



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL CBR CON LA APLICACIÓN DE POLVO DE CAUCHO
RECICLADO EN MATERIAL DE SUBBASE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTORES: RONALDO MISAEL ARMIJOS MALDONADO

DANIEL FRANCISCO VERDUGO PAVON

TUTOR: ING. ANGELA ROCÍO VÁSQUEZ BRAVO, MSc.

Cuenca - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Ronaldo Misael Armijos Maldonado con documento de identificación N° 1105355935 y Daniel Francisco Verdugo Pavon con documento de identificación N° 0107270571; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 09 de julio del 2025

Atentamente,



Ronaldo Misael Armijos Maldonado

1105355935



Daniel Francisco Verdugo Pavon

0107270571

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Ronaldo Misael Armijos Maldonado con documento de identificación N° 1105355935 y Daniel Francisco Verdugo Pavon con documento de identificación N° 0107270571, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Evaluación del CBR con la aplicación de polvo de caucho reciclado en material de subbase”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 09 de julio del 2025

Atentamente,



Ronaldo Misael Armijos Maldonado

1105355935



Daniel Francisco Verdugo Pavon

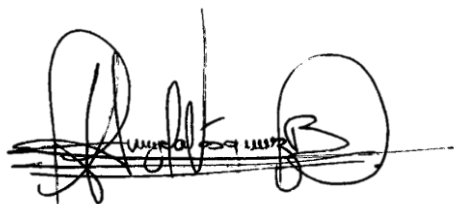
0107270571

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Angela Rocío Vásquez Bravo con documento de identificación N° 0106991482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DEL CBR CON LA APLICACIÓN DE POLVO DE CAUCHO RECICLADO EN MATERIAL DE SUBBASE, realizado por Ronaldo Misael Armijos Maldonado con documento de identificación N° 1105355935 y por Daniel Francisco Verdugo Pavon con documento de identificación N° 0107270571, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 09 de julio del 2025

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Angela Rocío Vásquez Bravo', written over a horizontal line.

Angela Rocío Vásquez Bravo

0106991482

1. Dedicatoria y Agradecimiento

Dedico este trabajo con profunda gratitud a todas las personas que han formado parte de este camino universitario, una etapa de aprendizaje, esfuerzo y crecimiento. En especial, a mis padres, Lorena Maldonado y Luis Armijos, por su amor incondicional y constante apoyo, y a mi amada abuelita Elvia Montaña, cuyo cariño ha sido siempre un consuelo en los momentos difíciles. A mis familiares y amistades cercanas, gracias por estar presentes, brindar aliento y acompañarme con afecto sincero.

Agradezco también a mis profesores y mentores, quienes me guiaron con dedicación y confianza, y sembraron en mí la pasión por aprender y superarme. Este proyecto marca el cierre de una etapa soñada y el inicio de nuevos desafíos con metas aún más grandes.

Mi agradecimiento especial a quienes hicieron posible esta investigación. A mis seres queridos, a mi compañero de tesis, y a la Ingeniera Ángela Rocío Vásquez Bravo, tutora de este trabajo, por su acompañamiento constante. Gracias a todos los que dejaron huella en este proceso que siempre recordaré con aprecio.

Atentamente

Ronaldo Misael Armijos Maldonado

A Dios que siempre supo guiarme, a mis padres y mis segundos padres, mis abuelos que me acompañaron y apoyaron en todo este proceso de la vida universitaria, a mi Dugis que estuvo a mi lado tantas noches en vela, a mi compañero de tesis que siempre se puso la "10" y a ella, que me acompañó desde el inicio y durante lo más fuerte, pero no supimos llegar al final.

A nuestros profesores que siempre estuvieron dispuestos a ayudarnos, a nuestros compañeros que siempre nos apoyamos entre todos y a nuestra tutora Ing. Rocío Vásquez que siempre se preocupó por nosotros y apoyo en todo este proceso.

Atentamente

Daniel Francisco Verdugo Pavon

2. Resumen

Por medio de la presente investigación se propone evaluar el comportamiento tanto físico como mecánico de una subbase granular siendo modificada con la adición de polvo de caucho reciclado en diferentes proporciones (10%, 15% y 20%), para así compararlo frente a una subbase convencional. La investigación se basó en la caracterización del material mediante ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado y ensayo CBR, bajo la normativa ecuatoriana vigente MOP-001-F 2002.

El objetivo de la investigación se centra en analizar como varía la densidad, la compactación y la capacidad portante del material al incorporar un residuo de material reciclado, en este caso el caucho, contribuyendo así a la búsqueda de soluciones que sean sostenibles en el área de la ingeniería civil con enfoque en la ingeniería vial. Esto permitirá establecer comparaciones entre las diferentes dosificaciones, aportando criterios para futuras investigaciones sobre implementación de este material.

Palabras clave: Subbase, polvo de caucho reciclado, soluciones sostenibles

3. Abstract

Through this research, it is proposed to evaluate the physical and mechanical behavior of a granular subbase modified by the addition of recycled rubber powder in varying proportions (10%, 15%, and 20%), to compare it with a conventional subbase.

The study is based on the characterization of the material through granulometric analysis, Atterberg limits, modified Proctor compaction test, and CBR test, all conducted in accordance with the current Ecuadorian standard MOP-001-F 2002.

The objective of the research focuses on analyzing how the density, compaction, and bearing capacity of the material vary when incorporating a recycled waste material, in this case, rubber, thus contributing to the pursuit of sustainable solutions in the field of civil engineering, particularly in road engineering. This will allow for comparisons between different dosages and provide criteria for future research on the implementation of this material.

Keywords: Subbase, recycled rubber powder, sustainable solutions

4. Índice General

1.	Dedicatoria y Agradecimiento	5
2.	Resumen	7
3.	Abstract	8
4.	Índice General	9
5.	Índice de Ilustraciones	11
6.	Índice de Tablas	13
7.	Introducción	15
8.	Problema	16
9.	Antecedentes	17
	9.1. Importancia y Alcances.....	19
	9.2. Delimitación.....	20
10.	Justificación	21
11.	Objetivos	22
	11.1. Objetivo General	22
	11.2. Objetivos Específicos	22
12.	Marco Conceptual	22
	12.1. Polvo de Caucho Reciclado	23
	12.2. Subbase Granular	25
	12.2.1. Normativa MOP - 001-F 2002.....	25
	12.2.2. Clasificación de los tipos de subbase.....	26
	12.3. Capacidad Portante	26

	10
12.4. Índice de Plasticidad y Límite Líquido	28
12.4.1. Método Índice de Plasticidad (IP)	28
12.4.2. Límite Líquido (LL)	29
12.5. Ensayo CBR (California Bearing Ratio)	30
12.5.1. Procedimiento de Cálculo	30
12.6. Economía Circular	32
12.7. Coeficiente Estructural.....	33
12.8. Granulometría	33
12.9. Sostenibilidad en la Construcción	35
12.10. Costo-Beneficio en Infraestructura Vial.....	35
13. Metodología.....	36
14. Análisis y comparación de resultados.....	43
14.1. Límites de Atterberg:	43
14.2. Granulometría:	44
14.3. Ensayo de Proctor:	49
14.4. CBR:.....	52
14.5. Resumen de resultados:.....	69
14.6. Interpretación de los resultados	69
15. Cronograma de actividades	71
16. Conclusiones	71
17. Recomendaciones	73
18. Anexos	74
19. Referencias bibliográficas	97

5. Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Demostración de la realización del CBR.....	27
Ilustración 2. Relación entre el CBR y el módulo resiliente.....	27
Ilustración 3. Coeficiente a3 - subbase.....	33
Ilustración 4. Ubicación de la mina Rookaazul.....	36
Ilustración 5. Esquema resumido de la realización del ensayo de granulometría. ...	38
Ilustración 6. Resumen de la realización del ensayo del límite líquido.....	39
Ilustración 7. Resumen de la realización del ensayo de Límite Plástico.....	40
Ilustración 8. Resumen de la realización del ensayo de proctor.....	41
Ilustración 9. Esquema resumido de la realización del ensayo de CBR.....	42
Ilustración 10. Faja granulométrica de la subbase clase 3.....	44
Ilustración 11. Representación gráfica de la granulometría.....	45
Ilustración 12. Representación gráfica de la granulometría.....	46
Ilustración 13. Representación gráfica de la granulometría.....	47
Ilustración 14. Representación gráfica de la granulometría.....	48
Ilustración 15. Gráfica del Proctor en la subbase sin adición de caucho.....	49
Ilustración 16. Gráfica del Proctor en la subbase con la adición de 10% de caucho	50
Ilustración 17. Gráfica del Proctor en la subbase con la adición de 20% de caucho	51
Ilustración 18. Gráfica del Proctor en la subbase con la adición del 20% de caucho	52
Ilustración 19. Gráfica esfuerzo deformación CBR 12 golpes.....	53
Ilustración 20. Gráfica esfuerzo deformación CBR 25 golpes.....	54
Ilustración 21. Gráfica esfuerzo deformación CBR 56 golpes.....	55
Ilustración 22. Gráfica Densidad contra el CBR en el material sin caucho.....	56

Ilustración 23. Gráfica esfuerzo deformación CBR 12 golpes	57
Ilustración 24. Gráfica esfuerzo deformación CBR 25 golpes	58
Ilustración 25. Gráfica esfuerzo deformación CBR 56 golpes	59
Ilustración 26. Gráfica Densidad contra el CBR en el material con 10% de caucho	60
Ilustración 27. Gráfica esfuerzo deformación CBR 12 golpes	61
Ilustración 28. Gráfica esfuerzo deformación CBR 25 golpes	62
Ilustración 29. Gráfica esfuerzo deformación CBR 56 golpes	63
Ilustración 30. Gráfica Densidad contra el CBR en el material con 15% de caucho	64
Ilustración 31. Gráfica esfuerzo deformación CBR 12 golpes	65
Ilustración 32. Gráfica esfuerzo deformación CBR 25 golpes	66
Ilustración 33. Gráfica esfuerzo deformación CBR 56 golpes	67
Ilustración 34. Gráfica Densidad contra el CBR en el material con 20% de caucho	68
Ilustración 35. Balanza de precisión de 0.01 g.....	74
Ilustración 36. Balanza con precisión de 0.1g.....	75
Ilustración 37. Tamizado de los materiales para la realización de los ensayos.....	75
Ilustración 38. Toma de muestras de humedades	76
Ilustración 39. Compra de los materiales en la mina	76
Ilustración 40. Toma de pesos en la balanza.....	77
Ilustración 41. Toma de muestras de hinchamiento en el día.....	77
Ilustración 42. Realización de los CBRs.....	78
Ilustración 43. Transporte de los CBRs para el ensayo.....	78
Ilustración 44. Desmolde del CBR después del ensayo	79
Ilustración 45. Implementos necesarios para realizar el ensayo de proctor	79
Ilustración 46. Colocación de los materiales en el horno para secado	80
Ilustración 47. Toma de pesos para humedades	80
Ilustración 48. Preparación de las muestras del CBR.....	81
Ilustración 49. Realización del ensayo de Proctor	81
Ilustración 50. Implementos necesarios para realizar el CBR.....	82

Ilustración 51. Toma de muestras de hinchamiento	82
Ilustración 52. Caucho implementado en las muestras	83
Ilustración 53. Material con adición de polvo de caucho	83
Ilustración 54. Tamices utilizados en la granulometría	84
Ilustración 55. Gráfica del límite líquido.....	85

6. Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades físicas del polvo de caucho	23
Tabla 2. Propiedades químicas del polvo de caucho	24
Tabla 3. Granulometrías de las clases de subbases.....	25
Tabla 4. Comparación entre el proctor estándar y el proctor modificado	31
Tabla 5. Resultados de los límites de Atterberg.....	43
Tabla 6. Granulometría de la subbase clase 3.....	44
Tabla 7. Granulometría del material sin adición de caucho	45
Tabla 8. Granulometría del material con 10% de adición de caucho	46
Tabla 9. Granulometría del material con 15% de adición de caucho	47
Tabla 10. Granulometría del material con 20% de adición de caucho	48
Tabla 11. Resultados del ensayo de proctor en la subbase sin adición de caucho ..	49
Tabla 12. Resultados del ensayo de proctor en la subbase con la adición de 10% de caucho.....	49
Tabla 13. Resultados del ensayo de proctor en la subbase con la adición de 15% de caucho.....	50
Tabla 14. Resultados del ensayo de proctor en la subbase con la adición de 20% de caucho.....	51
Tabla 15. Datos del instrumento de ensayo de CBR	52
Tabla 16. Resultados del CBR sin adición de caucho (12 golpes)	53
Tabla 17. Resultados del CBR sin adición de caucho (25 golpes)	54
Tabla 18. Resultados del CBR sin adición de caucho (56 golpes)	55

Tabla 19. Resumen de resultados del CBR sin adición de caucho	56
Tabla 20. Resultados finales del CBR del material sin adición de caucho.....	56
Tabla 21. Resultados del CBR del material con adición del 10% de caucho (12 golpes)	57
Tabla 22. Resultados del CBR del material con adición del 10% de caucho (25 golpes)	58
Tabla 23. Resultados del CBR del material con adición del 10% de caucho (56 golpes)	59
Tabla 24. Resumen de resultados del CBR con adición de 10% de caucho	60
Tabla 25. Resultados finales del CBR del material con adición de 10% de caucho .	60
Tabla 26. Resultados del CBR del material con adición del 15% de caucho (12 golpes)	61
Tabla 27. Resultados del CBR del material con adición del 15% de caucho (25 golpes)	62
Tabla 28. Resultados del CBR del material con adición del 15% de caucho (56 golpes)	63
Tabla 29. Resumen de resultados del CBR con adición de 15% de caucho	64
Tabla 30. Resultados finales del CBR del material con adición de 15% de caucho .	64
Tabla 31. Resultados del CBR del material con adición del 20% de caucho (12 golpes)	65
Tabla 32. Resultados del CBR del material con adición del 20% de caucho (25 golpes)	66
Tabla 33. Resultados del CBR del material con adición del 20% de caucho (56 golpes)	67
Tabla 34. Resumen de resultados del CBR con adición de 20% de caucho	68
Tabla 35. Resultados finales del CBR del material con adición de 20% de caucho .	68
Tabla 36. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio	69
Tabla 37. Datos tomados para sacar el límite líquido	84

Tabla 38. Datos tomados para el Límite Plástico	85
Tabla 39. Resultados de los límites de Atterberg	85
Tabla 40. Datos necesarios para realizar el ensayo de proctor (material sin caucho)	86
Tabla 41. Resultados del proctor en el material (Sin caucho)	87
Tabla 42. Datos necesarios para realizar el ensayo de proctor (10% caucho)	87
Tabla 43. Resultados del proctor en el material (10% caucho)	88
Tabla 44. Datos necesarios para realizar el ensayo de proctor (15% caucho)	89
Tabla 45. Resultados del proctor en el material (15% caucho)	89
Tabla 46. Datos necesarios para realizar el ensayo de proctor (20% caucho)	90
Tabla 47. Resultados del proctor en el material (20% caucho)	91
Tabla 48. Datos necesarios para calcular el CBR (Sin caucho)	92
Tabla 49. Resultados del CBR en el material (Sin caucho)	93
Tabla 50. Datos necesarios para calcular el CBR (10% caucho)	93
Tabla 51. Resultados del CBR en el material (10% caucho)	94
Tabla 52. Datos necesarios para calcular el CBR (15% caucho)	95
Tabla 53. Resultados del CBR en el material (15% caucho)	96
Tabla 54. Datos necesarios para calcular el CBR (20% caucho)	96
Tabla 55. Resultados del CBR en el material (20% caucho)	97

7. Introducción

La capa de suelo Subbase es una de las capas más importantes en el diseño de una vía porque tiene la función de distribuir los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares a las capas adyacentes, por lo que se debe tener especial cuidado en el diseño y colocación de esta (Lillian et al., 2025). En este contexto es necesaria la investigación de alternativas que ayuden a mejorar la resistencia de la capa, en el caso de la presente con la adición de polvo de caucho.

El polvo de caucho es un subproducto del uso de los neumáticos, que al terminar su periodo de uso son tirados a la basura y posteriormente reciclados y reinsertados al mercado en otro formato. Se considera aditivo funcional que mejore las capacidades mecánicas de la capa de subbase, ya que puede incrementar cohesión, capacidad portante y durabilidad, al tiempo que contribuye a la reducción de la huella de carbono del neumático (Guerrero-Bustamante et al., 2024; Salcedo Fontalvo et al., 2024).

Es imperativo buscar nuevos procesos de construcción que se enfoquen en reducir la huella de carbono producida no solo por la industria de la construcción, sino que pueda integrar áreas que también representan un problema para la sociedad, en este caso los neumáticos fuera de uso. El presente trabajo experimental evalúa comparativamente la resistencia de la subbase con adición de polvo de caucho reciclado frente a una subbase convencional, mediante ensayos de laboratorio como el CBR y Proctor modificado, conforme a la norma MOP - 001-F 2002 (Obras Publicas, 2002; Salcedo Fontalvo et al., 2024).

8. Problema

La calidad estructural de los pavimentos depende en gran medida de las propiedades mecánicas de las capas granulares adyacentes, en este caso la subbase es la encargada de distribuir las cargas vehiculares hacia el suelo natural (Schaefer et al., 2008). Sin embargo, la obtención de materiales granulares adecuados implica elevados costos de explotación de canteras, procesos de trituración intensivos y un impacto ambiental significativo. Esta situación evidencia la necesidad de identificar alternativas que permitan mejorar las características de la subbase sin incrementar los costos ni afectar negativamente al medio ambiente.

De forma paralela, la creciente generación de residuos provenientes de neumáticos fuera de uso plantea un desafío ambiental que aún no ha sido abordado de manera eficaz. A pesar de la existencia de regulaciones sobre su disposición final, su acumulación persiste, afectando a la sostenibilidad urbana y ambiental. En este contexto, el reciclaje de estos

residuos mediante su transformación en polvo de caucho ofrece una oportunidad para integrarlos en aplicaciones de ingeniería civil (Salcedo Fontalvo et al., 2024).

No obstante, a nivel técnico persiste una incertidumbre sobre los efectos reales de la adición de polvo de caucho reciclado en las propiedades mecánicas de las subbases granulares; mientras que algunos estudios reportan disminuciones importantes en el CBR con dosis de 10 y 15% (Salcedo Fontalvo et al., 2024), otros estudios muestran mejoras con adiciones de hasta el 4% (Juliana et al., 2020) lo que limita su implementación efectiva en proyectos viales.

Ante esta problemática, surge la necesidad de realizar una investigación experimental que permita evaluar de manera sistemática el comportamiento de una subbase granular modificada con adición de polvo de caucho reciclado en distintas proporciones. El propósito es determinar si dicha incorporación contribuye a mejorar la resistencia del material y verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas vigentes como una alternativa sostenible en la construcción de pavimentos.

9. Antecedentes

La expansión del parque automotor en Ecuador es un problema latente que produce desechos y contaminantes que necesitan ser tratados, en este contexto uno de los desechos más abundantes e importantes es el de las llantas de caucho, que una vez que han cumplido su vida útil se desechan. Lopez & Razo (2022) plantean que en el Ecuador se generan aproximadamente 240000 llantas desechadas y su degradación puede tardar un periodo de 500 años. Es decir, representa un problema no solo a corto plazo sino un problema que se va a heredar a las futuras generaciones que tendrán que lidiar con esta afección al planeta.

En el contexto local, la ciudad de Cuenca tiene la misma problemática con las llantas fuera de uso. Como exponen Pallazhco Siavichay & Mayancela Bermeo (2023) existen regulaciones para la disposición de estos desechos, pero la implementación y cumplimiento

son limitadas. Por lo tanto, es imperativo que se tome conciencia en este tema, puesto que estos recursos deben ser reutilizados para minimizar la huella de carbono.

Ante este hecho se han desarrollado diferentes alternativas para el uso de neumáticos reciclados en la Ingeniería Civil. Uno de ellos consiste en mejorar el material de subbase al agregar polvo de caucho, sacado de llantas fuera de uso trituradas. Los resultados de la adición de este material al suelo son efectivos ya que mejoran la capacidad portante y la resistencia al corte, como lo demuestran Yang et al. (2020) en su estudio sobre los Avances en las Propiedades del Suelo Reforzado con Caucho. Por otro lado, (Ramírez Navarrete et al., 2024) quienes realizaron un estudio adicionando polvo de caucho en porcentajes de 10%, 20% y 30% concluyen que el CBR empeora. Por lo tanto, se considera que estos resultados sirven como punto de partida para evaluar el efecto de la adición de polvo de caucho en parámetros geotécnicos de las subbases granulares y al mismo tiempo ofrecer una nueva alternativa constructiva.

Para poder evaluar la subbase y obtener resultados favorables se va a colocar polvo de caucho en diferentes dosificaciones y tamaños en la granulometría de esta (10%, 15% y 20%). De modo que se pueda ensayar cada una de las opciones mediante el CBR, próctor modificado, límite líquido e índice de plasticidad. Esto sirve para caracterizar el material y revisar que cumpla con los límites establecidos en la normativa MOP - 001-F 2002. Con este procedimiento se determinará la opción más efectiva para mejorar la resistencia de la subbase.

Para cumplir con los objetivos se propone un enfoque experimental, con implicaciones técnicas y ambientales al promover el reciclaje de llantas fuera de uso y ambientales críticos, al promover el reciclaje y disposición final de las llantas fuera de uso. Lo que en el área que le concierne a la presente significa una alternativa donde intersecan la innovación constructiva y la responsabilidad ambiental. La presente busca contribuir al conocimiento existente sobre el uso del caucho reciclado en el formato de polvo en ingeniería civil, proporcionando

evidencia que respalde su implementación en capas de pavimento en proyectos viales locales.

9.1. Importancia y Alcances

En la actualidad, una de las principales prioridades en todas las ramas de la construcción debe ser la adopción de prácticas sostenibles, mediante el uso de recursos renovables y el reciclaje de aquellos que no lo son. Estudios emergentes demuestran que la reutilización de recursos como hormigón con agregados reciclados y ladrillos plásticos, pueden reducir las emisiones de CO₂ hasta en un 45% y bajar el costo productivo en un 25%. (Knezevich Yánez et al., 2025).

Por ejemplo, el reciclaje industrial en Estados Unidos, que incluye materiales como el caucho de neumáticos fuera de uso, genera más de 471 000 empleos, de los cuales cerca de 150 000 son directos, y aporta más de 11 200 millones de dólares en ingresos fiscales estatales y federales (*New Study Shows Strong Economic Impact of the U.S. Scrap Recycling Industry - Recycled Materials Association*, n.d.).

La implementación de materiales reciclados permite reducir el impacto ambiental y puede mejorar ciertas propiedades técnicas del material. Al mismo tiempo, la reutilización de residuos contribuye a minimizar la cantidad de desechos sólidos, y su procesamiento puede abrir nuevas oportunidades laborales, especialmente en comunidades cercanas a los proyectos (Guerrero-Bustamante et al., 2024; Laftah et al., 2025)

En este contexto, la presente investigación representa un aporte valioso a la práctica profesional de la ingeniería civil, al proponer una alternativa técnica viable para la mejora de materiales viales. Los resultados que se obtengan podrían servir como base para la implementación de soluciones similares en futuros proyectos de infraestructura, contribuyendo a una evolución más sostenible dentro del ámbito de la ingeniería vial.

El enfoque principal de la investigación está centrado en mejorar las propiedades mecánicas del material granular utilizado en la subbase de pavimentos. Para ello, se plantea

la incorporación de polvo de caucho reciclado, comparando el comportamiento de mezclas modificadas frente a materiales tradicionales mediante ensayos de laboratorio, específicamente pruebas de soporte California (CBR). El objetivo es identificar el porcentaje óptimo de adición de caucho que proporcione un mejor rendimiento estructural al material.

Dentro del alcance de la investigación no se contemplan aspectos como el diseño estructural completo de la vía, el comportamiento que puede llegar a tener el material a largo plazo en condiciones reales de clima y cargas, ni los procedimientos necesarios para mantenimientos que podría llegar a necesitar a futuro. Estos aspectos son de gran importancia por lo que se considera que pueden ser temas de investigaciones futuras, las cuales podrán basarse en los resultados previamente obtenidos en esta investigación para implementarlos en proyectos a mayor escala.

El estudio se plantea y se desarrolla dentro de un contexto experimental en un ambiente controlado, por lo que no se contemplan conclusiones que validen el comportamiento en campo del material modificado. Sin embargo, los resultados obtenidos permitirán establecer una base sólida y técnica para futuras aplicaciones reales, ensayos complementarios y propuestas de normativas para implementación de materiales reciclados en capas estructurales de proyectos viales.

9.2. Delimitación

La investigación se delimita geográficamente a la provincia del Azuay, debido a que el material granular utilizado en los ensayos de laboratorio fue adquirido en la mina "Rookaazul" ubicada en el sector El Descanso, la cuál es una de las más utilizadas para la adquisición de materiales granulares para construcción de vías en la región. Esta elección permite que los resultados obtenidos sean factibles de aplicar en proyectos viales del entorno considerando la amplia utilización del material sobre el que se están realizando los ensayos.

En el ámbito temporal la investigación se desarrolla en año 2025, proyectándose como una base para futura aplicaciones, considerando que la normativa en base a la que se está

trabajando actualmente sobre construcción de pavimentos y caracterización de suelos se mantengan vigentes. En caso de que estas sean modificadas, se sugiere replantear los procedimientos y repetir los ensayos basándose en la nueva normativa y procedimientos vigentes para así garantizar la validez y aplicabilidad de los resultados.

Adicionalmente, la investigación únicamente contempla el análisis del comportamiento mecánico del material bajo condiciones controladas en laboratorio, sin incluir pruebas a escala real ni estudios logísticos o ambientales del uso del material caucho reciclado en vías. Sin embargo, se espera que los resultados sean utilizados como base para futuras investigaciones con un mayor alcance técnico y territorial.

10. Justificación

Resulta importante establecer medidas para evitar la huella de carbono y combatirla, sabiendo esto, la alternativa de realizar subbase mejorada con polvo de caucho es una opción atractiva porque combate la contaminación además de ofrecer una alternativa diferente a la subbase granular convencional. En adición, los procedimientos para la trituración de áridos producen contaminaciones importantes por el polvo y los gases relacionadas con las plantas de tratamiento (Antonio & Antonio García-Gutiérrez, 2019).

El material de subbase es fundamental porque este se encuentra entre la capa de suelo natural o subrasante y la capa de asfalto, entonces funciona como un elemento que ayuda a la distribución de las fuerzas generadas por el tráfico. Respaldando lo afirmado anteriormente (Ramírez Navarrete et al., 2024), exponen:

Dado el papel fundamental que desempeña la subbase granular en el sistema constructiva del pavimento, al actuar como un elemento clave en la absorción y recepción de las cargas que soporta, se reconoce su importancia como un componente esencial para la construcción y la durabilidad de las carreteras. (p. 15)

Entonces, es imperativo buscar que la subbase mejorada sea resistente, porque de este factor depende en gran medida la durabilidad de la carretera. La razón es clara, si la capa de subbase cede ante las cargas entonces la capa asfáltica se daña.

Usar subbase mejorada con polvo de caucho es valioso pues es una forma de economía circular, es decir, utilizar recursos nuevos y reutilizar los viejos. Esto representa una forma de ahorro en el sentido de emplear el polvo de caucho que se obtiene de las llantas fuera de uso que produce la ciudad. Entonces el nexo entre ambas se vuelve evidente, ya que al aplicar la economía circular en este contexto se evita la acumulación y se promueve conductas ecologistas.

11. Objetivos

11.1. Objetivo General

Valorar la influencia de la adición de polvo de caucho en diferentes dosificaciones y tamaños sobre la resistencia de la subbase.

11.2. Objetivos Específicos

- Analizar los efectos del polvo de caucho en la respuesta del material para determinar su influencia en la manipulación.
- Evaluar los cambios en la compacidad tras la adición de polvo de caucho.
- Comparar el comportamiento mecánico de una subbase convencional con una modificada con polvo de caucho para determinar su mejora estructural.

12. Marco Conceptual

El siguiente apartado se detallan todos los aspectos importantes necesarios para poder desarrollar el proyecto.

12.1. Polvo de Caucho Reciclado

El polvo de caucho reciclado proviene de la trituración de llantas fuera de uso y se ha utilizado en diversas aplicaciones en ingeniería civil. Su incorporación en materiales de construcción busca mejorar propiedades mecánicas y contribuir a la sostenibilidad ambiental mediante la reutilización de residuos, además nos da otras ventajas como mayor resistencia al envejecimiento, mayor resistencia a deformación y disminuye la susceptibilidad a la humedad. (Multinsa, 2022)

El caucho de las llantas está conformado por varios componentes tanto físicos como químicos, se detallan en las tablas a continuación:

Propiedades Físicas:

Tabla 1. Propiedades físicas del polvo de caucho

Componente	Vehículo Liviano (%)	Función
Caucho y elastómeros	48	Estructural-Deformación
Negro de humo	22	Mejora de propiedades físicas
Refuerzos metálicos (acero)	15	Formación esqueleto estructural
Refuerzos textiles	5	Formación esqueleto estructural
Óxido de Zinc	1.2	Catalizador
Azufre	1	Agente vulcanizante
Aditivos y otros	10	
Peso del neumático (kg)	6.5 - 9	

Nota. La tabla muestra las propiedades físicas del polvo de caucho tomadas de: (*Situación Actual Del Tratamiento de Neumáticos Fuera de Uso y Posibilidades de Obtención de Negro de Humo de Alta Pureza*, n.d.).

Propiedades Químicas:

Tabla 2. *Propiedades químicas del polvo de caucho*

Elemento	% peso
C	70
H	7
S	1
N ₂	0.5
O	4
ZnO	1
Fe	16
Ácido esteárico	0.3
Halógenos	0.1
Ligandos cupríferos	200 mg/kg
Cd	10 mg/kg
Cr	90 mg/kg
Ni	80 mg/kg
Pb	50 mg/kg

Nota. La tabla muestra las propiedades químicas del polvo de caucho tomadas de: (*Situación Actual Del Tratamiento de Neumáticos Fuera de Uso y Posibilidades de Obtención de Negro de Humo de Alta Pureza*, n.d.)

Específicamente, el tamaño nominal del polvo de caucho utilizado en la investigación fue de 1 a 4 mm, medida que fue seleccionada en función de la disponibilidad ofertada por la empresa proveedora. Esta granulometría se consideró adecuada por su facilidad de manipulación y por su compatibilidad con el material granular de la subbase, lo cual favorece una integración homogénea durante la preparación de las mezclas para los ensayos de laboratorio.

12.2. Subbase Granular

La subbase granular es una capa estructural de los pavimentos que se encuentra entre la subrasante y la base. Como menciona (Lillian et al., 2025) la función principal de la subbase es distribuir las cargas del tráfico y proporcionar estabilidad al pavimento. Debe cumplir con ciertas especificaciones granulométricas y de resistencia para garantizar que esta trabaje correctamente la granulometría deberá estar de acuerdo a las tablas del MOP. (Holcim Ecuador, 2025)

La subbase tiene 3 tipos de clases que se detallaran a continuación, estas se clasifican en base a la granulometría que se detalla en la tabla, sin embargo, cualquier clase que se utilice debe tener un coeficiente de desgaste máximo según el ensayo de abrasión de los Ángeles de 50% y el material que pase el tamiz "N° 40" debe tener un límite líquido máximo de 25 y un índice de plasticidad menor que 6. Deberá tener una capacidad de soporte que corresponda a un CBR mayor o igual al 30%. (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

12.2.1. Normativa MOP - 001-F 2002

Normativa ecuatoriana que regula los materiales de construcción utilizados en infraestructuras viales. Establece requisitos técnicos para la granulometría, resistencia y compactación de materiales como la subbase granular. (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

Tabla 3. Granulometrías de las clases de subbases

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
3" (76.2 mm.)	--	--	100
2" (50.4 mm.)	--	100	--
1 1/2 (38.1 mm.)	100	70 – 100	--
N°4 (4.75 mm.)	30 – 70	30 – 70	30 – 70
N°40 (0.425 mm.)	10 – 35	15 – 40	--
N°200 (0.075 mm.)	0 – 15	0 - 20	0 - 20

Nota. Datos tomados de las especificaciones técnicas MOP - 001-F 2002 (Quito, 2002).

12.2.2. Clasificación de los tipos de subbase

La clasificación de los tipos de subbase fue tomada de: MOP - 001-F 2002 (Obras Publicas, 2002).

Clase 1: Son subbases conformadas por rocas o gravas trituradas de acuerdo con los requerimientos establecidos y graduados uniformemente dentro de los límites de la Clase 1 en la Tabla 3. Es importante señalar que mínimo el 30% del agregado a preparar debe provenir del proceso de trituración.

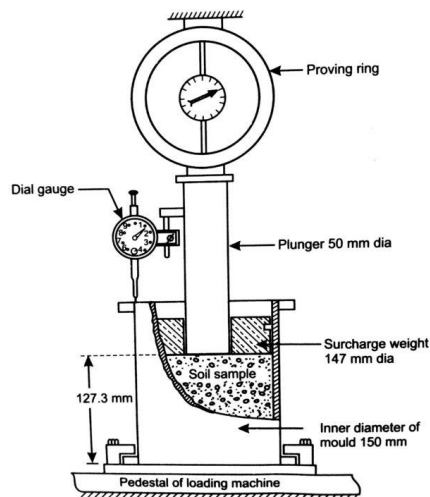
Clase 2: Son subbases conformadas por agregados que se obtienen mediante trituración o cribado en minas de piedras fragmentadas naturalmente o de gravas de acuerdo a los requerimientos establecidos y graduados uniformemente dentro de los límites de la Clase 2 en la Tabla 3. Es importante señalar que mínimo el 30% del agregado a preparar debe provenir del proceso de trituración.

Clase 3: Son subbases conformadas por agregados naturales y procesados de acuerdo con los requerimientos establecidos y graduados uniformemente dentro de los límites de la Clase 3 en la Tabla 3.

12.3. Capacidad Portante

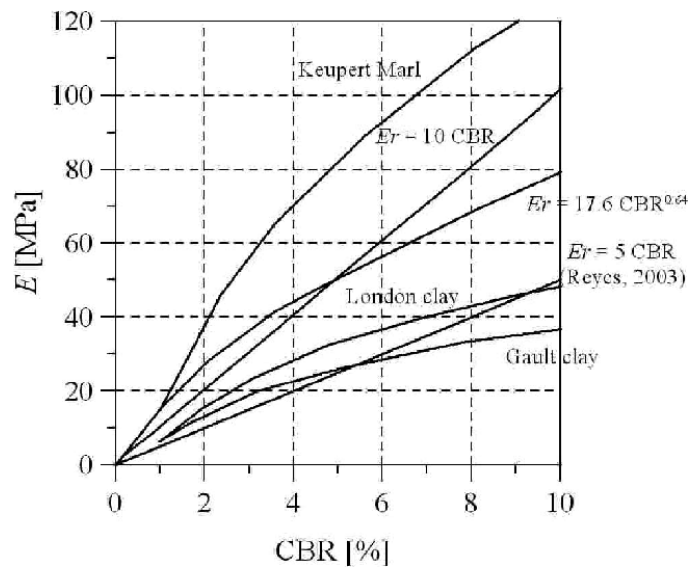
Es un aspecto crítico ya que influye directamente en la seguridad y se refiere a la habilidad del suelo o de un material de subbase para soportar cargas sin experimentar deformaciones excesivas. Se mide mediante ensayos como el CBR (California Bearing Ratio), el cual permite determinar la resistencia relativa del material, sin embargo, se pueden hacer pruebas en campo como ensayo de carga de placa y SPT (ensayo de penetración estándar) para tener datos directos sobre la respuesta a cargas aplicadas. (Ocrospoma Callupe & Rocha Sandoval, 2024)

Ilustración 1. Demostración de la realización del CBR



Nota. La figura muestra un esquema de la realización del ensayo CBR, la imagen fue extraída de (*California Bearing Ratio(CBR Test) of Subgrade Soil -Procedure, Apparatus, and Use for Pavement Design - Cement Concrete*, n.d.)

Ilustración 2. Relación entre el CBR y el módulo resiliente



Nota. La figura muestra la relación entre el módulo de elasticidad (E) y el CBR (%) para diferentes tipos de suelo, destacando ecuaciones empíricas utilizadas para estimar E en función del CBR. Imagen extraída de (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2007).

La relación entre el CBR y el módulo elástico en suelos granulares es un aspecto clave en el análisis mecánico de la subbase. Aunque existen fórmulas empíricas lineales como:

$$E = 10 \cdot CBR$$

Para valores bajos, y para valores mayores:

$$E = 176 \cdot CBR^{0.64}$$

Estas presentan limitaciones y alta dispersión de valores (Mendoza & Paredes, 2024; *Resilient Modulus*, n.d.).

Estudios más recientes mediante modelos FEM no lineales. (Mendoza & Paredes, 2024) proponen una una relación no lineal entre el CBR y el módulo elástico con la inclusión del esfuerzo de pre – consolidación (P_p) y el índice de compresión (λ):

$$CBR [\%] = -1.3 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda^{0.236} \cdot E^2 + (0.002 \ln P_p - 0.00086)E$$

12.4. Índice de Plasticidad y Límite Líquido

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo o material granular, indicando su capacidad para deformarse sin fracturarse, el índice plástico también nos da el rango de humedad en el que el suelo es plástico. Estos parámetros son esenciales para clasificar materiales según normativas como el MOP- 001-F 2002. (COTECNO, 2021)

12.4.1. Método Índice de Plasticidad (IP)

El índice de Plasticidad (IP), se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (*Aashto T 90 PDF | PDF | Materials | Nature*, n.d.; *AASHTO_T_89 | PDF*, n.d.; *International & indexed by mero*, n.d.), es un índice fundamental para poder identificar el rango de humedad en el que un suelo obtiene propiedades plásticas.

Además, un índice de plasticidad más alto indica mayor susceptibilidad a cambios volumétricos y compresibilidad, es decir, propiedades parecidas a las de la arcilla (*International & indexed by mero*, n.d.). Para poder calcularlo se realiza la siguiente operación:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

- IP = Índice de plasticidad
- LL = Límite líquido
- LP = Límite plástico

El IP refleja la plasticidad, cohesión, contenido de arcilla y susceptibilidad a variaciones volumétricas, además de influir directamente en la compactación y estabilidad estructural de los suelos (Karakan, 2022).

Según (Nugroho et al., 2021) cuando se tiene un IP bajo (< 5 %) el material presenta baja plasticidad y permite una buena compactación, garantizando rigidez y estabilidad para soportar cargas de tráfico. En contraste, un IP medio-alto (> 15 %) corresponde a suelos más plásticos y problemáticos en vías, que pueden generar grietas, deformaciones permanentes y problemas de durabilidad cuando se exponen a humedad y tránsito constante.

Conociendo las propiedades que representa tener un IP bajo o alto y bajo la literatura citada anteriormente, es notable que para las vías es necesario mantener un IP bajo para que no existan cambios de volúmenes importantes que puedan causar fallas en la estructura.

12.4.2. Límite Líquido (LL)

Se determina mediante el ensayo de Casagrande o el cono de penetración. En el método de Casagrande, se define como el contenido de humedad en el que un surco en la muestra de suelo cierra 12 mm después de 25 golpes en el dispositivo de límite líquido, según la norma ASTM D3418 / AASHTO T89 y según la norma ecuatoriana MOP 001 – F (2002)

Este parámetro se emplea para conocer la resistencia no drenada, compresibilidad, permeabilidad y comportamiento bajo ciclos húmedo–seco; además de ser vital en los sistemas de clasificación (USCS o AASHTO) y prever la potencial expansividad o retracción del suelo. El líquido límite (LL) se determina mediante el método de Casagrande: se gráfica

el número de golpes frente al contenido de humedad, y el LL corresponde al contenido de humedad donde la ranura se cierra 12 mm tras 25 golpes - aplicándose una interpolación semilogarítmica - siguiendo las normativas ASTM D4318 y AASHTO T89 (Haigh & Vardanega, 2014; MD Sahadat Hossain et al., 2021).

Estudios han demostrado que el LL se correlaciona con la compresibilidad, conductividad hidráulica, volumen de expansión/contracción y resistencia al corte sin drenaje (Fan et al., 2014). En el esquema de clasificación USCS, el LL delimita la distinción entre arcillas de alta y baja compresibilidad, influenciando directamente el diseño y comportamiento de materiales en subrasante y capas granulares (MD Sahadat Hossain et al., 2021).

12.5. Ensayo CBR (California Bearing Ratio)

Es un ensayo de laboratorio utilizado para evaluar la resistencia de los materiales granulares empleados en la construcción de pavimentos. Se basa en la comparación de la resistencia a la penetración de un material con la de una referencia estándar. (Geotecnia Fácil, 2018)

12.5.1. Procedimiento de Cálculo

Es un ensayo estandarizado regido por las normas ASTM D1883-21 y AASHTO T193, estas proveen los procedimientos de cálculo que se detallan a continuación.

1. Preparación de la muestra

- Compactar el material en un molde cilíndrico de 152 mm de diámetro y 178 mm de altura, siguiendo la energía de compactación requerida (por ejemplo, ensayo Proctor estándar o modificado).

Tabla 4. Comparación entre el proctor estándar y el proctor modificado

Parámetro	Proctor Estándar	Proctor Modificado
Peso del martillo	2.5 kg	4.5 kg
Altura de caída	30.5 cm	45.7 cm
Golpes por capa	25	25
Número de capas	3	5
Energía de compactación	600 kN·m/m ³	2700 kN·m/m ³
Densidad seca resultante	Menor	Mayor
Contenido óptimo de humedad	Mayor	Menor

Nota. La tabla muestra la diferencia entre los implementos usados en el Proctor modificado y el Proctor estándar, los datos fueron tomados de las normas ASTM D1557 – 09 y ASTM D 698 – 07.

Además, Proctor estándar es adecuado para obras livianas o de infraestructura básica, mientras que el Proctor modificado se reserva para obras con mayores demandas estructurales y funcionales, en este caso la vía. La elección entre uno u otro depende del tipo de carga que soportará la estructura, las condiciones del suelo y los requerimientos técnicos del proyecto. (*Astm-d-1557-09pdf_compress*, n.d.; Designation: D 698-07 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-Lbf/Ft 3 (600 KN-m/m 3)) 1, n.d.)

- Saturar la muestra (si se requiere) para simular condiciones de humedad extremas.

2. Ensayo de penetración

- Se aplica una carga vertical con un pistón de 50 mm de diámetro a una velocidad de 1.27 mm/min.
- Se registra la carga correspondiente a penetraciones de 0.625 mm, 1.25 mm, 2.5 mm, 5 mm, 7.5 mm, 10 mm y 12.5 mm.

3. Cálculo del CBR

El CBR se obtiene comparando la carga aplicada al material con una carga estándar de referencia:

$$CBR = \left(\frac{P}{P_s} \right) * 100$$

Donde:

- P = carga aplicada al material (en kg o N)
- Ps = carga estándar de referencia para una penetración específica

Valores típicos de Ps para suelos granulares:

- 2.5 mm → 1370 kg
- 5.0 mm → 2055 kg

4. Interpretación de resultados

- El CBR final se reporta como el mayor valor obtenido entre las penetraciones de 2.5 mm y 5.0 mm.
- Se compara con valores estándar para clasificar la capacidad portante del material.
- Valores de CBR $\geq 30\%$ se consideran adecuados para subbases, según las normativas citadas.

El CBR es fundamental para el diseño de espesor de las capas que conforman una vía, ya que se relacionan varios parámetros como la densidad, humedad, resistencia y compresibilidad. Además, mejorar la compactación y la gradación del material resulta en valores de CBR más altos, lo que mejora la calidad del pavimento, aspecto demostrado en suelos reciclados (Li et al., 2020). Además, es importante recalcar que según (Obras Publicas, 2002) la capacidad de soporte de la subbase corresponderá a un CBR igual o mayor del 30%.

12.6. Economía Circular

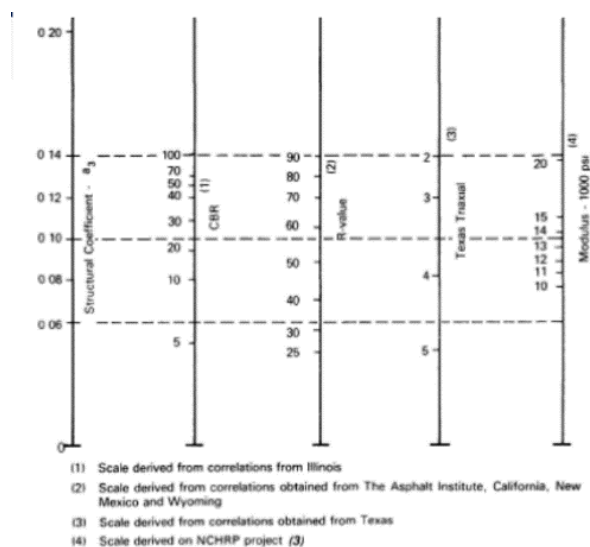
Modelo de producción y consumo que promueve la reutilización, reparación y reciclaje de materiales para minimizar el impacto ambiental y maximizar el uso de los recursos. En

este caso, el uso de polvo de caucho en subbases granulares contribuye a este enfoque al reutilizar residuos de neumáticos. (Parlamento Europeo, 2023)

12.7. Coeficiente Estructural

Parámetro empleado en el diseño de pavimentos que representa la capacidad de una capa para contribuir a la resistencia estructural total. Su determinación está vinculada a la resistencia obtenida en el ensayo CBR, impactando el diseño del espesor de la capa asfáltica. (Ricardo Morales, 2015).

Ilustración 3. Coeficiente a_3 - subbase



Nota. La figura muestra la relación entre el coeficiente estructural (a_3) y parámetros de resistencia como CBR, R-value, ensayo triaxial de Texas y módulo de elasticidad, utilizados en el diseño de pavimentos. La imagen fue extraída de la Guía de Diseño de Pavimentos Flexibles y Rígidos de la AASHTO 1993.

12.8. Granulometría

Es la distribución del tamaño de las partículas que componen un material granular. En la ingeniería vial, es un factor determinante para la calidad y desempeño de la subbase, ya que influye en su compactación y resistencia. (Carbotecnia, 2024).

Para poder realizar los cálculos se debe considerar la norma ASTM D6913 – 04, que detalla el procedimiento de cálculo:

Peso total seco de la muestra (W_t):

Se seca la muestra en horno a 105 ± 5 °C hasta masa constante.

Se registra el peso total de la muestra seca:

$$W_t = \text{Peso total del suelo seco}$$

Peso retenido en cada tamiz (W_i)

Luego del tamizado, se pesa el material retenido en cada tamiz individual.

Se registra el peso retenido en cada tamiz:

$$W_i = \text{Peso retenido en el tamiz}$$

Porcentaje retenido en cada tamiz (%)

Se calcula el porcentaje de cada fracción retenida respecto al total:

$$\%R_i = \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \times 100$$

Porcentaje acumulado retenido (%)

Se suman los porcentajes retenidos desde el tamiz superior hasta el actual.

Porcentaje que pasa por cada tamiz (%)

Se calcula restando el porcentaje acumulado retenido del 100%.

Curva granulométrica

Se representa en una gráfica semilogarítmica:

Eje X (logarítmico): tamaño de partícula (mm).

Eje Y (lineal): porcentaje que pasa (%).

Esta curva permite visualizar la distribución de tamaños de partícula y se usa para:

12.9. Sostenibilidad en la Construcción

Se refiere al uso eficiente de los recursos, minimización del impacto ambiental y aplicación de técnicas innovadoras que reduzcan la generación de residuos en proyectos de infraestructura, utiliza materiales no tóxicos y renovables, minimiza producción de desechos y optimiza el uso de energía y agua. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021)

La reutilización de los neumáticos representa una técnica sostenible que reduce consumo de recursos y energía, así también mejora las propiedades de la subbase, como en caso del uso de polvo de caucho que se presenta como una técnica sostenible, dado que aprovecha recursos no biodegradables (Salcedo Fontalvo et al., 2024).

Además, estudios han demostrado que la incorporación de polvo de caucho puede mejorar la compactación, rigidez y permeabilidad de materiales granulares, promoviendo soluciones ambientalmente responsables y técnicamente eficientes. Por ejemplo, (Tasalloti et al., 2021) revisaron múltiples investigaciones donde las proporciones adecuadas de polvo de caucho mejoraban la compactación, permeabilidad y resistencia en mezclas suelo-grava. Otro ejemplo de la utilización del polvo de caucho lo plantean (Juliana et al., 2020) que encontraron que una estabilización con 4% de polvo de caucho aumentó significativamente el CBR en condiciones secas y saturadas.

12.10. Costo-Beneficio en Infraestructura Vial

Si bien el presente estudio no contempla un análisis de costo-beneficio, se reconoce que futuras investigaciones podrían evaluar la viabilidad económica de esta técnica con base en sus resultados técnicos. Como lo expone (MCRIT, 2020) la inclusión de polvo de caucho en subbases debe ser evaluada en términos de viabilidad económica y rendimiento estructural.

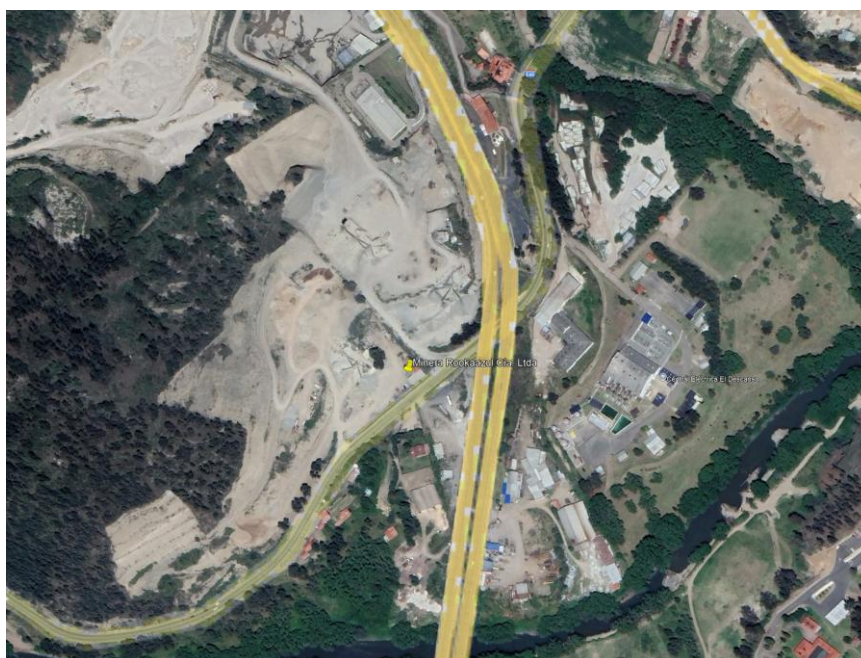
13. Metodología

Para cumplir con los objetivos de la presente investigación se requirió de tiempo y esfuerzo conjunto para poder realizar con éxito todos los ensayos de laboratorio que se definen a continuación:

1. Gestión y adquisición de materiales:

Se coordinó con el proveedor de material granular “Rookaazul” en Cuenca para obtener los agregados necesarios, en este caso subbase de clase 3, asegurando que cumplan con las especificaciones establecidas en la norma MOP - 001-F 2002, especialmente en términos de granulometría.

Ilustración 4. Ubicación de la mina Rookaazul



Nota. En la imagen se muestra la ubicación en el mapa de la mina de donde se sacó el material, la cual tiene las siguientes coordenadas: 735908.00 m E; 9686065.00 m S.

Además, se estableció contacto con un proveedor de polvo de caucho reciclado en la ciudad de Latacunga, cuya empresa lleva el nombre de “Proneumacosa”, para garantizar la entrega oportuna del material y su correcta dosificación en los ensayos. El tamaño que se adquirió fue el que pasante del tamiz N° 4 pero que no pase el tamiz 200, por motivos de

facilidad, holgura y conveniencia para realizar la adición de las partículas, debido a que el porcentaje de material que pasa el tamiz N° 4 es del 30-70%.

La adquisición de la subbase clase 3 se da porque resulta ser un material bastante ocupado en Ecuador y se encuentra disponibilidad en la zona, además se puede verificar que por los tamaños de los áridos es fácil reemplazar un porcentaje de su granulometría con polvo de caucho.

2. Caracterización inicial del material de subbase

Se realizaron ensayos de granulometría, límites de atterberg y CBR sobre el material granular sin adición de polvo de caucho, con el fin de establecer una línea base para la comparación de resultados. Se realizaron mínimo 3 ensayos CBR para poder evitar la desviación en los resultados por errores de ejecución. En adición, es importante revisar que el material cumpla con las características establecidas en la norma MOP - 001-F 2002, que especifica:

La porción del agregado que pase el tamiz N° 40, incluyendo el relleno mineral, deberá carecer de plasticidad o tener un límite líquido menor de 25 y un índice de plasticidad menor de 6, al ensayarse de acuerdo a los métodos establecidos en las Normas INEN 691 y 692 (AASHTO T-89 y T-90).

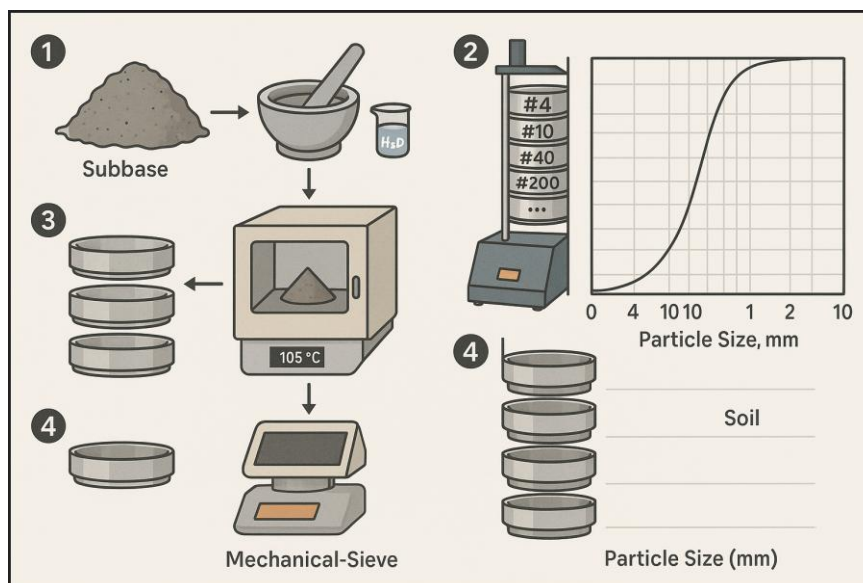
3. Dosificación y ejecución de ensayos

Teniendo los materiales caracterizados y revisados, se adicionó polvo de caucho en diferentes dosificaciones. Concretamente en 3 porcentajes (10%, 15% y 20%) en la porción de granulometría del material que pase el tamiz N° 4, porque según la tabla de granulometría, es un tamaño abundante que puede ser complementado con este material. Con el material dosificado en los porcentajes establecidos anteriormente, se realizaron todos los ensayos necesarios, exceptuando los límites de Atterberg porque la adición de polvo de caucho en el tamaño establecido no representa una variación de este parámetro.

Se realizaron los siguientes ensayos: *Determinación del Límite Líquido por el Método de Casagrande*, *Determinación del Límite Plástico*, *Ensayo de Relación de Soporte de California (CBR)*, *Ensayo de Compactación Proctor Modificado*. Primero, la granulometría se realizará de la siguiente manera:

1. Se trituró una muestra de subbase hasta que tuvo un tamaño que pasó por el tamiz #40 y se mezcló con agua hasta obtener una pasta homogénea.
2. La muestra representativa de suelo fue secada en horno a 105°C y pesada.
3. La muestra fue pasada por una serie de tamices (ej. #4, #10, #40, #200, etc.) utilizando un tamizador mecánico durante 10-15 minutos.
4. El material retenido en cada tamiz fue pesado y se calculó el porcentaje que pasó a través de cada uno respecto al peso total de la muestra.
5. El porcentaje que pasó a través de cada tamiz fue graficado en función del tamaño de partícula utilizando una escala logarítmica, con el fin de obtener la curva granulométrica del suelo.

Ilustración 5. Esquema resumido de la realización del ensayo de granulometría.

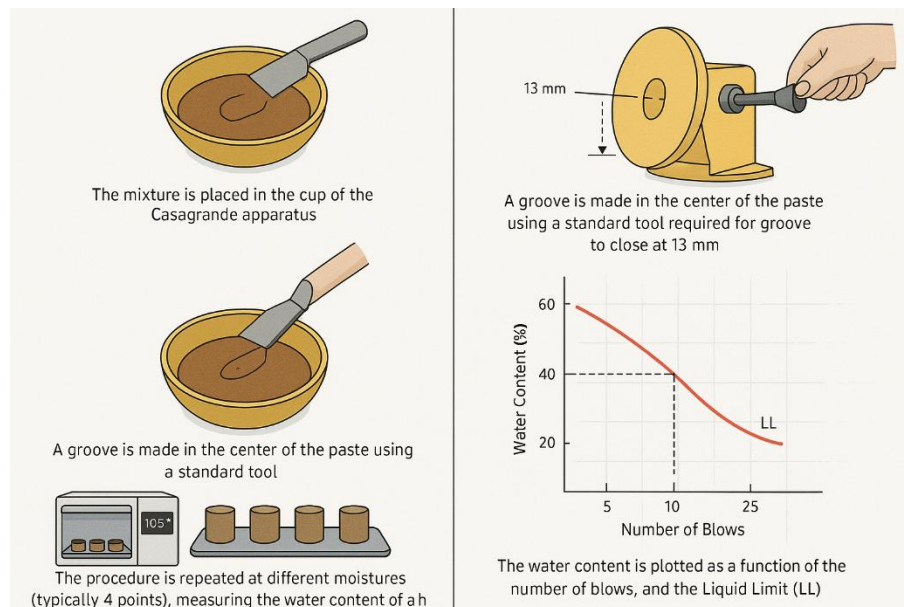


Nota. ChatGPT. (2025). *Procedimiento de análisis granulométrico por tamizado* [Imagen generada por IA]. DALL·E. Basado en la norma ASTM D6913/D6913M-17.

Segundo, para la determinación del límite líquido por el Método de Casagrande, se siguió el siguiente procedimiento:

1. La mezcla fue colocada en la copa del aparato de Casagrande.
2. Con una herramienta estándar, se hizo un surco en el centro de la pasta.
3. Se giró la manivela del aparato para que la copa subiera y bajara, contando los golpes necesarios hasta que el surco se cerró en 13 mm.
4. El procedimiento se repitió con distintas humedades (generalmente 4 puntos diferentes) y se tomó una muestra de cada prueba para medir su contenido de agua, utilizando un secado en horno a 105°C.
5. Finalmente, se graficó el contenido de agua en función del número de golpes y se encontró el límite líquido (LL) en el punto correspondiente a 25 golpes.

Ilustración 6. Resumen de la realización del ensayo del límite líquido



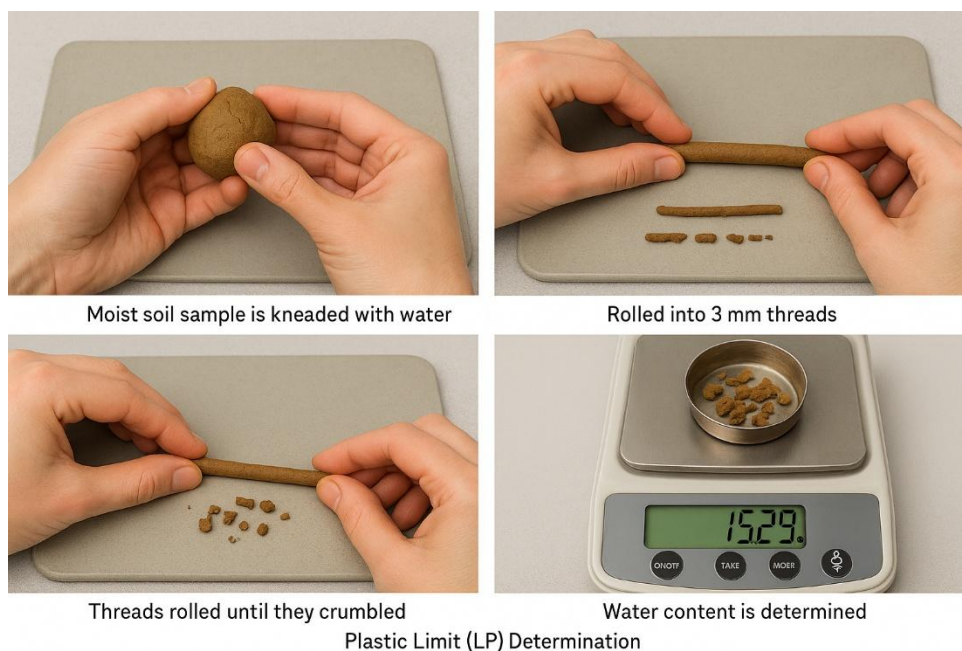
Nota. ChatGPT. (2025). *Determinación del límite líquido con el aparato de Casagrande* [Imagen generada por IA]. DALL-E. Basado en la norma ASTM D4318-17.

Tercero, para determinar el Límite Plástico:

1. Se utilizó la misma muestra de suelo fino que se empleó previamente para determinar el límite líquido (LL).

2. El suelo fue amasado con agua hasta obtener una consistencia maleable pero no pegajosa.
3. Se formaron cilindros con las manos, de aproximadamente 3 mm de diámetro.
4. Los cilindros fueron amasados y rodados hasta que se fracturaron, es decir, hasta que adquirieron una textura quebradiza.
5. La muestra húmeda fue pesada y posteriormente secada en un horno a 105°C.
6. El contenido de agua en el punto de fractura fue calculado, y este valor correspondió al límite plástico (LP) del suelo.

Ilustración 7. Resumen de la realización del ensayo de Límite Plástico



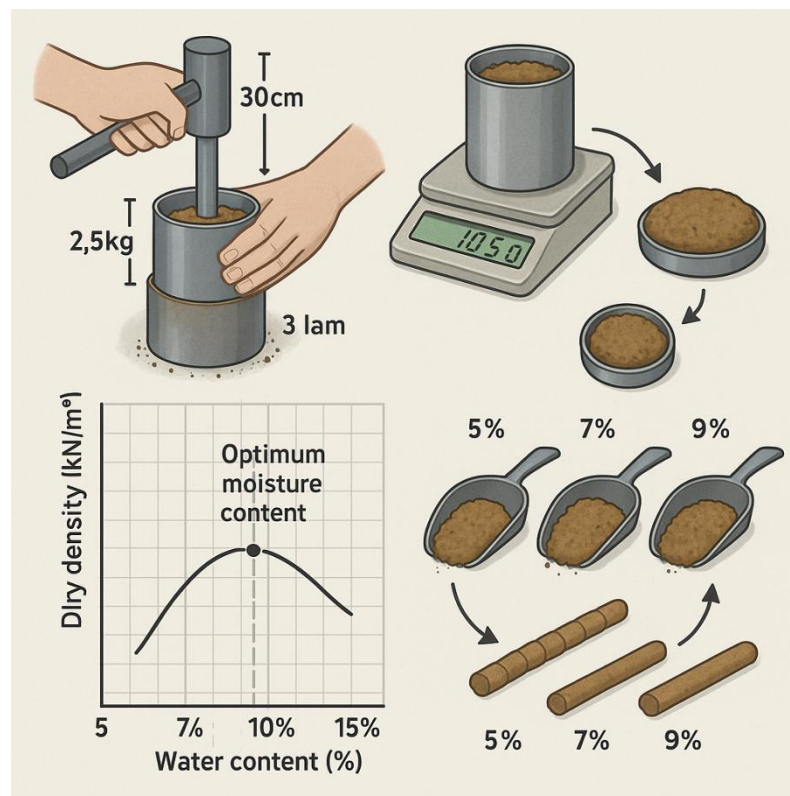
Nota. ChatGPT. (2025). *Determinación del límite plástico en suelos finos* [Imagen generada por IA]. DALL-E. Basado en la norma ASTM D4318-17.

Cuarto, se realizó el ensayo de Proctor para hallar la humedad óptima:

1. La muestra de suelo, que pasó por el tamiz #4, fue dividida en varias porciones.
2. Se agregó agua gradualmente a cada porción, siguiendo porcentajes específicos (por ejemplo, 5%, 7%, 9%, etc.).

3. Cada porción fue compactada en un molde Proctor de 10 cm de diámetro, en 3 capas. En el Proctor Estándar, se aplicaron 25 golpes por capa con un martillo estándar (2.5 kg, caída de 30 cm), mientras que en el Proctor Modificado se aplicaron 56 golpes por capa.
4. El molde con la muestra de suelo húmedo fue pesado, y luego se extrajo la muestra para determinar su contenido de agua mediante secado en horno a 105°C.
5. La densidad seca fue calculada para cada punto, y se graficó la densidad seca en función del contenido de agua. El pico de la curva resultante representó la densidad seca máxima y su contenido de agua correspondiente fue el contenido óptimo de compactación.

Ilustración 8. Resumen de la realización del ensayo de proctor

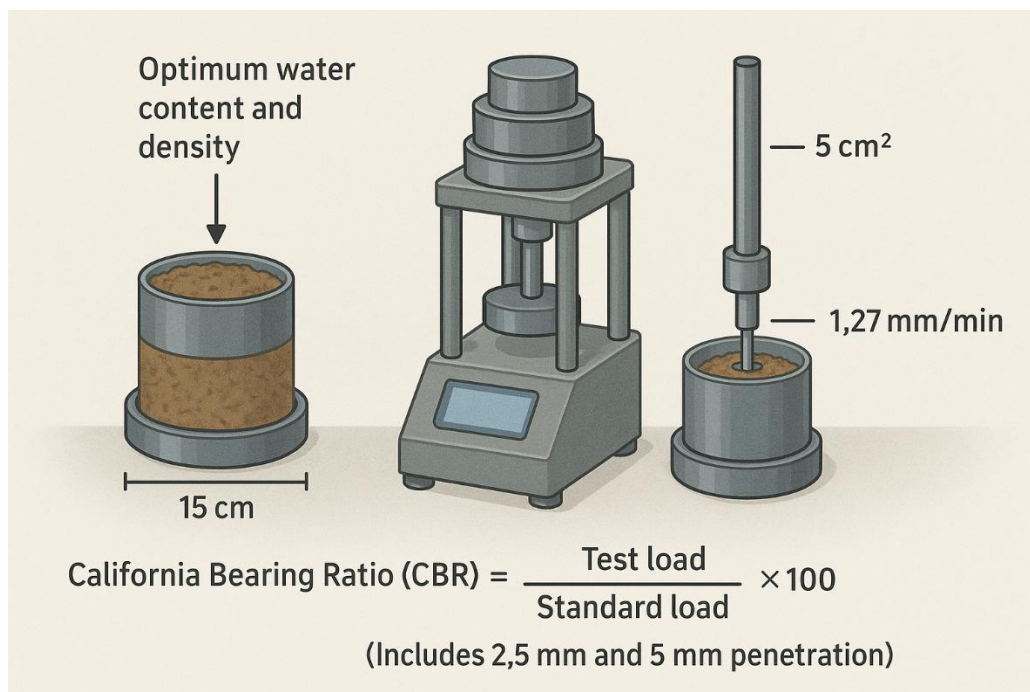


Nota. ChatGPT. (2025). Compactación de suelo mediante los métodos Proctor estándar y modificado [Imagen generada por IA]. DALL-E. Basado en las normas ASTM D698-12 y ASTM D1557-12.

Finalmente, se realizó el CBR mediante los siguientes lineamientos:

1. Se preparó una muestra de suelo compactada en un molde estándar de 15 cm de diámetro, ajustada al óptimo contenido de agua y densidad determinados previamente mediante el ensayo Proctor.
2. El molde fue colocado en la máquina CBR y se aplicó una sobrecarga, utilizando pesos que simularon la carga de pavimento.
3. Un pistón de 19 cm² fue introducido a una velocidad constante de 1.27 mm/min, y se midió la carga necesaria para penetrar 2.5 mm y 5 mm en la muestra.
4. Las cargas obtenidas fueron comparadas con las de una roca triturada estándar, y se calculó el porcentaje de CBR utilizando la fórmula mencionada en el Marco Metodológico.

Ilustración 9. Esquema resumido de la realización del ensayo de CBR



Nota. ChatGPT. (2025). *Procedimiento del ensayo CBR en suelo compactado* [Imagen generada por IA]. DALL-E. Basado en la norma ASTM D1883-21.

Una vez realizados todos los ensayos necesarios para caracterizar el material sin adición de caucho, se volvieron a realizar para cada uno de los casos que la investigación analiza, es decir, se realizaron ensayos de laboratorio para: subbase, subbase con 10% de adición de caucho, subbase con 15% de adición de caucho y subbase con 20% de adición de caucho.

14. Análisis y comparación de resultados

Los ensayos de laboratorio arrojaron los siguientes resultados:

14.1. Límites de Atterberg:

Para realizar los ensayos y los cálculos posteriores para la determinación de los límites, los autores se basaron en las normativas tratadas anteriormente, todos los procedimientos se rigieron completamente al esquema, minimizando errores que se pudieran tener.

Tabla 5. Resultados de los límites de Atterberg

Límites de Atterberg	
Límite Líquido	29.23%
Límite Plástico	19.71%
Índice de Plasticidad	10%

Nota. La tabla muestra los valores obtenidos después de ensayar el material sin adición de caucho

Anteriormente la literatura dio a conocer que el límite líquido tiene que ser menor de 25 y el índice de plasticidad menor de 6. No se cumple con este parámetro, aun así, los ensayos se realizaron porque es el material que se tenía disponible, además, otros materiales de la zona tampoco cumplieron con lo establecido.

14.2. Granulometría:

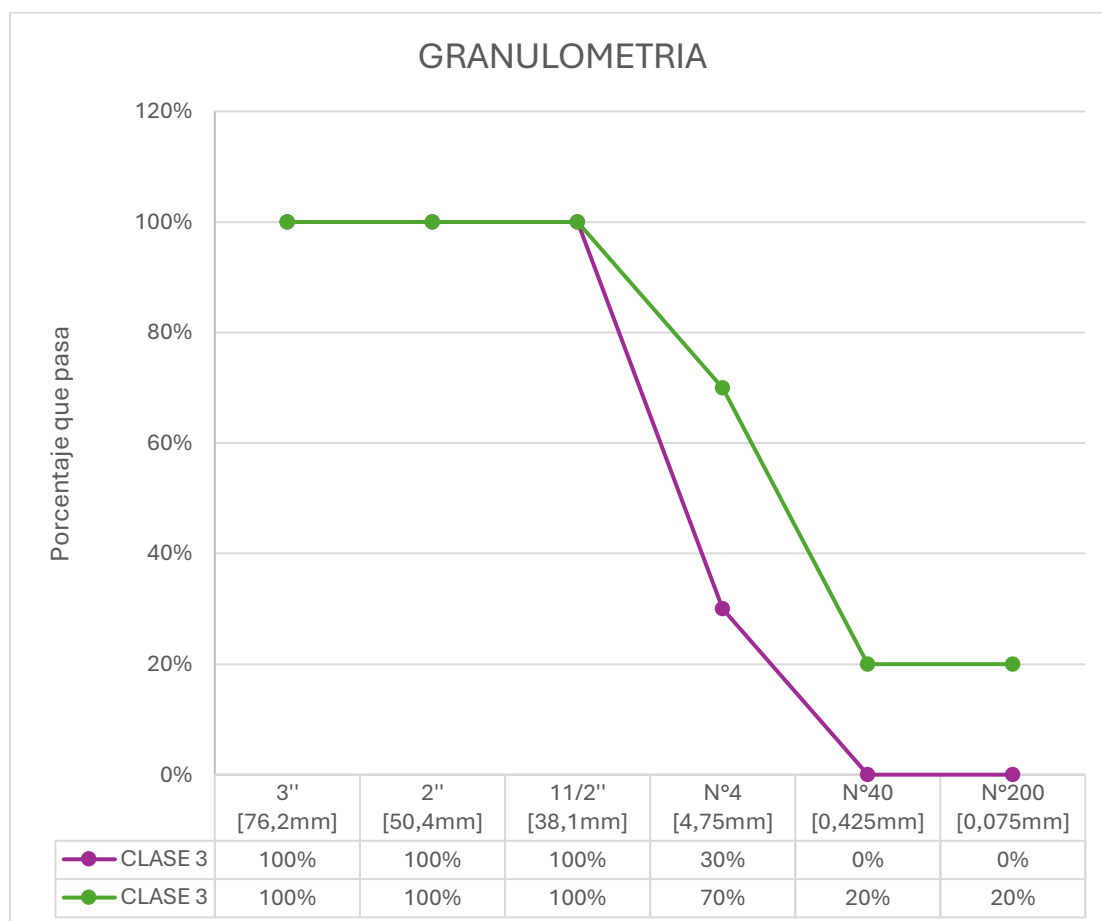
Se debe tener en cuenta que la granulometría a la que se rigen los autores es la de la subbase clase 3, según la clasificación de la MOP:

Tabla 6. Granulometría de la subbase clase 3

TAMIZ	CLASE 3	
	Inferior	Superior
3" [76,2mm]	100%	100%
2" [50,4mm]	100%	100%
1 1/2" [38,1mm]	100%	100%
N°4 [4,75mm]	30%	70%
N°40 [0,425mm]	0%	20%
N°200 [0,075mm]	0%	20%

Nota. La tabla muestra la faja granulométrica a la que deben regirse los materiales.

Ilustración 10. Faja granulométrica de la subbase clase 3



Nota. La figura muestra la faja granulométrica de la subbase clase 3, donde deberá acomodarse la granulometría de los materiales.

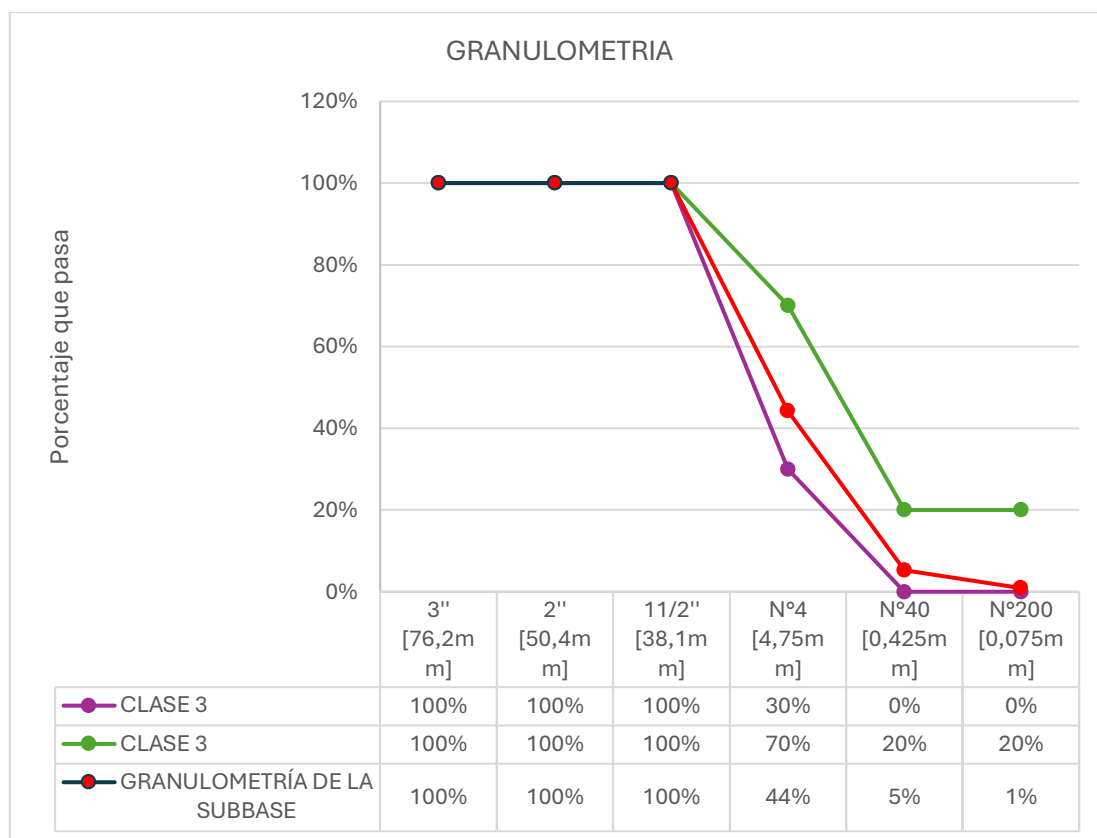
Subbase sin adición de caucho:

Tabla 7. Granulometría del material sin adición de caucho

TAMIZ	RETENIDO [g]	PASA [g]	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
3" [76,2mm]	0	1401.08	0%	100%
2" [50,4mm]	0	1401.08	0%	100%
1 1/2" [38,1mm]	0	1401.08	0%	100%
N°4 [4,75mm]	781.7	619.38	56%	44%
N°40 [0,425mm]	545.7	73.68	39%	5%
N°200 [0,075mm]	61.18	12.5	4%	1%
FONDO	12.5	0	1%	0%
Σ	1401.08		100%	

Nota. La tabla muestra valores obtenidos después de realizar el ensayo de granulometría.

Ilustración 11. Representación gráfica de la granulometría



Nota. La gráfica muestra la franja granulométrica de la subbase clase 3 y como la granulometría del material está dentro de ella.

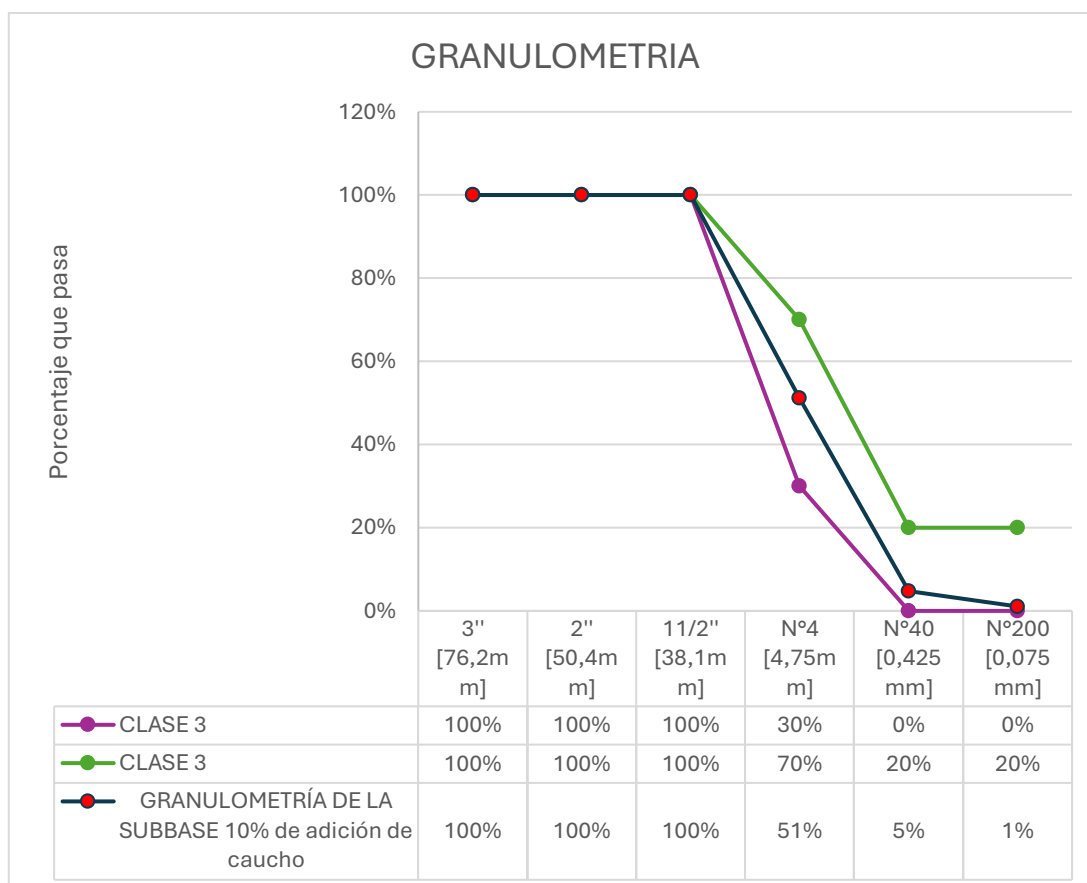
Subbase con 10% de adición de caucho:

Tabla 8. Granulometría del material con 10% de adición de caucho

TAMIZ	RETENIDO [g]	PASA [g]	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
3" [76,2mm]	0	1650	0%	100%
2" [50,4mm]	0	1650	0%	100%
1 1/2" [38,1mm]	0	1650	0%	100%
N°4 [4,75mm]	805.3	844.7	57%	51%
N°40 [0,425mm]	766.5	78.2	55%	5%
N°200 [0,075mm]	60.5	17.7	4%	1%
FONDO	17.7	0	1%	0%
Σ	1650		118%	

Nota. La tabla muestra valores obtenidos después de realizar el ensayo de granulometría.

Ilustración 12. Representación gráfica de la granulometría



Nota. La gráfica muestra la franja granulométrica de la subbase clase 3 y como la granulometría del material está dentro de ella.

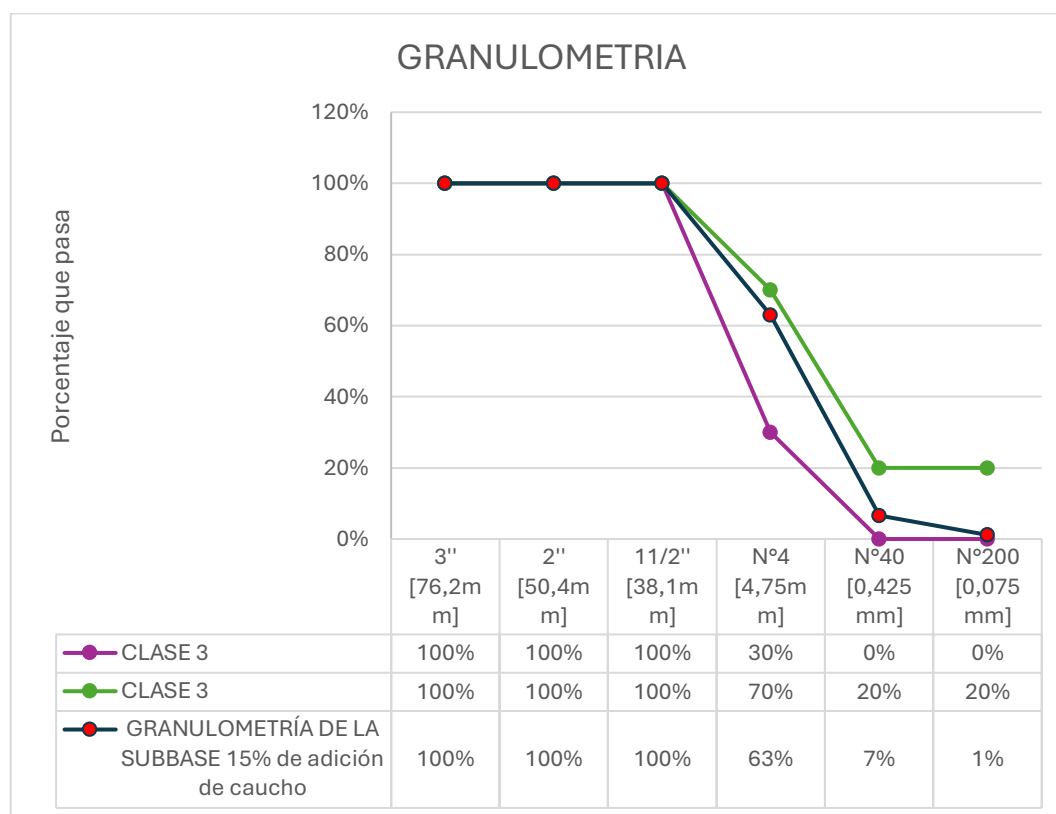
Subbase con 15% de adición de polvo de caucho:

Tabla 9. Granulometría del material con 15% de adición de caucho

TAMIZ	RETENIDO [g]	PASA [g]	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
3" [76,2mm]	0	1724.2	0%	100%
2" [50,4mm]	0	1724.2	0%	100%
1 1/2" [38,1mm]	0	1724.2	0%	100%
N°4 [4,75mm]	638.6	1085.6	46%	63%
N°40 [0,425mm]	970.5	115.1	69%	7%
N°200 [0,075mm]	95.4	19.7	7%	1%
FONDO	19.7	0	1%	0%
Σ	1724.2		123%	

Nota. La tabla muestra valores obtenidos después de realizar el ensayo de granulometría.

Ilustración 13. Representación gráfica de la granulometría



Nota. La gráfica muestra la franja granulométrica de la subbase clase 3 y como la granulometría del material está dentro de ella.

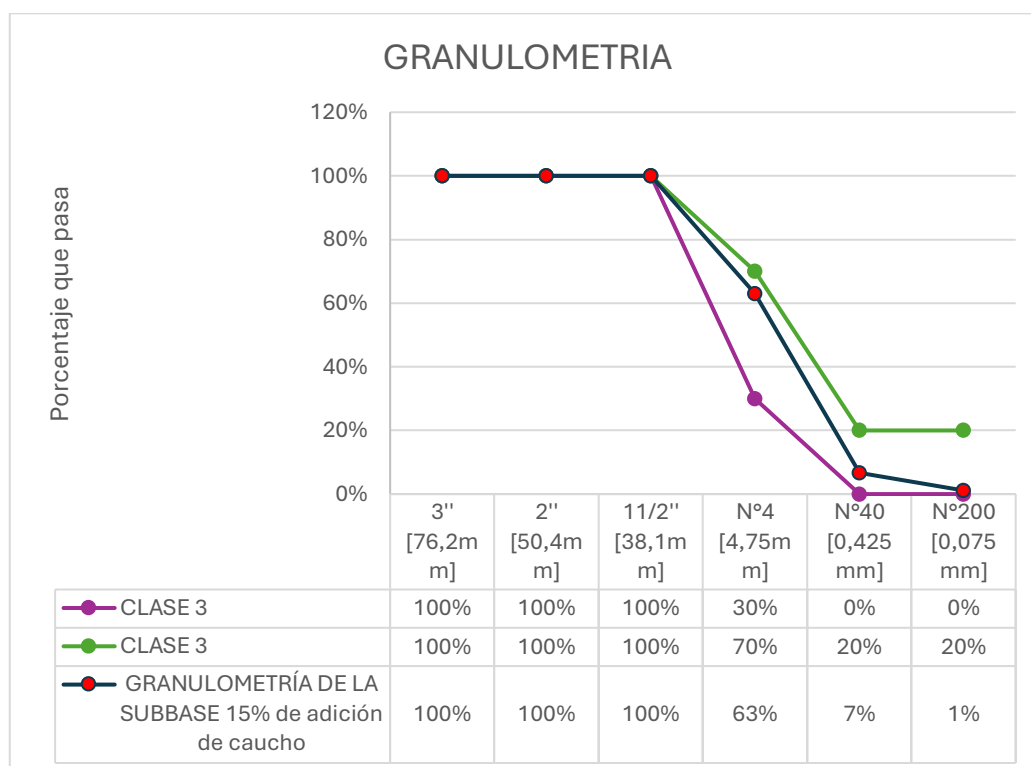
Subbase con 20% de adición de polvo de caucho:

Tabla 10. Granulometría del material con 20% de adición de caucho

TAMIZ	RETENIDO [g]	PASA [g]	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
3" [76,2mm]	0	1800.2	0%	100%
2" [50,4mm]	0	1800.2	0%	100%
1 1/2" [38,1mm]	0	1800.2	0%	100%
N°4 [4,75mm]	871.7	928.5	62%	52%
N°40 [0,425mm]	851.4	77.1	61%	4%
N°200 [0,075mm]	57.5	19.6	4%	1%
FONDO	19.6	0	1%	0%
Σ	1800.2		128%	

Nota. La tabla muestra valores obtenidos después de realizar el ensayo de granulometría.

Ilustración 14. Representación gráfica de la granulometría



Nota. La gráfica muestra la franja granulométrica de la subbase clase 3 y como la granulometría del material está dentro de ella

14.3. Ensayo de Proctor:

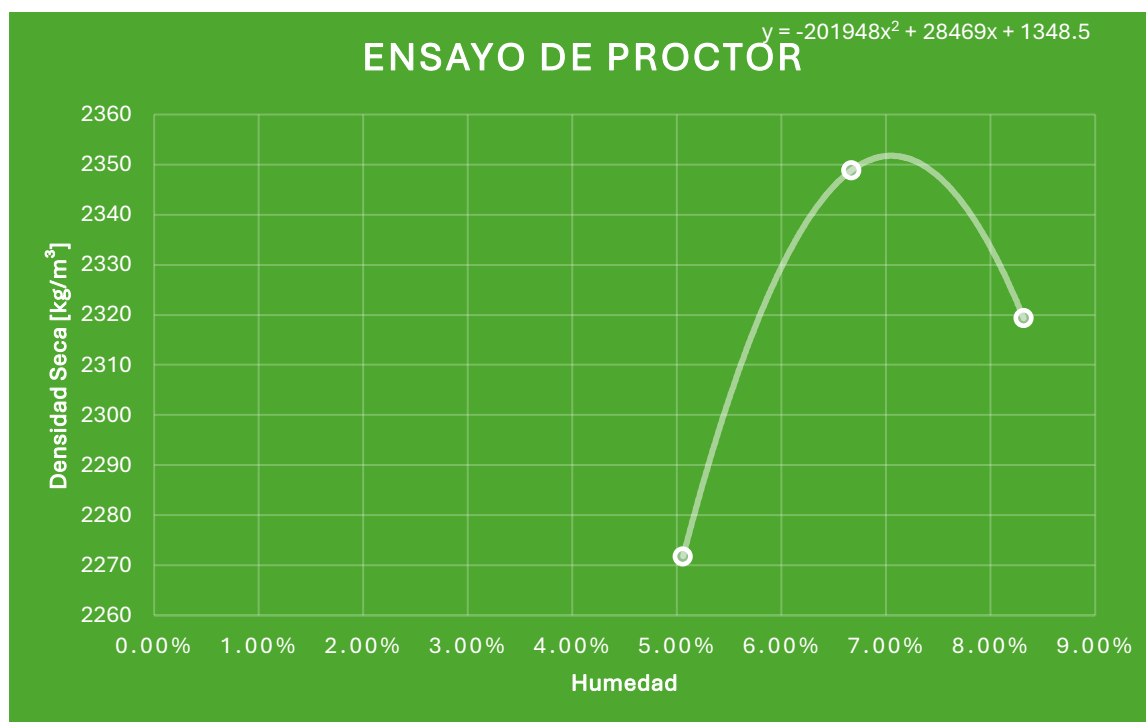
Subbase sin adición de polvo de caucho:

Tabla 11. Resultados del ensayo de proctor en la subbase sin adición de caucho

Resultados		
Humedad Óptima	7.00%	
Densidad Seca Máxima	2351.7848	kg/m ³

Nota. En la tabla se muestran los resultados del ensayo de Proctor.

Ilustración 15. Gráfica del Proctor en la subbase sin adición de caucho



Nota. En la gráfica se puede observar la forma que toma el ajuste con los puntos tomados, además, también muestra la ecuación.

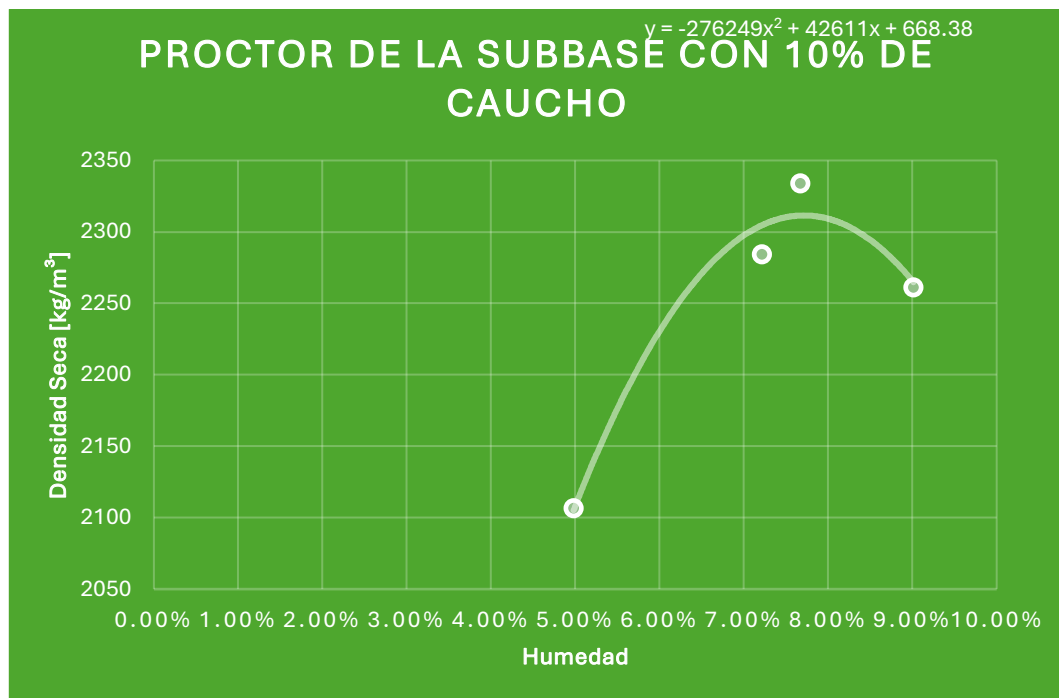
Subbase con 10% de adición de polvo de caucho:

Tabla 12. Resultados del ensayo de proctor en la subbase con la adición de 10% de caucho

Resultados		
Humedad Óptima	8.10%	
Densidad Seca Máxima	2311.54668	kg/m ³

Nota. En la tabla se muestran los resultados del ensayo de Proctor.

Ilustración 16. Gráfica del Proctor en la subbase con la adición de 10% de caucho



Nota. En la gráfica se puede observar la forma que toma el ajuste con los puntos tomados, además, también muestra la ecuación.

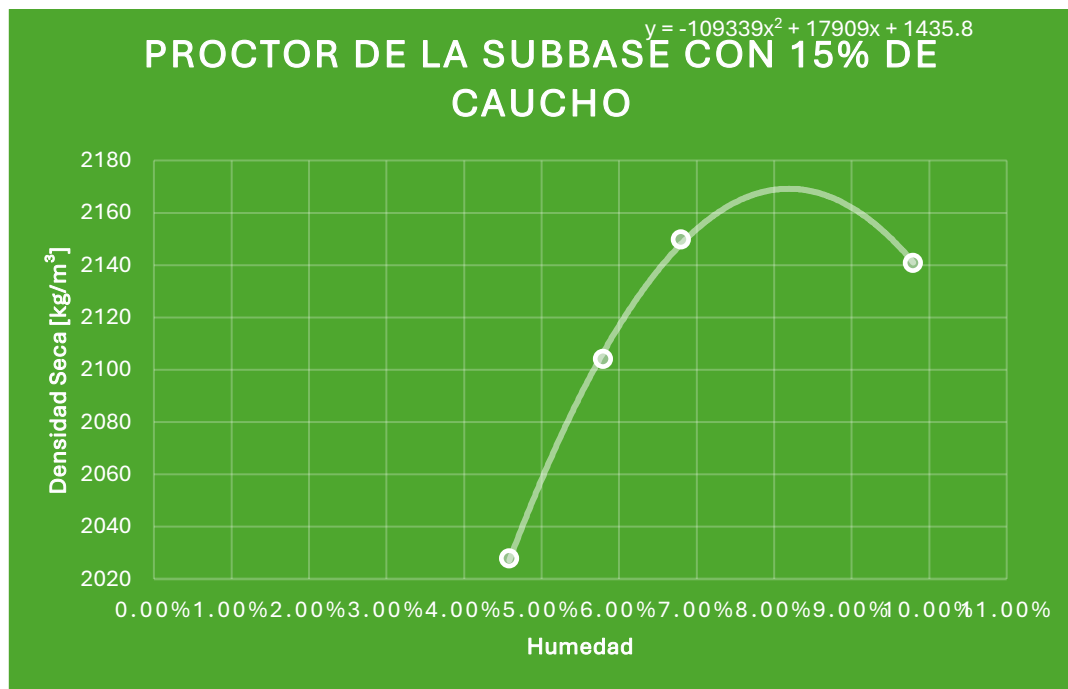
Subbase con 15% de adición de polvo de caucho:

Tabla 13. Resultados del ensayo de proctor en la subbase con la adición de 15% de caucho

Resultados	
Humedad Óptima	8.20%
Densidad Seca Máxima	2169.14256 kg/m ³

Nota. En la tabla se muestran los resultados del ensayo de Proctor.

Ilustración 17. Gráfica del Proctor en la subbase con la adición de 20% de caucho



Nota. En la gráfica se puede observar la forma que toma el ajuste con los puntos tomados, además, también muestra la ecuación.

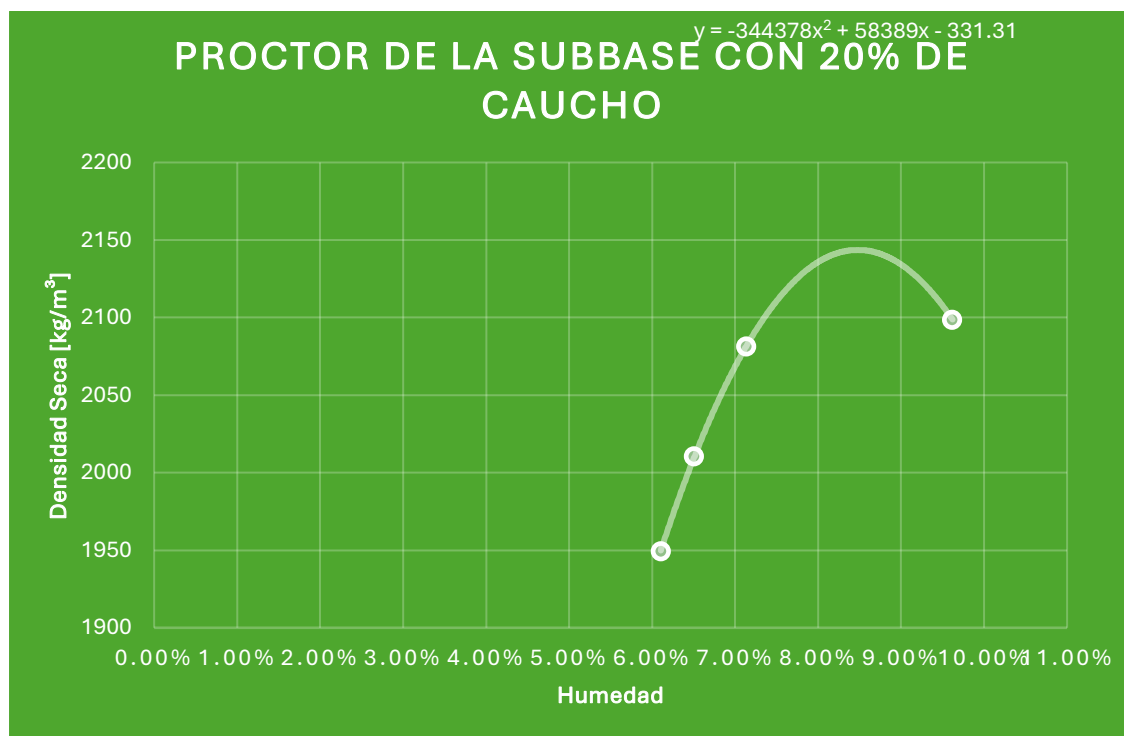
Subbase con 20% de adición de polvo de caucho:

Tabla 14. Resultados del ensayo de proctor en la subbase con la adición de 20% de caucho

Resultados	
Humedad Óptima	8.50%
Densidad Seca Máxima	2143.62395 kg/m ³

Nota. En la tabla se muestran los resultados del ensayo de Proctor.

Ilustración 18. Gráfica del Proctor en la subbase con la adición del 20% de caucho



Nota. En la gráfica se puede observar la forma que toma el ajuste con los puntos tomados, además, también muestra la ecuación.

14.4. CBR:

Para establecer el esfuerzo que se está generando en la muestra de suelo se calcula a partir de las lecturas brindadas por la máquina de CBR, realizando las transformaciones y operaciones necesarias hasta obtener los resultados que serán presentados en este acápite.

Tabla 15. Datos del instrumento de ensayo de CBR

DATOS DEL PISTON		
Carga del pistón [kN]	101.97	kg
Área del pistón	19.32	cm ²
Área del pistón	2.9946	in ²
kg/cm ²	0.070307	lbs/in ²

Nota. En la tabla se muestran datos correspondientes a la máquina proporcionados en el laboratorio.

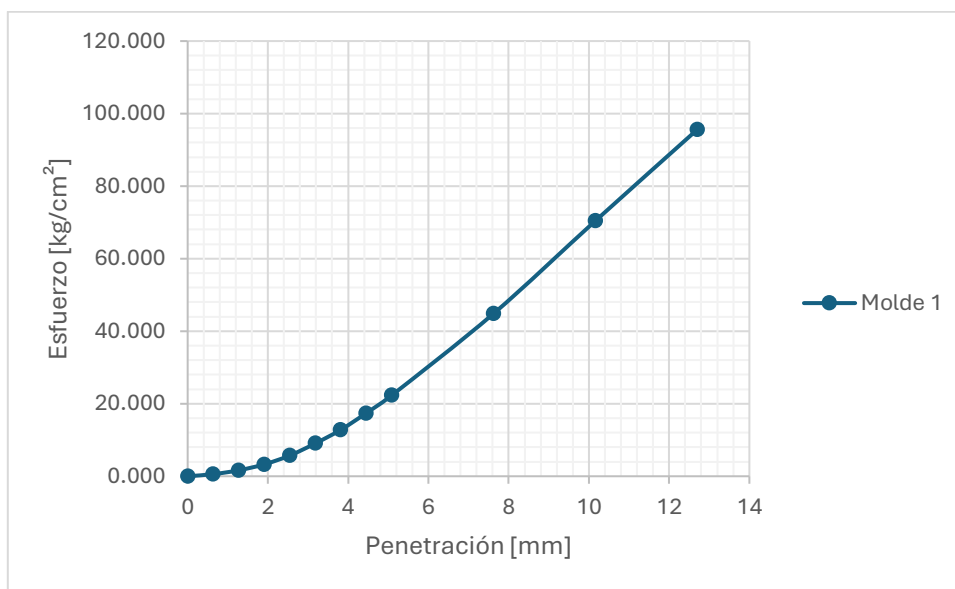
Subbase sin adición de caucho:

Tabla 16. Resultados del CBR sin adición de caucho (12 golpes)

CBR 12 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm ²]	Esfuerzo [kg/cm ²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.581	
1.27		1.636	
1.905		3.272	
2.541	70.31	5.700	8.11
3.176		9.025	
3.81		12.773	
4.445		17.364	
5.08	105.46	22.273	21.12
7.62		44.810	
10.16		70.408	
12.7		95.584	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material sin caucho con 12 golpes.

Ilustración 19. Gráfica esfuerzo deformación CBR 12 golpes

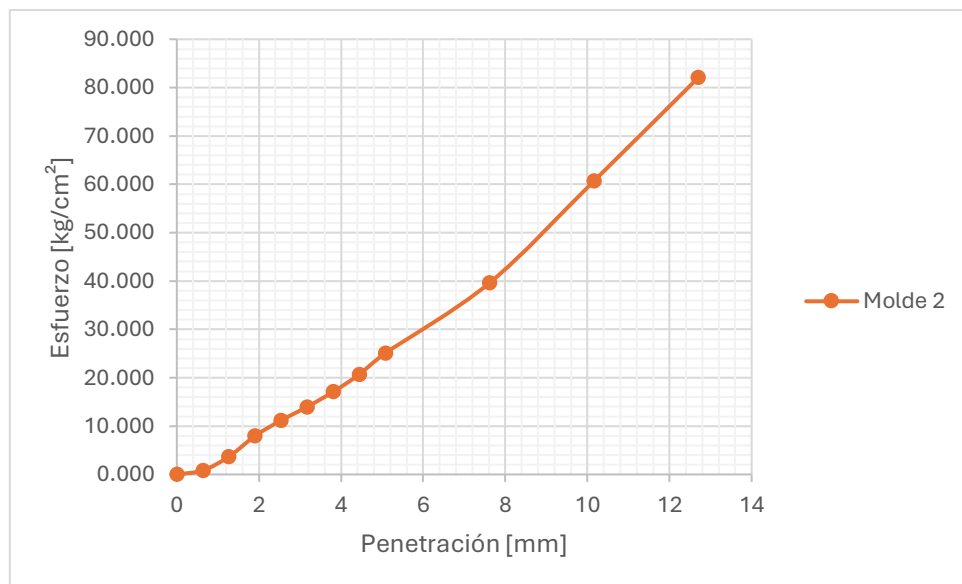


Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material sin caucho con 12 golpes.

Tabla 17. Resultados del CBR sin adición de caucho (25 golpes)

CBR 25 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm²]	Esfuerzo [kg/cm²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.844	
1.27		3.695	
1.905		7.970	
2.541	70.31	11.189	15.91
3.176		13.987	
3.81		17.101	
4.445		20.690	
5.08	105.46	25.070	23.77
7.62		39.637	
10.16		60.696	
12.7		82.072	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material sin caucho con 25 golpes.

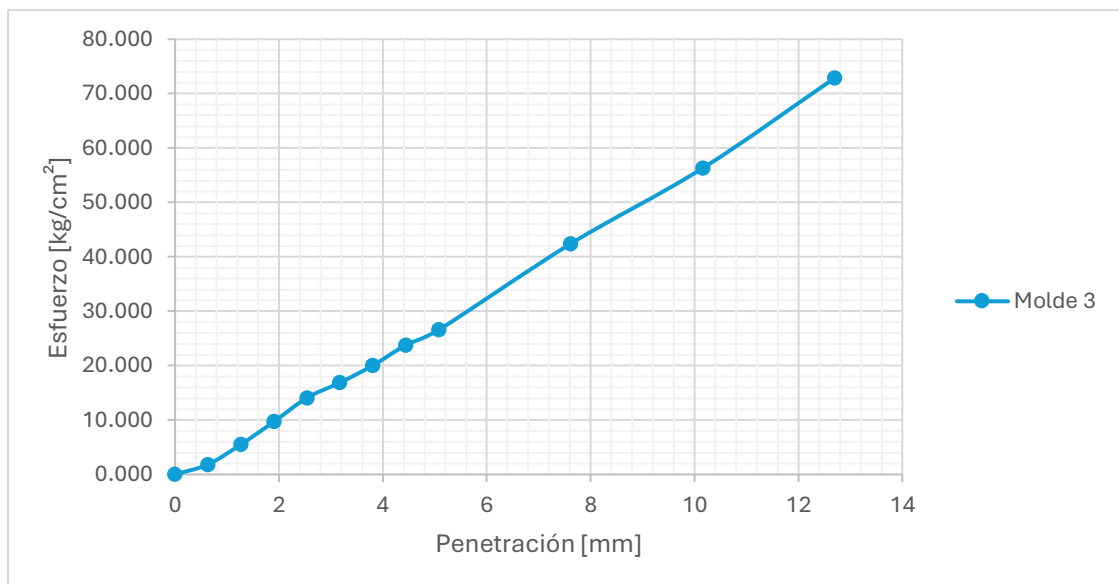
Ilustración 20. Gráfica esfuerzo deformación CBR 25 golpes

Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material sin caucho con 25 golpes.

Tabla 18. Resultados del CBR sin adición de caucho (56 golpes)

CBR 56 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm²]	Esfuerzo [kg/cm²]	CBR %
0		0.000	
0.635		1.847	
1.27		5.542	
1.905		9.711	
2.541	70.31	14.092	20.04
3.176		16.889	
3.81		20.056	
4.445		23.804	
5.08	105.46	26.601	25.22
7.62		42.435	
10.16		56.316	
12.7		72.888	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material sin caucho con 56 golpes.

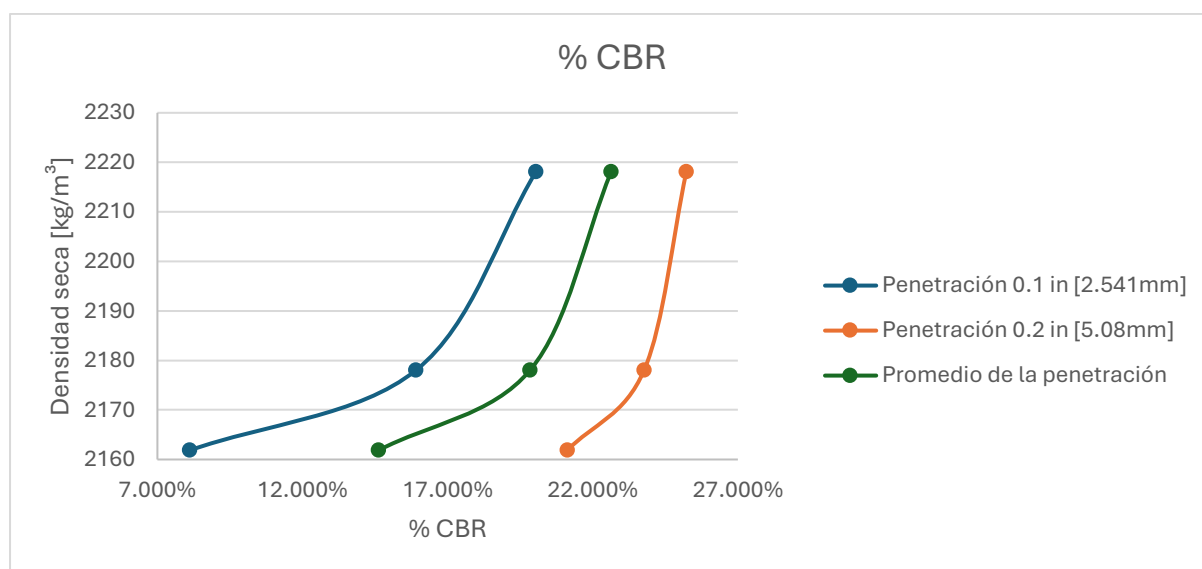
Ilustración 21. Gráfica esfuerzo deformación CBR 56 golpes

Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material sin caucho con 56 golpes.

Tabla 19. Resumen de resultados del CBR sin adición de caucho

CÁLCULO DEL CBR AL 100% Y 95%			
Molde	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Densidad Seca [kg/m³]	2161.825267	2178.0482	2218.095442
Penetración 0.1 in [2.541mm]	8.107%	15.914%	20.043%
Penetración 0.2 in [5.08mm]	21.120%	23.772%	25.224%
Promedio de la penetración	14.614%	19.843%	22.633%

Nota. La tabla muestra un resumen de la densidad y CBR en las penetraciones de 0.1, 0.2, y un promedio entre ambas en el material sin caucho.

Ilustración 22. Gráfica Densidad contra el CBR en el material sin caucho

Nota. En la gráfica se muestra el comportamiento del CBR contra la densidad del material sin caucho.

Tabla 20. Resultados finales del CBR del material sin adición de caucho

VALORES DEL CBR			
ESFUERZO [kg/cm ²]	CBR (01") %	ESFUERZO [kg/cm ²]	CBR (02") %
5.700	8.11%	22.273	21.12%
11.189	15.91%	25.070	23.77%
14.092	20.04%	26.601	25.22%
CBR 100% (0.1")	20.04%	CBR 100% (0.2")	25.22%

Nota. La tabla muestra los resultados finales del CBR en el material sin caucho.

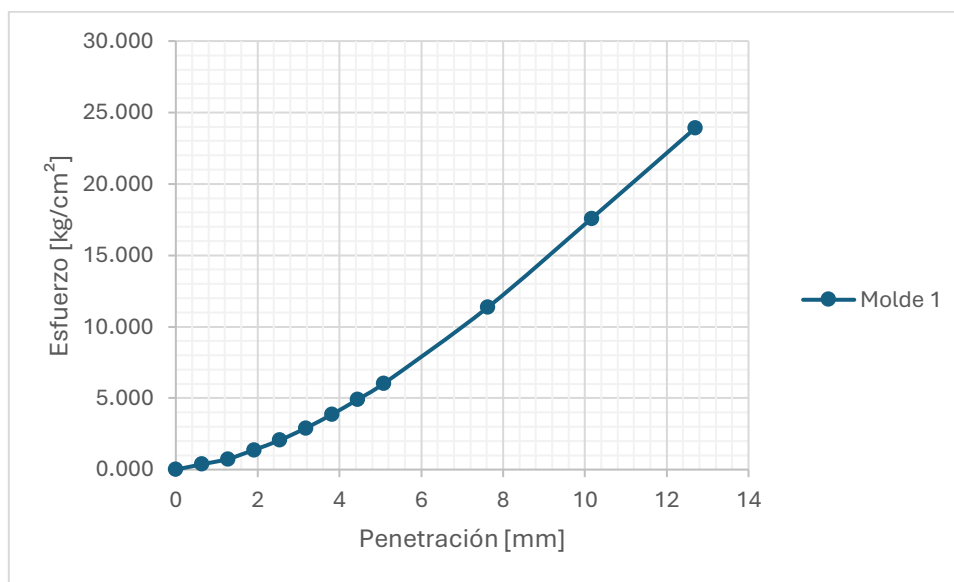
Subbase con adición del 10% de caucho:

Tabla 21. Resultados del CBR del material con adición del 10% de caucho (12 golpes)

CBR 12 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm²]	Esfuerzo [kg/cm²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.369	
1.27		0.739	
1.905		1.372	
2.541	70.31	2.058	2.93
3.176		2.903	
3.81		3.853	
4.445		4.908	
5.08	105.46	6.017	5.71
7.62		11.348	
10.16		17.576	
12.7		23.909	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 10% de caucho con 12 golpes.

Ilustración 23. Gráfica esfuerzo deformación CBR 12 golpes

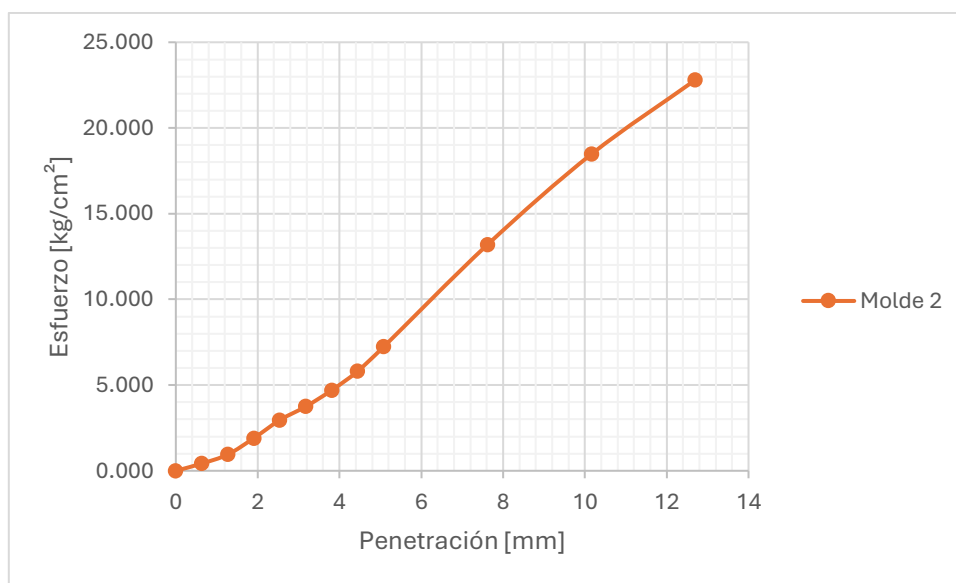


Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 10% caucho con 12 golpes.

Tabla 22. Resultados del CBR del material con adición del 10% de caucho (25 golpes)

CBR 25 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm ²]	Esfuerzo [kg/cm ²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.422	
1.27		0.950	
1.905		1.900	
2.541	70.31	2.956	4.20
3.176		3.747	
3.81		4.697	
4.445		5.806	
5.08	105.46	7.231	6.86
7.62		13.195	
10.16		18.473	
12.7		22.801	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 10% de caucho con 25 golpes.

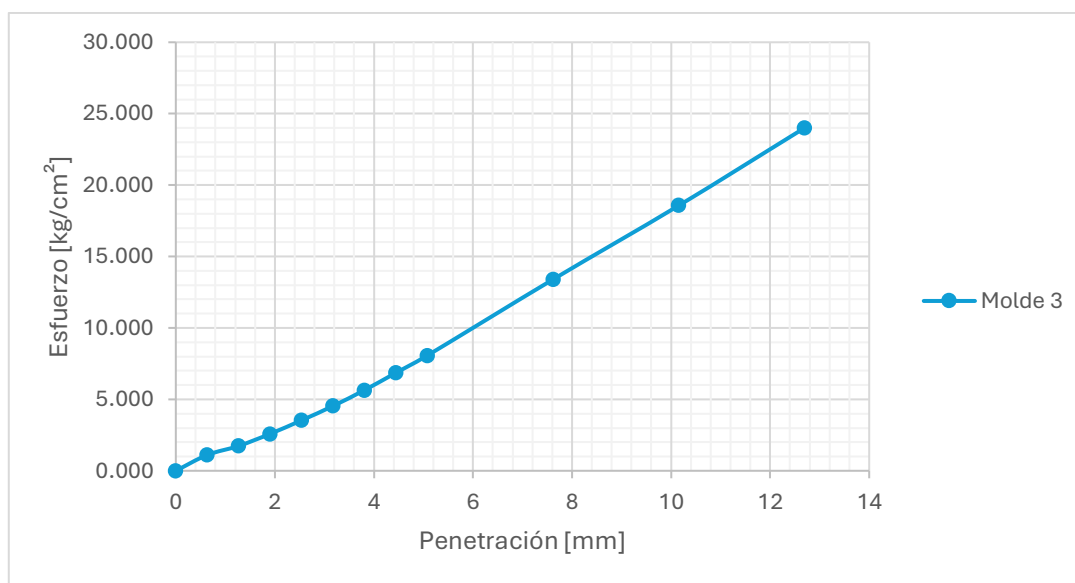
Ilustración 24. Gráfica esfuerzo deformación CBR 25 golpes

Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 10% caucho con 25 golpes.

Tabla 23. Resultados del CBR del material con adición del 10% de caucho (56 golpes)

CBR 56 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm ²]	Esfuerzo [kg/cm ²]	CBR %
0		0.000	
0.635		1.108	
1.27		1.742	
1.905		2.586	
2.541	70.31	3.536	5.03
3.176		4.539	
3.81		5.647	
4.445		6.861	
5.08	105.46	8.075	7.66
7.62		13.406	
10.16		18.578	
12.7		24.015	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 10% de caucho con 56 golpes.

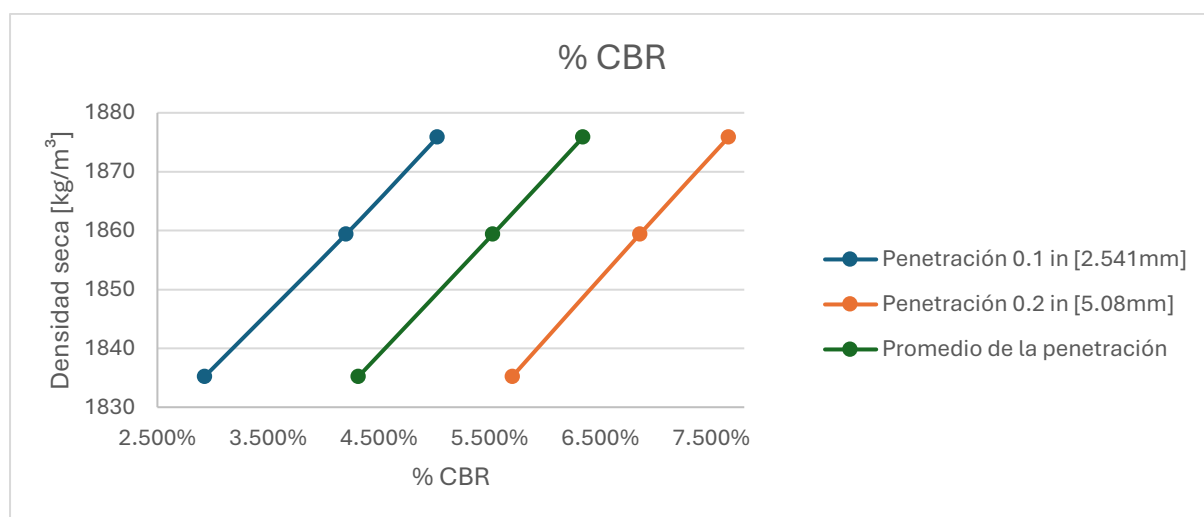
Ilustración 25. Gráfica esfuerzo deformación CBR 56 golpes

Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 10% caucho con 56 golpes.

Tabla 24. Resumen de resultados del CBR con adición de 10% de caucho

CÁLCULO DEL CBR AL 100% Y 95%			
Molde	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Densidad Seca [kg/m ³]	1835.225176	1859.37604	1875.835692
Penetración 0.1 in [2.541mm]	2.928%	4.204%	5.029%
Penetración 0.2 in [5.08mm]	5.705%	6.856%	7.657%
Promedio de la penetración	4.316%	5.530%	6.343%

Nota. La tabla muestra un resumen de la densidad y CBR en las penetraciones de 0.1, 0.2, y un promedio entre ambas en el material con 10% caucho.

Ilustración 26. Gráfica Densidad contra el CBR en el material con 10% de caucho

Nota. En la gráfica se muestra el comportamiento del CBR contra la densidad del material con 10% caucho.

Tabla 25. Resultados finales del CBR del material con adición de 10% de caucho

VALORES DEL CBR			
ESFUERZO [kg/cm ²]	CBR (01") %	ESFUERZO [kg/cm ²]	CBR (02") %
2.058	2.93%	6.017	5.71%
2.956	4.20%	7.231	6.86%
3.536	5.03%	8.075	7.66%
CBR 100% (0.1")	5.03%	CBR 100% (0.2")	7.66%

Nota. La tabla muestra los resultados finales del CBR en el material con 10% de caucho.

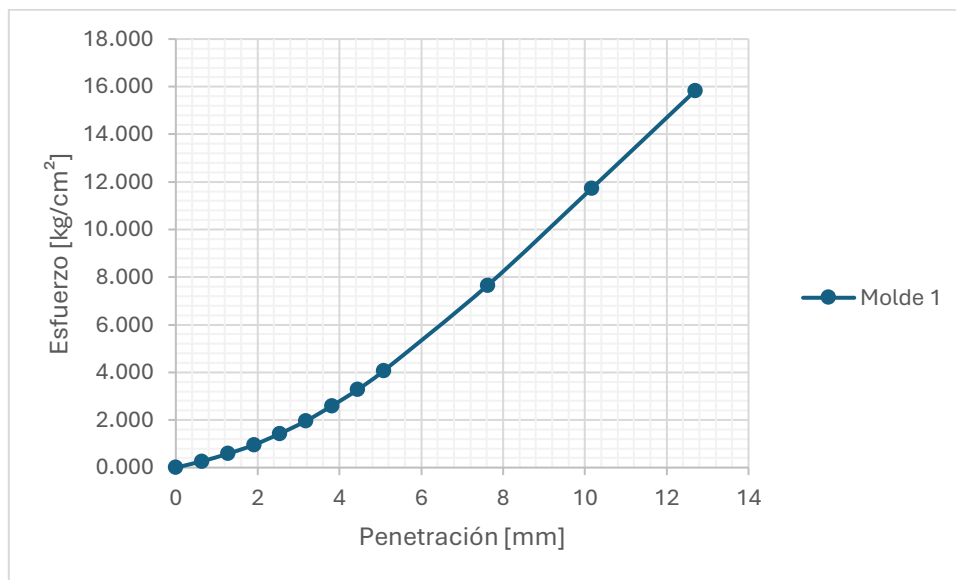
Subbase con adición del 15% de caucho:

Tabla 26. Resultados del CBR del material con adición del 15% de caucho (12 golpes)

CBR 12 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm ²]	Esfuerzo [kg/cm ²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.264	
1.27		0.581	
1.905		0.950	
2.541	70.31	1.425	2.03
3.176		1.953	
3.81		2.586	
4.445		3.272	
5.08	105.46	4.064	3.85
7.62		7.653	
10.16		11.717	
12.7		15.834	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 15% de caucho con 12 golpes.

Ilustración 27. Gráfica esfuerzo deformación CBR 12 golpes

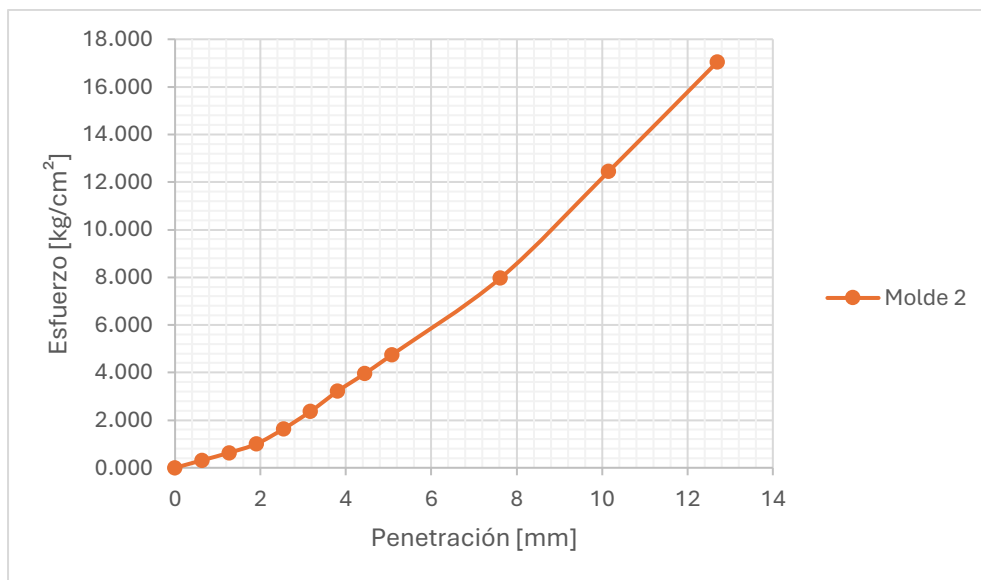


Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 15% caucho con 12 golpes.

Tabla 27. Resultados del CBR del material con adición del 15% de caucho (25 golpes)

CBR 25 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm ²]	Esfuerzo [kg/cm ²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.317	
1.27		0.633	
1.905		1.003	
2.541	70.31	1.636	2.33
3.176		2.375	
3.81		3.220	
4.445		3.958	
5.08	105.46	4.750	4.50
7.62		7.970	
10.16		12.456	
12.7		17.048	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 15% de caucho con 25 golpes.

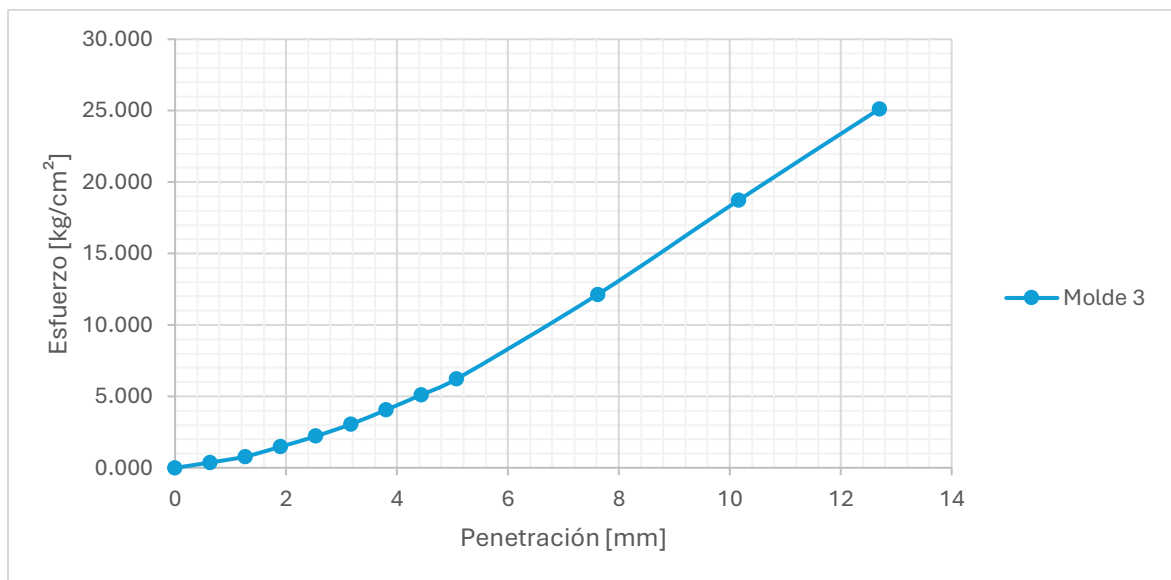
Ilustración 28. Gráfica esfuerzo deformación CBR 25 golpes

Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 15% caucho con 25 golpes.

Tabla 28. Resultados del CBR del material con adición del 15% de caucho (56 golpes)

CBR 56 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm ²]	Esfuerzo [kg/cm ²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.369	
1.27		0.792	
1.905		1.478	
2.541	70.31	2.217	3.15
3.176		3.061	
3.81		4.064	
4.445		5.120	
5.08	105.46	6.228	5.91
7.62		12.139	
10.16		18.737	
12.7		25.123	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 15% de caucho con 56 golpes.

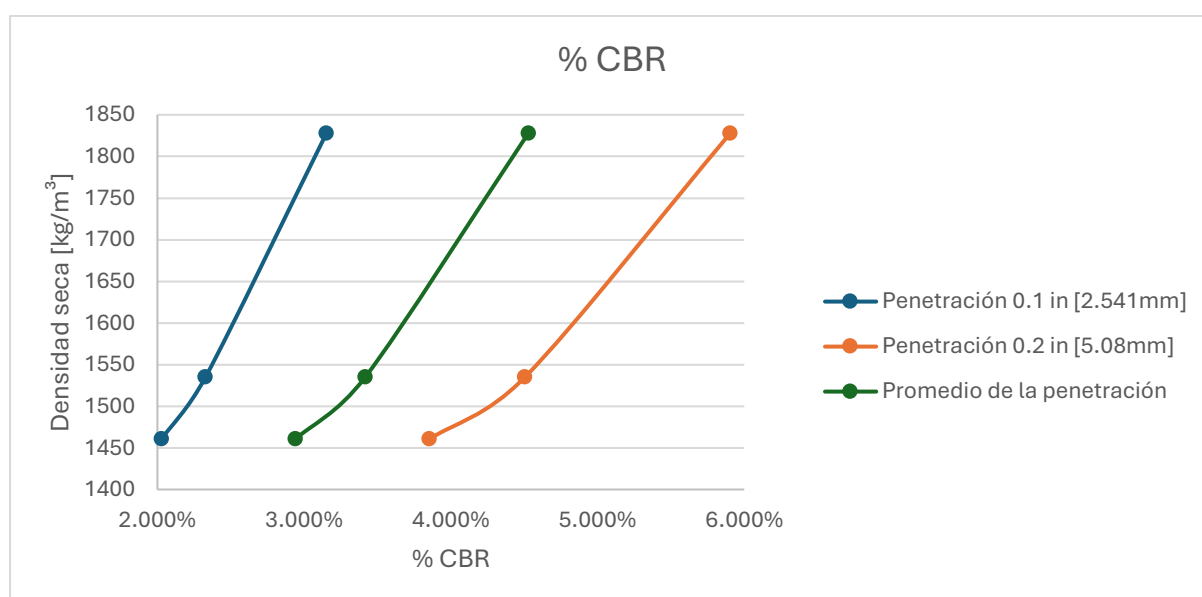
Ilustración 29. Gráfica esfuerzo deformación CBR 56 golpes

Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 15% caucho con 56 golpes.

Tabla 29. Resumen de resultados del CBR con adición de 15% de caucho

CÁLCULO DEL CBR AL 100% Y 95%			
Molde	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Densidad Seca [kg/m ³]	1460.564606	1534.78404	1828.077854
Penetración 0.1 in [2.541mm]	2.027%	2.327%	3.153%
Penetración 0.2 in [5.08mm]	3.854%	4.504%	5.906%
Promedio de la penetración	2.940%	3.416%	4.529%

Nota. La tabla muestra un resumen de la densidad y CBR en las penetraciones de 0.1, 0.2, y un promedio entre ambas en el material con 15% de caucho.

Ilustración 30. Gráfica Densidad contra el CBR en el material con 15% de caucho

Nota. En la gráfica se muestra el comportamiento del CBR contra la densidad del material con 15% de caucho.

Tabla 30. Resultados finales del CBR del material con adición de 15% de caucho

VALORES DEL CBR			
ESFUERZO [kg/cm ²]	CBR (01") %	ESFUERZO [kg/cm ²]	CBR (02") %
1.425	2.03%	4.064	3.85%
1.636	2.33%	4.750	4.50%
2.217	3.15%	6.228	5.91%
CBR 100% (0.1")	3.15%	CBR 100% (0.2")	5.91%

Nota. La tabla muestra los resultados finales del CBR en el material con 15% de caucho.

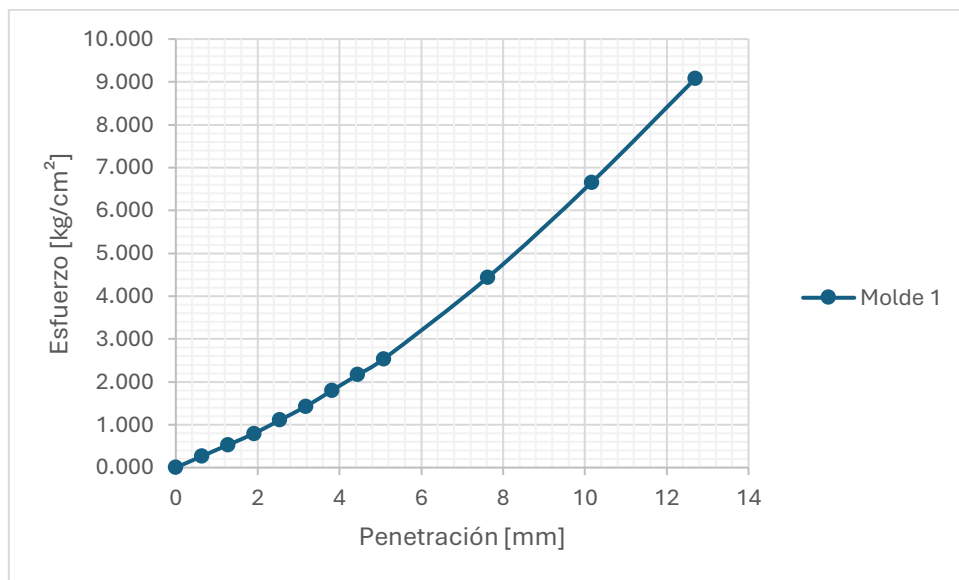
Subbase con adición del 20% de caucho:

Tabla 31. Resultados del CBR del material con adición del 20% de caucho (12 golpes)

CBR 12 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm²]	Esfuerzo [kg/cm²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.264	
1.27		0.528	
1.905		0.792	
2.541	70.31	1.108	1.58
3.176		1.425	
3.81		1.795	
4.445		2.164	
5.08	105.46	2.533	2.40
7.62		4.433	
10.16		6.650	
12.7		9.078	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 20% de caucho con 12 golpes.

Ilustración 31. Gráfica esfuerzo deformación CBR 12 golpes

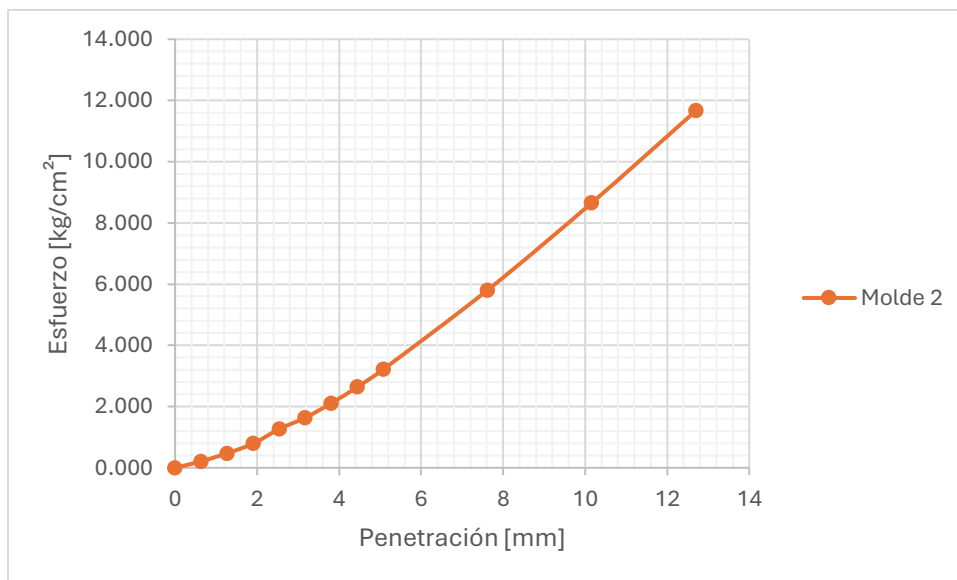


Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 20% caucho con 12 golpes.

Tabla 32. Resultados del CBR del material con adición del 20% de caucho (25 golpes)

CBR 25 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm ²]	Esfuerzo [kg/cm ²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.211	
1.27		0.475	
1.905		0.792	
2.541	70.31	1.267	1.80
3.176		1.636	
3.81		2.111	
4.445		2.639	
5.08	105.46	3.220	3.05
7.62		5.806	
10.16		8.656	
12.7		11.664	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 20% de caucho con 25 golpes.

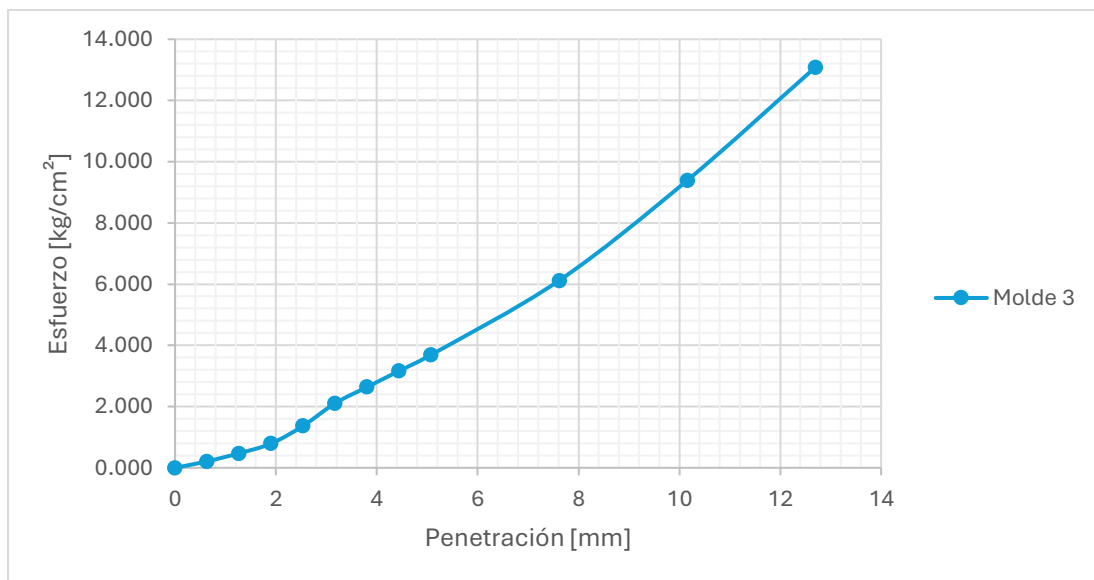
Ilustración 32. Gráfica esfuerzo deformación CBR 25 golpes

Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 20% caucho con 25 golpes.

Tabla 33. Resultados del CBR del material con adición del 20% de caucho (56 golpes)

CBR 56 Golpes			
Penetración [mm]	Carga estándar [kg/cm ²]	Esfuerzo [kg/cm ²]	CBR %
0		0.000	
0.635		0.211	
1.27		0.475	
1.905		0.792	
2.541	70.31	1.372	1.95
3.176		2.111	
3.81		2.639	
4.445		3.167	
5.08	105.46	3.695	3.50
7.62		6.122	
10.16		9.395	
12.7		13.089	

Nota. La tabla muestra los resultados del ensayo de CBR en el material con 20% de caucho con 56 golpes.

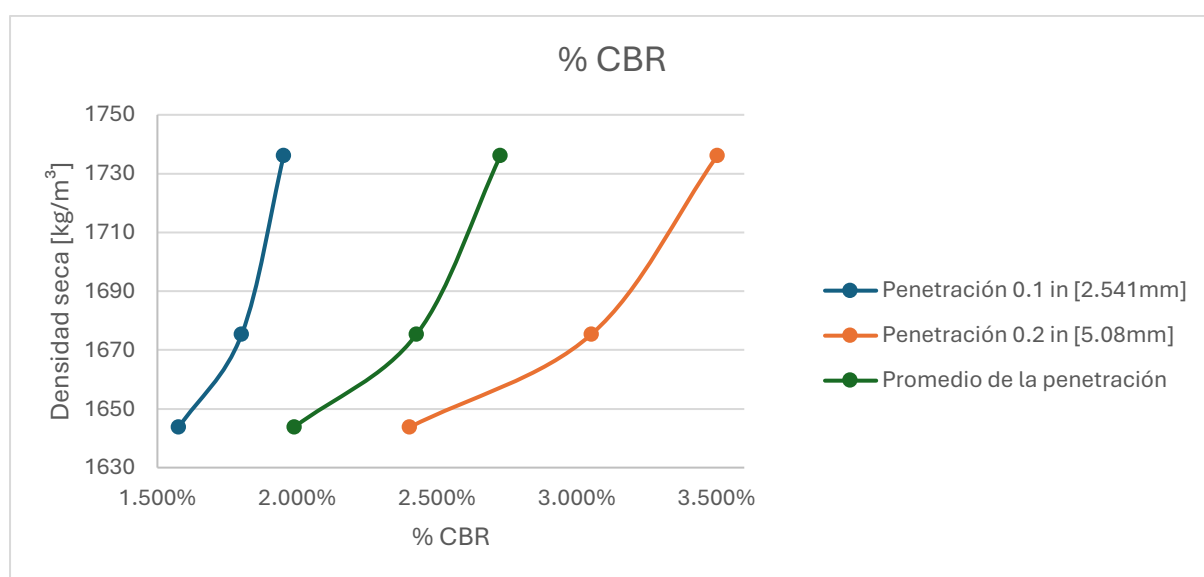
Ilustración 33. Gráfica esfuerzo deformación CBR 56 golpes

Nota. La gráfica muestra la interacción del esfuerzo y la penetración o deformación en el material con 20% caucho con 56 golpes.

Tabla 34. Resumen de resultados del CBR con adición de 20% de caucho

CÁLCULO DEL CBR AL 100% Y 95%			
Molde	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Densidad Seca [kg/m³]	1643.731065	1675.32798	1736.07993
Penetración 0.1 in [2.541mm]	1.576%	1.802%	1.952%
Penetración 0.2 in [5.08mm]	2.402%	3.053%	3.503%
Promedio de la penetración	1.989%	2.427%	2.728%

Nota. La tabla muestra un resumen de la densidad y CBR en las penetraciones de 0.1, 0.2, y un promedio entre ambas en el material con 20% caucho.

Ilustración 34. Gráfica Densidad contra el CBR en el material con 20% de caucho

Nota. En la gráfica se muestra el comportamiento del CBR contra la densidad del material con 20% de caucho.

Tabla 35. Resultados finales del CBR del material con adición de 20% de caucho

VALORES DEL CBR			
ESFUERZO [kg/cm ²]	CBR (01") %	ESFUERZO [kg/cm ²]	CBR (02") %
1.108	1.58%	2.533	2.40%
1.267	1.80%	3.220	3.05%
1.372	1.95%	3.695	3.50%
CBR 100% (0.1")	1.95%	CBR 100% (0.2")	3.50%

Nota. La tabla muestra los resultados finales del CBR en el material con 20% de caucho.

14.5. Resumen de resultados:

Tabla 36. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

RESULTADOS	
Límites de Atterberg	
Límite Plástico	29.23%
Límite Líquido	19.71%
Índice de Plasticidad	9.52%
Granulometría	
Subbase sin adición de caucho	Subbase clase 3
Subbase con 10% de adición de caucho	Subbase clase 3
Subbase con 15% de adición de caucho	Subbase clase 3
Subbase con 20% de adición de caucho	Subbase clase 3
Ensayo de Proctor	
Subbase sin adición de caucho	
Humedad Óptima	7.00%
Densidad seca Máxima	2351.785 kg/m ³
Subbase con 10% de adición de caucho	
Humedad Óptima	8.10%
Densidad seca Máxima	2311.547 kg/m ³
Subbase con 15% de adición de caucho	
Humedad Óptima	8.20%
Densidad seca Máxima	2169.143 kg/m ³
Subbase con 20% de adición de caucho	
Humedad Óptima	8.50%
Densidad seca Máxima	2143.62395 kg/m ³
CBRs	
Subbase sin adición de caucho	25.22%
Subbase con 10% de adición de caucho	7.66%
Subbase con 15% de adición de caucho	5.91%
Subbase con 20% de adición de caucho	3.50%

Nota. La tabla muestra un resumen de todos los resultados de los ensayos de laboratorio realizados por los autores del presente proyecto.

14.6. Interpretación de los resultados

Conforme a los resultados obtenidos después de realizar los ensayos de laboratorio necesarios representan que la subbase no cumple con los estándares mínimo requeridos por la norma ecuatoriana, donde se detalla que el índice de plasticidad debe ser menor a 6, en

este caso el índice de plasticidad es de 9.52 que está por encima de lo requerido. Cabe recalcar que no se realizaron ensayos de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad en los materiales que tenían adición de polvo de caucho, puesto que el tamaño de las partículas adicionadas no afectaba este parámetro, es decir, estaban fuera del tamaño requerido para el ensayo.

La granulometría cumple dentro del rango establecido en la norma, clasificando la subbase como una de clase 3, como era esperado. En este apartado no existe inconveniente con el material puesto que todas las muestras, desde la que no tiene adición de caucho hasta la que tienen una adición de 20% de adición de material, cumplieron satisfactoriamente con la granulometría.

En el ensayo de Proctor modificado se obtuvieron resultados diferentes en las muestras analizadas, iniciando con el material sin adición de polvo de caucho, el cual tuvo una compactación y humedad excelentes dando el resultado de una densidad máxima de 2352 kg/m^3 con una humedad de 7%. Pero se notó resultados preocupantes en las muestras con adición de polvo de caucho, donde se observó que las densidades de las muestras bajaron: 2312 kg/m^3 , 2169 kg/m^3 y 2144 kg/m^3 en las muestras con adición de 10%, 15% y 20% de caucho, respectivamente. Además, que la humedad óptima aumentó a 8.10% con el material con 10% de adición de caucho, 8.20% con el material con 15% de adición de caucho y 8.50% con el material con 20% de adición de caucho. Lo que resulta normal porque el material adicionado es un material con menos densidad.

Los autores del presente proyecto concluyen que las densidades bajan y las humedades aumentan por las propiedades del caucho, puesto que es resultó ser un material incompresible y que no absorbe la humedad, eso desencadenó problemas de compactación e hizo que los resultados varíen.

Los resultados del CBR son regulares en cuanto al material si adición de polvo de caucho, llegando al 25% de CBR, pero no cumple con lo mínimo requerido que es ser mayor

o igual al 30% de CBR. Esta deficiencia se atribuye a las propiedades del material puesto que los autores realizaron el ensayo con la mayor precisión que los recursos y los conocimientos les confieren. En cuanto a los materiales con adición de polvo de caucho, los resultados del CBR son preocupantes porque solamente bajan a 7%, 5% y 3% en las muestras con adición de 10%, 15% y 20% de caucho, respectivamente.

Los resultados no son los esperados, el motivo es el material externo adicionado. El caucho provee una capacidad de rebote al suelo que no presentaba anteriormente, además, el material desde el inicio no reflejaba buenos resultados en los ensayos por lo que los resultados de los CBRs con adición de caucho bajan alarmantemente.

15. Cronograma de actividades

Para la realización exitosa de la investigación se siguió el cronograma dispuesto en el anteproyecto sin cambios.

Tiempo	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Actividad				
Realización de ensayos de laboratorio. (Incluye, recuperación de las muestras, granulometrías, límite líquido, límite plástico, Proctor y CBR)	X	X	X	
Redacción y verificación del proyecto				X
Preparación para la defensa				X

16. Conclusiones

La investigación realizada tuvo como objetivo principal evaluar la influencia de la incorporación de polvo de caucho reciclado en las propiedades mecánicas de un material de subbase el cual fue adquirido en una planta de procesamiento de agregados, la cual es una de las más reconocidas en la zona. Los ensayos fueron realizados de manera rigurosa, utilizando equipos que se encontraban correctamente calibrados, siguiendo estrictamente las condiciones y procedimientos establecidos en las normativas ecuatorianas correspondientes

a cada ensayo y bajo condiciones controladas, esto otorga confiabilidad a los resultados que se obtuvieron.

A pesar de todo esto los resultados no reflejaron una mejora al material en los parámetros que se esperaban, al contrario, se presentó una disminución significativa en la densidad seca máxima y en el CBR. Uno de los motivos por los cuales se obtuvieron estos resultados podría ser que el caucho no es un material absorbente, por lo cual al incorporar la dosificación calculada de agua, este cambiaba los parámetros, en futuras investigaciones se debería calcular la humedad óptima del material ya con el caucho incluido; otro precedente de los resultados es que el caucho no es un material compresible, al contrario este tiene una alta capacidad de rebote, esto se logró apreciar desde el ensayo de Proctor ya que a mayor incorporación de caucho, el pistón daba un pequeño salto entre cada golpe, esto contribuyó a que su compactación se disminuya y al ser un material menos denso y ocupar más área por partícula que el material de subbase generó una disminución de la densidad de la muestra.

Un hallazgo preocupante fue que el material de subbase adquirido en la planta de procesamiento de agregados mencionada anteriormente tampoco cumplía con el valor mínimo de CBR exigido por la normativa, incluso antes de la incorporación de caucho, al ser un resultado fuera de lo común el ensayo con el material sin adición fue repetido, arrojando resultados similares en los que no cumplía con lo mínimo exigido por la normativa. El resultado fue socializado con docentes especializados en el área y nos supieron indicar que no es la única cantera donde ocurre eso ya que es complicado conseguir un material que cumpla estrictamente con los requisitos de la normativa en la zona. Esto resalta la necesidad de un control más estricto y riguroso sobre los materiales que se adquieren para proyectos viales en nuestro medio.

Como lo detallan en su estudio (Ramírez Navarrete et al., 2024) quienes realizaron un estudio de características similares, el CBR del material con adición de 10%, 20% y 30% de caucho da resultados desfavorables, bajando de un 57% de CBR a un 7%, ellos detallan que

el caucho usado no es un material idóneo para preservar las propiedades mecánicas del suelo.

Si bien los resultados no fueron los deseados, la investigación permitió concluir que la incorporación de caucho triturado y reciclado no es compatible específicamente con este tipo de suelo usado para subbase, al menos en las proporciones evaluadas, ya que, al aumentar el porcentaje de inclusión de caucho, el CBR disminuía. Sin embargo, no se descarta su uso si se realizan ajustes adicionales al diseño de la mezcla o si se combina con otros materiales estabilizadores.

Adicionalmente se podría evaluar el uso de polvo de caucho reciclado en aplicaciones diferentes al diseño de subbase convencional, aprovechando la capacidad de amortiguación que el polvo de caucho generó, ya que esto podría resultar favorable en superficies donde sea prioridad la comodidad del usuario y la absorción del impacto, como en senderos peatonales, ciclovías o zonas recreativas.

Se debería también analizar el comportamiento de la subbase modificada bajo cargas cíclicas o condiciones que simulen el tráfico repetido con ensayos de módulo resiliente o de fatiga, ya que inicialmente el CBR obtenido disminuyó, el material puede llegar a tener un buen desempeño a largo plazo en términos de recuperación elástica y durabilidad.

Finalmente se podría experimentar con una granulometría más pequeña de polvo de caucho ya que al ser de menor tamaño podrían integrarse de mejor manera al material, reduciendo los vacíos y por consiguiente el efecto de rebote que genera.

17. Recomendaciones

Se recomienda previo a la utilización del material para los ensayos o para proyectos viales realizar una evaluación de sus propiedades tanto físicas como mecánicas asegurando que cumpla al menos con las condiciones mínimas establecidas sin importar el origen del material, ya que se logró evidenciar que no siempre es así.

No se recomienda el uso de caucho reciclado como aditivo para mejorar las propiedades mecánicas ni como estabilizante para suelos con material de características similares al analizado en esta investigación, al menos sin haber realizado una modificación completa del diseño o implementados estabilizantes complementarios.

En futuras investigaciones se recomienda realizar estudios con otros tipos de suelo como los de tipo arcilloso ya que estos al tener un alto grado de cohesión y compactación pueden ser mejorados al incorporar el caucho reciclado, así también determinando si la efectividad de la incorporación de este depende de las características del terreno base utilizado.

18. Anexos

Ilustración 35. Balanza de precisión de 0.01 g



Nota. La balanza se utilizó para pesos menores a 1 kg y se muestra su sello de calibración.

Ilustración 36. Balanza con precisión de 0.1g



Nota. La balanza se utilizó para pesos mayores a 1 kg y se muestra su sello de calibración.

Ilustración 37. Tamizado de los materiales para la realización de los ensayos



Nota. Se usó la tamizadora para poder tener el material en el tamaño necesario para los ensayos.

Ilustración 38. Toma de muestras de humedades



Nota. Se muestra la toma de muestras de humedades después de realizar el CBR.

Ilustración 39. Compra de los materiales en la mina



Nota. Se muestra la compra de material en la mina Rokaazul.

Ilustración 40. Toma de pesos en la balanza



Nota. Se muestra la toma de pesos para humedades en la balanza.

Ilustración 41. Toma de muestras de hinchamiento en el día



Nota. Se muestra la toma de muestras de hinchamiento del CBR una vez sumergido.

Ilustración 42. Realización de los CBRs



Nota. Se muestran todos los CBRs antes de ser ensayados, en proceso de escurrimiento.

Ilustración 43. Transporte de los CBRs para el ensayo



Nota. Se muestran los CBRs antes de ser ensayados.

Ilustración 44. Desmolde del CBR después del ensayo



Nota. Se muestra el desmolde del CBR después del ensayo, haciendo uso de una gata hidráulica.

Ilustración 45. Implementos necesarios para realizar el ensayo de proctor



Nota. Se muestran los elementos necesarios para realizar el Proctor.

Ilustración 46. Colocación de los materiales en el horno para secado



Nota. Se muestra la colocación de las taras en el horno para determinar la humedad.

Ilustración 47. Toma de pesos para humedades



Nota. Se muestra la toma de pesos para calcular las humedades.

Ilustración 48. Preparación de las muestras del CBR



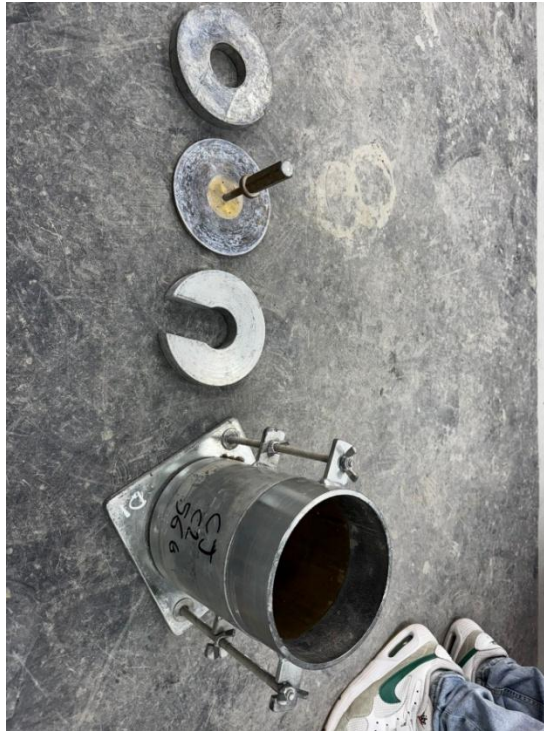
Nota. Se muestra la realización del ensayo de CBR.

Ilustración 49. Realización del ensayo de Proctor



Nota. Se muestra la realización del ensayo de Proctor.

Ilustración 50. *Implementos necesarios para realizar el CBR*



Nota. Se muestran los implementos necesarios para armar la muestra de CBR.

Ilustración 51. *Toma de muestras de hinchamiento*



Nota. Se muestra la toma de medidas con el dial antes de la sumergencia del CBR.

Ilustración 52. Caucho implementado en las muestras



Nota. Se muestra el polvo de caucho utilizado para la preparación de las muestras.

Ilustración 53. Material con adición de polvo de caucho



Nota. Se muestra el material con la adición de polvo de caucho listo para ser ensayado.

Ilustración 54. Tamices utilizados en la granulometría

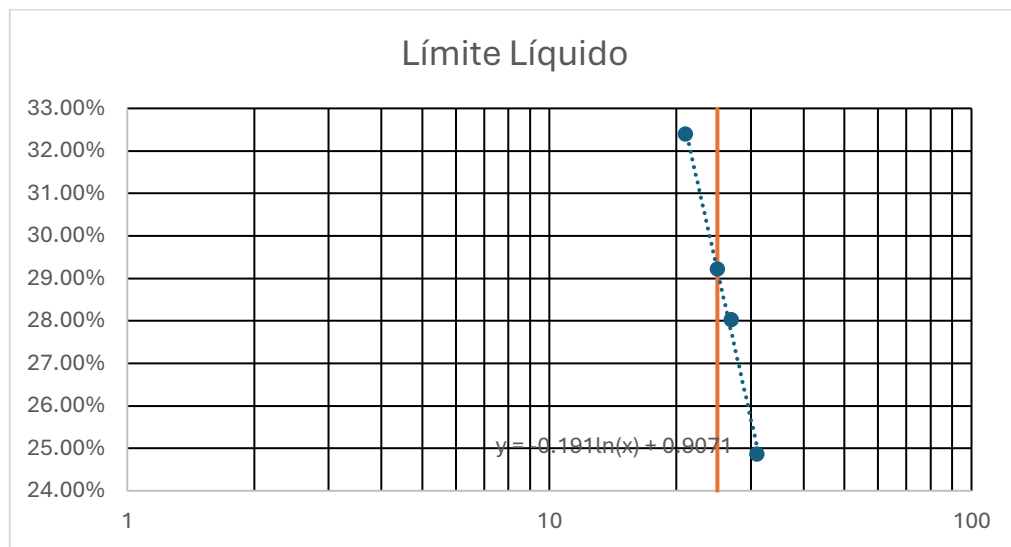


Nota. Son los tamices utilizados en el ensayo de granulometría.

Tabla 37. Datos tomados para sacar el límite líquido

LÍMITE LÍQUIDO DE LA SUBBASE								
Numero de golpes		Tara + suelo humedo	Tara + suelo seco	Agua	Tara	Masa suelo seco	Contenido de agua	
31	1	54.32	47	7.32	17.56	29.44	24.86%	
27	3	38.65	34.1	4.55	17.87	16.23	28.03%	
25	4	38.53	33.8	4.73	17.61	16.19	29.22%	
21	2	46.94	39.79	7.15	17.72	22.07	32.40%	

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo del límite líquido.

Ilustración 55. Gráfica del límite líquido

Nota. Gráfico utilizado para determinar el límite líquido.

Tabla 38. Datos tomados para el Límite Plástico

LIMITE PLASTICO DE LA SUBBASE						
Muestra	Tara + suelo humedo	Tara + suelo seco	Agua	Tara	Masa suelo seco	Contenido de agua
1	24.1	22.71	1.39	17.5	5.21	26.68%
2	22.3	21.78	0.52	17.7	4.08	12.75%

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo del límite plástico.

Tabla 39. Resultados de los límites de Atterberg

LP	LL	INDICE PLASTICIDAD
19.71%	29.23%	10%

Nota. Se muestran obtenidos de los límites de Atterberg, estos datos fueron presentados y explicados anteriormente.

Tabla 40. Datos necesarios para realizar el ensayo de proctor (material sin caucho)

PROCTOR DE LA SUBBASE						
MOLDE						
Diámetro	15.26	cm				
Longitud	11.65	cm				
Área	182.893785	cm ²				
Volumen	2130.7126	cm ³				
Peso	5.456	kg				
Peso martillo	44.5	N				
Altura de caída	457.2	cm				
N° Capas	5					
N° Golpes	56					
Material	Pasate el tamiz 3/4"					
ENSAYO DE PROCTOR						
N° Muestra	1	2	3			
Peso Suelo + Molde [kg]	10.299	10.464	10.402			
Peso Suelo [kg]	4.843	5.008	4.946			
Humedad Promedio [%]	5.06%	6.67%	8.32%			
Densidad Húmeda [kg/m ³]	2272.948497	2350.387378	2321.289132			
Densidad Seca [kg/m ³]	2271.799293	2348.821503	2319.360533			
HUMEDADES						
N° Muestra	1	2	3			
Peso capsula + suelo húmedo [g]	57.45	60.55	56.86	53.25	69.24	61.44
Peso capsula + suelo seco [g]	55.47	58.55	54.21	51.18	65.22	58.1
Peso capsula [g]	17.53	17.72	17.14	17.71	17.14	17.71
Peso del suelo seco [g]	37.94	40.83	37.07	33.47	48.08	40.39
Peso del agua [g]	1.98	2	2.65	2.07	4.02	3.34
Humedad [%]	5.22%	4.90%	7.15%	6.18%	8.36%	8.27%
Humedad Promedio [%]	5.06%		6.67%		8.32%	
Humedad Promedio [%]	6.68%					

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo de la humedad óptima y la densidad seca máxima.

Tabla 41. Resultados del proctor en el material (Sin caucho)

y = -201948x ² + 28469x + 1348.5	
Resultados	
Humedad Óptima	7.00%
Densidad Seca Máxima	2351.7848 kg/m ³
Humedad	Densidad Seca
%	kg/m ³
6.50%	2345.7547
6.60%	2347.76851
6.70%	2349.37843
6.80%	2350.58445
6.90%	2351.38657
7.00%	2351.7848
7.10%	2351.77913
7.20%	2351.36957
7.30%	2350.55611
7.40%	2349.33875
7.50%	2347.7175
7.60%	2345.69235

Nota. Se muestra el cálculo de la humedad óptima y la densidad seca máxima, mediante la ecuación mostrada.

Tabla 42. Datos necesarios para realizar el ensayo de proctor (10% caucho)

PROCTOR DE LA SUBBASE CON 10% DE CAUCHO				
MOLDE				
Diámetro	15.26 cm			
Longitud	11.65 cm			
Área	182.893785 cm ²			
Volumen	2130.7126 cm ³			
Peso	5.766 kg			
Peso martillo	44.5 N			
Altura de caída	457.2 cm			
N° Capas	5			
N° Golpes	56			
Material	Pasate el tamiz 3/4"			
ENSAYO DE PROCTOR CON 10				
N° Muestra	5%	6.50%	8%	8%
Peso Suelo + Molde [kg]	10.257	10.637	10.743	10.524
Peso Suelo [kg]	4.491	4.871	4.977	4.822
Humedad Promedio [%]	4.98%	7.22%	7.67%	9.01%
Densidad Húmeda [kg/m ³]	2107.74555	2286.08964	2335.838255	2263.092639
Densidad Seca [kg/m ³]	2106.696578	2284.441267	2334.047705	2261.055002
HUMEDADES				
N° Muestra	1	2	3	4
Peso capsula + suelo húmedo [g]	65.12	61.12	61.54	71.63
Peso capsula + suelo seco [g]	62.75	59.14	58.51	68.1
Peso capsula [g]	17.45	17.25	17.73	17.68
Peso del suelo seco [g]	45.3	41.89	40.78	50.42
Peso del agua [g]	2.37	1.98	3.03	3.53
Humedad [%]	5.23%	4.73%	7.43%	7.00%
Humedad Promedio [%]	4.98%	7.22%	7.67%	9.01%
Humedad Promedio [%]	6.62%			

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo de la humedad óptima y la densidad seca máxima.

Tabla 43. Resultados del proctor en el material (10% caucho)

y = -276249x ² + 42611x + 668.38	
Resultados	
Humedad Óptima	8.10%
Densidad Seca Máxima	2311.54668 kg/m ³
Humedad %	Densidad Seca kg/m ³
7.00%	2297.5299
7.10%	2301.18979
7.20%	2304.29718
7.30%	2306.85208
7.40%	2308.85448
7.50%	2310.30438
7.60%	2311.20178
7.70%	2311.54668
7.80%	2311.33908
7.90%	2310.57899
8.00%	2309.2664
8.10%	2307.40131

Nota. Se muestra el cálculo de la humedad óptima y la densidad seca máxima, mediante la ecuación mostrada.

Tabla 44. Datos necesarios para realizar el ensayo de proctor (15% caucho)

PROCTOR DE LA SUBBASE CON 15% DE CAUCHO								
MOLDE								
Diámetro	15.26	cm						
Longitud	11.65	cm						
Área	182.893785	cm ²						
Volumen	2130.7126	cm ³						
Peso	5.748	kg						
Peso martillo	44.5	N						
Altura de caída	457.2	cm						
N° Capas	5							
N° Golpes	56							
Material	Pasate el tamiz 3/4"							
ENSAYO DE PROCTOR								
N° Muestra	5%	6.50%	8%	10%				
Peso Suelo + Molde [kg]	10.071	10.234	10.332	10.314				
Peso Suelo [kg]	4.323	4.486	4.584	4.566				
Humedad Promedio [%]	4.59%	5.80%	6.80%	9.79%				
Densidad Húmeda [kg/m ³]	2028.898689	2105.398917	2151.39292	2142.945042				
Densidad Seca [kg/m ³]	2027.968841	2104.178923	2149.930475	2140.848253				
HUMEDADES								
N° Muestra	1	2	3	4				
Peso capsula + suelo húmedo [g]	50.99	69.78	58.01	67.98	84.5	84.5	75.78	71.53
Peso capsula + suelo seco [g]	49.25	67.91	55.52	65.51	80.22	80.22	70.77	66.5
Peso capsula [g]	17.42	17.42	17.15	17.14	17.3	17.3	17.26	17.31
Peso del suelo seco [g]	31.83	50.49	38.37	48.37	62.92	62.92	53.51	49.19
Peso del agua [g]	1.74	1.87	2.49	2.47	4.28	4.28	5.01	5.03
Humedad [%]	5.47%	3.70%	6.49%	5.11%	6.80%	6.80%	9.36%	10.23%
Humedad Promedio [%]	4.59%		5.80%		6.80%		9.79%	
Humedad Promedio [%]	5.73%							

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo de la humedad óptima y la densidad seca máxima.

Tabla 45. Resultados del proctor en el material (15% caucho)

y = -109339x ² + 17909x + 1435.8	
Resultados	
Humedad Óptima	8.20%
Densidad Seca Máxima	2169.14256 kg/m ³
Humedad	Densidad Seca
%	kg/m³
7.40%	2162.32564
7.50%	2163.94313
7.60%	2165.34194
7.70%	2166.52207
7.80%	2167.48352
7.90%	2168.2263
8.00%	2168.7504
8.10%	2169.05582
8.20%	2169.14256
8.30%	2169.01063
8.40%	2168.66002
8.50%	2168.09073

Nota. Se muestra el cálculo de la humedad óptima y la densidad seca máxima, mediante la ecuación mostrada.

Tabla 46. Datos necesarios para realizar el ensayo de proctor (20% caucho)

PROCTOR DE LA SUBBASE CON 20% DE CAUCHO									
MOLDE									
Diámetro	15.26	cm							
Longitud	11.65	cm							
Área	182.893785	cm ²							
Volumen	2130.7126	cm ³							
Peso	5.748	kg							
Peso martillo	44.5	N							
Altura de caída	457.2	cm							
N° Capas	5								
N° Golpes	56								
Material	Pasate el tamiz 3/4"								
ENSAYO DE PROCTOR									
N° Muestra	1		2		3		3		
Peso Suelo + Molde [kg]	9.904		10.035		10.186		10.224		
Peso Suelo [kg]	4.156		4.287		4.438		4.476		
Humedad Promedio [%]	6.11%		6.51%		7.14%		9.62%		
Densidad Húmeda [kg/m ³]	1950.521155		2012.002933		2082.871243		2100.705652		
Densidad Seca [kg/m ³]	1949.331067		2010.694757		2081.385604		2098.686684		
HUMEDADES									
N° Muestra	1		2		3		4		
Peso capsula + suelo húmedo	72.96	69.45	72.82	77.21	89.49	84.17	89.33	78.16	
Peso capsula + suelo seco [g]	69.62	66.57	69.79	73.21	84.59	79.82	82.76	73.1	
Peso capsula [g]	17.3	17.14	17.57	17.73	17.68	17.25	17.69	17.76	
Peso del suelo seco [g]	52.32	49.43	52.22	55.48	66.91	62.57	65.07	55.34	
Peso del agua [g]	3.34	2.88	3.03	4	4.9	4.35	6.57	5.06	
Humedad [%]	6.38%	5.83%	5.80%	7.21%	7.32%	6.95%	10.10%	9.14%	
Humedad Promedio [%]	6.11%		6.51%		7.14%		9.62%		
Humedad Promedio [%]	6.58%								

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo de la humedad óptima y la densidad seca máxima.

Tabla 47. Resultados del proctor en el material (20% caucho)

y = -344378x ² + 58389x - 331.31	
Resultados	
Humedad Óptima	8.50%
Densidad Seca Máxima	2143.62395 kg/m ³
Humedad %	Densidad Seca kg/m ³
8.00%	2135.7908
8.10%	2138.73494
8.20%	2140.99033
8.30%	2142.55696
8.40%	2143.43483
8.50%	2143.62395
8.60%	2143.12431
8.70%	2141.93592
8.80%	2140.05877
8.90%	2137.49286
9.00%	2134.2382
9.10%	2130.29478

Nota. Se muestra el cálculo de la humedad óptima y la densidad seca máxima, mediante la ecuación mostrada.

Tabla 48. Datos necesarios para calcular el CBR (Sin caucho)

CBR DE LA SUBBASE						
DATOS INICIALES						
Diámetro del molde	0.152	m	152	mm		
Altura del Molde	0.178	m	178	mm		
Volumen del Molde (m ³)	0.00323					
Densidad Seca Máxima [kg/m ³]	2351.785					
DENSIDAD SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA						
N° Molde	1	2	3			
N° Capas	5	5	5			
N° Golpes/Capa	12	25	56			
Humedad de la muestra%	7	7	7			
Peso del suelo húmedo + molde [kg]	13.394	14.402	14.379			
Peso del molde [kg]	5.912	6.869	6.713			
Peso del suelo húmedo [kg]	7.482	7.533	7.666			
Volumen del suelo [m ³]	0.00323	0.00323	0.00323			
Densidad húmeda [kg/m ³]	2316.438	2332.227	2373.404			
HUMEDAD						
Muestra	1		2		3	
Peso de la cápsula [g]	17.37	17.70	17.68	17.26	17.52	17.43
Peso muestra húmeda + cápsula [g]	68.42	74.36	72.85	64.73	86.60	88.46
Peso muestra seca + cápsula [g]	65.02	70.57	69.31	61.50	82.14	83.75
Peso del agua [g]	3.40	3.79	3.54	3.23	4.46	4.71
Peso del suelo seco [g]	47.65	52.87	51.63	44.24	64.62	66.32
Humedad [%]	7.135	7.169	6.856	7.301	6.902	7.102
Humedad Promedio[%]	7.152		7.079		7.002	
Densidad Seca [kg/m ³]	2161.825		2178.048		2218.095	
HINCHAMIENTO						
F-Dial	0.0001					
L Inicial	5		MOLDE			
Fecha	1		2		3	
27/6/2025	36		104		38.5	
28/6/2025	38		108.5		45	
29/6/2025	38		111		51	
30/6/2025	38		111		51	
HINCHAMIENTO	0.156		0.453		0.217	
DATOS DEL PISTON						
kN	101.97	kg				
Área del pistón	19.32	cm ²				
Área del pistón	2.9946	in ²				
kg/cm ²	0.070307	lbs/in ²				

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo del CBR.

Tabla 49. Resultados del CBR en el material (Sin caucho)

Penetración [mm]	Carga Estándar [kg/cm ²]	CBR											
		Molde 1				Molde 2				Molde 3			
		Carga Lectura kN	kg	[kg/cm ²]	%	Carga Lectura kN	kg	[kg/cm ²]	%	Carga Lectura kN	kg	[kg/cm ²]	%
0		0	0.000	0.000		0	0.000	0.000		0	0.000	0.000	
0.635		0.11	11.217	0.581		0.16	16.315	0.844		0.35	35.690	1.847	
1.27		0.31	31.611	1.636		0.7	71.379	3.695		1.05	107.069	5.542	
1.905		0.62	63.221	3.272		1.51	153.975	7.970		1.84	187.625	9.711	
2.541	70.31	1.08	110.128	5.700	0.0810722	2.12	216.176	11.189	0.15914172	2.67	272.260	14.092	0.20042849
3.176		1.71	174.369	9.025		2.65	270.221	13.987		3.2	326.304	16.889	
3.81		2.42	246.767	12.773		3.24	330.383	17.101		3.8	387.486	20.056	
4.445		3.29	335.481	17.364		3.92	399.722	20.690		4.51	459.885	23.804	
5.08	105.46	4.22	430.313	22.273	0.21119809	4.75	484.358	25.070	0.23772297	5.04	513.929	26.601	0.25223658
7.62		8.49	865.725	44.810		7.51	765.795	39.637		8.04	819.839	42.435	
10.16		13.34	1360.280	70.408		11.5	1172.655	60.696		10.67	1088.020	56.316	
12.7		18.11	1846.677	95.584		15.55	1585.634	82.072		13.81	1408.206	72.888	

Nota. Se muestran los resultados del CBR sin caucho.

Tabla 50. Datos necesarios para calcular el CBR (10% caucho)

CBR DE LA SUBBASE						
DATOS INICIALES						
Diámetro del molde	0.152 m		152 mm			
Altura del Molde	0.178 m		178 mm			
Volumen del Molde [m ³]	0.00323					
Densidad Seca Máxima [kg/m ³]	2311.547					
DENSIDAD SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA						
Nº Molde	1	2	3			
Nº Capas	5	5	5			
Nº Golpes/Capa	12	25	56			
Humedad de la muestra%	8.1	8.1	8.1			
Peso del suelo húmedo + molde [kg]	12.706	13.424	13.482			
Peso del molde [kg]	6.292	6.922	6.926			
Peso del suelo húmedo [kg]	6.414	6.502	6.556			
Volumen del suelo [m ³]	0.00323	0.00323	0.00323			
Densidad húmeda [kg/m ³]	1985.783	2013.028	2029.747			
HUMEDAD						
Muestra	1		2		3	
Peso de la cápsula [g]	17.15	17.29	17.65	17.75	17.76	17.49
Peso muestra húmeda + cápsula [g]	52.79	50.51	61.10	71.46	78.49	84.20
Peso muestra seca + cápsula [g]	50.10	47.98	57.80	67.34	73.85	79.18
Peso del agua [g]	2.69	2.53	3.30	4.12	4.64	5.02
Peso del suelo seco [g]	32.95	30.69	40.15	49.59	56.09	61.69
Humedad [%]	8.164	8.244	8.219	8.308	8.272	8.137
Humedad Promedio[%]	8.204		8.264		8.205	
Densidad Seca [kg/m ³]	1835.225		1859.376		1875.836	
HINCHAMIENTO						
F-Dial	0.0001					
L Inicial	5		MOLDE			
Fecha	1		2		3	
27/6/2025	301		297		10	
28/6/2025	318		308.5		20	
29/6/2025	319		308.5		23	
30/6/2025	319		308.5		23	
HINCHAMIENTO	1.31		1.257		0.112	
DATOS DEL PISTON						
kN	101.97 kg					
Área del pistón	19.32 cm ²					
Área del pistón	2.9946 in ²					
kg/cm ²	0.070307 lbs/in ²					

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo del CBR.

Tabla 51. Resultados del CBR en el material (10% caucho)

Penetración [mm]	Carga Estándar [kg/cm ²]	CBR											
		Molde 1				Molde 2				Molde 3			
		Carga		Corrección		Carga		Corrección		Carga		Corrección	
	Lectura kN	kg	[kg/cm ²]	%	Lectura kN	kg	[kg/cm ²]	%	Lectura kN	kg	[kg/cm ²]	%	
0		0	0.000	0.000		0	0.000	0.000		0	0.000	0.000	
0.635		0.07	7.138	0.369		0.08	8.158	0.422		0.21	21.414	1.108	
1.27		0.14	14.276	0.739		0.18	18.355	0.950		0.33	33.650	1.742	
1.905		0.26	26.512	1.372		0.36	36.709	1.900		0.49	49.965	2.586	
2.541	70.31	0.39	39.768	2.058	0.02927607	0.56	57.103	2.956	0.04203744	0.67	68.320	3.536	0.05029479
3.176		0.55	56.084	2.903		0.71	72.399	3.747		0.86	87.694	4.539	
3.81		0.73	74.438	3.853		0.89	90.753	4.697		1.07	109.108	5.647	
4.445		0.93	94.832	4.908		1.1	112.167	5.806		1.3	132.561	6.861	
5.08	105.46	1.14	116.246	6.017	0.05705351	1.37	139.699	7.231	0.06856431	1.53	156.014	8.075	0.07657182
7.62		2.15	219.236	11.348		2.5	254.925	13.195		2.54	259.004	13.406	
10.16		3.33	339.560	17.576		3.5	356.895	18.473		3.52	358.934	18.578	
12.7		4.53	461.924	23.909		4.32	440.510	22.801		4.55	463.964	24.015	

Nota. Se muestran los resultados del CBR 10% caucho.

Tabla 52. Datos necesarios para calcular el CBR (15% caucho)

CBR DE LA SUBBASE						
DATOS INICIALES						
Diámetro del molde	0.152	m	152	mm		
Altura del Molde	0.178	m	178	mm		
Volumen del Molde [m ³]	0.00323					
Densidad Seca Máxima [kg/m ³]	2169.143					
DENSIDAD SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA						
N° Molde	1	2	3			
N° Capas	5	5	5			
N° Golpes/Capa	12	25	56			
Humedad de la muestra%	8.2	8.2	8.2			
Peso del suelo húmedo + molde [kg]	12.039	12.414	12.802			
Peso del molde [kg]	6.914	7.037	6.398			
Peso del suelo húmedo [kg]	5.125	5.377	6.404			
Volumen del suelo [m ³]	0.00323	0.00323	0.00323			
Densidad húmeda [kg/m ³]	1586.707	1664.727	1982.687			
HUMEDAD						
Muestra	1		2		3	
Peso de la cápsula [g]	17.36	17.67	17.45	17.30	17.07	17.52
Peso muestra húmeda + cápsula [g]	62.38	69.15	74.85	73.91	72.99	69.14
Peso muestra seca + cápsula [g]	58.86	64.99	70.30	69.56	68.82	64.94
Peso del agua [g]	3.52	4.16	4.55	4.35	4.17	4.20
Peso del suelo seco [g]	41.50	47.32	52.85	52.26	51.75	47.42
Humedad [%]	8.482	8.791	8.609	8.324	8.058	8.857
Humedad Promedio[%]	8.637		8.467		8.457	
Densidad Seca [kg/m ³]	1460.565		1534.784		1828.078	
HINCHAMIENTO						
F-Dial	0.0001					
L Inicial	5					
	MOLDE					
Fecha	1	2	3			
27/6/2025	95.5	202	96			
28/6/2025	96.5	221	105			
29/6/2025	97	224	105			
30/6/2025	97	225.1	107			
HINCHAMIENTO	0.39	0.9362	0.442			
DATOS DEL PISTON						
kN	101.97	kg				
Área del pistón	19.32	cm ²				
Área del pistón	2.9946	in ²				
kg/cm ²	0.070307	lbs/in ²				

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo del CBR.

Tabla 53. Resultados del CBR en el material (15% caucho)

Penetración [mm]	Carga Estándar [kg/cm ²]	CBR											
		Molde 1				Molde 2				Molde 3			
		Carga Lectura kN	kg	Corrección [kg/cm ²]	%	Carga Lectura kN	kg	Corrección [kg/cm ²]	%	Carga Lectura kN	kg	Corrección [kg/cm ²]	%
0		0	0.000	0.000		0	0.000	0.000		0	0.000	0.000	
0.635		0.05	5.099	0.264		0.06	6.118	0.317		0.07	7.138	0.369	
1.27		0.11	11.217	0.581		0.12	12.236	0.633		0.15	15.296	0.792	
1.905		0.18	18.355	0.950		0.19	19.374	1.003		0.28	28.552	1.478	
2.541	70.31	0.27	27.532	1.425	0.02026805	0.31	31.611	1.636	0.023270724	0.42	42.827	2.217	0.03152808
3.176		0.37	37.729	1.953		0.45	45.887	2.375		0.58	59.143	3.081	
3.81		0.49	49.965	2.596		0.61	62.202	3.220		0.77	78.517	4.064	
4.445		0.62	63.221	3.272		0.75	76.478	3.958		0.97	98.911	5.120	
5.08	105.46	0.77	78.517	4.064	0.03853614	0.9	91.773	4.750	0.045042246	1.18	120.325	6.228	0.05905539
7.62		1.45	147.857	7.653		1.51	153.975	7.970		2.3	234.531	12.139	
10.16		2.22	226.373	11.717		2.36	240.649	12.456		3.55	361.994	18.737	
12.7		3	305.910	15.834		3.23	329.363	17.048		4.76	485.377	25.123	

Nota. Se muestran los resultados del CBR 15% caucho.

Tabla 54. Datos necesarios para calcular el CBR (20% caucho)

CBR DE LA SUBBASE				
DATOS INICIALES				
Diámetro del molde	0.152	m	152	mm
Altura del Molde	0.178	m	178	mm
Volumen del Molde (m ³)	0.00323			
Densidad Seca Máxima [kg/m ³]	2169.143			
DENSIDAD SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA				
Nº Molde	1	2	3	
Nº Capas	5	5	5	
Nº Golpes/Capa	12	25	56	
Humedad de la muestra%	8.5	8.5	8.5	
Peso del suelo húmedo + molde [kg]	12.556	12.651	13.033	
Peso del molde [kg]	6.795	6.774	6.959	
Peso del suelo húmedo [kg]	5.761	5.877	6.074	
Volumen del suelo [m ³]	0.003230	0.003230	0.003230	
Densidad húmeda [kg/m ³]	1783.614	1819.528	1880.519	
HUMEDAD				
Muestra	1	2	3	
Peso de la cápsula [g]	17.50	17.69	17.50	17.30
Peso muestra húmeda + cápsula [g]	51.34	65.54	60.83	66.47
Peso muestra seca + cápsula [g]	48.67	61.81	57.42	62.80
Peso del agua [g]	2.67	3.73	3.41	3.67
Peso del suelo seco [g]	31.17	44.12	39.92	43.01
Humedad [%]	8.566	8.454	8.542	8.672
Humedad Promedio[%]	8.510		8.607	8.320
Densidad Seca [kg/m ³]	1643.731		1675.328	1736.080
HINCHAMIENTO				
F-Dial	0.0001			
L Inicial	5			
		MOLDE		
Fecha		1	2	3
27/6/2025		268	39	49.8
28/6/2025		275	51	65
29/6/2025		276	52.5	67
30/6/2025		277	56	61
HINCHAMIENTO		1.12	0.241	0.2864
DATOS DEL PISTON				
kN	101.97	kg		
Área del pistón	19.32	cm ²		
Área del pistón	2.9946	in ²		
kg/cm ²	0.070307	lbs/in ²		

Nota. Se muestran los datos sacados del laboratorio usados para el cálculo del CBR.

Tabla 55. Resultados del CBR en el material (20% caucho)

Penetración [mm]	Carga Estándar [kg/cm ²]	CBR											
		Molde 1				Molde 2				Molde 3			
		Carga Lectura kN	kg	Corrección [kg/cm ²]	%	Carga Lectura kN	kg	Corrección [kg/cm ²]	%	Carga Lectura kN	kg	Corrección [kg/cm ²]	%
0		0	0.000	0.000		0	0.000	0.000		0	0.000	0.000	
0.635		0.05	5.099	0.264		0.04	4.079	0.211		0.04	4.079	0.211	
1.27		0.1	10.197	0.528		0.09	9.177	0.475		0.09	9.177	0.475	
1.905		0.15	15.296	0.792		0.15	15.296	0.792		0.15	15.296	0.792	
2.541	70.31	0.21	21.414	1.108	0.01576404	0.24	24.473	1.267	0.01801604	0.26	26.512	1.372	0.01951738
3.176		0.27	27.532	1.425		0.31	31.611	1.636		0.4	40.788	2.111	
3.81		0.34	34.670	1.795		0.4	40.788	2.111		0.5	50.985	2.639	
4.445		0.41	41.808	2.164		0.5	50.985	2.639		0.6	61.182	3.167	
5.08	105.46	0.48	48.946	2.533	0.02402253	0.61	62.202	3.220	0.03052863	0.7	71.379	3.695	0.03503286
7.62		0.84	85.655	4.433		1.1	112.167	5.806		1.16	118.285	6.122	
10.16		1.26	128.482	6.650		1.64	167.231	8.656		1.78	181.507	9.395	
12.7		1.72	175.388	9.078		2.21	225.354	11.664		2.48	252.886	13.089	

Nota. Se muestran los resultados del CBR 20% caucho.

19. Referencias bibliográficas

Aashto T 90 PDF | PDF | Materials | Nature. (n.d.). Retrieved July 6, 2025, from <https://es.scribd.com/document/334497893/AASHTO-T-90-pdf>

AASHTO_T_89 | PDF. (n.d.). Retrieved July 6, 2025, from <https://es.scribd.com/document/842247064/AASHTO-T-89>

Antonio, J., & Antonio García-Gutiérrez, J. (2019). *Cálculo de emisión de polvo en plantas de trituración de piedra*.

astm-d-1557-09pdf_compress. (n.d.).

California Bearing Ratio(CBR Test) of Subgrade Soil -Procedure, apparatus, and use for pavement Design - Cement Concrete. (n.d.). Retrieved July 7, 2025, from https://cementconcrete.org/geotechnical/california-bearing-ratio-cbr-test/1914/?utm_source=chatgpt.com

Carbotecnia. (2024, May 16). *Granulometría número de malla carbón activado, Standard Sieve*. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/granulometria-o-numero-de-malla/>

Construcción Sostenible -. (n.d.). Retrieved February 23, 2025, from <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible/>

COTECNO. (2021, September). *Límites De Atterberg: Determinación De Los Límites Plástico, Líquido Y De Encogimiento Del Suelo.* » COTECNO | Equipamiento Científico | Prospecciones, Auscultación, Geofísica, Ingeniería. <https://www.cotecno.cl/limites-de-atterberg-determinacion-de-los-limites-de-plastico-liquido-y-encogimiento/>

Designation: D 698-07 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) 1. (n.d.). www.astm.org,

Fan, R. D., Du, Y. J., Reddy, K. R., Liu, S. Y., & Yang, Y. L. (2014). Compressibility and hydraulic conductivity of clayey soil mixed with calcium bentonite for slurry wall backfill: Initial assessment. *Applied Clay Science*, 101, 119–127. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2014.07.026>

Geotecnia Fácil. (2018, April 10). *El ensayo CBR de laboratorio ¿Qué es? y ¿Para qué sirve?* <https://geotecniafacil.com/ensayo-cbr-laboratorio/>

Guerrero-Bustamante, O., Camargo, R., Dawd, I., Duque, J., Polo-Mendoza, R., Gálvis, J., Díaz, J., Daza, O., Cucunuba, J., & Acosta, C. (2024). Implementation of Crumb Rubber (CR) in Road Pavements: A Comprehensive Literature Review. *Infrastructures*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES9120223>

Haigh, S. K., & Vardanega, P. J. (2014). Fundamental basis of single-point liquid limit measurement approaches. *Applied Clay Science*, 102, 8–14. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2014.10.011>

Holcim Ecuador. (2025). *Agregados Material Granular Subbase Clase 3 Cribado.* <https://www.holcim.com.ec/agregados-material-granular-subbase-clase-3-cribado>

International, A., & indexed by mero, files. (n.d.). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils 1.*

Juliana, I., Fatin, A. R., Rozaini, R., Masyitah, M. N., Khairul, A. H., & Nur Shafieza, A. (2020). Effectiveness of crumb rubber for subgrade soil stabilization. *IOP Conference Series:*

Materials Science and Engineering, 849(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/849/1/012029>

Karakan, E. (2022). Relationships among plasticity, clay fraction and activity of clay–sand mixtures. *Arabian Journal of Geosciences* 2022 15:4, 15(4), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S12517-022-09482-9>

Knezevich Yáñez, C. A., Plúa Marcillo, A. J., Murillo Álava, P. F., & Salgado Granda, B. A. (2025). Uso de materiales reciclados en la construcción sostenible. *Revista Social Fronteriza*, 5(2). [https://doi.org/10.59814/RESOFRO.2025.5\(2\)638](https://doi.org/10.59814/RESOFRO.2025.5(2)638)

Laftah, W. A., Aizan, W., & Rahman, W. A. (2025). A comprehensive review of tire recycling technologies and applications. *Materials Advances*. <https://doi.org/10.1039/D5MA00463B>

Li, T., Kong, L., & Liu, B. (2020). The California Bearing Ratio and Pore Structure Characteristics of Weakly Expansive Soil in Frozen Areas. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 7576, 10(21), 7576. <https://doi.org/10.3390/APP10217576>

Lillian, N., Ahmed, S. B., Krishnan, D., & Eze, V. H. U. (2025). Comprehensive evaluation of sub-base materials for road pavements, integrating California bearing ratio and triaxial compression tests for enhanced stability and durability: A systematic review. *Discover Civil Engineering* 2025 2:1, 2(1), 1–27. <https://doi.org/10.1007/S44290-025-00278-W>

Lopez, V. P., & Razo, M. D. C. (2022). Análisis económico de productos a partir de reciclados. Caso: recicladora verde neumático. *RES NON VERBA REVISTA CIENTÍFICA*, 12(1), 158–176. <https://doi.org/10.21855/RESNONVERBA.V12I1.618>

MCRIT. (2020). *ANÁLISIS COSTES BENEFICIO*.

MD Sahadat Hossain, Ph. D. , P. E., Islam, M. A., Badhon, F. F., & Imtiaz, T. (2021). *Atterberg Limit Test*. Mavs Open Press. <https://uta.pressbooks.pub/soilmechanics/chapter/atterberg-limit-test/>

Mendoza, C., & Paredes, J. A. (2024). A random elastoplastic framework of relationships between CBR and Young's modulus for coarse-grained soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(8), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S41062-024-01603-5/FIGURES/11>

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). *MOP - 001-F 2002*.

Multinsa. (2022, July 11). *¿Cómo se hace el asfalto con polvo de caucho? - Multinsa*. <https://www.multinsa.com/como-se-hace-el-asfalto-con-polvo-de-caucho/>

New Study Shows Strong Economic Impact of the U.S. Scrap Recycling Industry - Recycled Materials Association. (n.d.). Retrieved July 6, 2025, from <https://www.recycledmaterials.org/press-release/new-study-shows-strong-economic-impact-of-the-u-s-scrap-recycling-industry/>

Nugroho, S. A., Wibisono, G., Ongko, A., & Mauliza, A. Z. (2021). Effects of High Plasticity and Expansive Clay Stabilization with Lime on UCS Testing in Several Conditions. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 1000(1000). <https://doi.org/10.22146/jcef.59438>

Obras Publicas, M. DE. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES DE CAMINOS Y PUENTES*.

Ocrospoma Callupe, F. N., & Rocha Sandova, C. A. I. (2024). Capacidad Portante de los Suelos para Establecer la Zonificación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 2702–2720. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.13734

Pallazhco Siavichay, D. E., & Mayancela Bermeo, J. S. (2023). *Tratamiento de las llantas desechadas por final de vida útil en la ciudad de Cuenca*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26232>

Parlamento Europeo. (2023, May 24). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*

| Temas | Parlamento Europeo.

<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Ramírez Navarrete, Y. O., Baquero Gil, J. A., & Presencial. (2024). *Análisis del comportamiento del CBR en la subbase granular clase c invias con la incorporación del 10% 20% y 30 % de grano caucho CGR.* <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/14048>

Resilient Modulus. (n.d.).

Ricardo Morales. (2015). *DISEÑO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO POR EL METODO AASHTO-93 EMPLEANDO EL SOFTWARE DISAASHTO-93. ASPHALT PAVEMENT DESIGN THROUGH AASHTO-93 METHOD USING THE SOFTWARE DISAASHTO-93* [Universidad Militar Nueva Granada]. <https://core.ac.uk/download/pdf/143451539.pdf>

Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17(2), 41–65. <https://doi.org/10.18359/RCIN.1074>

Salcedo Fontalvo, J. E., Vega A, D. L., Castro Cabeza, A., Ramirez Lozano, C., & Lopez Rengifo, S. (2024). Mechanical and Environmental Analysis of Granular Subbase with Fine Crumb Rubber. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(10), 14389–14401. <https://doi.org/10.1007/S13369-024-09041-2/TABLES/6>

Schaefer, V. R., White, D. J., Ceylan, H., Stevens, L. J., Schaefer, V. R. ;, White, D. J. ;, & Ceylan, H. ; (2008). *Design Guide for Improved Quality of Roadway Subgrades and Subbases.* 46. http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/46

Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza. (n.d.). Retrieved July 6, 2025, from <https://1library.co/document/yd90w9ez-situacion-actual-tratamiento-neumaticos-posibilidades-obtencion-negro-pureza.html>

Tasalloti, A., Chiaro, G., Murali, A., & Banasiak, L. (2021). Physical and Mechanical Properties of Granulated Rubber Mixed with Granular Soils—A Literature Review. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 4309, 13(8), 4309. <https://doi.org/10.3390/SU13084309>

Yang, Z., Zhang, Q., Shi, W., Lv, J., Lu, Z., & Ling, X. (2020). Advances in Properties of Rubber Reinforced Soil. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1), 6629757. <https://doi.org/10.1155/2020/6629757>

ChatGPT. (2025). *Imágenes generadas por IA para ilustrar ensayos geotécnicos de laboratorio: granulometría, límite líquido, límite plástico, compactación Proctor y CBR* [Imágenes generadas por IA]. DALL·E.