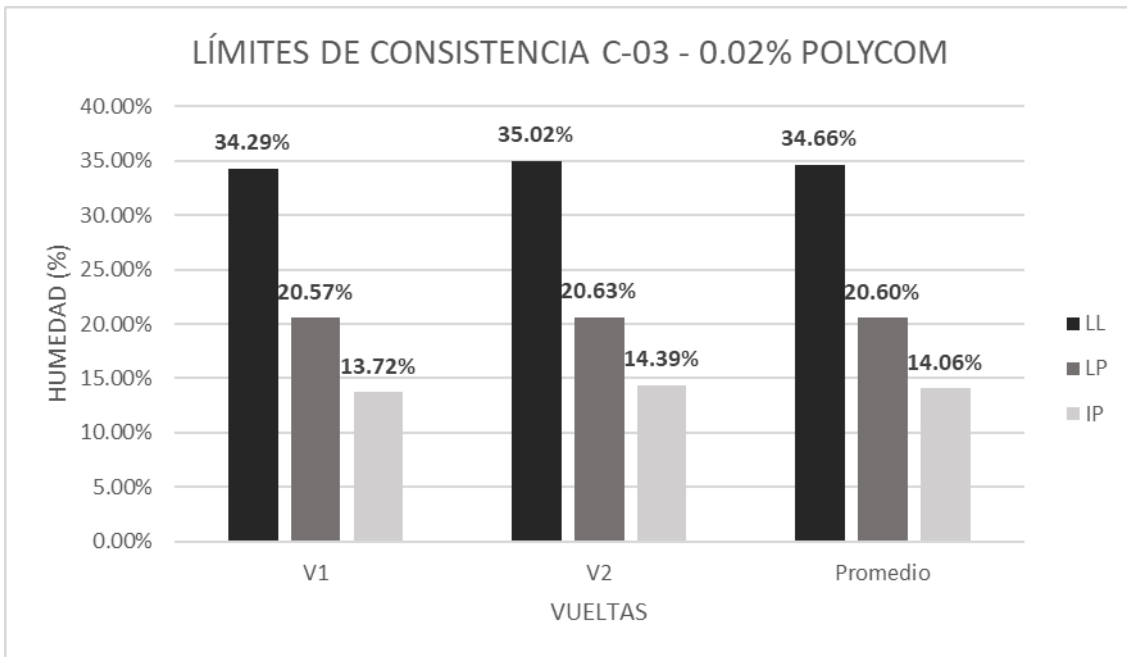


Ilustración 72: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.02% Polycom.

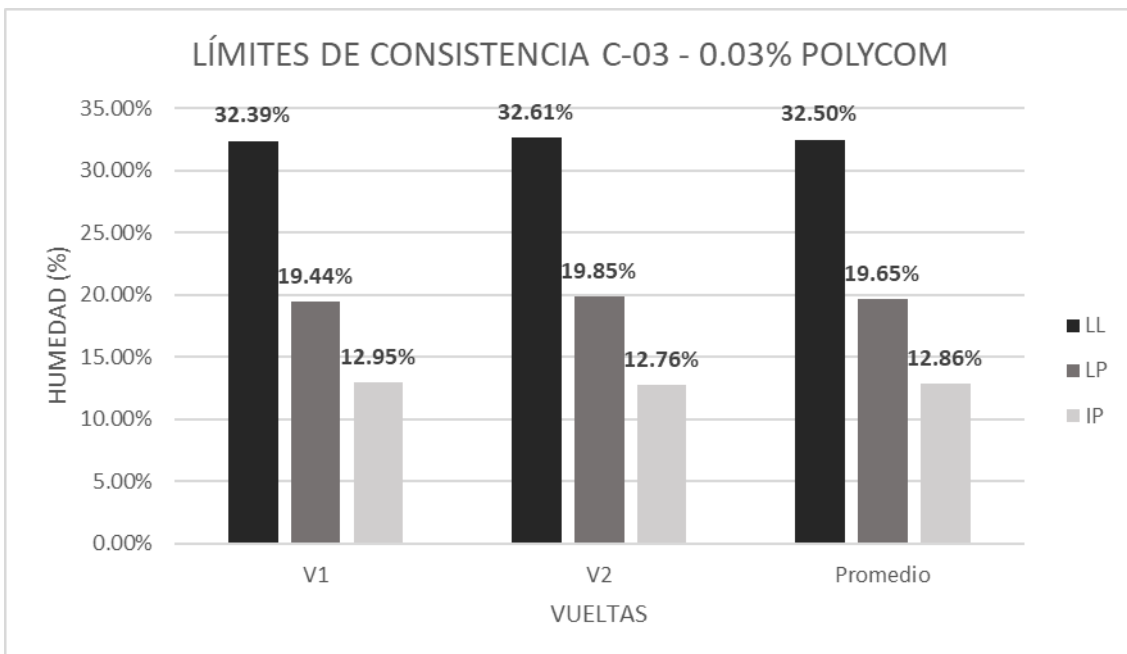


Ilustración 73: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.03% Polycom.

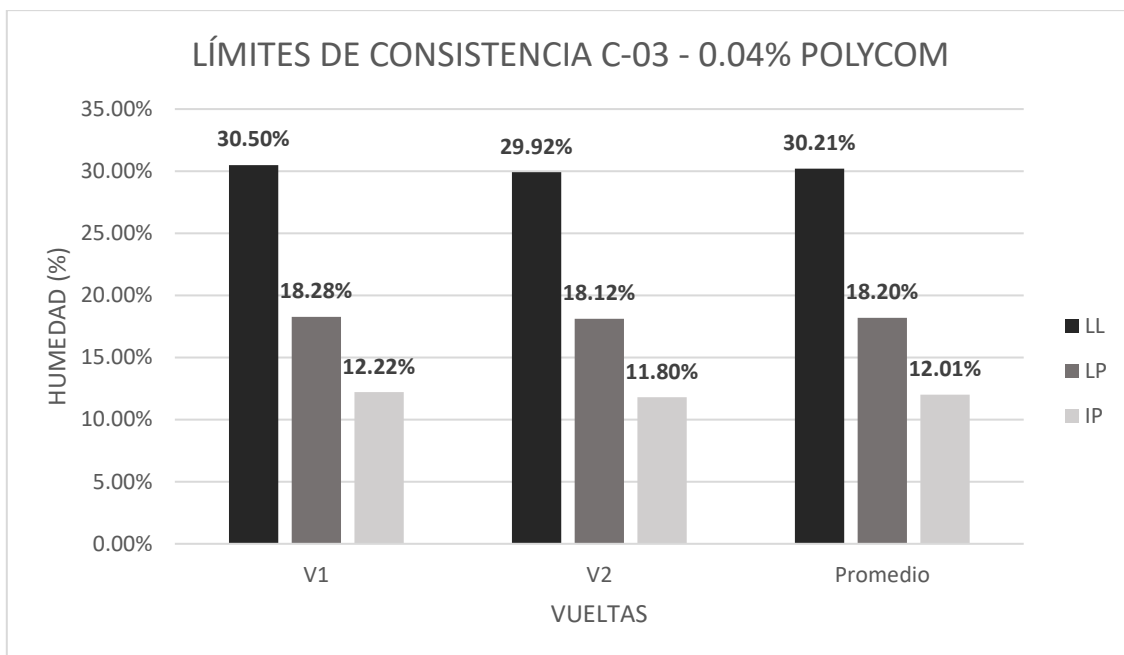


Ilustración 74: Resultados de los límites de consistencia C-03 – 0.04% Polycom.

En general, en las Ilustraciones 70 - 74 se observa a mayor detalle la disminución del índice de plasticidad de la muestra, evidenciando una mayor disminución en la dosificación 0.01%, al igual que las calicatas C-01 y C-02, en comparación a otras dosificaciones.

✓ Permeabilidad NTP 339.147

Este ensayo físico experimental se llevó a cabo para las muestras patrón y con adición de aditivo Polycom siguiendo la normativa NTP 339.147.

Calicata 01

Tabla XLI: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0% Polycom

C-01 + 0% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	110.00	100.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2400.00	1740.00
Coeficiente de permeabilidad (K)	2.86E-04	3.59E-04
Promedio coeficiente K	3.23E-04	

Tabla XLII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0.01% Polycom

C-01 + 0.01% Polycom		
Muestra N°	1	2

Volumen de agua (ml)	110.00	107.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	3060.00	2460.00
Coefficiente de permeabilidad (K)	2.25E-04	2.72E-04
Promedio coeficiente K	2.48E-04	

Tabla XLIII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0.02% Polycom

C-01 + 0.02% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	78.00	88.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2460.00	2280.00
Coefficiente de permeabilidad (K)	1.98E-04	2.41E-04
Promedio coeficiente K	2.20E-04	

Tabla XLIV: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0.03% Polycom

C-01 + 0.03% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	72.00	90.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2378.00	2494.00
Coefficiente de permeabilidad (K)	1.89E-04	2.26E-04
Promedio coeficiente K	2.07E-04	

Tabla XLV: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-01 – 0.04% Polycom

C-01 + 0.04% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	90.00	85.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	3132.00	3480.00

Coefficiente de permeabilidad (K)	1.80E-04	1.53E-04
Promedio coeficiente K	1.66E-04	

Las Tablas XLI - XLV evidencian cómo los cambios en la dosificación de Polycom influyen en el coeficiente de permeabilidad de la calicata C-01, mostrando una disminución en dicho coeficiente a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo.

Calicata 02

Tabla XLVI: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0% Polycom

C-02 + 0% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	95.00	92.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	1800.00	2400.00
Coefficiente de permeabilidad (K)	3.30E-04	2.40E-04
Promedio coeficiente K	2.85E-04	

Tabla XLVII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0.01% Polycom

C-02 + 0.01% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	97.00	80.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2640.00	2520.00
Coefficiente de permeabilidad (K)	2.30E-04	1.98E-04
Promedio coeficiente K	2.14E-04	

Tabla XLVIII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0.02% Polycom

C-02 + 0.02% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	84.00	81.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2520.00	2640.00
Coefficiente de permeabilidad (K)	2.08E-04	2.41E-04

Promedio coeficiente K **2.00E-04**

Tabla XLIX: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0.03% Polycom

C-02 + 0.03% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	90.00	88.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	3074.00	2726.00
Coficiente de permeabilidad (K)	1.83E-04	2.02E-04
Promedio coeficiente K	1.92E-04	

Tabla L: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-02 – 0.04% Polycom

C-02 + 0.04% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	88.00	84.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2784.00	3480.00
Coficiente de permeabilidad (K)	1.98E-04	1.51E-04
Promedio coeficiente K	1.74E-04	

Las Tablas XLVI - L evidencian cómo los cambios en la dosificación de Polycom influyen en el coeficiente de permeabilidad de la calicata C-02, mostrando una disminución en dicho coeficiente a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo.

Calicata 03

Tabla LI: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0% Polycom

C-03 + 0% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	82.00	90.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2640.00	2100.00
Coficiente de permeabilidad (K)	1.94E-04	2.68E-04
Promedio coeficiente K	2.31E-04	

Tabla LII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0.01% Polycom

C-03 + 0.01% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	90.00	85.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2520.00	2700.00
Coficiente de permeabilidad (K)	2.23E-04	1.97E-04
Promedio coeficiente K	2.10E-04	

Tabla LIII: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0.02% Polycom

C-03 + 0.02% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	75.00	90.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2700.00	2940.00
Coficiente de permeabilidad (K)	1.74E-04	1.91E-04
Promedio coeficiente K	1.82E-04	

Tabla LIV: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0.03% Polycom

C-03 + 0.03% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	60.00	65.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50
Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	3016.00	2552.00
Coficiente de permeabilidad (K)	1.24E-04	1.59E-04
Promedio coeficiente K	1.42E-04	

Tabla LV: Resultados del coeficiente de permeabilidad C-03 – 0.04% Polycom

C-03 + 0.04% Polycom		
Muestra N°	1	2
Volumen de agua (ml)	55.00	52.00
Longitud de pitón a pitón (cm)	26.50	26.50

Diferencia de nivel (cm.)	136.00	136.00
Área transversal del permeámetro (cm ²)	31.17	31.17
Tiempo de ensayo (s)	2610.00	2610.00
Coefficiente de permeabilidad (K)	1.32E-04	1.25E-04
Promedio coeficiente K	1.28E-04	

Las Tablas LI - LV evidencian cómo los cambios en la dosificación de Polycom influyen en el coeficiente de permeabilidad de la calicata C-03, mostrando una disminución en dicho coeficiente a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo.

Ensayos Mecánicos de muestras experimentales: SN + Adición Polycom

Los ensayos mecánicos realizados en las muestras experimentales fueron los siguientes: Proctor modificado y CBR (California Bearing Ratio). Se realizaron estos ensayos en cada calicata, aplicando todas las combinaciones de pruebas pertinentes a cada una.

✓ Proctor Modificado – MTC E115

Este ensayo mecánico experimental se llevó a cabo para las muestras patrón y con adición de aditivo Polycom siguiendo la normativa MTC E 115.

Calicata 01

Tabla LVI: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0% Polycom

C-01 + 0% Polycom			
Nº Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm ³)
V1	1.50 m	14.375	1.787
V2	1.50 m	15.306	1.820
V3	1.50 m	14.041	1.802
Promedio	1.50 m	14.574	1.803

Tabla LVII: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0.01% Polycom

C-01 + 0.01% Polycom			
Nº Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm ³)
V1	1.50 m	13.285	1.847
V2	1.50 m	13.799	1.863
V3	1.50 m	13.289	1.870
Promedio	1.50 m	13.458	1.860

Tabla LVIII: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0.02% Polycom

C-01 + 0.02% Polycom			
Nº Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm ³)

V1	1.50 m	12.841	1.890
V2	1.50 m	12.868	1.904
V3	1.50 m	12.161	1.910
Promedio	1.50 m	12.623	1.901

Tabla LIX: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0.03% Polycom

C-01 + 0.03% Polycom			
N° Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm³)
V1	1.50 m	12.095	1.941
V2	1.50 m	12.135	1.955
V3	1.50 m	12.261	1.932
Promedio	1.50 m	12.164	1.943

Tabla LX: Resultados de Proctor modificado C-01 – 0.04% Polycom

C-01 + 0.04% Polycom			
N° Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm³)
V1	1.50 m	11.086	1.962
V2	1.50 m	11.134	1.980
V3	1.50 m	11.293	1.971
Promedio	1.50 m	11.171	1.971

Las Tablas LVI - LX indican que a medida que aumenta el porcentaje de aditivo Polycom, ligeramente aumenta la densidad máxima seca del suelo y disminuye el óptimo contenido de humedad. Esto demuestra que el Polycom tiene un efecto estabilizador y contribuye a una mayor compactación en la mezcla suelo-aditivo.

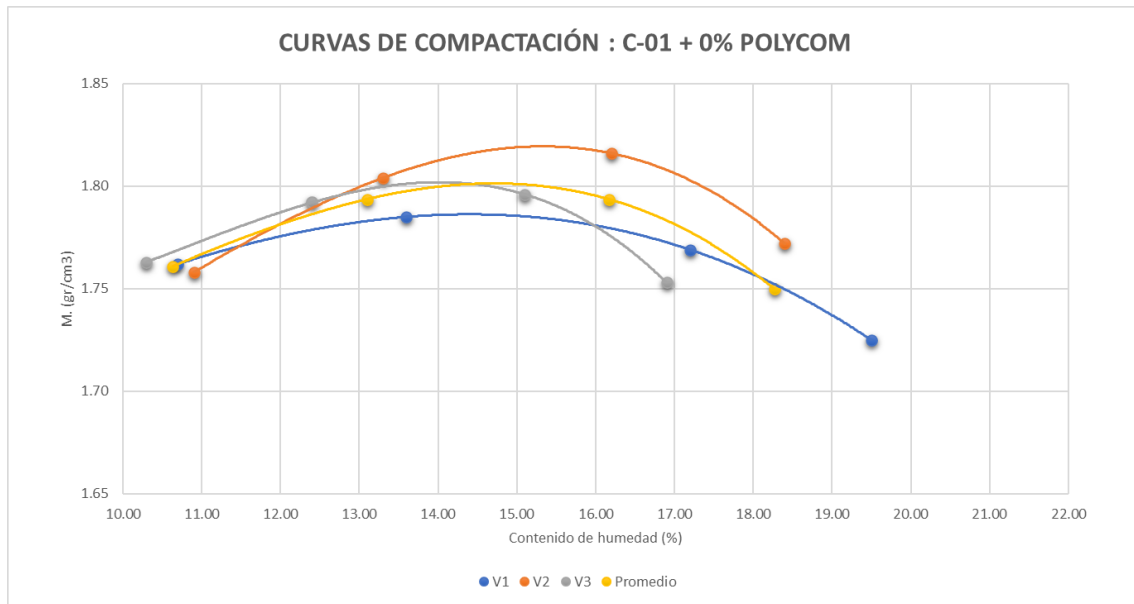


Ilustración 75: Resultados curva de compactación C-01 – 0% Polycom.

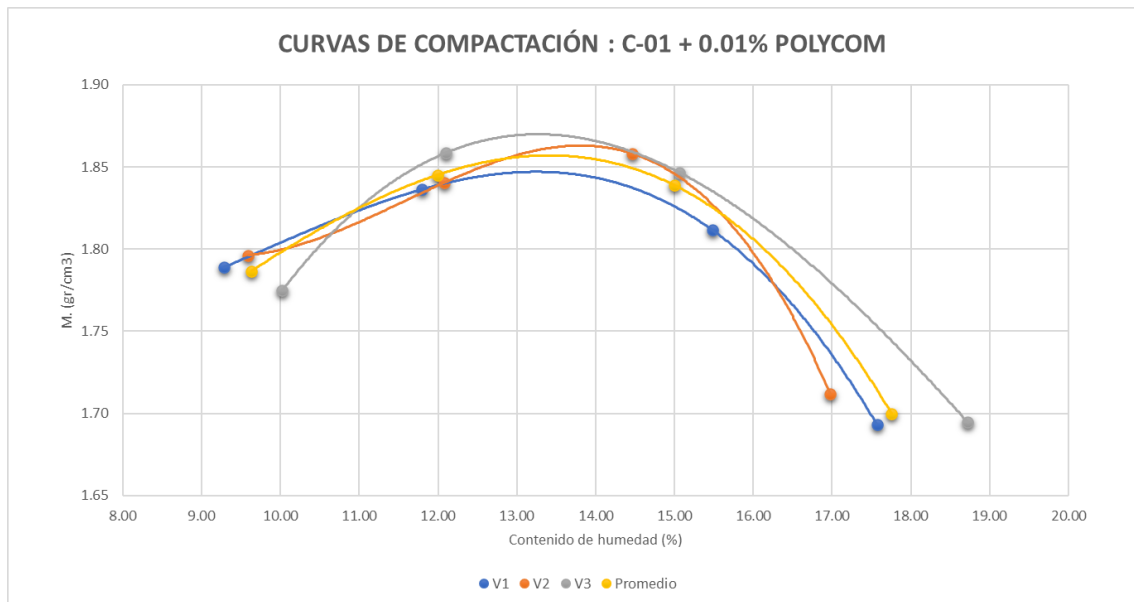


Ilustración 76: Resultados curva de compactación C-01 – 0.01% Polycom.

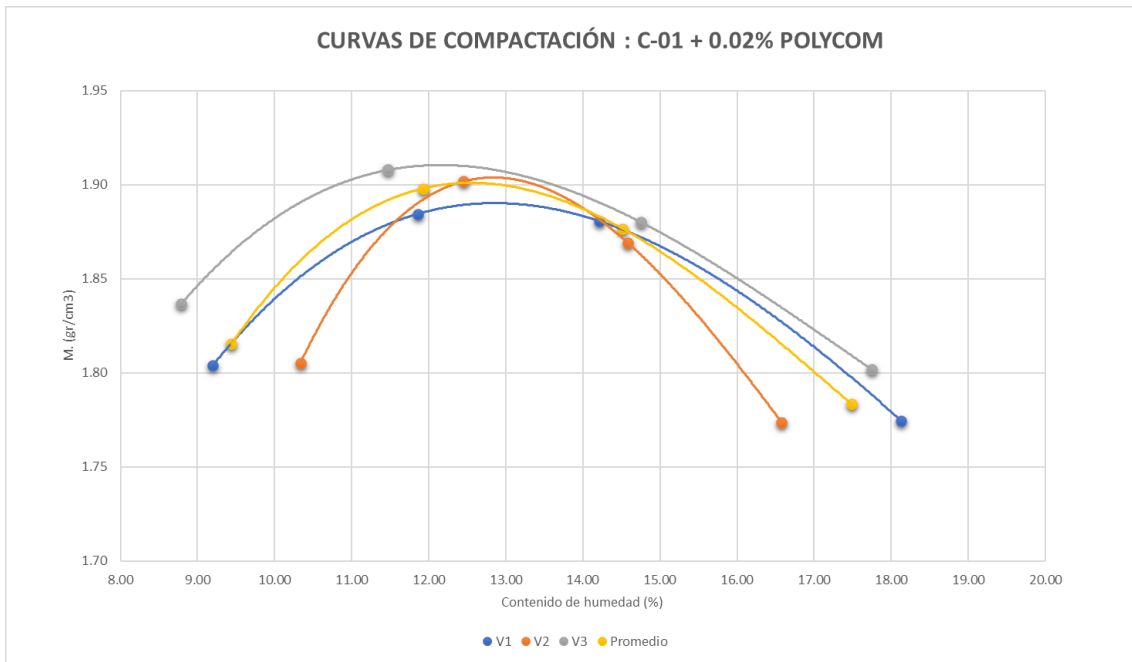


Ilustración 77: Resultados curva de compactación C-01 – 0.02% Polycom.

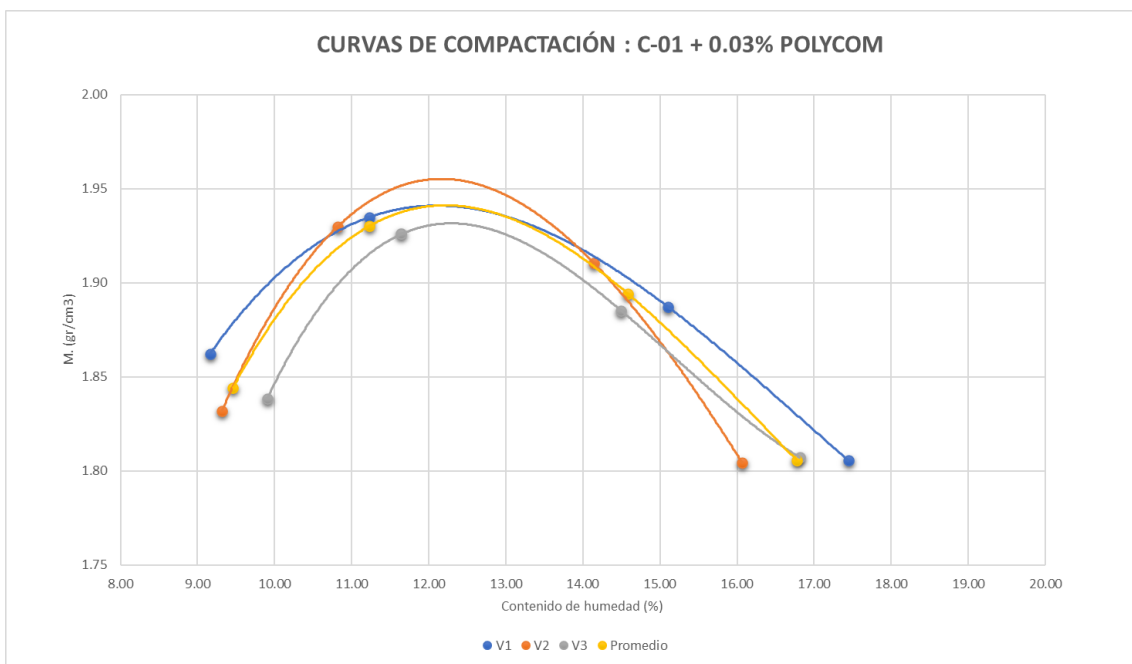


Ilustración 78: Resultados curva de compactación C-01 – 0.03% Polycom.

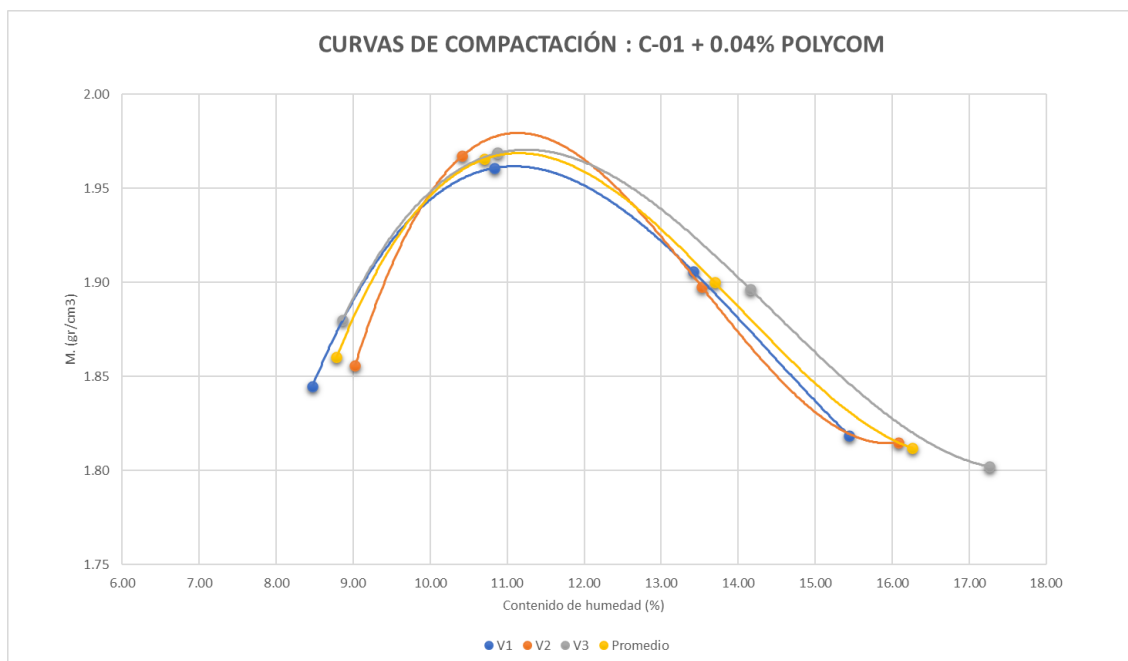


Ilustración 79: Resultados curva de compactación C-01 – 0.04% Polycom.

Las Ilustraciones 75 - 79 ilustran cómo la adición de aditivo Polycom permite que el suelo sea compactado de forma más eficiente. Esto se evidencia en una mayor densidad seca alcanzada en las muestras con aditivo, en comparación con aquellas muestras que no lo contienen.

Calicata 02

Tabla LXI: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0% Polycom

C-02 + 0% Polycom			
Nº Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm ³)
V1	1.50 m	15.989	1.802
V2	1.50 m	16.604	1.837
V3	1.50 m	15.372	1.849
Promedio	1.50 m	15.988	1.829

Tabla LXII: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0.01% Polycom

C-02 + 0.01% Polycom			
Nº Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm ³)
V1	1.50 m	14.061	1.889
V2	1.50 m	14.615	1.863
V3	1.50 m	14.720	1.870
Promedio	1.50 m	14.465	1.874

Tabla LXIII: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0.02% Polycom

C-02 + 0.02% Polycom			
N° Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm3)
V1	1.50 m	13.428	1.901
V2	1.50 m	13.221	1.921
V3	1.50 m	13.333	1.918
Promedio	1.50 m	13.328	1.913

Tabla LXIV: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0.03% Polycom

C-02 + 0.03% Polycom			
N° Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm3)
V1	1.50 m	12.622	1.955
V2	1.50 m	13.052	1.940
V3	1.50 m	12.083	1.963
Promedio	1.50 m	12.586	1.953

Tabla LXV: Resultados de Proctor modificado C-02 – 0.04% Polycom

C-02 + 0.04% Polycom			
N° Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm3)
V1	1.50 m	11.440	1.967
V2	1.50 m	11.731	1.957
V3	1.50 m	11.637	1.973
Promedio	1.50 m	11.603	1.966

Las Tablas LXI - LXV indican que a medida que aumenta el porcentaje de aditivo Polycom, ligeramente aumenta la densidad máxima seca del suelo y disminuye el óptimo contenido de humedad. Esto demuestra que el Polycom tiene un efecto estabilizador y contribuye a una mayor compactación en la mezcla suelo-aditivo.

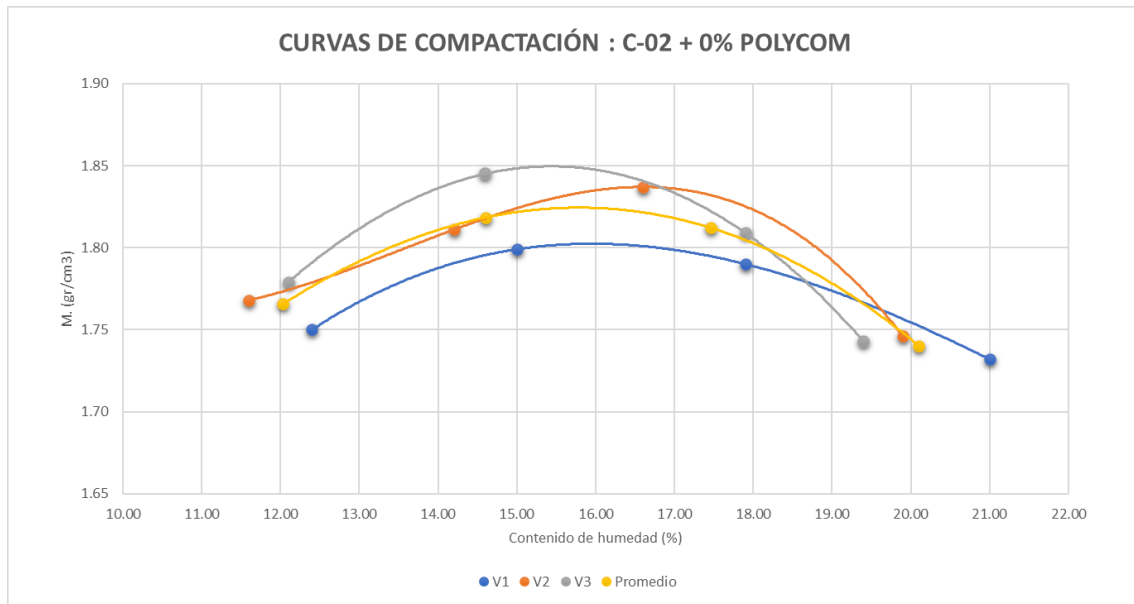


Ilustración 80: Resultados curva de compactación C-02 – 0% Polycom.

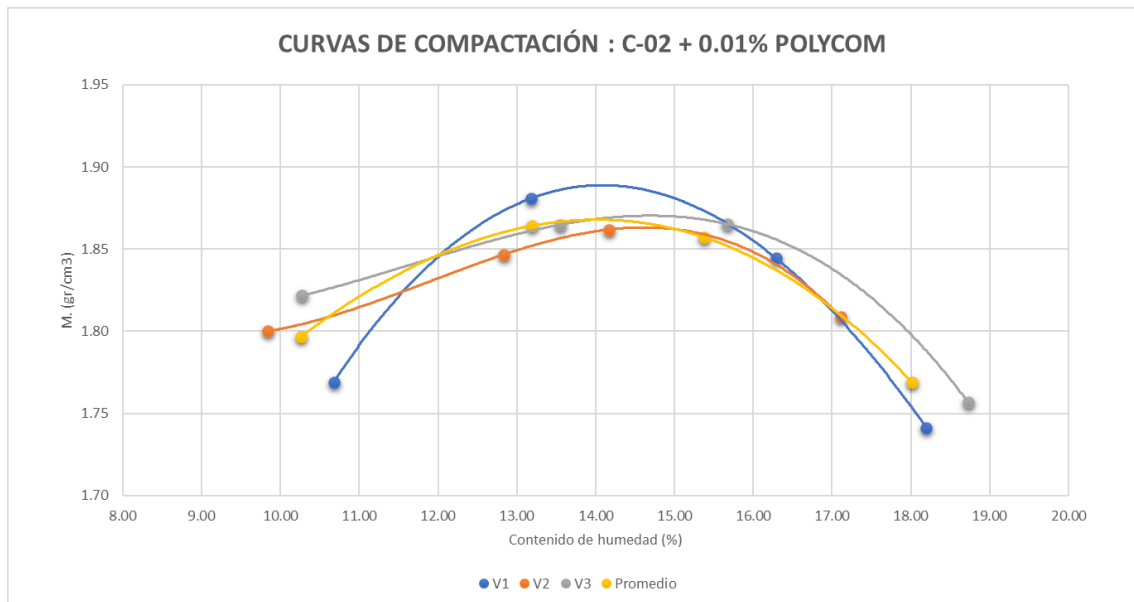


Ilustración 81: Resultados curva de compactación C-02 – 0.01% Polycom.

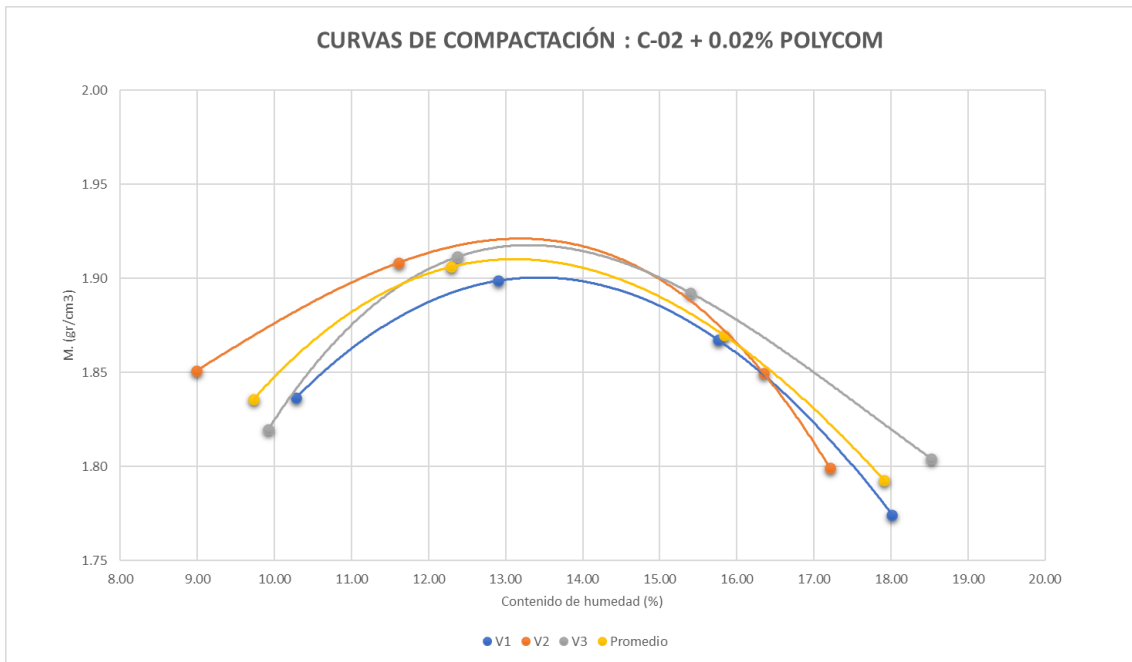


Ilustración 82: Resultados curva de compactación C-02 – 0.02% Polycom.

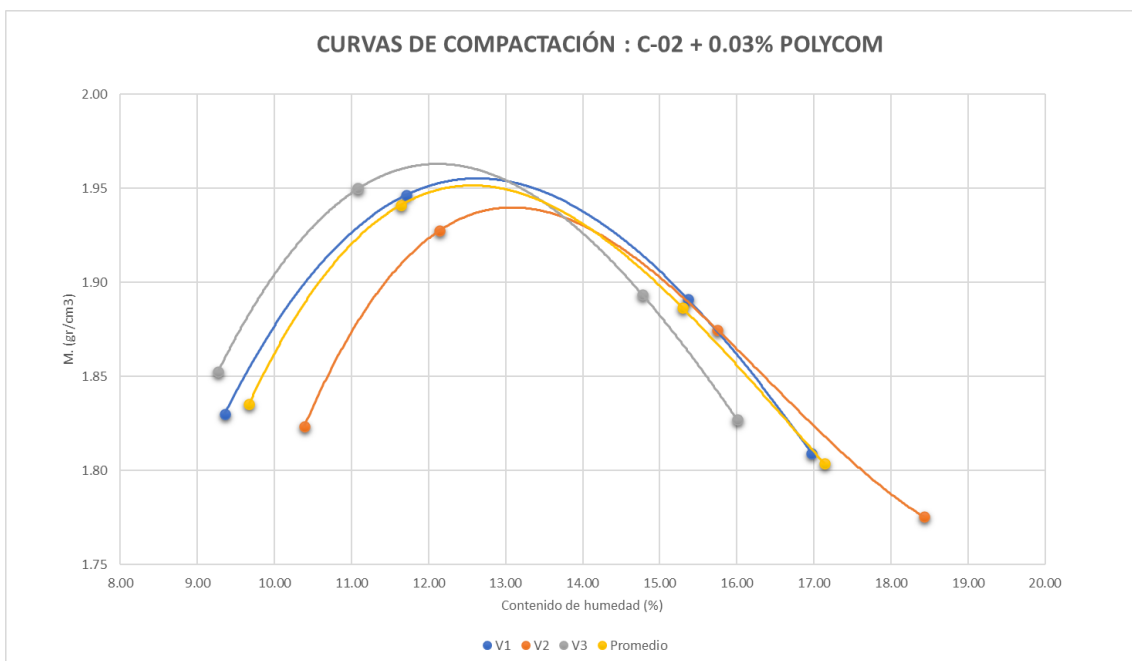


Ilustración 83: Resultados curva de compactación C-02 – 0.03% Polycom.

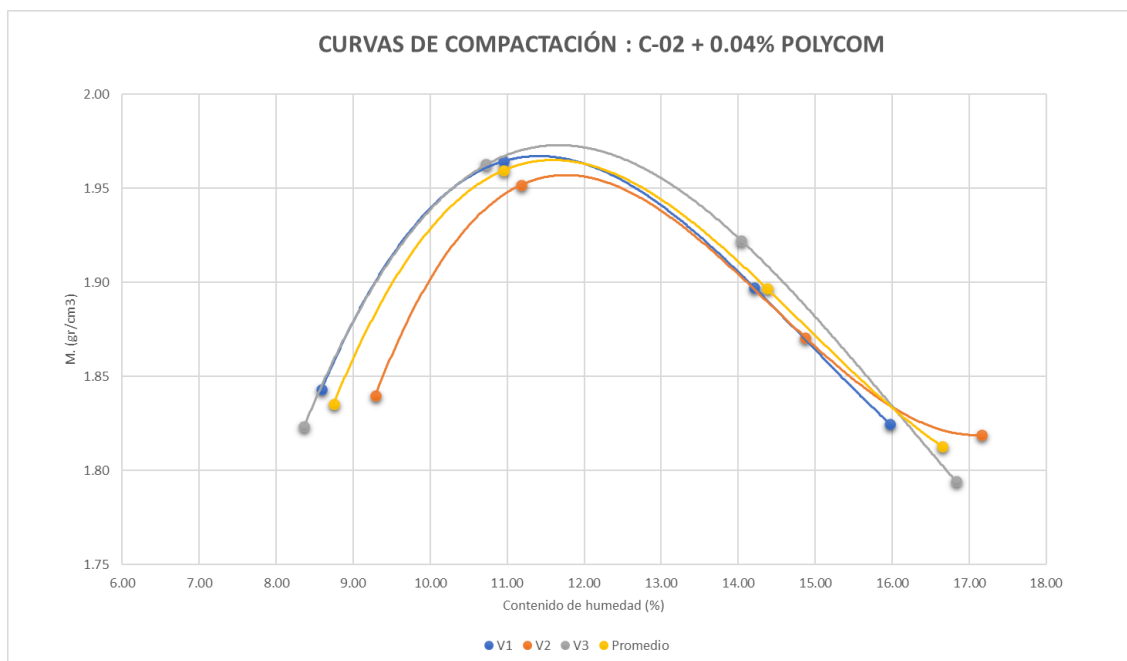


Ilustración 84: Resultados curva de compactación C-02 – 0.04% Polycom.

Las Ilustraciones 80 - 84 ilustran cómo la adición de aditivo Polycom permite que el suelo sea compactado de forma más eficiente. Esto se evidencia en una mayor densidad seca alcanzada en las muestras con aditivo, en comparación con aquellas muestras que no lo contienen.

Calicata 03

Tabla LXVI: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0% Polycom

C-03 + 0% Polycom			
Nº Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm ³)
V1	1.50 m	16.912	1.834
V2	1.50 m	16.972	1.845
V3	1.50 m	15.876	1.853
Promedio	1.50 m	16.587	1.844

Tabla LXVII: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0.01% Polycom

C-03 + 0.01% Polycom			
Nº Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm ³)
V1	1.50 m	14.611	1.889
V2	1.50 m	14.988	1.876
V3	1.50 m	14.477	1.867
Promedio	1.50 m	14.692	1.877

Tabla LXVIII: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0.02% Polycom

C-03 + 0.02% Polycom			
N° Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm³)
V1	1.50 m	13.716	1.924
V2	1.50 m	14.100	1.911
V3	1.50 m	12.555	1.932
Promedio	1.50 m	13.457	1.922

Tabla LXIX: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0.03% Polycom

C-03 + 0.03% Polycom			
N° Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm³)
V1	1.50 m	11.962	1.963
V2	1.50 m	11.247	1.978
V3	1.50 m	11.623	1.971
Promedio	1.50 m	11.611	1.971

Tabla LXX: Resultados de Proctor modificado C-03 – 0.04% Polycom

C-03 + 0.04% Polycom			
N° Vueltas	Profundidad	O.C.H (%)	M.D.S (gr/cm³)
V1	1.50 m	10.548	1.980
V2	1.50 m	10.353	1.989
V3	1.50 m	10.007	1.997
Promedio	1.50 m	10.303	1.988

Las Tablas LXVI – LXX indican que a medida que aumenta el porcentaje de aditivo Polycom, ligeramente aumenta la densidad máxima seca del suelo y disminuye el óptimo contenido de humedad. Esto demuestra que el Polycom tiene un efecto estabilizador y contribuye a una mayor compactación en la mezcla suelo-aditivo.

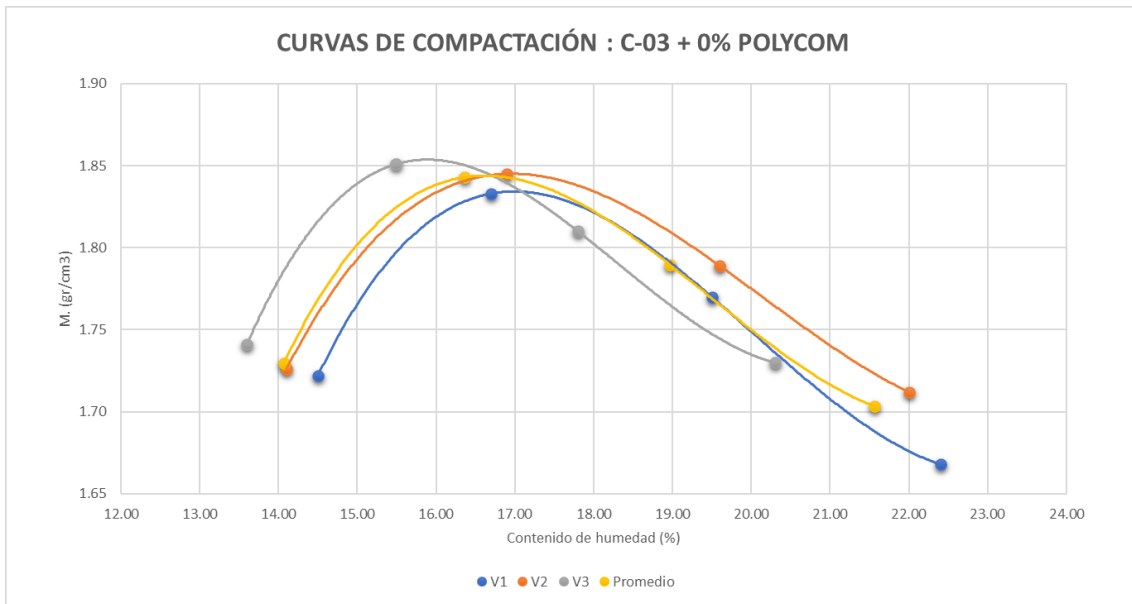


Ilustración 85: Resultados curva de compactación C-03 – 0% Polycom.

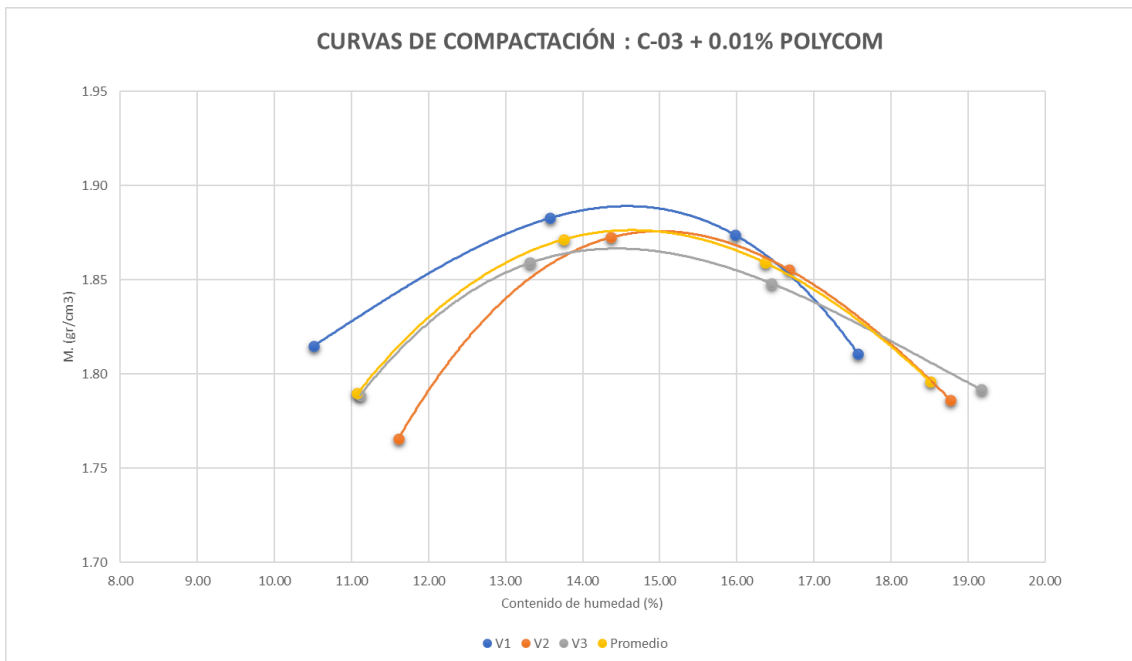


Ilustración 86: Resultados curva de compactación C-03 – 0.01% Polycom.

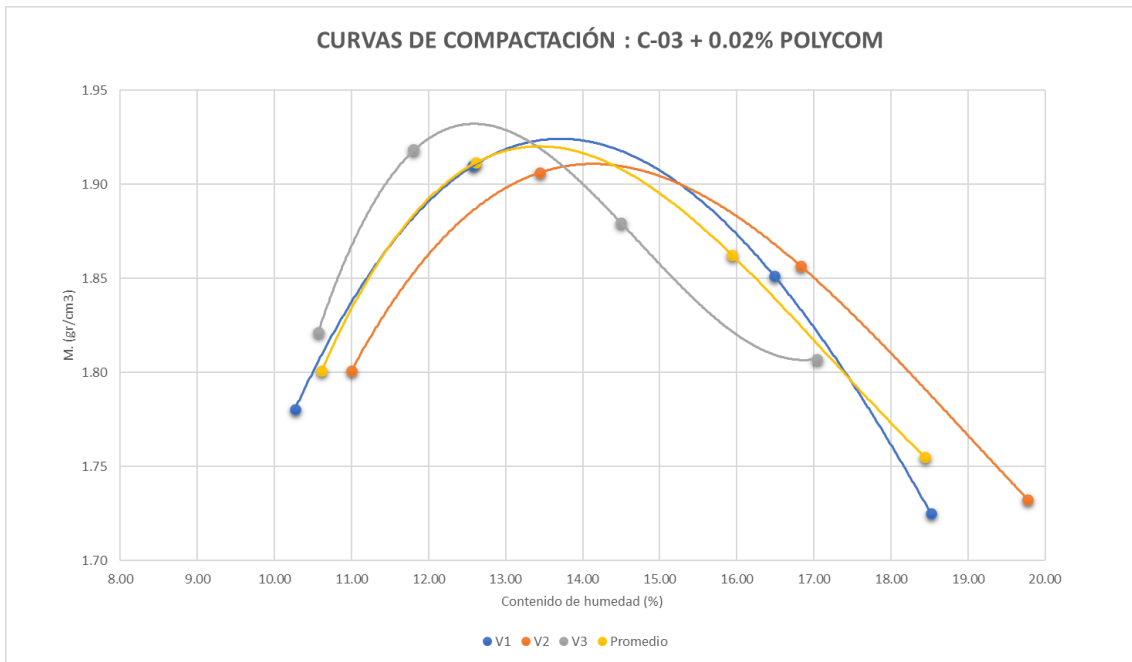


Ilustración 87: Resultados curva de compactación C-03 – 0.02% Polycom.

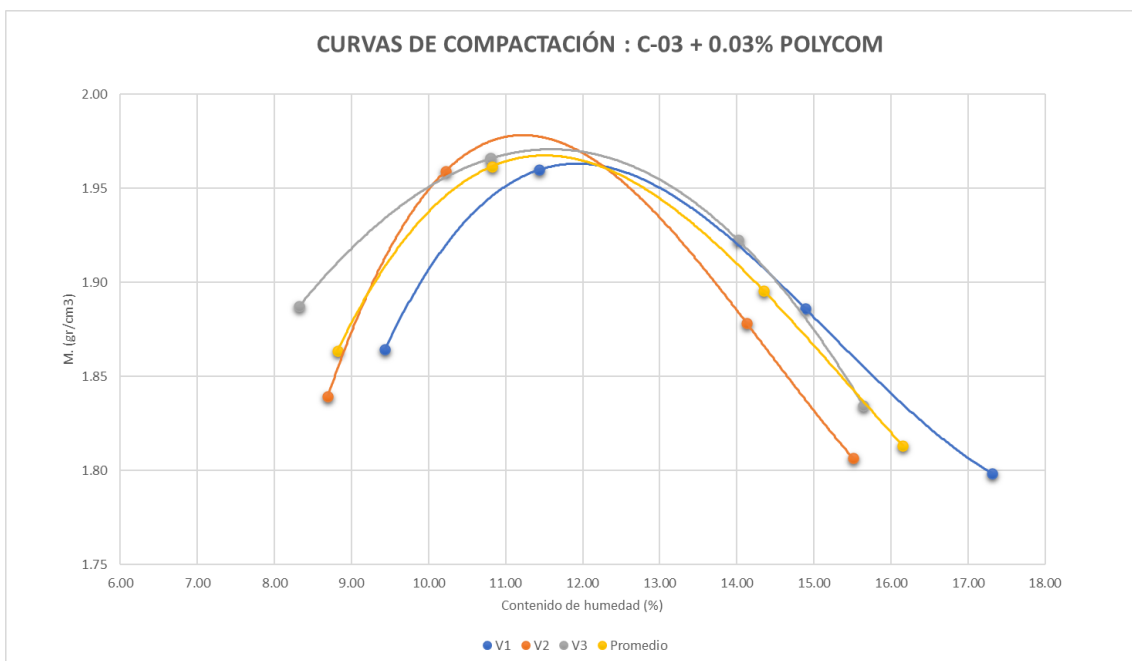


Ilustración 88: Resultados curva de compactación C-03 – 0.03% Polycom.

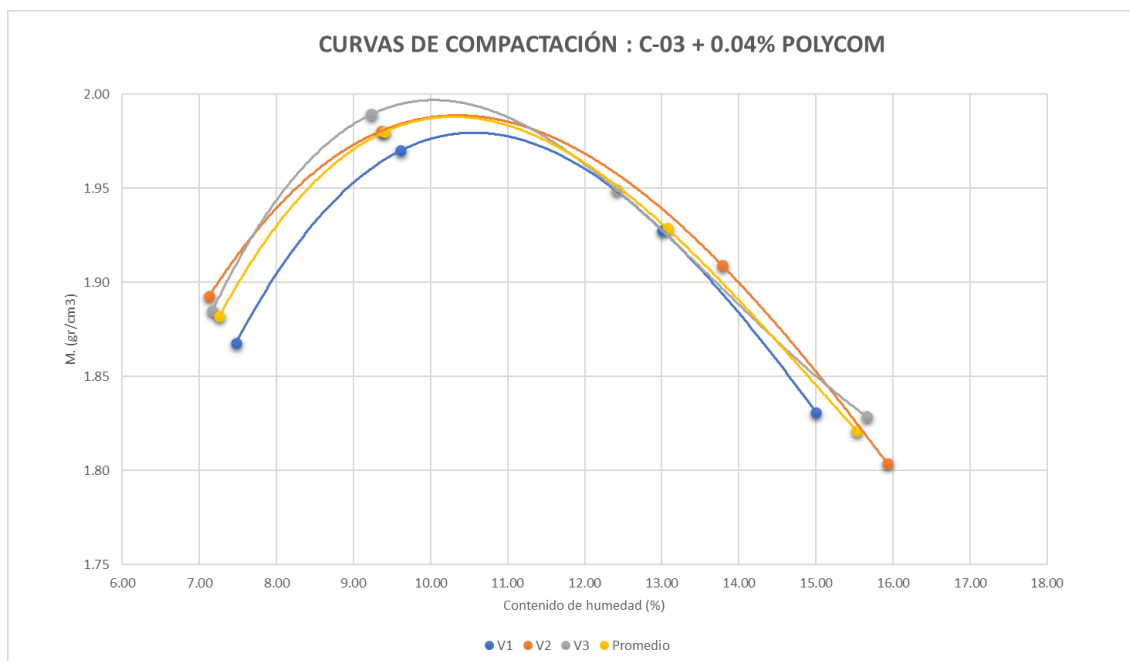


Ilustración 89: Resultados curva de compactación C-03 – 0.04% Polycom.

Las Ilustraciones 85 - 89 ilustran cómo la adición de aditivo Polycom permite que el suelo sea compactado de forma más eficiente. Esto se evidencia en una mayor densidad seca alcanzada en las muestras con aditivo, en comparación con aquellas muestras que no lo contienen.

✓ California Bearing Ratio (CBR) - MTC E132

Este ensayo mecánico experimental se llevó a cabo para las muestras patrón y con adición de aditivo Polycom siguiendo la normativa MTC E 132.

Calicata 01

Tabla LXXI: Resultados de CBR C-01 – 0% Polycom

C-01 + 0% Polycom					
N° Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	5.600	4.340	6.210	4.630
V2	1.50 m	5.700	4.610	6.450	4.960
V3	1.50 m	5.150	4.220	6.090	4.760
Promedio	1.50 m	5.483	4.390	6.250	4.783

Tabla LXXII: Resultados de CBR C-01 – 0.01% Polycom

C-01 + 0.01% Polycom					
N° Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"

V1	1.50 m	13.08	10.61	15.57	12.48
V2	1.50 m	14.13	11.29	17.14	13.40
V3	1.50 m	12.51	10.30	14.76	11.90
Promedio	1.50 m	13.24	10.73	15.82	12.59

Tabla LXXIII: Resultados de CBR C-01 – 0.02% Polycom

C-01 + 0.02% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	27.64	23.36	31.95	27.10
V2	1.50 m	26.77	20.91	31.60	24.69
V3	1.50 m	25.82	20.93	30.41	24.90
Promedio	1.50 m	26.74	21.73	31.32	25.56

Tabla LXXIV: Resultados de CBR C-01 – 0.03% Polycom

C-01 + 0.03% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	49.00	41.09	56.93	46.40
V2	1.50 m	50.75	43.54	58.69	49.82
V3	1.50 m	50.16	41.22	57.75	47.23
Promedio	1.50 m	49.97	41.95	57.79	47.82

Tabla LXXV: Resultados de CBR C-01 – 0.04% Polycom

C-01 + 0.04% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	60.75	51.42	71.78	59.33
V2	1.50 m	62.09	54.11	72.56	62.29
V3	1.50 m	59.91	52.20	70.89	60.80
Promedio	1.50 m	60.92	52.58	71.74	60.81

Las tres repeticiones del ensayo CBR arrojaron resultados con ligera variabilidad. Se obtuvo un CBR promedio de 5.483 al 100% y 4.390 al 95% para una penetración de 0.1", así como 6.250 al 100% y 4.783 al 95% para una penetración de 0.2". Esta fluctuación es típica y se atribuye a factores como pequeñas diferencias en la humedad, la compactación y la heterogeneidad natural del suelo.

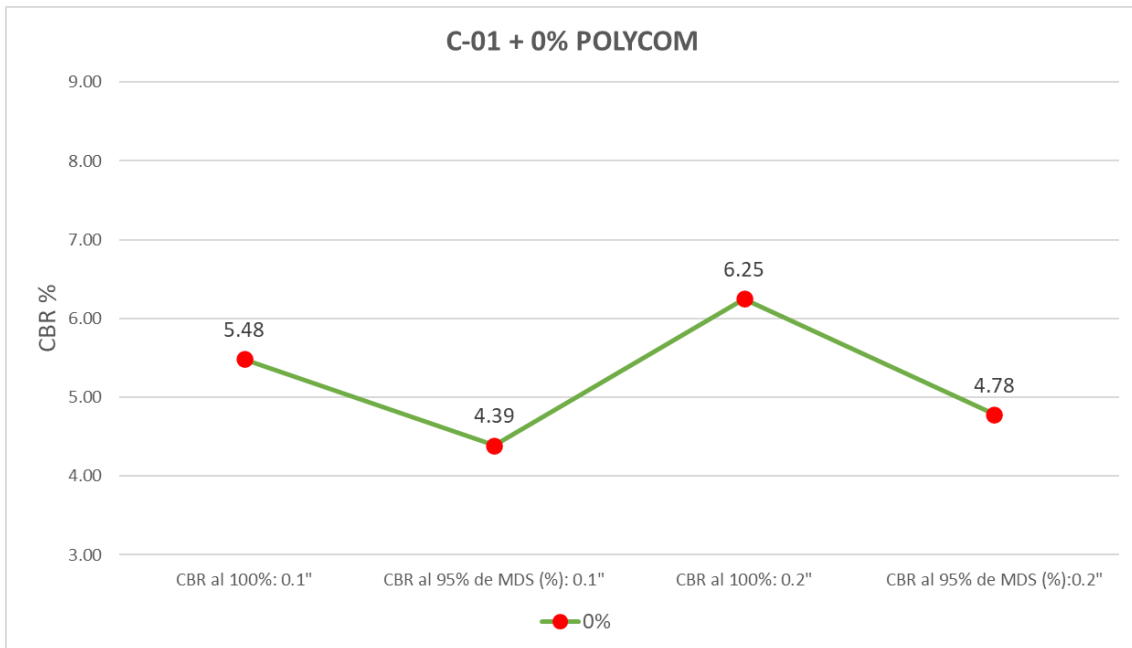


Ilustración 90: Resultados de CBR C-01 – 0% Polycom.

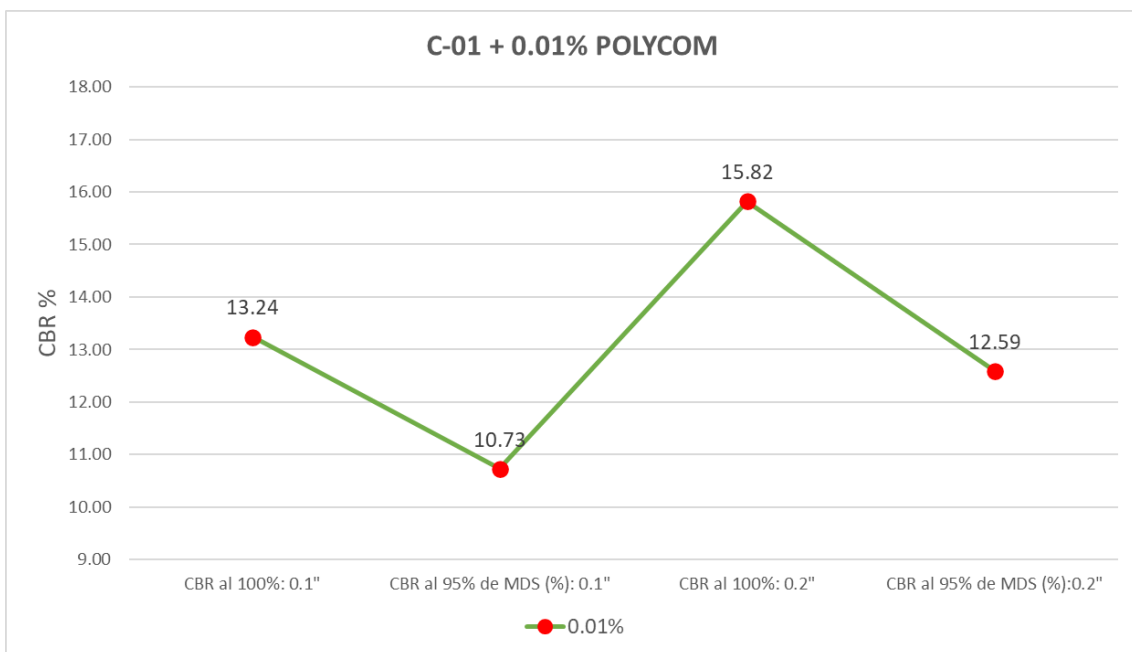


Ilustración 91: Resultados de CBR C-01 – 0.01% Polycom.

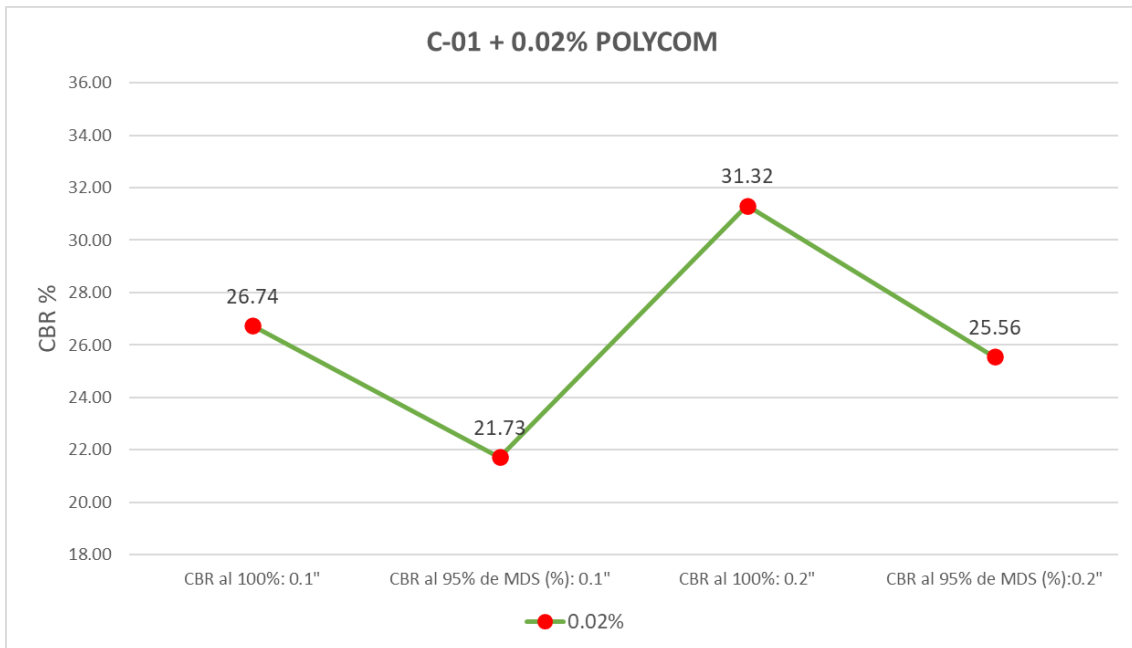


Ilustración 92: Resultados de CBR C-01 – 0.02% Polycom.

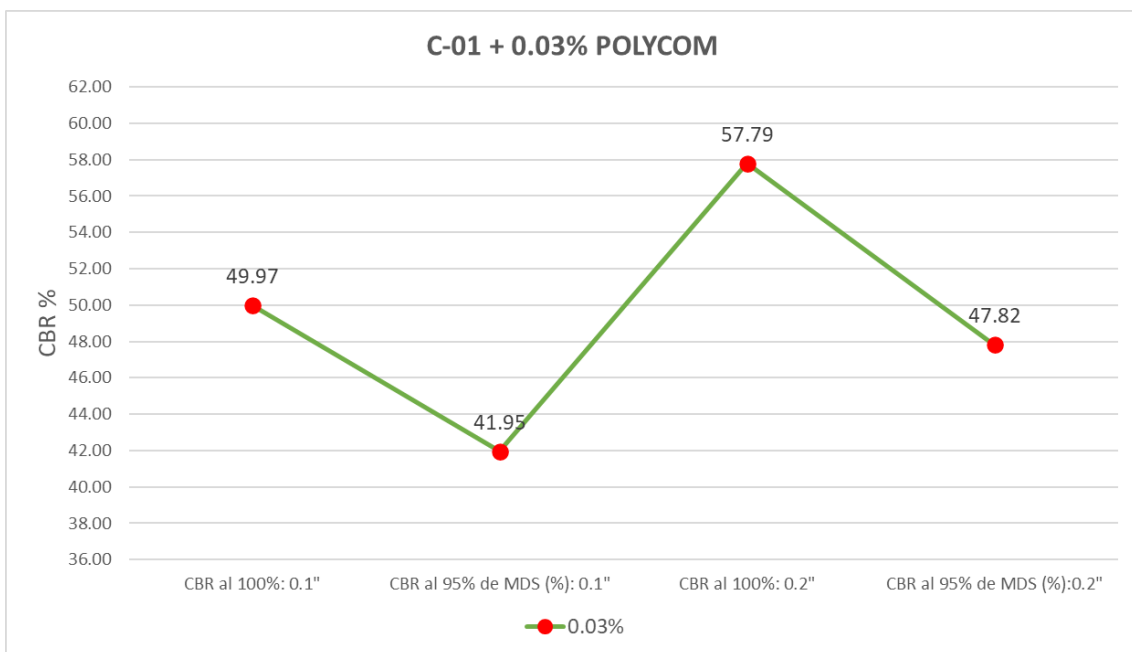


Ilustración 93: Resultados de CBR C-01 – 0.03% Polycom.

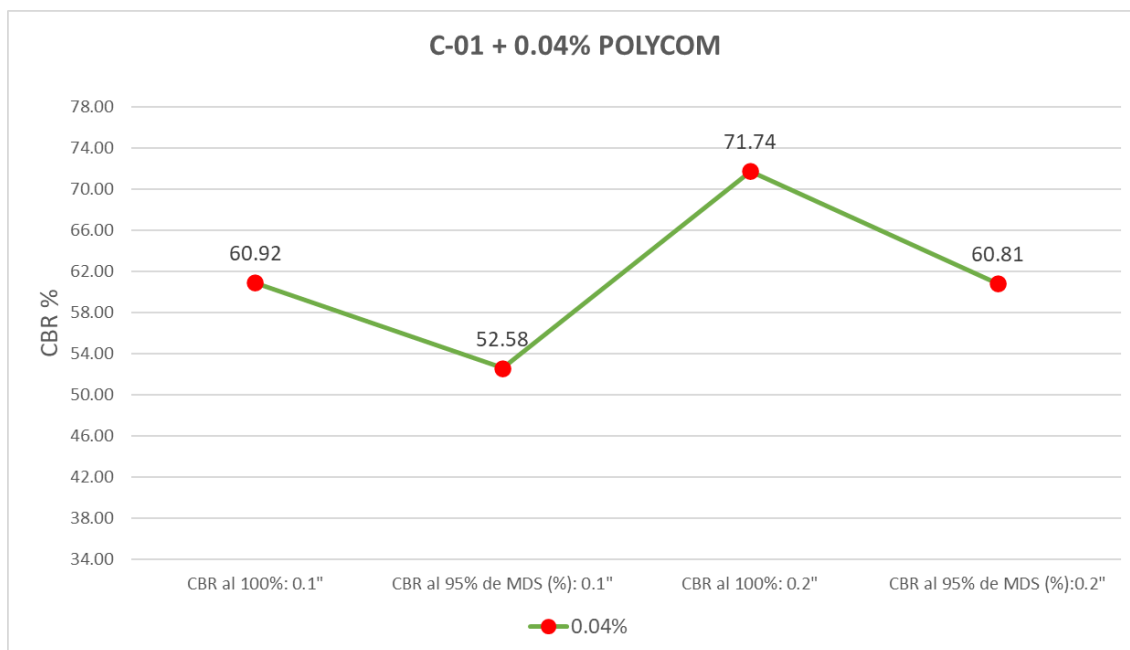


Ilustración 94: Resultados de CBR C-01 – 0.04% Polycom.

Calicata 02

Tabla LXXVI: Resultados de CBR C-02 – 0% Polycom

C-02 + 0% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	4.950	3.900	5.740	4.280
V2	1.50 m	5.110	4.250	5.930	4.740
V3	1.50 m	5.000	4.190	5.800	4.590
Promedio	1.50 m	5.020	4.113	5.823	4.537

Tabla LXXVII: Resultados de CBR C-02 – 0.01% Polycom

C-02 + 0.01% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	11.58	8.99	13.84	10.65
V2	1.50 m	9.9	7.73	12.44	9.37
V3	1.50 m	10.41	8.95	12.95	10.95
Promedio	1.50 m	10.63	8.56	13.08	10.32

Tabla LXXVIII: Resultados de CBR C-02 – 0.02% Polycom

C-02 + 0.02% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de MDS: 0.1"	CBR al 95% de MDS: 0.1"	CBR al 100% de MDS: 0.2"	CBR al 95% de MDS: 0.2"
V1	1.50 m	22.82	19.27	27.87	23.47
V2	1.50 m	24.18	19.74	28.91	23.49
V3	1.50 m	23.03	19.78	28.35	24.29
Promedio	1.50 m	23.34	19.60	28.38	23.75

Tabla LXXIX: Resultados de CBR C-02 – 0.03% Polycom

C-02 + 0.03% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de MDS: 0.1"	CBR al 95% de MDS: 0.1"	CBR al 100% de MDS: 0.2"	CBR al 95% de MDS: 0.2"
V1	1.50 m	41.91	34.28	52.02	40.98
V2	1.50 m	40.86	33.78	49.98	39.51
V3	1.50 m	42.95	34.53	52.99	41.01
Promedio	1.50 m	41.91	34.20	51.66	40.50

Tabla LXXX: Resultados de CBR C-02 – 0.04% Polycom

C-02 + 0.04% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de MDS: 0.1"	CBR al 95% de MDS: 0.1"	CBR al 100% de MDS: 0.2"	CBR al 95% de MDS: 0.2"
V1	1.50 m	63.75	53.49	73.93	61.22
V2	1.50 m	60.73	50.53	71.44	58.27
V3	1.50 m	62.01	52.98	73.06	61.55
Promedio	1.50 m	62.16	52.33	72.81	60.35

Las tres repeticiones del ensayo CBR arrojaron resultados con ligera variabilidad. Se obtuvo un CBR promedio de 5.020 al 100% y 4.113 al 95% para una penetración de 0.1", así como 5.823 al 100% y 4.537 al 95% para una penetración de 0.2". Esta fluctuación es típica y se atribuye a factores como pequeñas diferencias en la humedad, la compactación y la heterogeneidad natural del suelo.

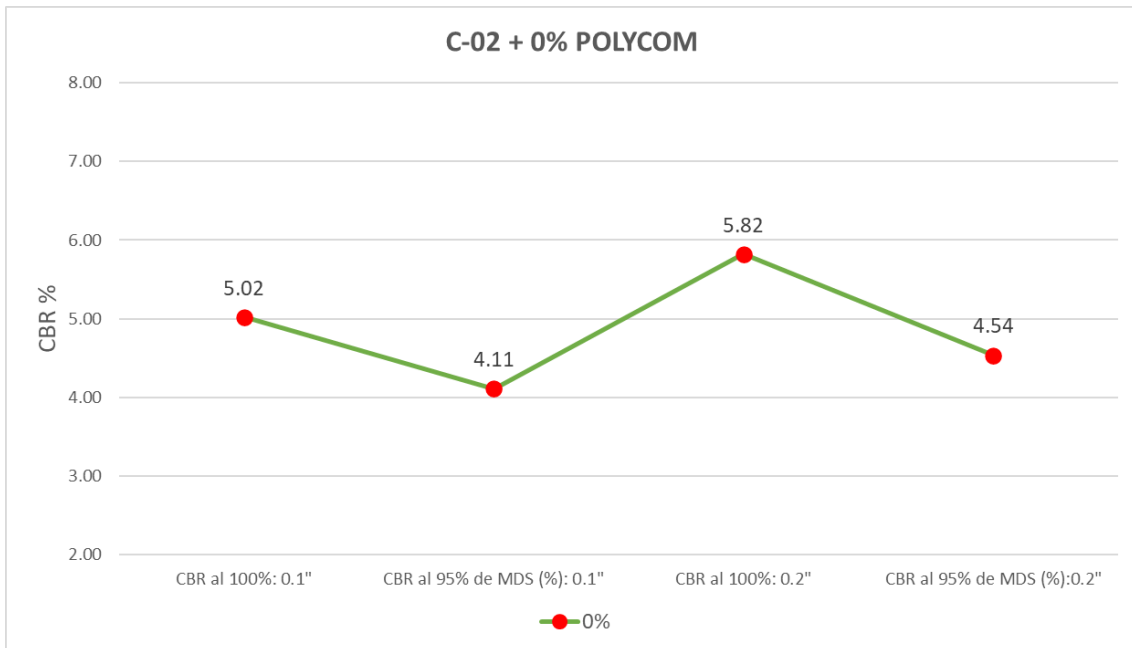


Ilustración 95: Resultados de CBR C-02 – 0% Polycom.

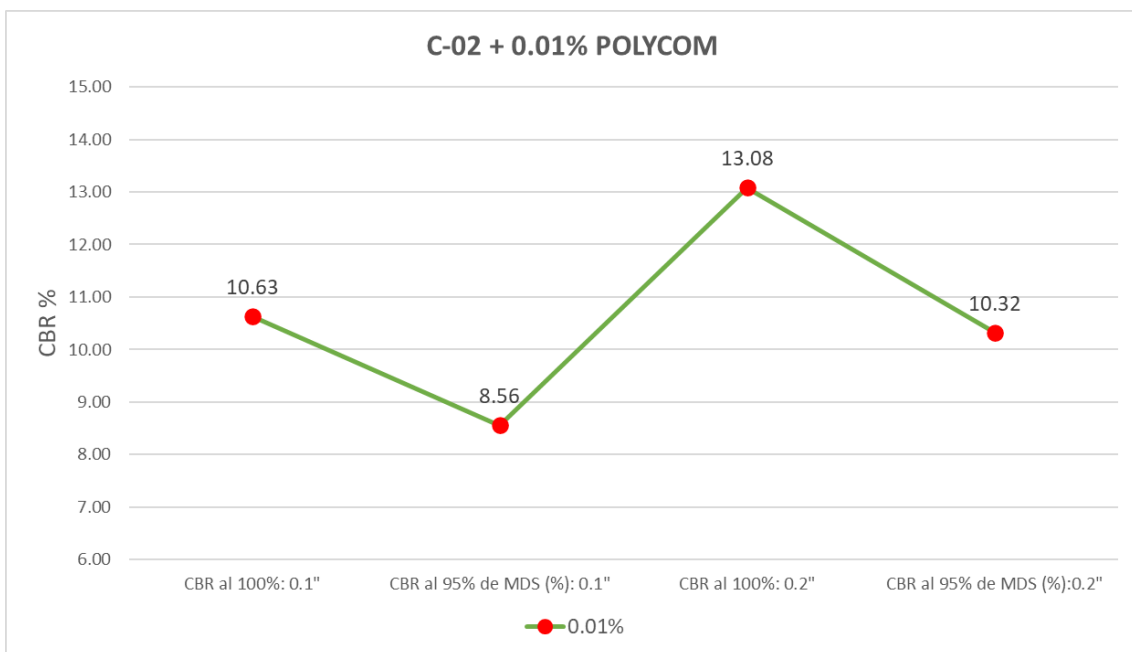


Ilustración 96: Resultados de CBR C-02 – 0.01% Polycom.

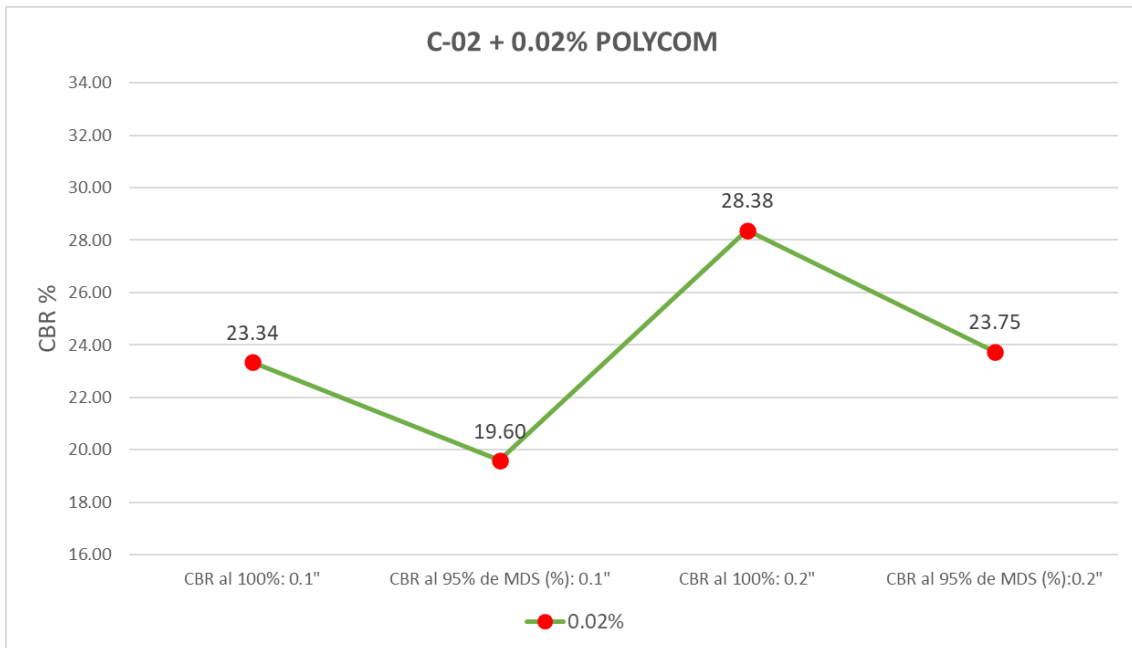


Ilustración 97: Resultados de CBR C-02 – 0.02% Polycom.

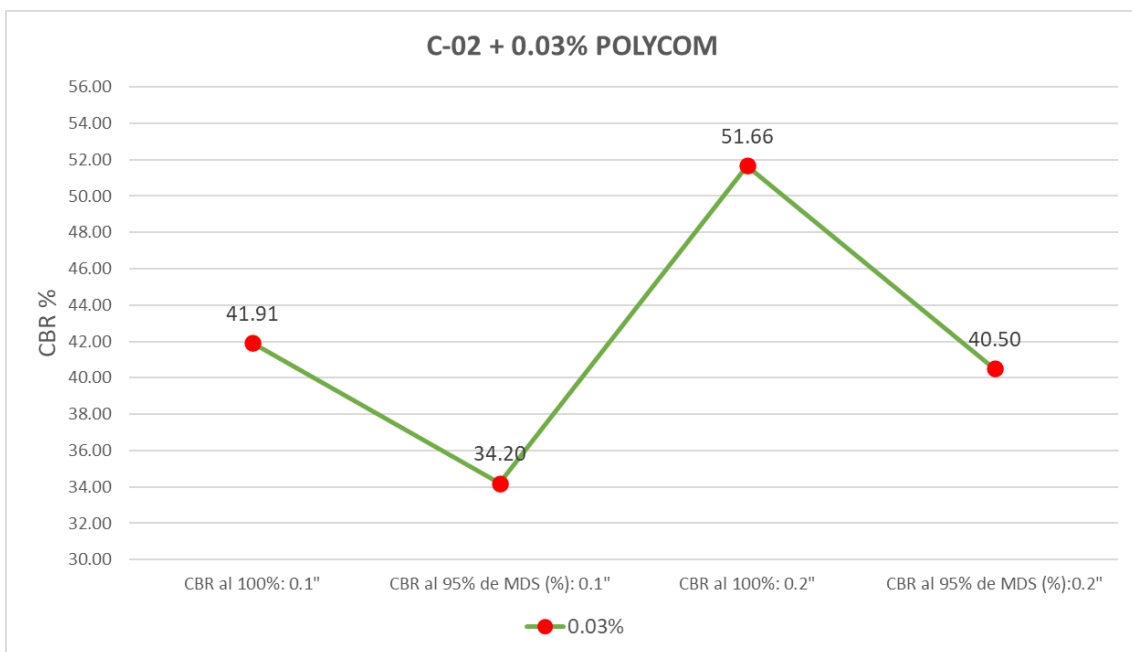


Ilustración 98: Resultados de CBR C-02 – 0.03% Polycom.

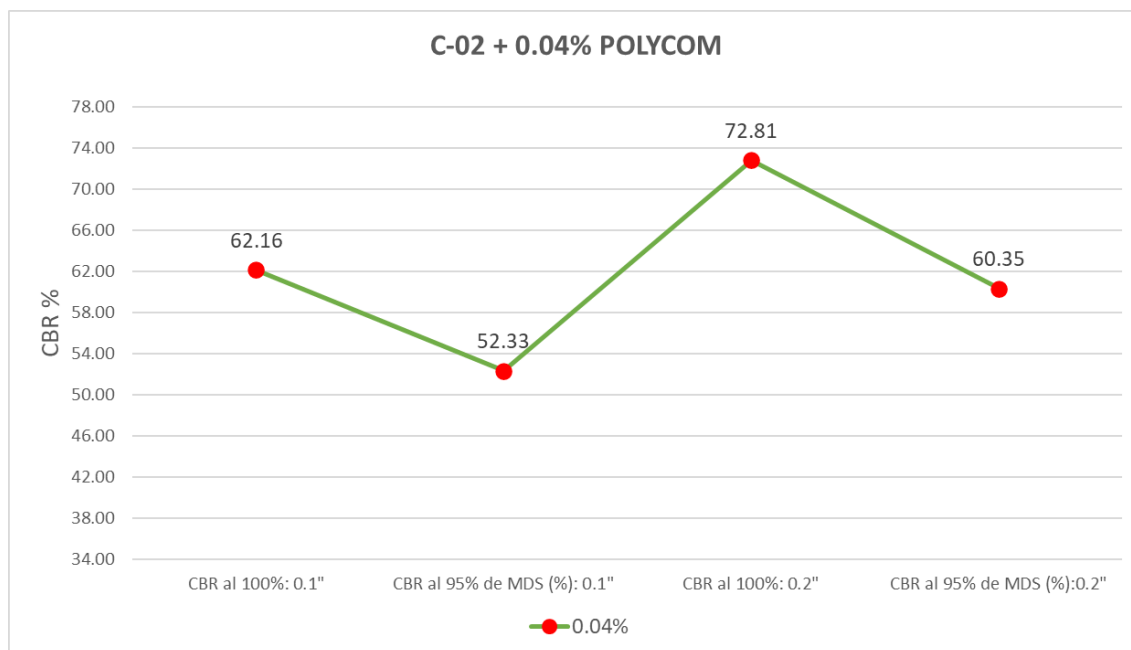


Ilustración 99: Resultados de CBR C-02 – 0.04% Polycom.

Calicata 03

Tabla LXXXI: Resultados de CBR C-03 – 0% Polycom

C-03 + 0% Polycom					
N° Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	4.550	3.680	5.480	4.190
V2	1.50 m	4.200	3.310	5.140	3.790
V3	1.50 m	4.340	3.280	5.330	3.840
Promedio	1.50 m	4.363	3.423	5.317	3.940

Tabla LXXXII: Resultados de CBR C-03 – 0.01% Polycom

C-03 + 0.01% Polycom					
N° Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	8.67	7.64	11.43	9.84
V2	1.50 m	10.26	8.06	12.88	9.75
V3	1.50 m	9.68	7.84	12.79	10.09
Promedio	1.50 m	9.54	7.85	12.37	9.89

Tabla LXXXIII: Resultados de CBR C-03 – 0.02% Polycom

C-03 + 0.02% Polycom					
N° Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"

V1	1.50 m	17.35	14.57	21.88	18.32
V2	1.50 m	16.93	14.08	21.30	18.05
V3	1.50 m	18.52	15.63	23.02	19.35
Promedio	1.50 m	17.60	14.76	22.07	18.57

Tabla LXXXIV: Resultados de CBR C-03 – 0.03% Polycom

C-03 + 0.03% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	37.31	29.87	44.64	35.86
V2	1.50 m	36.56	30.03	43.87	35.50
V3	1.50 m	35.29	28.70	42.55	34.27
Promedio	1.50 m	36.39	29.53	43.69	35.21

Tabla LXXXV: Resultados de CBR C-03 – 0.04% Polycom

C-03 + 0.04% Polycom					
Nº Vueltas	Profundidad	CBR al 100% de	CBR al 95%	CBR al 100%	CBR al 95% de
		MDS: 0.1"	de MDS: 0.1"	de MDS: 0.2"	MDS: 0.2"
V1	1.50 m	56.25	48.20	63.67	54.29
V2	1.50 m	55.43	46.93	63.05	53.20
V3	1.50 m	53.85	45.10	62.05	51.65
Promedio	1.50 m	55.18	46.74	62.92	53.05

Las tres repeticiones del ensayo CBR arrojaron resultados con ligera variabilidad. Se obtuvo un CBR promedio de 4.363 al 100% y 3.423 al 95% para una penetración de 0.1", así como 5.317 al 100% y 3.940 al 95% para una penetración de 0.2". Esta fluctuación es típica y se atribuye a factores como pequeñas diferencias en la humedad, la compactación y la heterogeneidad natural del suelo.

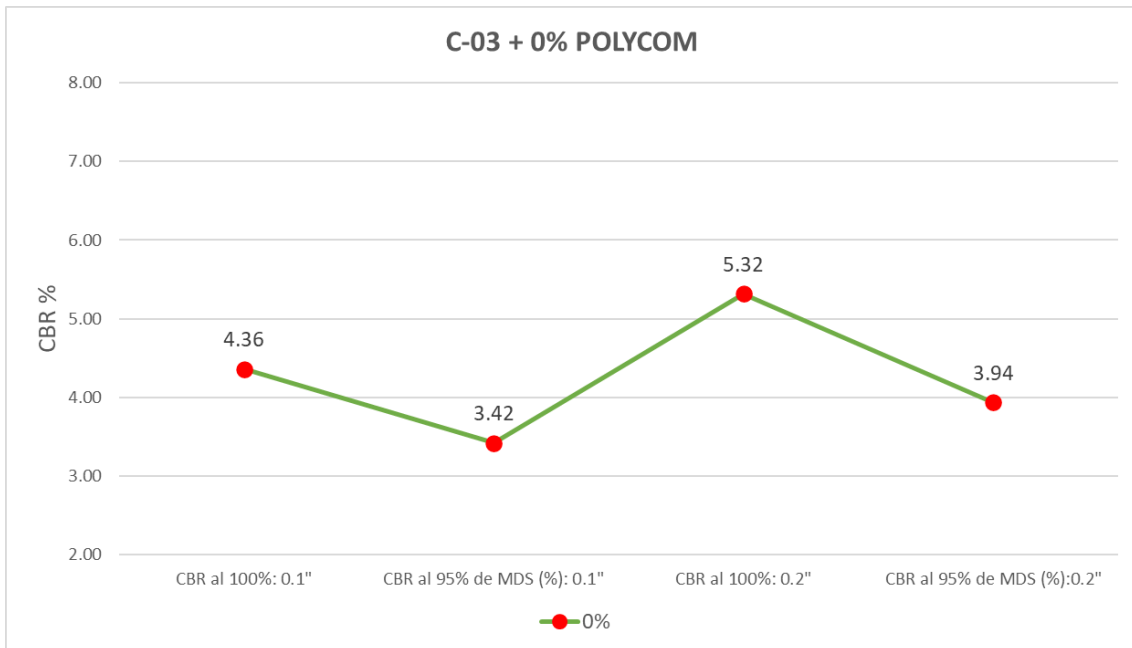


Ilustración 100: Resultados de CBR C-03 – 0% Polycom.

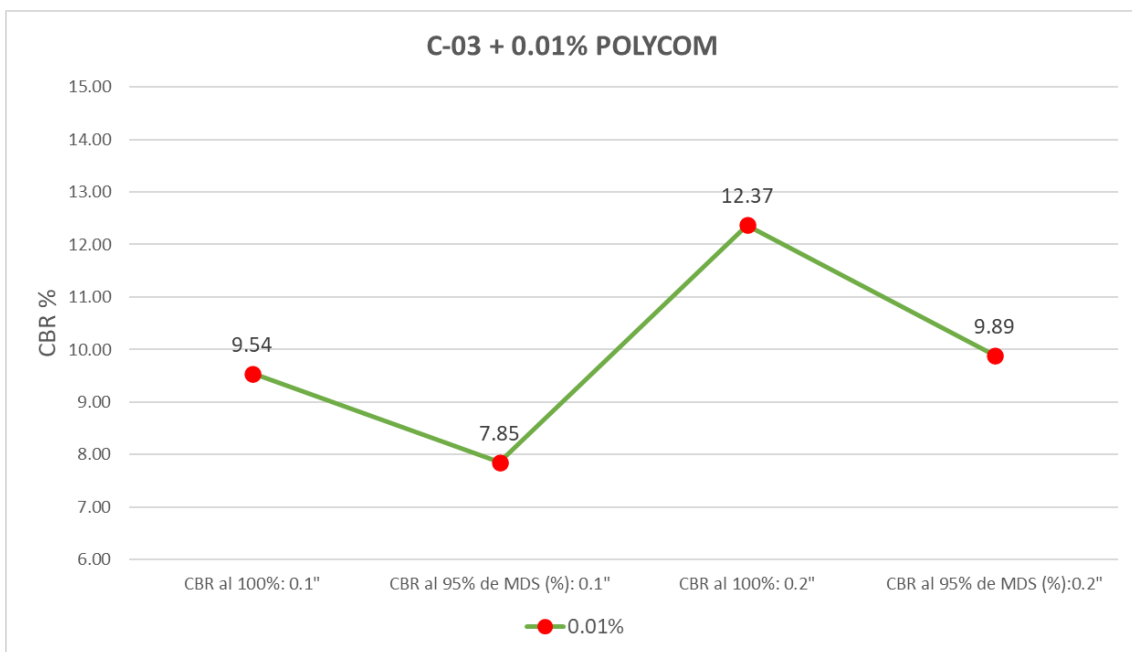


Ilustración 101: Resultados de CBR C-03 – 0.01% Polycom.

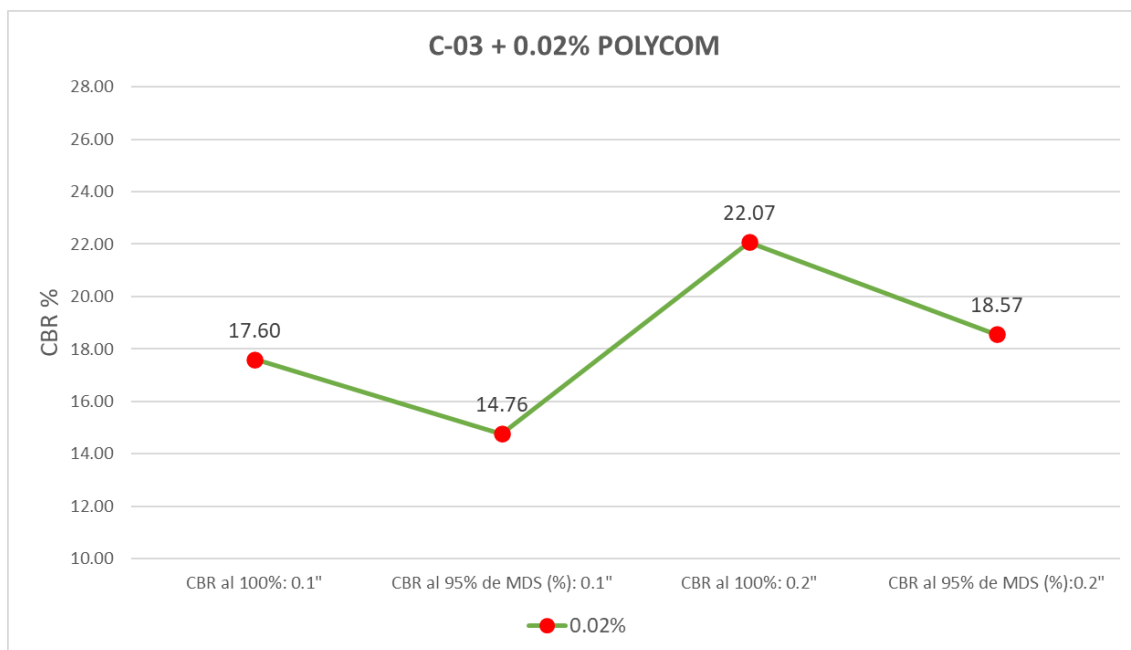


Ilustración 102: Resultados de CBR C-03 – 0.02% Polycom.

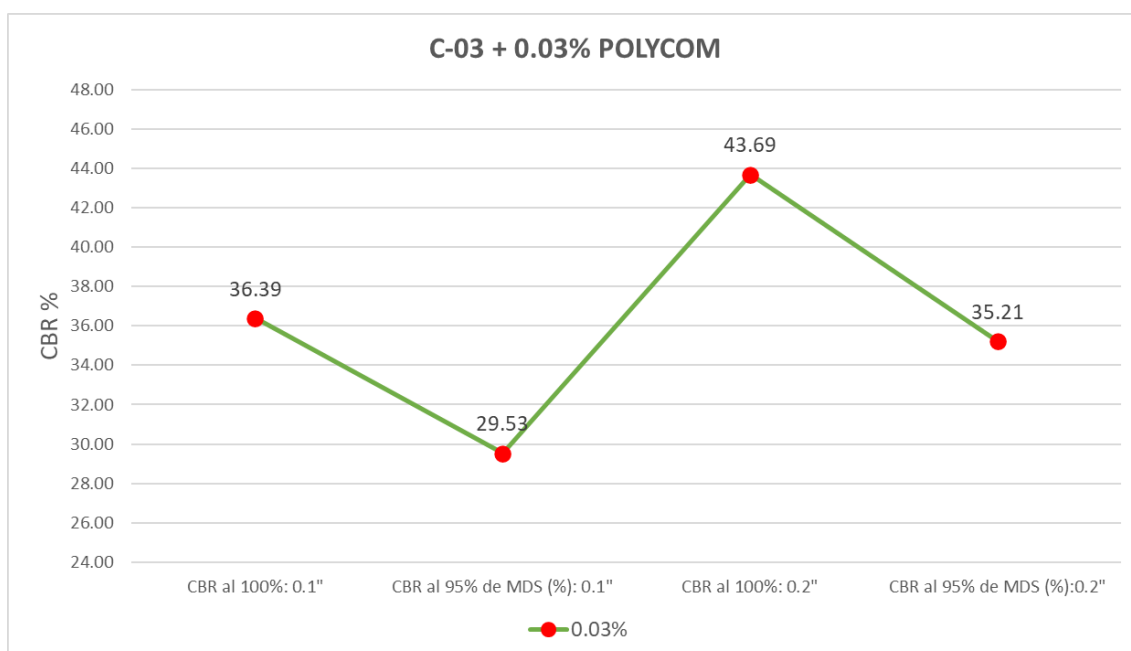


Ilustración 103: Resultados de CBR C-03 – 0.03% Polycom.

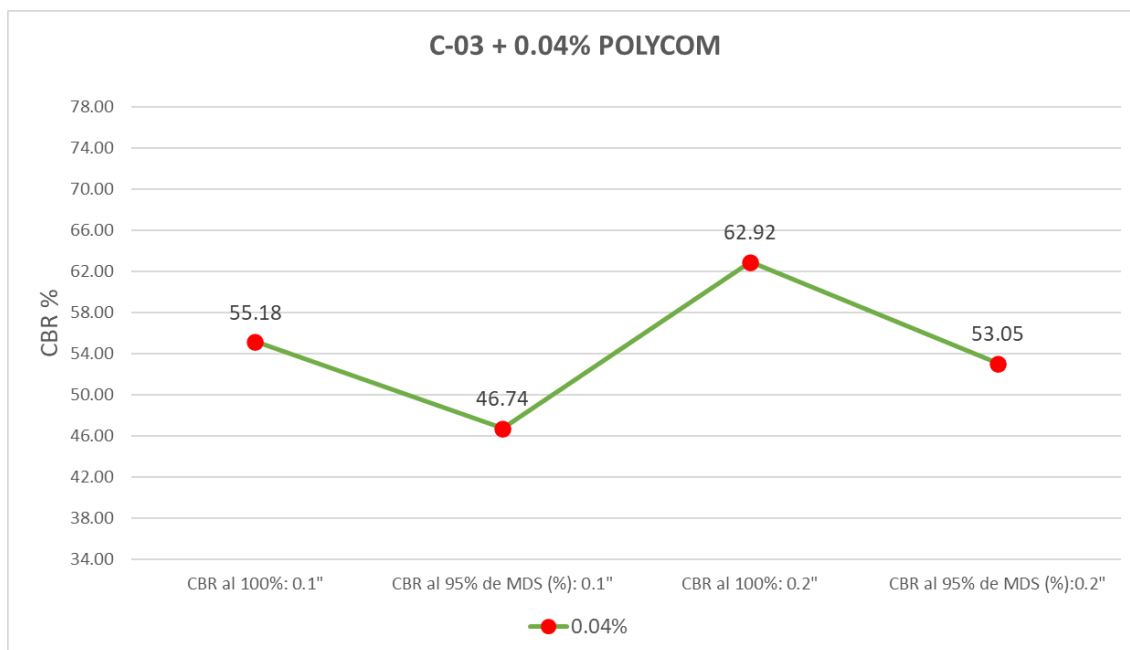


Ilustración 104: Resultados de CBR C-03 – 0.04% Polycom.

Análisis de costos

En primer lugar, se elaboró un análisis de costos unitarios para la partida de subbase para pavimentos sin el uso de agentes estabilizantes, con el propósito de establecer una base de comparación con los costos derivados de la estabilización con el aditivo Polycom.

Partida: 01.01 SUB BASE GRANULAR						
Rendimiento: 500 M3/DIA						
		Unidad: M3		Costo Unitario por m3:		32.68
Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra						
CAPATAZ	HH	1.0000	0.0160	22.33	0.36	
PEON	HH	4.0000	0.0640	20.20	1.29	
					1.65	
Materiales						
MATERIAL GRANULAR PARA SUB BASE	M3		1.0000	22.20	22.20	
AGUA PARA LA OBRA	M3		0.0460	4.87	0.22	
					22.42	
Equipos y Herramientas						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.65	0.08	
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135 HP 1	HM	0.7500	0.0120	150.83	1.81	
RETROEXCAVADORA SOBRE LLANTAS 58 HP 1.0 YD3	HM	0.3500	0.0056	127.35	0.71	
MOTONIVELADORA 145-150 HP	HM	0.5000	0.0080	206.77	1.65	
VOLQUETE 6X4 330HP 15M3	HM	0.7500	0.0120	240.70	2.89	
CAMION CISTERNA AGUA 4X2 122 HP 1500 GAL	HM	0.7500	0.0120	122.89	1.47	
					8.61	

Ilustración 105: Costos unitarios para 1 m3 de subbase sin estabilizar.

De acuerdo con la ilustración 105, el análisis de costos de la subbase granular sin estabilizar es de 32.68 soles por metro cúbico, considerando un rendimiento de 500 metros cúbicos por día.

Posteriormente, se elaboró un análisis de costos unitarios para la estabilización de suelo natural estabilizado con aditivo Polycom en porcentajes de 0.01%, 0.02%, 0.03% y 0.04%.

Partida: 01.02 MEJORAMIENTO DE SUELO NATURAL CON 0.01% DE ADITIVO POLYCOM PARA CAPA DE SUB BASE						
Rendimiento: 500 M3/DIA		Unidad: M3		Costo Unitario por m3:		58.12
Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra						
CAPATAZ	HH	1.0000	0.0160	22.33	0.36	
PEON	HH	4.0000	0.0640	20.20	1.29	
						1.65
Materiales						
AGUA PARA LA OBRA	M3		0.3000	4.87	1.46	
ADITIVO POLYCOM	KG		0.0500	1,000.00	50.00	
						51.46
Equipos y Herramientas						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.65	0.08	
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135 HP 1	HM	0.7500	0.0120	150.83	1.81	
MOTONIVELADORA 145-150 HP	HM	0.5000	0.0080	206.77	1.65	
CAMION CISTERNA AGUA 4X2 122 HP 1500 GAL	HM	0.7500	0.0120	122.89	1.47	
						5.01

Ilustración 106: Costos unitarios para 1 m3 estabilizado con 0.01% de aditivo Polycom.

De acuerdo con la ilustración 106, el análisis de costos del suelo estabilizado con 0.01% de aditivo Polycom es de 58.12 soles por metro cúbico, considerando un rendimiento de 500 metros cúbicos por día.

Partida: 01.03 MEJORAMIENTO DE SUELO NATURAL CON 0.02% DE ADITIVO POLYCOM PARA CAPA DE SUB BASE						
Rendimiento: 500 M3/DIA		Unidad: M3		Costo Unitario por m3:		108.12
Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra						
CAPATAZ	HH	1.0000	0.0160	22.33	0.36	
PEON	HH	4.0000	0.0640	20.20	1.29	
						1.65
Materiales						
AGUA PARA LA OBRA	M3		0.3000	4.87	1.46	
ADITIVO POLYCOM	KG		0.1000	1,000.00	100.00	
						101.46
Equipos y Herramientas						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.65	0.08	
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135 HP 1	HM	0.7500	0.0120	150.83	1.81	
MOTONIVELADORA 145-150 HP	HM	0.5000	0.0080	206.77	1.65	
CAMION CISTERNA AGUA 4X2 122 HP 1500 GAL	HM	0.7500	0.0120	122.89	1.47	
						5.01

Ilustración 107: Costos unitarios para 1 m3 estabilizado con 0.02% de aditivo Polycom.

De acuerdo con la ilustración 107, el análisis de costos del suelo estabilizado con 0.02% de aditivo Polycom es de 108.12 soles por metro cúbico, considerando un rendimiento de 500 metros cúbicos por día.

Partida: 01.04 MEJORAMIENTO DE SUELO NATURAL CON 0.03% DE ADITIVO POLYCOM PARA CAPA DE SUB BASE							
Rendimiento: 500 M3/DIA		Unidad: M3			Costo Unitario por m3:		158.12
Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial		
Mano de Obra							
CAPATAZ	HH	1.0000	0.0160	22.33	0.36		
PEON	HH	4.0000	0.0640	20.20	1.29		
						1.65	
Materiales							
AGUA PARA LA OBRA	M3		0.3000	4.87	1.46		
ADITIVO POLYCOM	KG		0.1500	1,000.00	150.00		
						151.46	
Equipos y Herramientas							
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.65	0.08		
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135 HP 1	HM	0.7500	0.0120	150.83	1.81		
MOTONIVELADORA 145-150 HP	HM	0.5000	0.0080	206.77	1.65		
CAMION CISTERNA AGUA 4X2 122 HP 1500 GAL	HM	0.7500	0.0120	122.89	1.47		
						5.01	

Ilustración 108: Costos unitarios para 1 m3 estabilizado con 0.03% de aditivo Polycom.

De acuerdo con la ilustración 108, el análisis de costos del suelo estabilizado con 0.03% de aditivo Polycom es de 158.12 soles por metro cúbico, considerando un rendimiento de 500 metros cúbicos por día.

Partida: 01.05 MEJORAMIENTO DE SUELO NATURAL CON 0.04% DE ADITIVO POLYCOM PARA CAPA DE SUB BASE							
Rendimiento: 500 M3/DIA		Unidad: M3			Costo Unitario por m3:		208.12
Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial		
Mano de Obra							
CAPATAZ	HH	1.0000	0.0160	22.33	0.36		
PEON	HH	4.0000	0.0640	20.20	1.29		
						1.65	
Materiales							
AGUA PARA LA OBRA	M3		0.3000	4.87	1.46		
ADITIVO POLYCOM	KG		0.2000	1,000.00	200.00		
						201.46	
Equipos y Herramientas							
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.65	0.08		
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROPULSADO 101-135 HP 1	HM	0.7500	0.0120	150.83	1.81		
MOTONIVELADORA 145-150 HP	HM	0.5000	0.0080	206.77	1.65		
CAMION CISTERNA AGUA 4X2 122 HP 1500 GAL	HM	0.7500	0.0120	122.89	1.47		
						5.01	

Ilustración 109: Costos unitarios para 1 m3 estabilizado con 0.04% de aditivo Polycom.

De acuerdo con la ilustración 109, el análisis de costos del suelo estabilizado con 0.04% de aditivo Polycom es de 208.12 soles por metro cúbico, considerando un rendimiento de 500 metros cúbicos por día.

El análisis de costos unitarios reveló que la estabilización de suelo natural con el aditivo Polycom para capa de subbase es mayor al precio por metro cúbico en comparación al material de subbase sin estabilizar. Sin embargo, este aumento no resulta significativo al considerar las notables mejoras en las propiedades mecánicas del suelo, como un incremento sustancial del CBR, lo que puede reducir los costos de mantenimiento a largo plazo optimizando el rendimiento estructural del pavimento.

Discusiones

De acuerdo con el objetivo específico de clasificar las muestras del material granular marginal por medio del sistema SUCS y AASHTO, los resultados obtenidos muestran que, en el lugar de estudio, La Victoria – Chiclayo, predominan suelos finos con presencia de arcilla y arena. En el sistema SUCS, las tres muestras analizadas se clasificaron como tipo CL; mientras que en el sistema AASHTO, las muestras C-01, C-02 y C-03 se clasificaron como A-6(6), A-7-6(7) y A-7-6(10), respectivamente. Dichos resultados son respaldados por el informe del INDECI [36], el cual señala que, durante la evaluación de los sectores de la ciudad de Chiclayo, específicamente en el sector III de La Victoria, donde se encuentra la variable estudiada, predominan suelos de tipo CL-ML con pequeñas proporciones de arena. Asimismo, los resultados de esta investigación se compararon con los obtenidos por Contoguris et al [18], que en su tesis titulada “Estabilización de suelos finos mediante el uso del polímero Polycom en subrasantes para caminos de baja transitabilidad en la ciudad de Iquitos, 2020” aplicó aditivo Polycom a muestras de suelo de tipo limo-arcillosos, los cuales se clasificaron como CL según el sistema SUCS y como A-7-6(22) de acuerdo con el sistema AASHTO. Por otro lado, Isla [14] en su tesis titulada “Influencia de la incorporación de Polycom en la estabilidad del afirmado para el mejoramiento de los pavimentos, Huanta Ayacucho– 2021” aplicó aditivo Polycom a suelos conformados por gravas pobremente gradadas con limo y arena, los cuales se clasificaron como GP-GM según el sistema SUCS y como A-1-a(0) de acuerdo con el sistema AASHTO. Los resultados de esta investigación coinciden con los de Contoguris et al [18], ya que en ambos estudios las muestras analizadas fueron suelos naturales extraídos de vías no pavimentadas, lo que explica la similitud en el tipo suelo CL (arcilla arenosa de baja plasticidad). En contraste, los resultados difieren de los obtenidos por Isla [14], cuyas muestras provenían de material de afirmado obtenido en cantera, de tipo GP-GM (gravas pobremente gradadas con limo y arena) con características más estables y mejoradas respecto a los suelos naturales. Sin embargo, a pesar de estas diferencias en el origen de las muestras, en las tres investigaciones se evidencia la presencia de material fino, principalmente arcillas y limos, lo cual influye en el comportamiento físico-mecánico del suelo. En consecuencia, la presencia de materiales finos en las muestras de suelo hace que estas no cumplan con los requerimientos normativos establecidos para su uso en capas de subbase de pavimentos; por ello, las muestras corresponden a suelos que pueden ser objeto de estabilización mediante el aditivo Polycom con el fin de mejorar sus propiedades y evaluar su viabilidad para su utilización en la subbase. La normativa española en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras

y Puentes [29], considera a los suelos arcillosos y limosos clasificados como CL, CH, ML y MH según el sistema SUCS como materiales marginales, debido a que no cumplen con los estándares exigidos por la norma. No obstante, estos pueden ser utilizados en estructuras de pavimento únicamente si sus propiedades físico-mecánicas son previamente mejoradas.

De acuerdo con el objetivo específico de determinar las propiedades físicas del material granular marginal natural y estabilizada con aditivo Polycom, se determinó que la muestra C-01 natural sin adición presentó un límite líquido promedio de 40.83% y un límite plástico de 24.27% dando como resultado un índice de plasticidad de 16.56%; con la incorporación de Polycom se evidenció una mejora progresiva, con 0.01% el límite líquido y plástico se redujo a 31.37% y 22.80% respectivamente, dando un índice de plasticidad de 8.57%; con 0.02% el límite líquido y plástico se redujo a 29.45% y 21.68% respectivamente, dando un índice de plasticidad de 7.78%; con 0.03% el límite líquido y plástico se redujo a 27.30% y 20.98% respectivamente, dando un índice de plasticidad de 6.33%; finalmente, con 0.04% el límite líquido y plástico llegó a reducirse a 24.91% y 20.11% respectivamente, dando un índice de plasticidad de 4.80%. Los resultados de esta investigación se compararon con los obtenidos por Contoguris et al [18], que en su tesis titulada “Estabilización de suelos finos mediante el uso del polímero Polycom en subrasantes para caminos de baja transitabilidad en la ciudad de Iquitos, 2020”, se observó que la muestra natural sin adición presentó un límite líquido de 40.10% y un índice de plasticidad de 20.83%; y con la incorporación de Polycom obtuvo una mejora progresiva, con 0.10 Kg/m³ el límite líquido y el índice de plasticidad se redujeron a 29.95% y 11.88% respectivamente; con 0.20 Kg/m³ el límite líquido y el índice de plasticidad se redujeron a 27.80% y 9.92% respectivamente; finalmente, con 0.30 Kg/m³ el límite líquido y el índice de plasticidad se redujeron a 26.55% y 9.53% respectivamente. Los resultados de esta investigación coinciden con los de Contoguris et al [18], ya que en ambos casos se logró reducir el límite líquido y el índice de plasticidad; por lo tanto, se confirma que la adición de aditivo Polycom mejora las propiedades físicas disminuyendo la tendencia a expandirse o contraerse por la humedad, mejorando su estabilidad volumétrica y facilitando su compactación. No obstante, es necesario realizar evaluaciones adicionales para determinar si estos beneficios se mantienen a largo plazo bajo condiciones reales de carga.

De acuerdo con el objetivo específico de determinar las propiedades mecánicas mediante los ensayos de California Bearing Ratio (CBR) y Proctor Modificado del material granular marginal natural y estabilizada con aditivo Polycom, se determinó que la muestra C-01 natural sin adición presentó una Máxima Densidad Seca (MDS) promedio de 1.803 g/cm³, un Óptimo Contenido de Humedad (OCH) de 14.574% y un CBR promedio de 5.48% para una MDS del

100%; con la incorporación de Polycom se evidenció una mejora progresiva, con 0.01% la MDS aumentó a 1.860 g/cm³, el OCH disminuyó a 13.458% y el CBR subió a 13.24%; con 0.02% la MDS alcanzó 1.901 g/cm³, el OCH bajó a 12.623% y el CBR llegó a 26.74%; con 0.03% la MDS fue de 1.943 g/cm³, el OCH de 12.164% y el CBR incrementó a 49.97%; finalmente, con 0.04% se obtuvo la mayor mejora, alcanzando una MDS de 1.971 g/cm³, un OCH de 11.171% y un CBR de 60.92%. Los resultados de esta investigación se compararon con los obtenidos por Isla [14], que en su tesis titulada “Influencia de la incorporación de Polycom en la estabilidad del afirmado para el mejoramiento de los pavimentos, Huanta Ayacucho– 2021”, se observó que la muestra natural sin adición presentó una MDS promedio de 2.000 g/cm³, un OCH de 9.37% y un CBR promedio de 60.00% para un MDS del 100%; con la adición de Polycom obtuvo una mejora progresiva, con 0.01% la MDS aumentó a 2.100 g/cm³, el OCH disminuyó a 9.13% y el CBR incrementó a 98.00%; con 0.02% la MDS aumento a 2.013 g/cm³, el OCH disminuyó a 9.00% y el CBR incrementó a 124.00%; finalmente, con 0.03% la MDS aumento a 2.030 g/cm³, el OCH disminuyó a 8.15% y el CBR incrementó a 161.00%. Por otro lado, Contoguris et al [18], en su tesis titulada “Estabilización de suelos finos mediante el uso del polímero Polycom en subrasantes para caminos de baja transitabilidad en la ciudad de Iquitos, 2020” se observó que la muestra natural sin adición presentó una MDS promedio de 1.794 g/cm³, un OCH de 15.00% y un CBR promedio de 6.05% para un MDS del 100%; con la adición de Polycom se obtuvo una mejora progresiva en el OCH y CBR, pero una disminución en la MDS; con 0.01 Kg/m³ la MDS se redujo a 1.781 g/cm³, el OCH disminuyó a 14.60% y el CBR incrementó a 12.70%; con 0.02 Kg/m³ la MDS se redujo a 1.777 g/cm³, el OCH disminuyó a 13.80% y el CBR incrementó a 24.00%; finalmente, con 0.03 Kg/m³ la MDS se redujo a 1.769 g/cm³, el OCH disminuyó a 13.50% y el CBR incrementó a 44.00%. Los resultados de esta investigación coinciden con los de Isla [14], ya que en ambos casos la adición de Polycom produjo un incremento en la MDS y el CBR, así como una reducción del OCH. Sin embargo, difieren con los reportados por Contoguris et al [18], pues, aunque también se observó un aumento del CBR y una disminución del OCH, en su estudio la MDS disminuyó, mientras que en esta investigación se incrementó, esto podría deberse por las diferencias de dosificaciones. No obstante, se debe controlar la humedad y la compactación, ya que de ello depende alcanzar la máxima densidad seca, Delgado et al [15], comenta que el aditivo Polycom requiere una adecuada dispersión y activación en el suelo para desarrollar correctamente sus propiedades aglutinantes y mejorar la resistencia mecánica.

De acuerdo con el objetivo específico de desarrollar un análisis de costos de la estabilización del material granular marginal con aditivo Polycom, se determinó que el costo unitario por

metro cúbico de la subbase sin estabilizar es de 32.68 soles; siendo este considerablemente menor que los costos por metro cúbico de la estabilización del suelo natural con dosificaciones de 0.01%, 0.02%, 0.03% y 0.04% de aditivo Polycom para capa de subbase, los cuales alcanzaron valores de 58.12, 108.12, 158.12 y 208.12 soles respectivamente. Los resultados de esta investigación se compararon con los obtenidos por Delgado et al [15], que en su tesis titulada “Aplicación del estabilizador Polycom en el material tipo afirmado para carreteras no pavimentadas de san Ignacio-Cajamarca”, se observó que la estabilización de carreteras no pavimentadas con una dosificación de 0.01% de aditivo Polycom genera un incremento en el costo en comparación con el afirmado convencional sin estabilizar, alcanzando valores de 63.86 y 17.86 soles por metro cúbico, respectivamente. Por otro lado, León et al [16], en su tesis titulada “Evaluar el Uso de Polímeros Reciclados para el Mejoramiento de Vías no Pavimentadas del Distrito de José Leonardo Ortiz - Chiclayo – 2021”, realizó una comparación económica entre dos alternativas de estabilización de subrasante, el uso de 5% de polímero PET y la estabilización convencional con cal al 15 %, los resultados mostraron que la opción con polímero PET alcanzó un costo de 85.71 soles por metro cúbico, mientras que la estabilización con cal fue considerablemente más costosa, con 233.89 soles por metro cúbico. Los resultados de esta investigación tienen una clara relación con los estudios previos mencionados. En primer lugar, coinciden con los hallazgos de Delgado et al [15], ya que en ambos casos se evidencia que estabilizar el suelo natural con aditivo Polycom genera un costo mayor en comparación con utilizar material granular sin estabilizar proveniente de cantera. Por otro lado, también se observa coincidencia con lo reportado por León et al [16], debido a que, en ambos estudios, el uso de polímeros para estabilizar el suelo natural resulta económicamente más viable que la estabilización con cal, que es uno de los métodos tradicionales de estabilización establecidos por el MTC. No obstante, es necesario profundizar en comparaciones con otros métodos de estabilización, considerando no solo el costo, sino también el nivel de mejora obtenido y el impacto ambiental que generan, Delgado et al [15], comenta que el aditivo Polycom constituye una alternativa viable, ya que reduce los costos de mantenimiento y prolonga la vida útil de las vías no pavimentadas, lo que además lo convierte en una opción ecoamigable al disminuir los gastos en futuras intervenciones o en la construcción de nuevas capas de rodadura.

Conclusiones

Se clasificó las muestras del material granular marginal por medio de los sistemas SUCS y AASHTO, determinando que el material de suelo extraído de la vía Pachacamac, perteneciente al sector III del distrito La Victoria (Chiclayo – Lambayeque), es de tipo CL (suelo arcilloso de baja plasticidad) y A-6-7 respectivamente. Siendo perteneciente a los tipos de suelos catalogados como materiales marginales para su uso en estructuras de pavimentos.

Se evaluaron las propiedades físicas del suelo natural de las muestras C-01, C-02 y C-03, obteniéndose límites líquidos de 40.83%, 43.02% y 44.97% e índices de plasticidad de 16.56%, 18.57% y 21.03%, valores que superan los máximos del MTC (25% de límite líquido y 6% de índice de plasticidad). Sin embargo, al adicionar 0.04% de Polycom, las muestras C-01 y C-02 redujeron su índice de plasticidad a 4.80% y 5.98%, cumpliendo la normativa, por otro lado, la muestra C-01 con la misma dosificación disminuyó su límite líquido a 24.91%, cumpliendo con el estándar normativo. Además, se evidenció que, al adicionar 0.04 % de Polycom, el coeficiente de permeabilidad de las muestras C-01, C-02 y C-03 disminuyó de 3.23E-04, 2.85E-04 y 2.31E-04 a 1.66E-04, 1.74E-04 y 1.28E-04, respectivamente.

Se determinó las propiedades mecánicas del suelo natural de las muestras C-01, C-02 Y C-03, arrojando valores de CBR de 5.480%, 5.020% y 4.363% respectivamente, para una MDS del 100%, siendo estos valores menores al 40% que es el estándar establecido por el MTC para capa de subbase. Sin embargo, a partir de la dosificación de 0.03% de aditivo Polycom, se obtuvieron mejores significativas en las muestras C-01, C-02 Y C-03 incrementando el CBR a 41.91%, 49.97% y 36.39% respectivamente, convirtiéndolas en aptas mecánicamente para ser usadas en capas de subbase superando el 40%, a excepción de la muestra C-03, que logró superar dicho estándar en la dosificación 0.04% alcanzando un valor de CBR de 55.18%.

El análisis económico demuestra que la estabilización de suelo natural con aditivo Polycom para la capa de subbase incrementa el costo por metro cúbico en comparación con el uso del material de cantera estabilizar. Sin embargo, esta alternativa resulta ser más económica que métodos tradicionales de estabilización, como la aplicación de cal al 15%. Aunque la inversión inicial sea mayor, la estabilización con Polycom constituye una solución viable y sostenible para la subbase de pavimentos, contribuyendo a prolongar la vida útil de las vías y disminuir la necesidad de intervenciones posteriores.

Recomendaciones

En la presente investigación se utilizó aditivo Polycom hasta una dosificación del 0.04%, se recomienda continuar evaluando este aditivo en proporciones más elevadas, con el fin de determinar si se mantiene un incremento continuo en las propiedades del material. Asimismo, se sugiere ampliar su aplicación a distintos tipos de suelos, con el objetivo de evaluar el nivel de mejora que puede proporcionar.

Se recomienda llevar a cabo ensayos o pruebas de campo en proyectos viales reales durante períodos prolongados, con el fin de monitorear el comportamiento del suelo con aditivo Polycom frente a la durabilidad y la respuesta del material frente a cargas de tráfico reales, así como evaluar la posible degradación de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo.

Se recomienda emplear el polímero Polycom como alternativa viable y económica en los proyectos de mejoramiento de calles, aprovechando el material disponible en la zona. Esto permitiría reducir la extracción de material de cantera, cuyo suministro se está volviendo escaso y costoso, contribuyendo a un uso más sostenible de los recursos locales.

Se recomienda realizar comparaciones entre la estabilización con aditivo Polycom y otros métodos de estabilización, considerando no solo los aspectos económicos, sino también el nivel de mejora de las propiedades del suelo y el impacto ambiental generado por cada alternativa.

Se recomienda implementar programas de capacitación dirigido al personal de obra sobre la correcta aplicación del aditivo Polycom. Asimismo, establecer procedimientos de control de calidad que garanticen la uniformidad de la mezcla, optimizando el desempeño del aditivo en el suelo.

Referencias

- [1] *Guide to Pavement Technology Part 4A: Granular Base and Subbase Materials*, 1.2. Sydney, 2024. Accedido: 9 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://austroads.com.au/publications/pavement/agpt04a>
- [2] A. Geremew, E. Quezon, y G. Kebede, «Influence Of Subsurface Courses Materials On Pavement Performance: A Case Study in Yebu-Agaro Road», *International Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 7, pp. 1252-1260, oct. 2016.
- [3] C. Li, J. C. Ashlock, D. J. White, y P. K. R. Vennapusa, «Mechanistic-based comparisons of stabilised base and granular surface layers of low-volume roads», *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 20, n.º 1, pp. 112-124, ene. 2019, doi: 10.1080/10298436.2017.1321417.
- [4] J. U. Canaza Canaza, «Evaluación de las propiedades de los materiales de base y sub base para pavimentos del distrito de José Luis Bustamante y Rivero», *Universidad Continental*, 2020, Accedido: 9 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/9034>
- [5] M. M. R. Ntsie, «Application of the ecorce m tool to investigate pavement premature failure on South African roads», Thesis, Central University of Technology, 2022. Accedido: 9 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://ir.cut.ac.za/handle/11462/2575>
- [6] S. Prasad, «Feasibility Study on Cement Treated Base and Sub Base layers of Service Roads - A Case Study on Khed Sinnar NH 50 Project», vol. 03, n.º 09.
- [7] D. R. Noa Mayta, «Catalizadores del suero de leche para la estabilización del suelo limoso del Psj. Las Orquídeas, San Sebastián, Cusco, 2021», *Repositorio Institucional - UCV*, 2022, Accedido: 9 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91317>
- [8] T. N. D. R. Ticlla Ríos, «Evaluación de las características geotécnicas del suelo de las principales canteras para afirmado de carreteras del distrito de Chota.», jul. 2021, Accedido: 9 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14142/162>
- [9] S. Srikanth Reddy y A. C. S. V. Prasad, «Quarry dust as an auxiliary additive to lime stabilized expansive soil in subbase», *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 7, n.º 6, pp. 1015-1018, 2019.

- [10] M. M. Martínez Machado, «Mejoramiento de la subrasante mediante la adición del Polímero Polycom, en la Av. Unión de Manchay. Lima -2019», *Repositorio Institucional - UCV*, 2020, Accedido: 9 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/65430>
- [11] «Guía Metodológica para la Identificación, Formulación y Evaluación de Proyectos de Infraestructura Vial de Costa Rica | Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo». Accedido: 25 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/node/1439>
- [12] P. Newman *et al.*, *Reducing the environmental impact of road construction*. Australia: Sustainable Built Environment National Research Centre (SBEnc), 2012. Accedido: 9 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.sbenrc.com.au/wp-content/uploads/2013/11/SBEnc-Project-1.3-Briefing-Report-Reducing-energy-intensity-of-road-construction.pdf>
- [13] J. Santillán Chávarry y F. P. Véliz Arévalo, «Influencia del polímero POLYCOM en la capacidad portante de la base para la carretera de Acos Vinchos – Colpa en Ayacucho», 2024, Accedido: 21 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/9479108>
- [14] W. G. Isla Cifuentes, «Influencia de la incorporación de Polycom en la estabilidad del afirmado para el mejoramiento de los pavimentos, Huanta – Ayacucho – 2021», *Repositorio Institucional - UCV*, 2021, Accedido: 24 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/85636>
- [15] C. C. Delgado Bravo y P. A. Renilla Lau, «Aplicación del estabilizador polycom en el material tipo afirmado para carreteras no pavimentadas de San Ignacio-Cajamarca.», *Repositorio Institucional - USS*, 2024, Accedido: 14 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/13672>
- [16] J. León Burga y D. J. C. Marín Vásquez, «Evaluar el uso de polímeros reciclados para el mejoramiento de vías no pavimentadas del distrito de José Leonardo Ortiz - Chiclayo - 2021», *Repositorio Institucional - UCV*, 2021, Accedido: 14 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/69544>
- [17] J. C. Poma Loayza, «Aplicación del Polímero Poliacrilamida (Pam) en la Estabilización del Suelo en las Carreteras Vecinales de la Provincia de Angaraes – Huancavelica.», *Universidad Peruana Los Andes*, may 2022, Accedido: 21 de

- septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/4054>
- [18] K. M. Contoguris Poma y M. A. Pasmíño Shahuano, «Estabilización de suelos finos mediante el uso del polímero polycom en subrasantes para caminos de baja transitabilidad en la ciudad de Iquitos, 2020», feb. 2022, Accedido: 24 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/1782>
- [19] S. J. Manuyama Solsol y A. M. Najar Tangoa, «Estabilización química de suelos areno limo arcillosos en selva baja. Aplicación de aditivo terrasil para mejoramiento de material de base en vía de acceso “Villa Milagritos” - San Juan Bautista, Perú, 2022”», *Universidad Científica del Perú - UCP*, ago. 2022, Accedido: 6 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/1978>
- [20] D. A. Balbuena Flores y E. Y. Clavo Rimarachin, «Estabilización de bases granulares con cal y con cemento portland para mejorar las propiedades físico mecánicas en carreteras», *Universidad Ricardo Palma*, 2022, Accedido: 6 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/6326>
- [21] K. P. Huamán Mejía y M. Á. Troncos Abendaño, «Influencia de la adición de concha de abanico en el afirmado proveniente de la cantera la obrilla para estabilización de subbase de pavimentos, castilla, Piura.», *Universidad Privada Antenor Orrego*, 2021, Accedido: 6 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/7674>
- [22] S. Hazim, T. Chopra, R. Pathak, y A. Kumar, «Laboratory Investigation and Field Performance Evaluation of Chemically Stabilized Cement Treated Subbase», *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 68, n.º 3, pp. 999-1012, 2024, doi: 10.3311/PPci.23136.
- [23] I. Zambrano Mesa, E. Tejada Piusseaut, A. A. Aaenlle, I. Zambrano Mesa, E. Tejada Piusseaut, y A. A. Aaenlle, «Materiales granulares mejorados con emulsión asfáltica catiónica para subbases de pavimentos», *Infraestructura Vial*, vol. 22, n.º 39, pp. 29-42, jun. 2020, doi: 10.15517/iv.v22i39.41574.
- [24] M. I. Z. Meza y E. T. Piusseaut, «Materiales granulares tratados con emulsión asfáltica para su empleo en bases o subbases de pavimentos flexibles.», *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 13, n.º 3, pp. 1-11, 2019.

- [25] S. K. Pradhan y G. Biswal, «Utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) as granular sub-base material in road construction», *Materials Today: Proceedings*, vol. 60, pp. 288-293, ene. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.564.
- [26] «Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras», Perú, jul. 2015. Accedido: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/docs/normas/normasv/2015/RD003-2015/Pautas_Pavimentos.pdf
- [27] F. Montejo, *Ingeniería de pavimentos para carreteras*, 2.^a ed. Bogotá: Agora editores, 2002. Accedido: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca
- [28] H. A. R. Quintana y F. R. Lizcano, «COMPORTAMIENTO RESILIENTE DE MATERIALES GRANULARES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES: ESTADO DEL CONOCIMIENTO», n.º 11.
- [29] Ó. D. Cáceres López y A. D. Rodríguez Cifuentes, «Estimación de la resistencia monotónica en materiales granulares marginales como alternativa para la construcción de vías», feb. 2021, Accedido: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3731753>
- [30] *Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Lima – Perú, 2014. Accedido: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/1p9kERBPq09HX-a5nb_EbY_sMKq_paKDM/view?usp=drive_link&usp=embed_facebook
- [31] Ministerio de Transporte y comunicaciones, *Manual de Ensayos de Materiales – Norma MTC E101*. Accedido: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/40583979/MANUAL_DE_ENSAYO_DE_MATERIALES
- [32] Ministerio de Transporte y comunicaciones, *Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)*. Lima - Perú, 2013. Accedido: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Técnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-01-13%20Especificaciones%20Técnicas%20Generales%20para%20Construcci%C3%99)

B3n%20-%20EG-2013%20-%20(Versi%C3%B3n%20Revisada%20-%20JULIO%202013).pdf

- [33] M. Á. Cristóbal Calderón, «Estabilización iónica de suelos con terrasil en los contratos de mantenimiento y conservación vial», 2015.
- [34] C. G. Aguilar Castañeda, «Revisión del estado del arte del uso de polímeros en la estabilización de suelos».
- [35] M. B. Suárez, «Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil», Accedido: 14 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil
- [36] *Plan de prevención ante desastres: usos del suelo y medidas de mitigación ciudad de Chiclayo*. Accedido: 26 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/3093>

Anexos

CONFORMIDAD DE ASESOR
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Chiclayo, 27 de Octubre del 2025.

Señores

López Carranza, Atilio Rubén
Castillo Velarde, Roberto Carlos
Escuela Profesional de Ingeniería Civil - USAT
Presente.

Le expreso mi saludo y en mi condición de asesor doy mi **CONFORMIDAD** a la tesis titulada:
“Mejoramiento del material granular marginal con aditivo Polycom para la subbase de pavimentos”.

presentado por el estudiante **Baldárrago Gastulo Miguel Eduardo** 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.



RUBÉN ELI ESTRADA CHUNGA
INGENIERO CIVIL
REG. CIP. 254291

Ing. Rubén Eli Estrada Chunga
Docente Asesor

LINK DE DRIVE- ENSAYOS DE LABORATORIO

<https://drive.google.com/drive/folders/1rT92O-7m-tFubTZ6egy0UAzk-SpXu7FY?usp=sharing>



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 017-2025-II

FECHA: 28 de Octubre 2025

VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ESTUDIANTE: Baldárrago Gastulo, Miguel Eduardo

TITULO DE LA TESIS: Mejoramiento del material granular marginal con aditivo Polycorn para la subbase de pavimentos.

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
- Permeabilidad
- Equivalente de arena
- Proctor Modificado
- CBR de laboratorio

Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.

Observación: Adjunto



Henry Rivadeneyra Oblitas
 Responsable de Lab Ing. Civil



Anexo 03. Visita a la zona de estudio.



Anexo 04. Visita a la zona de estudio.



Anexo 05. Extracción de Calicata 01.



Anexo 06. Extracción de Calicata 02.



Anexo 07. Extracción de Calicata 03.



Anexo 08. Peso de las muestras evaluadas.



Anexo 09. Muestras húmedas.



Anexo 10.: Muestras secadas en el horno.



Anexo 11. Muestras lavadas.



Anexo 12. Juego de tamices



Anexo 13.: Determinación del peso retenido en cada tamiz.



Anexo 14. Preparación de las muestras a evaluar.



Anexo 15. Uso de la copa de Casagrande.



Anexo 16. Contenido de humedad de las muestras.



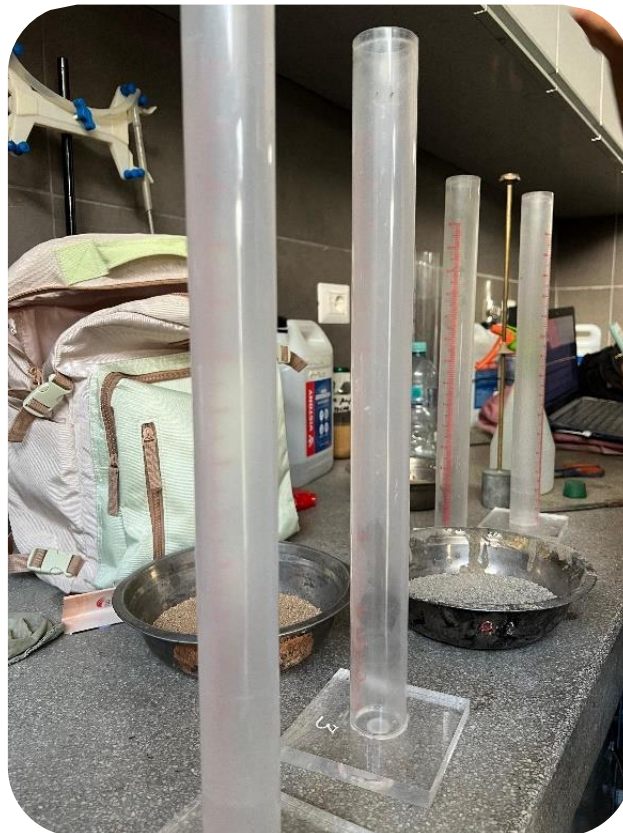
Anexo 17. Ejecución del ensayo.



Anexo 18. Muestras secas.



Anexo 19. Preparación de las muestras.



Anexo 20. Preparación de las probetas para colocar las muestras.



Anexo 21. Reposo de las muestras en las probetas.



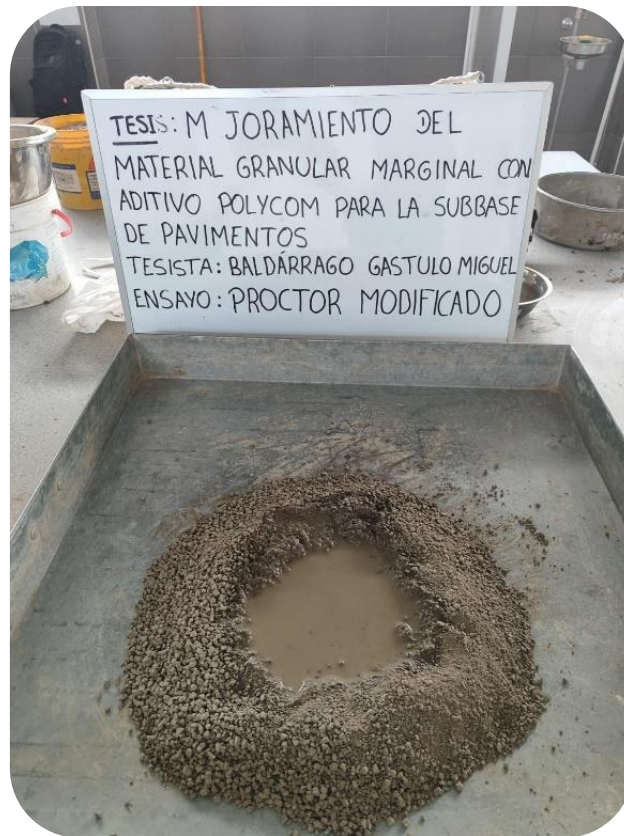
Anexo 22. Preparación de la muestra en el permeámetro.



Anexo 23. Aplicación de un nivel constante de carga hidráulica.



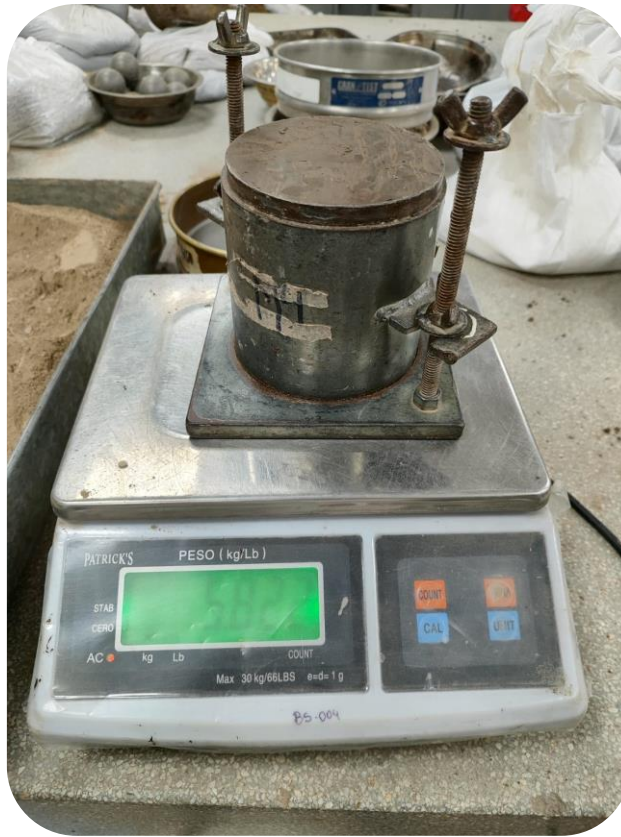
Anexo 24.: Registro del volumen de agua.



Anexo 25. Saturación de las muestras.



Anexo 26. Penetración en 5 capas.



Anexo 27. Peso de la muestra penetrada + molde.



Anexo 28. Penetración 5 capas.



Anexo 29. Medición de expansión.



Anexo 30. Moldes compactados en saturación 4 días.



Anexo 31. Peso de la muestra + molde pasando los 4 días.



Anexo 32. Penetración.



Anexo 33. Aditivo Polycom.



Anexo 34. Aditivo Polycom.



Anexo 37. Ejecución del ensayo experimental.



Anexo 38. Preparación de la muestra con aditivo Polycom



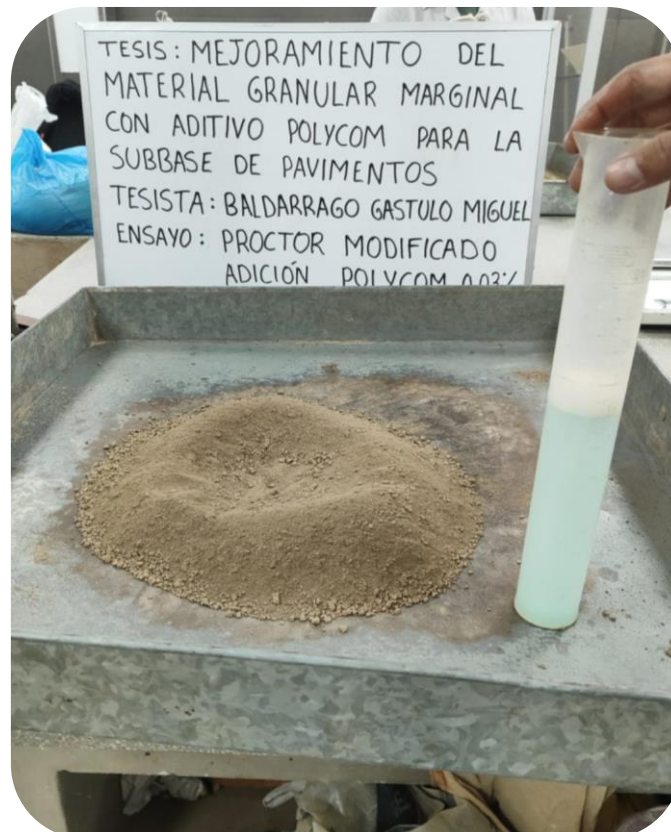
Anexo 39. Preparación de la muestra con aditivo Polycom en el permeámetro.



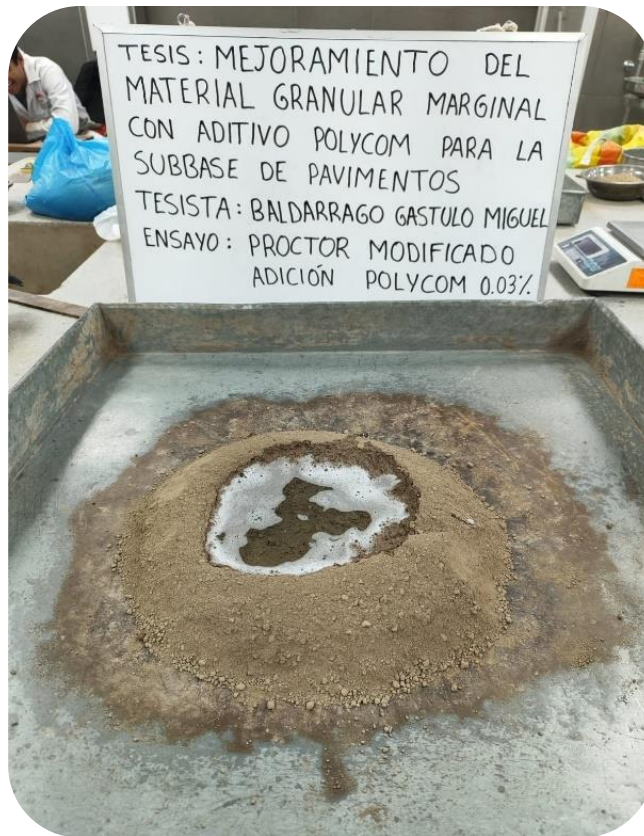
Anexo 40. Registro del volumen de agua de la muestra con aditivo Polycom.



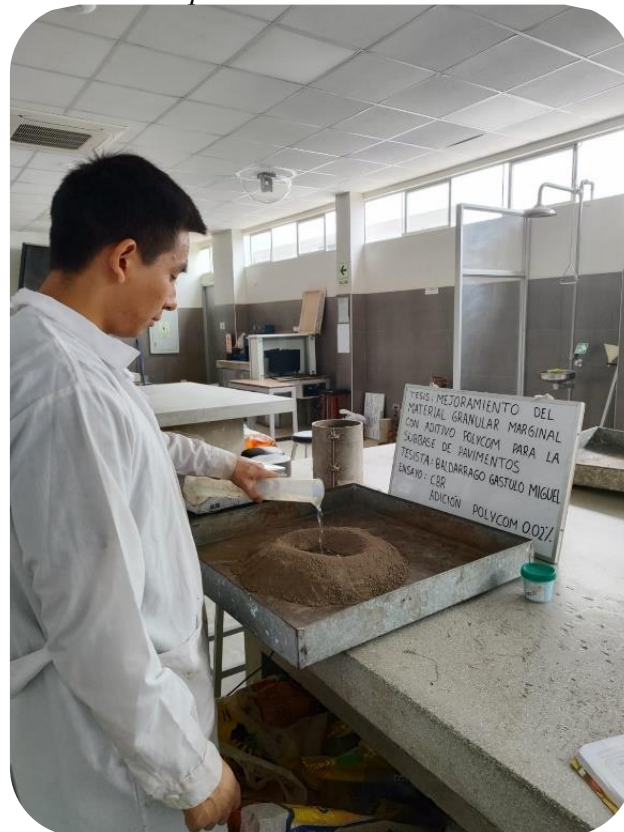
Anexo 41. Adición de aditivo Polycom + agua.



Anexo 42. Solución agua con aditivo Polycom.



Anexo 43. Preparación de la muestra + Adición.



Anexo 44. Adición aditivo Polycom a la muestra.



Anexo 45. Penetración 5 capas muestras con aditivo Polycom.



Anexo 46. Registro de penetración muestra con aditivo Polycom.

SECTORES	ASENTAMIENTOS HUMANOS	TIPOS DE SUELO PREDOMINANTES	ESTATIGRAFIA	EXPANSION DEL SUELO	CAPACIDAD PORTANTE	NIVEL FREATICO
I	Urb. El Ingeniero I y II, Miraflores, Ciudad del Chofer, 03 de Octubre, Quiñones, Remigio Silva, Las Brisas, La Purísima, Residencial A. B. Leguía y Cerropon, Cruz de Chalpon, Rosa Nelida Castillo, Sto. Toribio de Mogrovejo, 4 de Noviembre, Simón Bolívar, Vista Alegre, Nueva Esperanza, Cruz de la Esperanza, Sta. Lila, F. Belaúnde, J. Basadre, Los Mochicas, Ricardo Palma, Sta. Elena, José Quiñonez, José Balta, José Olaya, Elías Aguirre, José Obrero, Cruz del Perdón, Cerro Pololó, J. Carlos Mariategui, Amp. Cruz del Perdón, Los Olivos, Parte de 9 de Octubre, 19 de Setiembre, San Sebastian, Virgen de la Paz, San Julio, Sta. Alejandrina, Santuario, Progresiva Cerropón, La Molina Alta, Las Mercedes, La Colina, Vista Hermosa, AVIANTEL, La Concordia, La Plaza, La Pradera, Los Cedros de la Pradera, Virgen de Fátima, san Jerónimo, Los Jardines y Sagrado Corazón de Jesús.	Arcillas del tipo (CL y CH), Arenas (SC, SM y SP) y Gravas (GC y GP).	Media a Semiduro: 2.0 m. < C-3 < 4.5 Rígido: 4.5 m. < C-5 < 15.0 m.	Suelos superficiales de expansión baja a media, con cambio de volumen pequeño.	1.0 - 2.0 Kg./cm. ²	2.0 a 7.0 m.
II	Comprende parte del sector Este de la ciudad: Aeropuerto, Planta de Tratamiento de Agua Potable, AA.HH. López Albujar, Micaela Bastidas, San Antonio, Nuevo Mundo, Atusparias, Francisco Cabrera, Las Mercedes, César Vallejo, Amp. Campodónico, Progresiva UCHOFEN, Sagrado Corazón de Jesús, San Guillermo, Sto. Toribio, El Obrero, Amp. San Antonio, Puente Blanco, Jorge Chávez, Fanny Abanto Calle, parte del A.H. Suazo.	Arcillas del tipo (CL y CH), Arenas (SC, SM y SP) y Gravas (GC y CP).	Media a Semiduro: 6.0 m. < C-3 < 8.0 Rígido: 8.0 m. < C-5 < 13.0 m.	Suelos finos de expansión baja a media, con cambio de volumen pequeño a moderado.	1.0 - 2.0 Kg./cm. ²	2.0 a 3.5 m.
III	Ramiro Priale, José Santos Chocano, UPIS 1° de Mayo, María Parado de Bellido, Mercado Moshoqueque, Area Central, AA.HH. Santa Rosa, Diego Ferré, Urb. La Primavera, Patazca, Bancarios, La Florida, Hipodromo y el 3er Sector del distrito, Stein, Miraflores, Indoamérica, El Salitral, 6to Sector Urrunaga, Villa Hermosa, La Explanada, Milagro de Dios, Villa El Sol, San Lorenzo, Sta. Ana, Nuevo San Lorenzo, Casablanca, San José Obrero, Garcés, Latina, Artesanos, 12 de Octubre, F. Bolognesi, San Carlos, Las Palmeras, Fundo Sta. María, San Isidro, Miraflores, Amp. T. Amarú, Luis Heysen, La Primavera, San Luis, Porvenir, Cois, San Juan, Salazar, Chiclayo, El Molino, Las Américas, Señor de Los Milagros, San Nicolás, Boggiano, San Francisco, Campodónico, Raymondí, 3° Sector de La Victoria, San Martín, Zamora, Diego Ferré, Mesones Muroy y Ciro Alegría.	Arcillas de media y alta plasticidad del tipo (CL, CH, CL-ML) y en pequeñas proporciones arenas del tipo (SC, SM y SP).	Blando a Medio: 2.0 m. < C-2 < 5.0 m. Semiduro: 3.0 m. < C-4 < 8.0 m. Duro a Rígido: 6.0 m. < C-5 < 13.0 m.	Suelos fino de expansión media a alta, con cambio de volumen moderado.	0.5 - 1.0 Kg./cm. ²	1.5 a 2.3 m.
IV	Urb. Santa Victoria, Federico Villareal, Cafè Perú, Santa Angela, Parque Zonal, C.E. Salaverry, Sta. Victoria, San Eduardo, Carlos Cabrejos Falla, Ana de los Angeles, Villa El Salvador, Sta. Angela, Nazareno, H. Unanue, Divino Maestro, Corazón de Jesús, Carmen Angélica, Los Jardines de Santa Rosa, La Florida, El Amauta, Los Jazmines, Los Pinos de Plata, V. R. Haya de la Torre, Sta. Margarita y parte del A.H. La Victoria.	Arcillas de media y alta plasticidad del tipo (CL, CH, CL-ML) y en pequeñas proporciones arenas del tipo (SC, SM y SP).	Muy Blando a Medio: 3.5 m. < C-1 < 4.5 m. Semiduro: 4.5 m. < C-4 < 5.5 m. Duro a Rígido: 5.5 m. < C-5 < 10.0 m.	Suelos fino de expansibilidad alta a extremadamente alta, con cambio de volumen moderado a severo.	0.0 - 0.5 Kg./cm. ²	1.0 a 2.0 m.

Anexo 47. Clasificación de suelos según INDECI [36].



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ITEM	DESCRIPCION	U.M.
1	POLIMERO EN POLVO SECO SOLUBLE EN AGUA (WDPP) X 2 KG	BOTELLA

I. DESCRIPCION

1.1. Características técnicas:

- ✓ Aplicable en suelos de muy baja calidad.
- ✓ Presenta un rendimiento de 50 m³ de suelo a tratar por cada botella de 2 kilos c/u.
- ✓ Aplicable para sub-rasantes, sub-base y base granular como también para caminos en afirmado
- ✓ Tiene un rango de usos para carreteras de penetración de bajo volumen de tránsito, carreteras nacionales de tráfico intenso, accesos de tránsito pesado y calles y avenidas
- ✓ Mejora los subsuelos de baja resistencia <4 CBR
- ✓ Incrementa la densidad del suelo.
- ✓ Incrementa la capacidad de soporte del suelo.
- ✓ El suelo se densifica a un menor contenido de humedad.
- ✓ Incrementa la resistencia al agua
- ✓ Aumento de CBR.

1.2. Comportamiento

- ✓ Ligante Aniónico que produce una alta densidad y que se mantiene estable a través de ciclos húmedos y secos
- ✓ Reducción de la deterioración de la plataforma y la base de rodadura de los caminos.

1.3. Consistencia

- ✓ Polvo granulado concentrado.

1.4. Rango

- ✓ Rango de tipos de suelos naturales desde suelos compuestos por gravas limpias hasta suelos orgánicos altamente expansivos, buen desempeño con diferentes rangos de plasticidad. Suelos de tipo A1, A2, A3, A4, A5, A6 y A7

1.5. Características Ambientales

- ✓ Ecológico
- ✓ No tóxico
- ✓ Biodegradable.
- ✓ No inflamable.
- ✓ Es químicamente inerte
- ✓ Producto no peligroso

1.6. Propiedades a 25 °C

- ✓ PH = 6.9 (5000 : 1) no es ácido ni alcalino
- ✓ Gravedad Específica = 0.8
- ✓ Olor = Olor Leve

II. VENTAJAS

- ✓ La estabilización con PolyCom ofrece mayor resistencia (mayor CBR),
- ✓ Una mayor resistencia y flexibilidad - Alto grado de resistencia al agua - saneamiento y/o remediación de suelos dispersivos y arcillas reactivas - mejora la manejabilidad de los suelos.
- ✓ El material tratado puede ser almacenado por periodos prolongados.
- ✓ Ninguna planta o equipo especial es requerido.
- ✓ La instalación del producto es hecha competentemente con equipos estandarizados de estabilización.
- ✓ Aumenta la densidad del terreno, evitando los vacíos dentro de la estructura estabilizada.
- ✓ Buen comportamiento estructural con los ligantes si se plantean recubrimientos con capas asfálticas.
- ✓ Mínimo costo de transporte
- ✓ Es reciclable una vez que la vida útil de la carretera estabilizada termina.
- ✓ 30%-50% ahorro de agua
- ✓ No existe agrietamiento por fatiga ni por ahuellamiento en la subrasante.

III. NORMATIVIDAD

- ✓ Cumple con las Normas Técnicas MTC E1109-2004 acerca de Estabilizadores Químicos de suelos.
- ✓ Presenta Certificado de no toxicidad del producto.
- ✓ Aumento de CBR que se logrará con el producto, se puede comprobar en Obra o laboratorio.
- ✓ El costo de traslado de los bienes generalmente son asumidos íntegramente por el proveedor a Almacén de Obra.
- ✓ Los bienes generalmente se entregan en el plazo de 02 día calendario después de obtener una Orden de Compra.

IV. FORMA DE ENTREGA:

La entrega de aditivo estabilizador de suelo es en Botellas de 2kg cada una, en buenas condiciones aptas para la realización de las partidas en la que se empleará.

El producto no presentará fallas de fabricación, en caso contrario, este será reemplazado, sin perjuicio o gastos adicionales al proyecto.

Lugar de Entrega: Donde el Cliente lo solicite.

FINALIDAD DE LA COMPRA: La adquisición de los bienes, son para cumplir con las metas propuestas por el cliente.

¿Requiere más información? Comuníquese a cualquiera de nuestros teléfonos

Servicio al Cliente Nacional

 **AUSTLATIN Perú**

'Paving the way to Latin America'

Edgar Montesinos

991 302 559 RPM #991 302 559 RPC 961 765 623

emaustlatin@live.com.au

Doylith Cauper

961 508 737 RPM #825271

doylith_cj@hotmail.com

Soporte Técnico y Asesoría

 **POLYMPERÚ**
ASESORÍA Y SERVICIOS

Gonzalo Gutiérrez Sandoval

Gerente General 51 1 3370051 990 263 614

ggutierrez@polymperu.com

gongutsa@hotmail.com

Daniel Montesinos Salazar

Gerente Administrativo 271 5220 999 600 685 / 988 450 342

dmontesinos@polymperu.com

dmontesinos1@hotmail.com



Chiclayo, 13 de marzo de 2025

CARTA N° 065-2025-USAT-EIC

Señor(a)

Ing. Edwin Gonzalo Vasquez Sánchez

Alcalde

MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE LA VICTORIA

Presente. -

De mi especial consideración:

Es grato dirigirme a usted para expresarle mis saludos cordiales a nombre de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo y desearle éxitos en su gestión al frente de su representada.

Asimismo, por este medio presentarle al estudiante **MIGUEL EDUARDO BALDARRAGO GASTULO**, identificado con **DNI N° 71593286** y **código universitario 201TD99167** del Programa de Estudios de **INGENIERÍA CIVIL**; quien se encuentra desarrollando su tesis denominada: **MEJORAMIENTO DEL MATERIAL GRANULAR MARGINAL CON ADITIVO POLYCOM PARA LA SUBBASE DE PAVIMENTOS**, para lo cual le solicito tenga a bien otorgarle las facilidades, permisos y apoyo pertinentes en acceder a la información necesaria; tomando en cuenta los protocolos de bioseguridad en prevención del COVID-19, decretado por el gobierno.

Agradeciendo de antemano su atención a la presente, me despido expresando mi especial consideración y estima.

Atentamente,



Maximiliano Arroyo Ulloa
Dr. Ing. Maximiliano Arroyo Ulloa
Decano (e) de la Facultad de Ingeniería



Municipalidad Distrital de
LA VICTORIA

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

La Victoria, 25 de marzo del 2025

Carta N.º 062-2025-MDLV/URH

Dr. Ing. Maximiliano Arroyo Ulloa
Decano(e) de la Facultad de Ingeniería
USAT

ASUNTO: ACEPTACION PARA REALIZAR TRABAJO DE INVESTIGACION

REF. : CARTA N.º 065-2025-USAT-EICA

Tengo el agrado de dirigirme a Usted, para saludarlo en nombre de la Unidad de Recursos Humanos de la Municipalidad Distrital de La Victoria que represento y a la vez manifestarle lo siguiente:

Que, el estudiante **BALDARRAGO GASTULO, Miguel Eduardo**, alumno de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Institución Universitaria que Usted representa, ha sido admitido para realizar su proyecto de investigación denominado "Mejoramiento del material granular marginal con aditivo polycom para la subbase de pavimentos", en la Gerencia de Desarrollo Territorial e Infraestructura de la Municipalidad Distrital de La Victoria.

Aprovecho la oportunidad para expresarle mi consideración y estima personal.

Atentamente,



MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE LA VICTORIA

Abg. Sara Cecilia Villegas Semaqui
JEFE DE RECURSOS HUMANOS

c.c. Archivo.

CIUDAD DE PROGRESO

Av. Unión N° 1696, La Victoria - Chiclayo

gob.pe/munilavictoria-chiclayo munilavictoriachiclayo imagenmunilavictoria@gmail.com

Anexo 52. Carta de aceptación para la extracción de las muestras de suelo.