



Facultad de Ingeniería

Escuela de Construcción Civil

**Evaluar la influencia del polietileno tereftalato triturado,  
como agregado fino, en la permeabilidad y resistencia de  
bases granulares para pavimentos flexibles.**

**Por**

**Catalina De Las Mercedes Álvarez Gómez**

Tesis para optar al Título de Ingeniero Constructor

Prof. Guía: Guillermo Brante Lara.

Índice

<b>1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>8</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	8
1.2. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE.....	10
1.3 HIPÓTESIS .....	12
1.4 OBJETIVOS .....	12
1.4.1 <i>Objetivo General</i> .....	12
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	12
1.5 ALCANCES .....	12
<b>2.MARCO TEÓRICO. ....</b>	<b>13</b>
2.1 PAVIMENTOS.....	13
2.1.1 <i>Pavimentos flexibles</i> .....	13
2.1.2 <i>Pavimentos rígidos</i> . ....	15
2.1.3 <i>Propiedades de los materiales para la base granular de pavimentos flexibles</i> .....	16
Tabla 2.1. <i>Masa mínima de la muestra respecto al tamaño máximo del árido</i> .....	17
Tabla N° 2.2 <i>Bandas granulométricas para bases, subbases y capas de rodaduras</i> .....	18
Tabla N°2.3 <i>Parámetros de límite de consistencia para una base granular</i> . ....	19
Tabla N°2.5 <i>Sistema de clasificación de suelo USCS</i> .....	20
2.2. TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET).....	25
2.2.1 <i>Propiedades mecánicas del PET</i> . ....	25
Tabla N°2.6 <i>Propiedades mecánicas del pet</i> .....	26
2.2.2 <i>Propiedades térmicas del PET</i> . ....	26
2.2.3 <i>Propiedades físicas del PET</i> .....	27
Tabla N°2.7 <i>Propiedades físicas del PET</i> .....	27
2.3 UTILIZACIÓN DE PET EN SUELOS. ....	27
2.3.1 <i>Influencia del PET en la permeabilidad de suelos</i> . ....	27
2.3.2 <i>Influencia del PET en la capacidad de carga de suelos</i> .....	29
<b>3.METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. ....</b>	<b>30</b>
3.1 ETAPA 1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CONSTITUYENTES. ....	31
3.1.1 <i>Preparación de Tereftalato de polietileno molido</i> . ....	31
3.1.2 <i>Clasificación de suelos</i> . ....	31
3.1.3 <i>Compactación de suelos</i> . ....	32
Tabla N°3.3 <i>Tamaño de la muestra de ensayo</i> .....	33
3.1.4 <i>Densidad de partículas sólidas</i> . ....	33
3.1.5 <i>Desgaste de los Ángeles</i> . ....	33
3.1.6 <i>Cubicidad de partículas</i> . ....	34
3.1.7 <i>Determinación de la razón de soporte de suelos compactados (CBR)</i> .....	35
3.1.8 <i>Ensayo de permeabilidad</i> .....	35

3.2 ETAPA 2. MEZCLA DE BASE GRANULAR CON TEREFTALATO DE POLIETILENO MOLIDO.....	37
4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
4.1 Caracterización de base granular.....	38
4.1.1 Análisis granulométrico.....	38
4.1.1.1 Granulometría base granular.....	39
4.1.2 Banda granulométrica base granular.....	41
4.1.3 Límites de Atterberg.....	41
4.1.4 Clasificación de suelos.....	42
4.1.4.1 Clasificación de suelo con método SUCS.....	42
4.1.4.2 Clasificación de suelo con método AASHTO.....	44
4.1.5 Proctor modificado (NCh 1534/2 Of 2008).....	45
4.1.6 Densidad de partículas sólidas (NCh 1532 Of 80).....	46
4.1.7 Cubicidad de partículas.....	46
4.1.8 Capacidad de soporte C.B.R (NCh 1852 Of 81).....	47
4.2 Caracterización de base granular con adición de PET.....	49
4.2.1 Análisis granulométrico de base granular con PET.....	49
4.2.1.1 Granulometría de PET.....	49
4.2.1.2 Granulometría de base granular con 1% de PET adicionado.....	50
4.2.1.3 Granulometría de base granular con 4% de PET adicionado.....	51
4.2.1.4 Granulometría de base granular con 7% de PET adicionado.....	52
4.2.2 Proctor modificado con adición de 1% de PET.....	53
4.2.3 Proctor modificado con adición de 4% de PET.....	54
4.2.4 Proctor modificado con adición de 7% de PET.....	55
4.2.5 Capacidad de soporte (C.B.R) de base granular con adición de 1% de PET.....	57
4.2.6 Capacidad de soporte (C.B.R) de base granular con adición de 4% de PET.....	59
Figura N° 4.16 Curva penetración vs esfuerzo base granular con 4% de PET triturado.....	59
Figura N° 4.17 C.B.R base granular con 4% de PET triturado.....	60
4.2.7 Capacidad de soporte (C.B.R) de base granular con adición de 7% de PET.....	61
Figura N° 4.18 Curva penetración vs esfuerzo base granular con 7% de PET triturado.....	61
Figura N° 4.19 C.B.R base granular con 7% de PET triturado.....	62
4.3 EVALUACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE LA BASE GRANULAR CON ADICIÓN DE PET.....	63
Figura N° 4.20 Curva de permeabilidad de base granular con diferentes adiciones de PET triturado.....	63

## CONCLUSIONES ..... 64

1. INFLUENCIA DEL PET EN LA PERMEABILIDAD DE LA BASE GRANULAR.....	64
2. INFLUENCIA DEL PET EN LA CAPACIDAD DE CARGA DE LA BASE GRANULAR.....	64
LA ADICIÓN DEL 1% DE PET TRITURADO A LA BASE GRANULAR RESULTÓ EN UNA LEVE DISMINUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE, ALCANZANDO UN VALOR DE CBR DEL 134%. ESTO SUGIERE QUE UNA BAJA	

PROPORCIÓN DE PET PUEDE ACTUAR COMO ESTABILIZADOR MECÁNICO DENTRO DE LA ESTRUCTURA GRANULAR SIN ALTERAR EN GRAN MEDIDA LA CAPACIDAD DE CARGA. SIN EMBARGO, .....	64
LOS RESULTADOS INDICAN QUE EL 1% DE PET ES LA PROPORCIÓN ÓPTIMA PARA TENER UNA DISMINUCIÓN PEQUEÑA EN LA CAPACIDAD DE SOPORTE SIN COMPROMETER OTRAS PROPIEDADES COMO LA COMPACTACIÓN O LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL. ESTE PORCENTAJE PUEDE SER RECOMENDADO EN ZONAS DE ALTO TRÁNSITO O DONDE SE REQUIERE UN MAYOR DESEMPEÑO MECÁNICO DE LA BASE GRANULAR. ....	65
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>66</b>

### ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 2.1 EVALUACIÓN DE PERMEABILIDAD DE SUELO + PET.....	28
FIGURA 2.2 EVALUACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DE PET + SUELO.....	28
FIGURA 2.3 PORCENTAJES C.B.R CON INCORPORACIÓN DE PET .....	29
FIGURA N° 3.1 RESUMEN DE METODOLOGÍA A EMPLEAR.....	30

### ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 2.1. MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA RESPECTO AL TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO. ....	17
TABLA N° 2.2 BANDAS GRANULOMÉTRICAS PARA BASES, SUBBASES Y CAPAS DE RODADURAS. ....	18
TABLA N°2.3 PARÁMETROS DE LÍMITE DE CONSISTENCIA PARA UNA BASE GRANULAR. ....	19
TABLA N° 2.4 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELO AASHTO. ....	19
TABLA N°2.5 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELO USCS. ....	20
TABLA N°2.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PET.....	26
TABLA N°2.7 PROPIEDADES FÍSICAS DEL PET. ....	27
TABLA N°3.1 ENSAYOS FÍSICOS Y MECÁNICOS ETAPA 1. ....	31
TABLA 3.2 REQUISITOS PARA BASES GRANULARES. LÍMITE LÍQUIDO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD. ....	32

TABLA N°3.3 TAMAÑO DE LA MUESTRA DE ENSAYO.....	33
TABLA N°3.4 GRADOS DE ENSAYE. DEFINIDOS POR SUS RANGOS DE TAMAÑO, EN MM. ....	34
TABLA N°3.5 CANTIDAD MÍNIMA DE MUESTRA DE ENSAYE CUBICIDAD DE PARTÍCULAS.....	34
TABLA N°3.6 REQUISITOS MÍNIMOS DE CBR Y CUBICIDAD PARA BASES GRANULARES. ....	35
TABLA N°3.7 CONFECCIÓN DE PROBETAS ETAPA 1. ....	37
TABLA N°3.8 CONFECCIÓN DE PROBETAS ETAPA 2. ....	38

## Glosario

**Agregado fino:** La muestra agregado fino consiste en el material que pasa la malla de 4,75 mm.

**Agregado grueso:** Parte del agregado pétreo total que queda retenido en la malla de 4,75 mm.

**Drenaje:** El drenaje se refiere a la permeabilidad y transmisibilidad del suelo, es decir, la facilidad para que el agua circule a través del suelo.

**Base granular:** Elemento de la estructura de una vía que consiste en una capa de material seleccionado y compactado, de espesor definido de acuerdo con un diseño previo, que se construye sobre la sub-base o sobre la sub-rasante de una vía.

**Subrasante:** Capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.

**Subbase:** capa granular localizada entre la subrasante y la base granular en los pavimentos asfálticos.

**Pavimento:** La estructura integral de las capas de subrasante, sub-base, base y carpeta colocado encima de la rasante y destinada a sostener las cargas vehiculares.

**Pavimento Flexible:** Pavimento formado por una o varias capas asfálticas y/o materiales seleccionados o tratados, de módulos elásticos decrecientes con la profundidad. Normalmente, la capa de rodadura corresponde a una mezcla asfáltica o a una capa asfáltica de protección y las capas profundas, a materiales granulares del tipo base y subbase. En este caso, las cargas de rueda son resistidas principalmente por la capacidad del sistema de absorber deformaciones, que le es conferida por las características de sus capas constitutivas y del suelo de fundación.

**Chancado:** Partícula pétreo preparada por métodos mecanizados (chancadores), que tiene dos o más caras fracturadas y que por ello posee al menos una arista. No se consideran como chancado aquellas partículas que, aun teniendo dos o más caras fracturadas, presenten cantos redondeados.

**Laja:** Partícula pétreo en que la razón o cociente entre las dimensiones máxima y mínima, referida a un prisma rectangular circunscrito, es mayor que 5.

**Rodado:** Partícula pétreo que no posee aristas.

**Cuarteo:** Procedimiento empleado para reducir el tamaño original de una muestra de suelo o agregado pétreo, cuyo objetivo es obtener una muestra representativa del material y de un tamaño acorde a los requerimientos del ensayo a realizar.

**Densidad Compactada Húmeda:** Densidad de un suelo compactado, que se determina dividiendo la masa húmeda por su volumen.

**Densidad Compactada Seca:** Densidad de un suelo compactado, que se determina dividiendo la masa seca por su volumen.

**Estabilización de Suelos:** Mejoramiento de las propiedades físicas y/o mecánicas de un suelo mediante procedimientos mecánicos y/o fisicoquímicos.

**Fisura (asfalto):** Quiebre o rotura que afecta a las capas estructurales del pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es igual o menor que 3 mm.

**Humedad Óptima:** Porcentaje de humedad para el cual un suelo sometido a una energía de compactación determinada presenta su máxima densidad (DMCS).

**Permeabilidad de un Suelo:** Propiedad de los suelos o capas granulares de un pavimento, de permitir el paso del agua a través de ellas. Se mide mediante ensayo y se expresa como coeficiente de permeabilidad. Es un indicador de la capacidad drenante del suelo o capa granular.

**Suelo bien Graduado:** Suelo conformado por partículas de diferentes tamaños y cuya curva granulométrica es continua y suave.

**Tamizado:** Operación que consiste en separar por tamaño las partículas de un agregado, mediante tamices.

# 1. Aspectos generales del proyecto de investigación.

## 1.1 Planteamiento del problema.

Dentro de la construcción, la infraestructura vial desempeña un papel crucial en el crecimiento y desarrollo de los países. Esta rama de la industria de la construcción de igual manera consume recursos no renovables, ya que la construcción de vías requiere de diferentes recursos entre ellos económicos y naturales, como son los suelos, donde estos se encuentran en lo que denominamos canteras (G. Guevara, 2019). Las innovaciones en tecnologías constructivas y materiales deben orientarse hacia la creación de vías que sean de alta calidad y funcionalidad y que no consuma recursos no renovables, por lo que es imperativo investigar materiales que ofrezcan durabilidad a las estructuras de pavimentos y estabilidad en sus distintas capas, con el objetivo de retrasar su deterioro a corto plazo (J. Arteaga, 2018).

Según el manual de carreteras un contenido adecuado de finos es necesario para llenar los vacíos y maximizar la densidad de la base; sin embargo, un exceso de finos puede disminuir la capacidad de carga, provocando una mayor deflexión en las estructuras de pavimento. Además, un alto contenido de finos compromete la permeabilidad de la base, dificultando el drenaje del agua que penetra en el pavimento, lo que puede llevar a la erosión de la base y al deterioro prematuro del pavimento.

De la misma manera, la compactación es un método para aumentar mecánicamente la densidad del suelo, y es especialmente valiosa en aplicaciones de construcción. Si este proceso no se realiza correctamente, el asentamiento del suelo puede producirse, lo que resulta en costos de mantenimiento innecesarios o fallas del pavimento o la estructura. Sin embargo, la compactación del suelo disminuye permeabilidad de la base granular (Cotecno, 2019). Por otra parte, se producen patologías en los pavimentos a causa de un exceso de finos y presencia de agua en sus bases granulares, una de ellas es la patología de surgencia (A. Costa, 2021), esto debido a que los suelos finos poseen baja capacidad portante, por lo que son bastante compresibles, generando problemas de asentamientos diferenciales cuando se usan como suelo de apoyo; son también impermeables, generando problemas de drenaje, teniendo que recurrirse a métodos no convencionales para desaguar, y cuando están húmedos son plásticos, de alta o baja plasticidad de acuerdo al mineral predominante (B. Soberón, 2022).

En la literatura se han estudiado diferentes tipos de suelos mejorados con diversos materiales plásticos de desecho, en forma de fibras, gránulos y tiras. El objetivo principal de estos estudios fue mejorar los parámetros geotécnicos de los suelos.

La contaminación ambiental ha alcanzado niveles críticos debido a la industrialización que genera elementos no reutilizables o de un solo uso, lo que provoca que gran parte de estos materiales terminen en basurales, rellenos sanitarios o vertederos, sin embargo, otra parte no despreciable termina en ríos, mares, y vertederos ilegales o microbasurales afectando el hábitat natural y poniendo en peligro a la vida silvestre, así como también, reduciendo la calidad de vida de comunidades que deben enfrentarse a este tipo de contaminación día a día (C. Muñoz, 2020).

Por otro lado, Chile genera un consumo de plástico de aproximadamente 1 millón 357 mil toneladas al año, de las cuales más del 70% termina en océanos y vertederos, y un 12% es incinerado, lo que genera contaminación y afecta a las comunidades más vulnerables (Agenda País, 2021). El plástico, especialmente el PET, tiene un tiempo de descomposición extremadamente prolongado, que oscila entre 100 y 1.000 años (Credinform, 2023). Este material, conocido por su ligereza y resistencia mecánica, presenta una oportunidad para su reciclaje en aplicaciones constructivas.

El PET se caracteriza por poseer una alta resistencia a la tracción (aproximadamente 91 MPa) y a la compresión (en rangos entre 21 y 89 MPa) (Khalid, B., & Alshawmar, F. 2024).

Ligereza y la estabilidad dimensional, además de un comportamiento térmico controlado (temperatura de fusión alrededor de 260 °C y de transición vítrea cerca de 70 °C)– permiten que el PET actúe como un componente que favorece el mantenimiento de la integridad de la mezcla bajo condiciones variables de carga y temperatura (Khalid, B., & Alshawmar, F. (2024).

Por lo tanto, se propone investigar el uso de plástico PET reciclado triturado como agregado fino en bases granulares, con el objetivo de aumentar la permeabilidad de estas capas y potencialmente estabilizar el material de la base granular mediante la incorporación de PET reciclado en la base granular.

## 1.2. Estudio del estado del Arte.

Los autores SN. Siddique, M. Aktery y E. Mohamedelhassan (2024), analizaron cómo la adición de micro plástico en diferentes concentraciones, así como la inclusión de raíces de plantas, afecta las propiedades de resistencia y permeabilidad de muestras de suelo. Este enfoque permite evaluar la sinergia entre los residuos plásticos y la biología del suelo, abriendo nuevas posibilidades para mejorar la calidad del terreno.

Por otro lado, P. Solanki (2018), se centra en el desarrollo de un innovador compuesto plástico permeable, denominado PPC, elaborado a partir de tereftalato de polietileno (PET), tierra y agregados. Este nuevo material no solo busca reducir la escorrentía de aguas pluviales, sino que también contribuye a desviar plásticos de vertederos e incineradores. Las muestras de PPC se prepararon en diversas proporciones de PET y tierra/agregado, y fueron sometidas a pruebas para evaluar su resistencia a la tracción indirecta y su permeabilidad, mostrando su potencial como una alternativa sostenible para pavimentos permeables en construcciones de menor resistencia.

Asimismo, M. Koohmishi y A. Azarhoosh (2021), analizaron cómo la distribución de poros entre los agregados influye en la permeabilidad de medios granulares. Para ello, realizaron pruebas de permeabilidad a gran escala en diversas gradaciones de agregado de tamaño grueso, extraído de tres tipos de roca distintos. A través de un procedimiento analítico, determinaron la distribución del tamaño de constricción que caracteriza la interconectividad de los poros y utilizaron un enfoque probabilístico para estimar la distribución del tamaño de los huecos de aire, basado en imágenes bidimensionales de las muestras preparadas.

A.Urian, N. Ilies, NM, O. Nemes, A. Nagy (2023), estudiaron el comportamiento de los materiales de desecho plástico elaborados a partir de tereftalato de polietileno (PET) en la mejora del suelo. Así, se estudiaron las características mecánicas de una arcilla mejorada con PET triturado. El PET se añadió en relación con la masa seca de la arcilla, en porcentajes de 2%, 4% y 6%. El PET se trituró en formas irregulares con tamaños que oscilaban entre 3 mm y 12 mm y se distribuyó aleatoriamente en las muestras de prueba. Se llevaron a cabo pruebas de compresión y corte directo para estudiar los parámetros de compresibilidad y corte del suelo mejorado (ángulo de fricción interna y cohesión). Los resultados

experimentales mostraron una mejora en las características mecánicas de la arcilla incluso con una baja adición de PET del 2% y 4%.

En la investigación realizada por L. Suthar, S. Meena y U. Kumar (2024) se utilizaron escamas de plástico PET para mejorar resistencia al corte, el ángulo de fricción y CBR de un suelo arenoso. Incluyó un análisis exhaustivo mediante diversos ensayos, tales como el de tamices, la prueba de compactación Proctor, la prueba de relación de carga de California (CBR) y la prueba de caja de corte directo. En este estudio, se incorporaron porcentajes variables de escamas de plástico PET, concretamente del 5 %, 10 % y 15 % con relación al peso de la muestra de suelo utilizada. Los resultados de las pruebas de laboratorio revelaron que la inclusión de estas escamas de plástico mejoró significativamente diversas propiedades del suelo, como la resistencia al corte y el ángulo de fricción, además de elevar el valor CBR del compuesto. Estos hallazgos indican que el uso de escamas de plástico PET puede ser beneficioso, haciendo que el material resultante sea adecuado para la construcción de pavimentos.

La investigación realizada por R. Miranda (2010) da a conocer las patologías existentes en pavimentos flexibles provocadas por la presencia de finos y por problemas de drenaje que afectan a los estratos de base granular del pavimento. La primera de las patologías es la fisuras y grietas por fatigamiento la cual es una serie de fisuras interconectadas con patrones irregulares, generalmente ubicadas en zonas donde hay repeticiones de carga. La segunda patología existente es la patología de baches en carpetas asfálticas y tratamientos superficiales, la cual es una cavidad, normalmente redondeada, que se forma al desprenderse mezcla asfáltica. La tercera patología existente es la deformación transversal, la cuales se ocasionan por la falta de adherencia entre la carpeta de superficie y la carpeta inferior. La última patología reconocida es la surgencia de finos y agua. Este afloramiento corresponde a la salida de agua infiltrada, junto con materiales finos de la capa de base por las grietas, cuando circulan sobre ellas las cargas de tránsito. La presencia de manchas o de material acumulado en la superficie cercana al borde de las grietas indica la existencia del fenómeno.

Este conjunto de estudios resalta el potencial de los materiales reciclados y la optimización de las propiedades del suelo y los agregados, ofreciendo soluciones innovadoras para la gestión de residuos y la mejora de la infraestructura vial.

### 1.3 Hipótesis

La incorporación de polietileno tereftalato triturado como agregado fino en la base granular de un pavimento flexible modificará la permeabilidad y la resistencia de la carpeta asfáltica.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo General

Determinar la influencia de polietileno tereftalato triturado en las propiedades físicas y mecánicas de la base granular en pavimentos flexibles.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar la influencia del polietileno tereftalato triturado en la permeabilidad de la base granular de un pavimento flexible.
2. Evaluar la influencia del polietileno tereftalato triturado en la capacidad de carga de la base granular de un pavimento flexible.

### 1.5 Alcances

1. Los análisis de las muestras se llevarán a cabo en los laboratorios disponibles de la Universidad de Valparaíso y en el laboratorio regional de vialidad.
2. En el estudio se utilizarán bases granulares limpias provenientes de la Planta de Áridos TRICAM, que obtiene sus áridos de la explotación en el río La Ligua, ubicado en la provincia de Petorca.
3. El estudio se centrará en los requerimientos de las bases granulares para pavimentos flexibles.

## 2.Marco teórico.

### 2.1 Pavimentos.

Un pavimento es una estructura constituida por una serie de capas superpuestas, que se diseñan y constituyen teniendo en cuenta diferentes métodos, normas y especificaciones técnicas para materiales apropiados, que se someten a diferentes procesos constructivos con el fin de obtener una superficie apta que presente la rigidez y durabilidad necesaria para el tránsito de vehículos (J. Mocondino, 2020).

Según J. Mocondino, 2020 las funciones de un pavimento son:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente a la intemperie.
- Presentar una textura superficial apta para la velocidad prevista de circulación de los vehículos, puesto que esto tiene influencia directa en la seguridad vial.
  - Ser resistente al desgaste generado por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
  - Ser durable.
  - Ser económico.
  - El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influyen en el entorno, deber ser adecuadamente moderado.
  - Poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramiento y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

#### 2.1.1 Pavimentos flexibles.

Son estructuras formadas por tres estratos o capas pavimento, base y subbase que se extienden y compactan sobre la subrasante existente y que a su vez pueden tener subcapas (J. Mocondino, 2020).

- Pavimento: Está formado por una mezcla de material granular (grava y/o arena) y material bituminoso (asfalto), esta mezcla puede ser dosificada y diseñada por

diferentes métodos. Tiene como función principal soportar las cargas, tanto horizontales como verticales del tránsito. Si su espesor supera los 10 centímetros se suele dividir en una capa de rodadura y una intermedia (J. Mocondino, 2020).

- Base granular: Es un material granular que se compone por partículas de diferentes tamaños (triturados, arenas y materiales finos) los cuales deben cumplir con una granulometría y distribución específica de las mismas según la especificación técnica. Su misión es la de absorber la mayor parte de los esfuerzos verticales (J. Mocondino, 2020).
- Sub-base granular: El estrato más profundo es la subbase, la cual posee características similares a la de la base y sus componentes son prácticamente los mismos (triturados, arenas y materiales finos), pero con granulometría y distribución de tamaños de las partículas diferentes. Su función, al igual que la base, es absorber la carga restante generada por los esfuerzos verticales que sobrepasa las capas anteriores, además proporciona un cimiento uniforme para estas (J. Mocondino, 2020).

#### 2.1.1.1 Propiedades de los pavimentos flexibles.

Para obtener una mezcla de calidad, esta debe poseer las propiedades siguientes:

- Estabilidad: La estabilidad de un asfalto es su capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otros efectos que indican cambios en la mezcla (G. Alarcon y M. Cárdenas, 2021).
- Durabilidad: Es la habilidad de una carpeta de asfalto, para resistir factores como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y la separación de las películas de asfalto. Esta propiedad se mejora de tres formas: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una gradación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla (G. Alarcon y M. Cárdenas, 2021).

- Flexibilidad: Es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan bajo cargas o se expanden por expansión del suelo (G. Alarcon y M. Cárdenas, 2021).
- Resistencia a la fatiga: Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se conoce por medio de los estudios realizados a diferentes carpetas asfálticas, que los vacíos y la viscosidad del asfalto, tienen un efecto considerable en la resistencia a la fatiga (G. Alarcon y M. Cárdenas, 2021).
- Resistencia al deslizamiento: Es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie esta mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento. Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa (G. Alarcon y M. Cárdenas, 2021).
- Trabajabilidad: Está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría (G. Alarcon y M. Cárdenas, 2021).

### 2.1.2 Pavimentos rígidos.

Las estructuras de los pavimentos rígidos suelen estar conformados por dos capas, una superior de concreto y una inferior de base, aunque en determinadas circunstancias y dependiendo de la capacidad de soporte de la subrasante existente puede haber una tercera capa de subbase (J. Mocondino, 2020).

- Capa superior: La capa superior puede ser de dos tipos; una compuesta por losas de concreto separadas por juntas transversales y longitudinales o una losa continua de concreto armado. La alta rigidez del concreto hidráulico y su elevado coeficiente de elasticidad, hacen que la forma de trabajo de los pavimentos rígidos sea por medio de la distribución de esfuerzos que se genera sobre esta primera capa, obteniendo así que las cargas y esfuerzos que llegan a la capa base sean considerablemente menores (J. Mocondino, 2020).
- Capa inferior: Los dos componentes inferiores como lo son la base y la subbase son exactamente los mismos que componen la estructura de un pavimento flexible (J. Mocondino, 2020).

### 2.1.3 Propiedades de los materiales para la base granular de pavimentos flexibles.

La capa de base compuesta por agregados granulares poseen ciertas características que gobiernan su comportamiento, por lo que deben conocerse y entenderse para poder ser aprovechadas (G. Alarcon y M. Cárdenas, 2021). A continuación, se describen algunas de estas propiedades.

#### 2.1.3.1 Propiedades físicas.

##### 2.1.3.1.1 Caracterización de suelos.

Los suelos tienen partículas de tamaño variable, dentro de la parte sólida de los suelos, hay partículas de distintos tamaños. La clasificación de tamaños existe dentro de una masa de suelo para ver si ese análisis tiene alguna significación en las propiedades de suelo. Esto nos conduce al análisis de la composición granulométrica (L. Montoya, 2023).

##### 2.1.3.1.2 Granulometría.

La granulometría es un ensayo básico que permite conocer las características de un suelo en base a la dimensión de sus granos o partículas. Esta información se refleja

gráficamente a través de la conocida curva granulométrica, la cual, tiene forma de “S” y condensa los resultados de la granulometría de suelos en términos del porcentaje de cada intervalo de tamaños de grano que pasan por una serie de tamices establecida (Structuralia, 2022).

El ensayo de granulometría debe hacerse de acuerdo con el método 8.202.3 del Manual de carreteras Volumen 8, 2023, el cual debe aplicarse en conjunto con el inciso 8.102.1 del mismo manual mencionado.

El MC- V8, 2023 determina que el ensayo de granulometría debe realizarse con material que pasa el tamiz de 3” el cual tiene un tamaño nominal de 80mm, usando una muestra no inferior a la mínima que exige, la cual depende del tamaño máximo del material.

Tabla 2.1. Masa mínima de la muestra respecto al tamaño máximo del árido.

Tamaño Máximo Absoluto (mm)	Cantidad Mínima De Muestra Para El Ensaye (kg)
5	0,5
10	2
20	5
25	10
50	15
80	20

Fuente: MC.V8 (2023).

### 2.1.3.1.3 Banda granulométrica.

Según el MC- V8, 2023 Para la región de Valparaíso las bases granulares deben ser de una determinada graduación para así ajustarse a una banda granulométrica específica, ya sea TM 50-b, TM 50-c ó TM 25 según muestra la tabla N° 2.2 Esta graduación responde a la necesidad de obtener bases más densas y resistentes.

Tabla N° 2.2 Bandas granulométricas para bases, subbases y capas de rodaduras.

Tamiz (mm)	TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
50	100	100	100				
40	-	70 - 100	-	100	100	100	
25	55 - 100	55 - 85	70 - 100	70 - 100	80 - 100	80 - 100	100
20	-	45 - 75	60 - 90	50 - 80	-	-	70 - 100
10	30 - 75	35 - 65	40 - 75	25 - 50	50 - 80	50 - 80	50 - 80
5	20 - 65	25 - 55	30 - 60	10 - 30	35 - 65	35 - 65	35 - 65
2.5	-	-	-	5 - 15	-	-	-
2	10 - 50	15 - 45	15 - 45	-	25 - 50	25 - 50	25 - 50
0,5	5 - 30	5 - 25	10 - 30	0 - 5	10 - 30	15 - 30	10 - 30
0,08	0 - 20	0 - 10	0 - 15	0 - 3	5 - 15	5 - 20	0 - 15

Fuente: Manual de carreteras volumen N°8, 2023.

#### 2.1.3.1.4 Limite de consistencia o de Atterberg.

Existe una serie de relaciones empíricas que permiten medir la capacidad de un suelo para absorber la humedad sin cambiar su estado de consistencia. Estos indicadores son mediciones indirectas de la característica básica de superficie específica. Los más usados son el límite plástico y el límite líquido conocidos como límites de Atterberg. Estos índices se determinan en suelos remoldeados o suelos que han perdido su estructura por amasado (Manual de Carreteras Volumen N°2, 2023).

Según el MC- V8, 2023 Lo límites de consistencia se realizarán con los métodos 8.102.3, 8.102.4, teniendo como parámetros el inciso 8.101.1 de este manual. Dentro de los límites de consistencia es habitual incluir el límite de contracción, este ensaye se hace como lo estipula el MC-V8 inciso 8.102.5. De igual forma se debe regir por lo indicado en la Nch 1517 of 79.

#### 2.1.3.1.5 Límite plástico.

Es el contenido de humedad sobre el cual las partículas de suelo están bien lubricadas y pueden ser moldeadas en una masa plástica. Una menor cantidad de agua conduce al suelo a un estado semisólido, quebradizo, en el cual se evidencian características granulares. Por otro lado, una mayor cantidad de agua hace al suelo más plástico como resultado de una disminución de su cohesión. El límite plástico es el menor contenido de agua por el cual el suelo mantiene características plásticas (Manual de Carreteras Volumen N°2, 2023). El ensaye del límite plástico se ejecutará como dicta el MC-V8 inciso 8.102.4.

### 2.1.3.1.6 Límite líquido.

Se representa como el menor contenido de agua necesario para reducir la masa de suelo a una condición de semifluido, con una cohesión insignificante. En este sentido, dicho contenido de humedad puede considerarse como un límite de saturación (Manual de Carreteras Volumen N°2, 2023). Este ensaye se ejecutará como lo dicta el MC-V8 inciso 8.102.3. se debe usar el método mecánico (curva de flujo) con tres puntos como mínimo.

Tabla N°2.3 Parámetros de límite de consistencia para una base granular.

LÍMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG		
	Límite Líquido	Índice de plasticidad
Base Granular	Máx. 25	Máx. 6

Fuente: MC-V8, (2023).

### 2.1.3.1.7 Clasificación de suelos por método AASHTO.

Esta clasificación de suelos se rige por la norma AASHTO M145. Esta norma se reserva, preferentemente, para obras viales. Esta clasificación divide a los suelos en 7 grupos generales (Manual de carreteras Volumen N°2, 2023).

Tabla N° 2.4 Sistema de clasificación de suelo AASHTO.

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

Fuente: AASHTO M145.

### 2.1.3.1.8 Clasificación de suelos por método USCS.

Esta clasificación de suelos se rige por la norma ASTM D 2487. Esta norma está orientada a cualquier tipo de obra. Esta clasificación divide a los suelos en 15 grupos generales (Manual de carreteras Volumen N°2, 2023).

Tabla N°2.5 Sistema de clasificación de suelo USCS.

<b>SISTEMA CLASIFICACION USCS</b>						
GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)						
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3	< 0.73 (wl-20) ó <4 > 0.73 (wl-20) ó >7
	GP			≤ 6	<1 ó >3	
	GM		> 12			
	GC					
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3	< 0.73 (wl-20) ó <4 > 0.73 (wl-20) y >7
	SP			≤ 6	<1 ó >3	
	SM		> 12			
	SC					
* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC. *** respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm						
** Si $IP \cong 0.73 (wl-20)$ ó si IP entre 4 y 7 e $IP > 0.73 (wl-20)$ , usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC.						
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej: GW-GM en vez de GW-GC.						
$C_U = (D_{60}) / (D_{10})$			$C_C = (D_{30}^2) / (D_{60} \cdot D_{10})$			

Fuente: ASTM D 2487.

### 2.1.3.1.9 Densidad real de partículas de suelo.

La parte sólida de los suelos está constituida por partículas dispuestas de una manera determinada, formando un cierto tipo de estructura porosa que conforma la masa (L. Montoya, 2023). Según la NCh 1532 Para determinar la densidad real de partículas de cualquier tipo de suelo se debe realizar el ensayo de densidad de partículas sólidas.

### 2.1.3.1.10 Densidad de partículas sólidas.

La densidad de partículas sólidas es el cociente entre la masa sólida de un suelo y el volumen sólido del mismo. La densidad de partículas toma en cuenta únicamente la masa y

el volumen que ocupan las partículas sólidas. Excluye el volumen ocupado por el aire y el agua (A. Cárdenas y E. Donoso, 2008).

En el caso de las partículas mayores que 5 mm se utiliza el método 8.202.20 del MC-V8, el cual tiene como objetivo de cuantificar la absorción de agua del material y también permite determinar la densidad neta, la que considera solo el volumen de los poros inaccesibles de las partículas y la densidad real, que considera tanto los poros accesibles como los inaccesibles de las partículas (Manual de Carreteras Volumen N°2, 2023). De igual manera se debe regir por la NCh 1532 of 80. Cuando el suelo se compone de partículas mayores que 5 mm. se debe aplicar el método de determinación de densidad neta de las gravas según método 8.202.20 del MC-V8, 2023.

#### 2.1.3.1.11 Contenido de humedad y grado de saturación.

La determinación del contenido de humedad de un suelo, que corresponde a la razón entre la masa del agua contenida en el suelo y la masa seca del mismo, se hace frecuentemente secando la muestra al horno a una temperatura de 110° C, siguiendo un procedimiento como lo indica el MC-V8 inciso 8.102.2 (Manual de Carreteras Volumen N°2, 2023).

El grado de saturación, que corresponde a la razón entre el volumen de agua contenido en el suelo y el volumen de huecos que este presenta, se calcula una vez determinado la humedad del suelo, su densidad de partículas sólidas y su densidad natural seca, haciendo uso de la expresión (Manual de Carreteras Volumen N°2, 2023):

$$Sr = \frac{\omega}{\frac{1000}{p_d} - \frac{1000}{p_s}}$$

Donde:

*Sr*: Grado de saturación (%)

*ω*: Contenido de humedad del suelo (%)

*p<sub>d</sub>*: Densidad natural seca  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

*p<sub>s</sub>*: Densidad de partículas sólidas  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

#### 2.1.3.1.12 Relación humedad – densidad.

El ensaye tiene por objetivo determinar la densidad máxima y la humedad óptima que puede alcanzar un suelo cuando se compacta con una energía por unidad de volumen determinada. Se rige por la Nch 1534/2 of 79.

Los procedimientos más usados corresponden a los ensayos de compactación por impacto (ensayo Proctor), los que se encuentran descritos en el MC-V8 por los siguientes métodos (Manual de Carreteras Volumen N°2, 2023):

- 8.102.7: Relación humedad-densidad. Ensaye Proctor modificado, que considera pisón de 4,5 kg y 460 mm de caída libre.

#### 2.1.3.1.13 Densidad relativa.

Este ensaye es aplicable a suelos granulares de libre drenaje, en los que suele conseguirse una máxima densidad cuando se compactan totalmente saturados. En el MC-V8 inciso 8.102.8 se define la manera de realizar este ensaye y como presentar sus resultados. En laboratorio se determinan las densidades máxima y mínima del suelo remoldeados. La densidad relativa queda dada por la siguiente expresión (Manual de Carreteras Volumen N°2, 2023):

$$DR = \frac{p_{m\acute{a}x} (p_d - p_{m\acute{i}n})}{p_d (p_{m\acute{a}x} - p_{m\acute{i}n})} \times 100$$

Donde:

$DR$  = Densidad relativa (%)

$p_d$ : Densidad natural seca  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$p_{m\acute{a}x}$ : Densidad máxima de laboratorio  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$p_{m\acute{i}n}$ : Densidad mínima de laboratorio  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

#### 2.1.3.1.14. Morfología de agregado grueso del suelo.

Piedra tipo chancada: se origina de los cantos rodados con la cualidad de ser artificial. Son angulares y graduados según la especificación que se requiera. Este agregado tiene una excelente resistencia a la compresión, ya que debido a sus aristas se torna difícil el deslizamiento entre partículas (T. Coffey, 2017).

Piedra tipo rodada: es un agregado natural originado por la desintegración de fragmentos de roca, por su transporte a través del agua en ríos. Las partículas de este tipo de agregado son resistentes, redondeados y lisos. Este agregado es resistente y buena trabajabilidad, ya que las partículas se deslizan fácilmente alcanzando esquinas (T. Coffey, 2017).

Piedra tipo laja: Es el término con el que se designa a un tipo de roca sedimentaria que es lisa y plana. Que naturalmente se pueden encontrar con forma de láminas y su vez pueden tener apariencia de rectángulo, de círculo, de óvalo, e incluso pueden llegar a presentarse en formatos bastante irregulares (Y. Irán, 2023).

#### 2.1.3.15. Cubicidad de partículas.

Este ensayo se rige por el inciso 8.202.6 del manual de carreteras volumen 8, 2023.

Según la NCh 163 El ensayo de cubicidad de partículas determina el contenido porcentual de las partículas chancadas, rodadas y lajas de la fracción de agregado grueso del suelo. Este método se aplica a todos los elementos pétreos que se emplean en la elaboración de carpetas de pavimentos.

#### 2.1.3.1.16. Permeabilidad del suelo.

La norma AASHTO T215 describe un ensayo de permeabilidad de carga constante que es aplicable para suelos granulares con un porcentaje de finos que no supere el 10%.

Los ensayos de permeabilidad en laboratorio se reservan para estimar el coeficiente de permeabilidad de suelos naturales muy homogéneos y de rellenos compactados. (Manual de carreteras volumen N°2, 2023).

El coeficiente de permeabilidad se puede determinar haciendo uso de técnicas directas e indirectas. Dentro de las técnicas directas se encuentran los ensayos de laboratorio mediante el permeámetro de carga variable o de carga constante tal como lo indica la norma ASTM D 2434 y la norma AASHTO T 215. De igual manera se puede calcular el coeficiente de permeabilidad,  $K$ , mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{Q \times L}{A \times t \times h}$$

Donde:

$K$ : Coeficiente de permeabilidad,  $\frac{cm}{s}$

$Q$ : Cantidad de agua de descarga,  $cm^3$

$L$ : Distancia entre manómetros,  $cm$

$A$ : Área de la sección transversal de la muestra,  $cm^2$

$t$ : Tiempo total de desagüe,  $seg$

$h$ : Diferencia de carga (altura) sobre los manómetros,  $cm$

### 2.1.3.2 Propiedades mecánicas.

#### 2.1.3.2.1 Capacidad de carga.

La máxima resistencia del suelo ante la presencia de esfuerzo cortante es así a lo que se conoce como la capacidad de carga última. Este estado límite nos indica todos los esfuerzos que el suelo puede aguantar antes de presentar daños irreparables (J. López, 2011).

#### 2.1.3.2.2 Relación de soporte de california (CBR).

Según la Nch 1852 of 81 el CBR es un ensayo de relación de soporte que mide la resistencia al corte, esfuerzo cortante, de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número asociado a la capacidad de soporte.

Para estimar la capacidad de soporte de un suelo, mediante la determinación de su resistencia a la penetración, se recurre por lo general al ensaye C.B.R, el cual se describe en el MC-V8 inciso 8.102.11.

## 2.2. Tereftalato de polietileno (PET).

El tereftalato de polietileno, comúnmente conocido como PET, es un tipo de plástico perteneciente a la familia de los poliésteres. Se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones debido a sus propiedades físicas y químicas favorables, como la resistencia mecánica, resistencia térmica y química, así como la estabilidad dimensional. Es un polímero lineal semi cristalino. Este material se caracteriza por ser transparente, resistente y liviano y es usado comúnmente en botellas y envases. Además, es uno de los tipos de plásticos más usados y reciclados (S. Maldonado, 2023).

### 2.2.1 Propiedades mecánicas del PET.

El tereftalato de polietileno (PET) tiene varias propiedades mecánicas, entre ellas:

- Resistencia a la tracción: El PET es un material muy resistente a la tracción 91 MPa, lo que significa que puede soportar grandes fuerzas de tensión sin romperse (Extrulam, 2023).
- Resistencia a la compresión: El PET también es resistente a la compresión, la cual tiene valores que oscilan entre 21 Mpa, 38 Mpa y 89 Mpa, lo que significa que puede soportar grandes fuerzas de compresión sin deformarse. Esta propiedad hace que el PET sea adecuado para aplicaciones que requieren una alta rigidez (Extrulam, 2023).
- Otras propiedades: La tabla N°2.6 mostrada a continuación detalla, en un resumen, otras propiedades mecánicas de polietileno tereftalato PET.

Tabla N°2.6 Propiedades mecánicas del pet.

Propiedades Mecánicas	Norma	Unidades	Valores
Límite elástico (2)	ISO 527	MPa	90
Alargamiento en el rendimiento (2)	ISO 527	%	–
Resistencia a la tracción hasta la rotura (2)	ISO 527	MPa	–
Alargamiento hasta la rotura (2)	ISO 527	%	15
Módulo de tracción (2)	ISO 527	MPa	3700
Resistencia al impacto sin muescas	ISO 179	KJ/mm2	> 50
Resistencia al impacto con muesca	ISO 179	KJ/mm2	2
Dureza Rockwell M	ISO 2039	N/mm2	96
Dureza Shore D	DIN 53505	° Shore D	–
Resistencia a la flexión – al 3,5%	ISO 178	MPa	–
Módulo de flexión	ISO 178	MPa	–
Tensión compresiva (1% tensión-23 ° C)	ISO 604	MPa	26
Módulo de compresión	ISO 604	MPa	–
Deformación bajo carga 100 Mpa-24 hr- RT	–	%	–
Relación de Poisson	Abs		0,44

Fuente: Broncesval, 2020.

### 2.2.2 Propiedades térmicas del PET.

- Temperatura de fusión: La temperatura de fusión del PET es de aproximadamente 260 °C. Esta propiedad determina la temperatura a la que el PET se funde y se convierte en un líquido (Extrulam, 2023).
- Temperatura de transición vítrea: La temperatura de transición vítrea del PET es de aproximadamente 70 °C. Esta propiedad determina la temperatura a la que el PET pasa de un estado vítreo a un estado amorfo (Extrulam, 2023).
- Conductividad térmica: La conductividad térmica del PET es relativamente baja, lo que significa que es un buen aislante térmico. Esta propiedad hace que el PET sea

adecuado para aplicaciones que requieren un buen aislamiento térmico, como botellas de bebidas (Extrulam, 2023).

### 2.2.3 Propiedades físicas del PET.

El tereftalato de polietileno (PET) es un plástico que tiene varias propiedades físicas, las cuales se resumen en la tabla N°2.7 a continuación.

Tabla N°2.7 Propiedades físicas del PET.

Propiedades Físicas	Norma	Unidades	Valores
Peso específico	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,39
Absorción de agua a la saturación	ISO 62	%	0,5
Absorción de humedad a 23 ° C – 50% RH	ISO 62	%	0,25
Límite superior de temperatura de trabajo	–	°C	100
Límite inferior de temperatura de trabajo	–	°C	-20

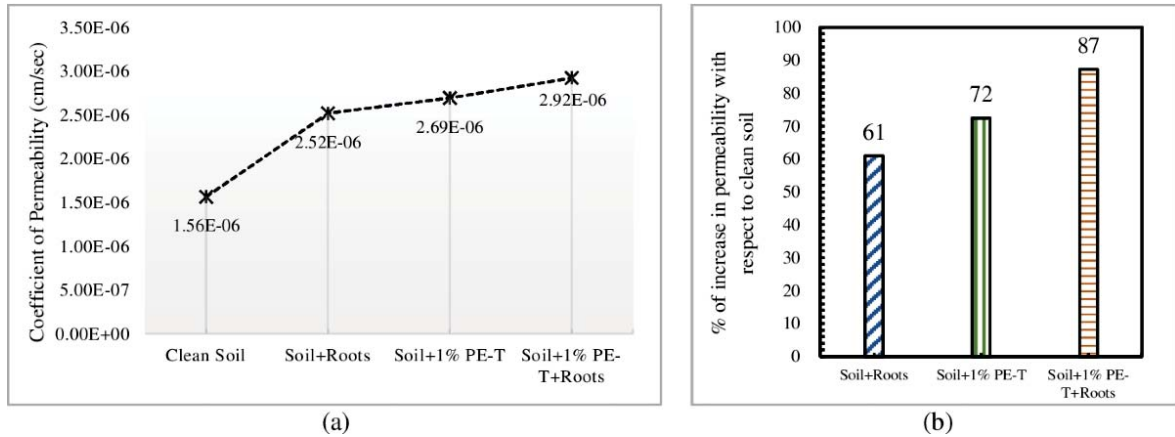
Fuente: Broncesval, 2020.

## 2.3 Utilización de PET en suelos.

### 2.3.1 Influencia del PET en la permeabilidad de suelos.

Los autores S. Siddique, M. Aktery y E. Mohamedelhassan (2024) investigaron la incorporación del PET en suelos arcillosos, donde los objetivos del estudio son investigar las propiedades de resistencia y permeabilidad de muestras de suelo tratadas con microplástico en diferentes concentraciones y muestras tratadas tanto con microplástico como con raíces de plantas. Los rangos de concentración de PET fueron entre 0,25 y 4% (por masa seca de suelo).

Figura 2.1 Evaluación de permeabilidad de suelo + PET.



Fuente: S. Siddique, M. Aktery y E. Mohamedelhasan (2024).

De la figura 2.1 se puede determinar que el coeficiente de permeabilidad aumenta en un 72% y un 87% en el suelo tratado con 1% de PE-T y 1% de PE-T + raíces, respectivamente, en comparación con el suelo limpio sin adiciones. El porcentaje óptimo de PET en este estudio para aumentar la permeabilidad del suelo fue del 1%.

El autori P. Solanki (2018) en su estudio se centran en la utilización de PET reciclado para la elaboración de un compuesto permeable para pavimentos. Los rangos de incorporación de PET fueron de 5%, 7,5% y 10% de la masa seca del suelo.

Figura 2.2 Evaluación de la permeabilidad de PET + suelo.

M i x #	PET (%)	Soil (%)	Coarse Aggregate (%)	(Aggregate+soil)/PET ratio (AS/P)	Aggregate/PET ratio (A/P)	Average indirect tensile strength in psi (kPa)	Average permeability in ft/day (m/day)
1	5	5	90	19	18	52 (358)	2226 (679)
2	7.5	5	87.5	12.3	11.7	57 (393)	1210 (369)
3	10	5	85	9	8.5	60 (414)	1163 (355)
4	10	0	90	9	9	28 (193)	1242 (379)
5	10	10	80	9	8	70 (483)	42 (13)

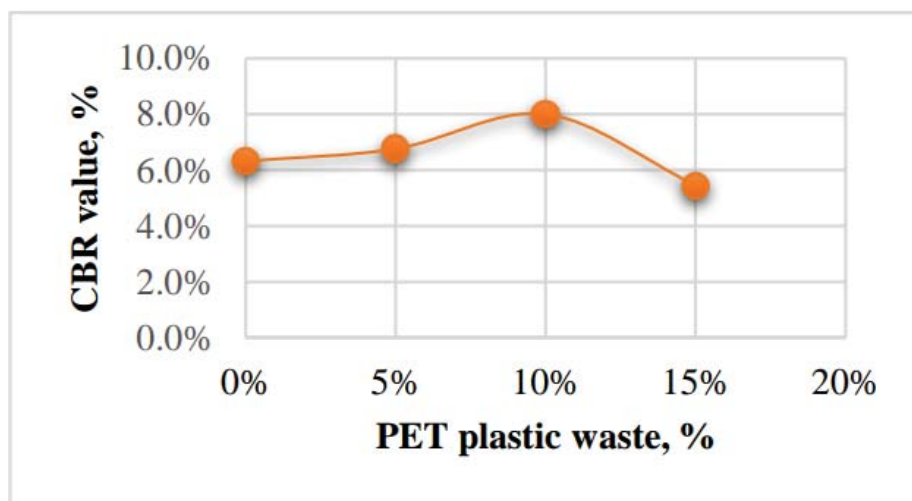
Fuente: P. Solanki (2018).

De la figura 2.2 se puede determinar la permeabilidad disminuye a medida que la relación S/P (Suelo/PET) se reduce. Esto significa que, a menor cantidad de PET y mayor cantidad de suelo, mayor es la permeabilidad. El porcentaje óptimo de PET en este estudio para aumentar la permeabilidad del suelo fue del 5%.

### 2.3.2 Influencia del PET en la capacidad de carga de suelos.

Los autores L. Suthar, S. Meena y U. Kumar (2024) investigaron la incorporación del PET en suelos arenosos, donde cuyo objetivo era investigar la viabilidad de utilizar residuos plásticos de polietileno tereftalato (PET) para reforzar suelos arenosos y mejorar sus propiedades. El PET utilizado en el estudio se presenta en forma de escamas de diferentes colores, con tamaños que varían entre 0,075 y 4,750 mm. Esta forma y tamaño de partícula son similares a la arena utilizada en el estudio.

Figura 2.3 Porcentajes C.B.R con incorporación de PET

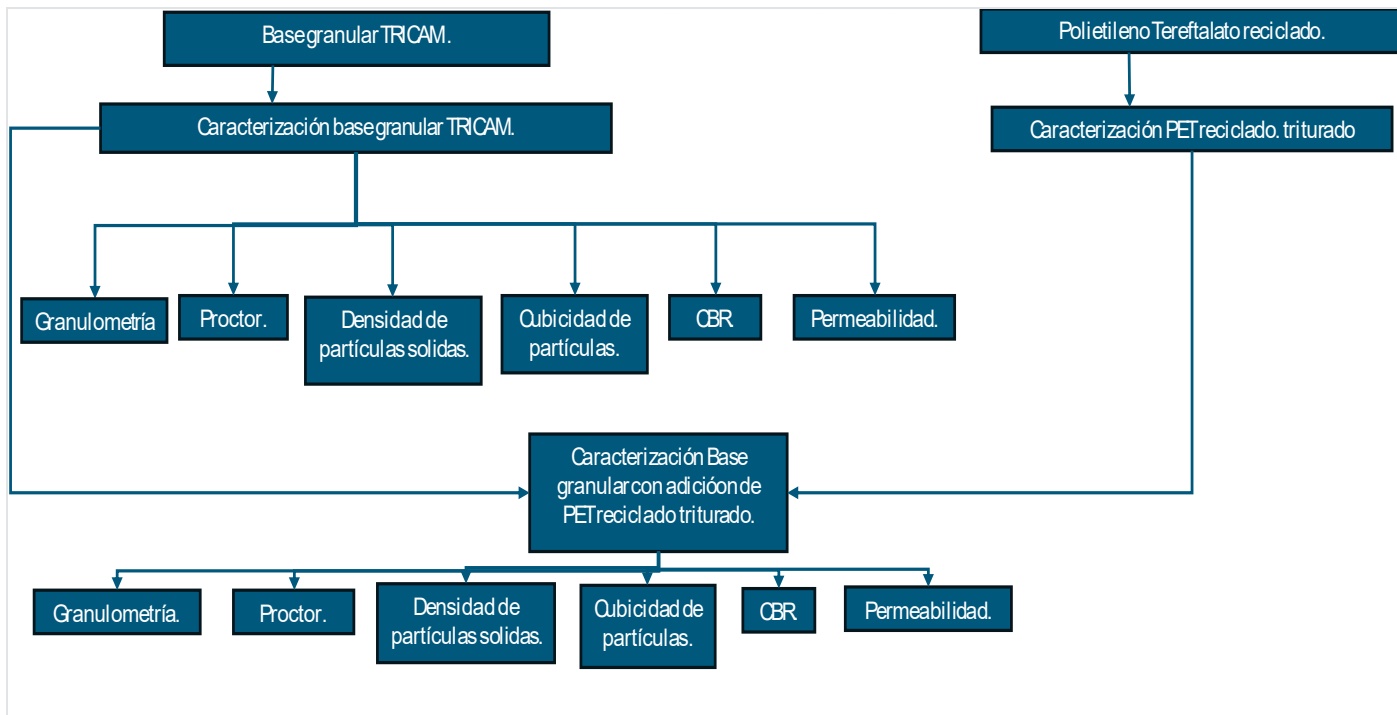


Fuente: L. Suthar, S. Meena y U. Kumar (2024).

De la figura 2.3 se puede determinar que el compuesto arena + PET con 10% de PET alcanzó un CBR de 8%, lo que representa un aumento del 15.5% en comparación con el CBR de la arena sin refuerzo (6.3%). Sin embargo, la adición de un porcentaje mayor de PET (15% en el estudio) resultó en una disminución del CBR, alcanzando un valor de 5.5%. La adición de un 5% de PET no produjo cambios significativos en el CBR del suelo. Los resultados del estudio demuestran la importancia de optimizar el porcentaje de PET en la mezcla para maximizar el valor de CBR y obtener los mejores resultados en términos de capacidad de soporte del suelo. El porcentaje óptimo de PET en este estudio fue del 10%.

### 3. Metodología de la investigación.

Figura N° 3.1 Resumen de metodología a emplear.



Fuente: Elaboración propia, (2024).

En este apartado se detallará el procedimiento y materiales usados para el desarrollo de la presente tesis.

En primer lugar, se obtendrán la base granular y el PET. La base granular será extraída de la Planta de Áridos TRICAM, que obtiene sus materiales de la explotación en el río La Ligua, ubicado en la provincia de Petorca. Por su parte, el PET se adquirirá directamente de la empresa Rinoplast, situada en Playa Ancha, cerca del vertedero Los Molles.

Una vez obtenidos ambos materiales, se dará inicio al estudio, el cual se desarrollará en dos etapas. En la primera etapa se llevará a cabo el análisis de la base granular y de PET por separado. La segunda etapa consistirá en el análisis de la mezcla de base granular y PET, con el objetivo de evaluar la influencia de la incorporación de PET en las propiedades de la base granular.

### 3.1 Etapa 1. Caracterización de materiales constituyentes.

Se procederá a la caracterización de base granular y PET por separado para identificar las propiedades físicas y mecánicas de cada una.

Tabla N°3.1 Ensayos físicos y mecánicos etapa 1.

ENSAYO	ETAPA 1	
	BASE GRANULAR	PET
Granulometría	•	•
Límites de Atterberg	•	
Proctor modificado	•	
Densidad relativa	•	
Densidad de partículas sólidas	•	
Cubicidad de las partículas	•	
Desgaste de los ángeles	•	
C.B.R	•	
Permeabilidad	•	

Fuente: Elaboración propia, 2024.

#### 3.1.1 Preparación de Tereftalato de polietileno molido.

En primera instancia se deberá preparar el Tereftalato de polietileno molido. Para el empleo del Tereftalato de polietileno como adición en los áridos en capas granulares, como base, se deberá llevar a cabo el siguiente proceso:

- Limpieza, el material deberá ser limpiado de toda impureza que pueda llegar a tener, tales como metales o residuos orgánicos e inorgánicos.

- Granulometría, Se separarán en los diferentes tamices el material de Tereftalato de polietileno molido, dejando para utilizar solamente el material que pase por el tamiz N°4, es decir, separando el agregado fino del agregado grueso.

#### 3.1.2 Clasificación de suelos.

La clasificación de los suelos se realizará según lo indica el manual de carretera volumen 5, con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) y el sistema

AASHTO. Para ello previamente se deben realizar los ensayos de granulometría y límites de Atterberg los cuales serán realizados bajo los procedimientos descritos por el Manual de carreteras volumen 8 y las normas chilenas correspondientes.

En una primera etapa, se efectuará la granulometría siguiendo el procedimiento establecido en la norma NCh 165 de 2009. Una vez finalizado este ensayo, se procederá a realizar los correspondientes ensayos para determinar los límites de consistencia, conocidos como límites de Atterberg, específicamente el límite líquido y el límite plástico, conforme al procedimiento determinado por la Nch 1517 of 79 y con los resultados obtenidos, se calculará el índice de plasticidad como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico y no debe ser superior a 6% para las bases granulares de pavimentos asfálticos (Manual de carreteras volumen N°8, 2023).

Tabla 3.2 Requisitos para Bases Granulares. Límite líquido e índice de plasticidad.

ENSAYE	REQUISITOS
Límite líquido	máx. 25%
Índice de plasticidad	máx. 6%

Fuente: Manual de carreteras volumen N°8, 2023.

### 3.1.3 Compactación de suelos.

Se procederá a realizar la compactación de la muestra de la base granular con el ensayo Proctor modificado, según lo indica la NCh 1534/2 of 2008 y el MC-V8 (8.102.7). Con los resultados de este ensayo se realizará una curva de variación de densidad seca v/s porcentaje de humedad, para así conocer la densidad seca máxima de compactación y la humedad óptima para la compactación de las muestras. Para la compactación se utilizará un pisón de 4.5 kg en caída libre desde una altura de 460 mm., con una energía específica de compactación de 2.67(J/cm<sup>3</sup>), (=27.2 Kgf cm/cm<sup>3</sup>).

Existen dos posibilidades de procedimiento:

- Método B: Molde de 150 mm. de diámetro, material de suelo que pasa por el tamiz 5 mm.
- Método D: Molde de 150 mm. de diámetro, material de suelo que pasa por el tamiz de 20 mm.

Tabla N°3.3 Tamaño de la muestra de ensayo.

Molde (mm)	Método	Masa mínima de la muestra (g)	Masa aproximada de fracción de muestra para cada determinación (g)
150	ByD	30.000	6.000

Fuente: Manual de carreteras, 2023.

Si el suelo no es cohesivo, no cementado, de flujo libre, con un tamaño máximo nominal hasta 80 mm., un índice de plasticidad igual o menor que 5 y que contiene hasta un 12% en masa de partículas menores que 0.075 mm. Se someterá a ensayo Densidad Relativa para determinar densidad mínima y las densidades máximas secas a través de los métodos seco y húmedo.

En el método seco se determinará la densidad mínima seca y la densidad máxima compactada seca y en el método húmedo se determinará la densidad máxima compactada seca.

#### 3.1.4 Densidad de partículas sólidas.

Se realizará el ensayo de partículas sólidas siguiendo los procedimientos de la NCh 1117 y de la NCh 1532 Of 80. Este ensayo consiste en la determinación de la densidad de partículas sólidas de suelos que se componen de partículas menores a 5 mm. Mediante la utilización de un picnómetro que puede ser un frasco volumétrico de 100 ml, o una botella con capacidad de 50 ml. Cuando el suelo se compone de partículas mayores que 5 mm. se debe aplicar el método de determinación de densidad neta de las gravas. Se determina y registra el porcentaje de la masa seca de ambas fracciones y se ensayan por separado con el método correspondiente. El resultado será el promedio de ambas fracciones.

#### 3.1.5 Desgaste de los Ángeles.

El propósito de este ensayo es analizar el desgaste del agregado grueso, resultante de la combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y trituración. El ensayo se hará de acuerdo con el procedimiento de la NCh 1369-2010 y el método 8.202.11 del manual de carreteras volumen N°8.

Tabla N°3.4 Grados de ensaye. Definidos por sus rangos de tamaño, en mm.

Tamaños de partículas (mm)	1	2	3	4	5	6	7
	(80-40)	(50-25)	(40-20)	(40-10)	(20-10)	(10-5)	(5-2,5)
Tamaño de las fracciones (g)							
80 – 63	2.500 ± 50						
63 – 50	2.500 ± 50						
50 – 40	5.000 ± 50	5.000 ± 50					
40 – 25		5.000 ± 25					
25 – 20			5.000 ± 25	5.000 ± 25	1.250 ± 25		
20 – 12,5					1.250 ± 10	2.500 ± 10	
12,5 – 10			1.250 ± 10		2.500 ± 10		
10 – 6,3						2.500 ± 10	
6,3 – 5					2.500 ± 10		
5 – 2,5						5.000 ± 10	
Masa inicial de muestra (Mi)	10.000 ± 100	10.000 ± 75	10.000 ± 50	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10	5.000 ± 10
Esferas							
- número	12		12	11	8	6	
- masa (g)	5.000 ± 25		5.000 ± 25	4.584 ± 25	3.330 ± 25	2.500 ± 15	
Número de Revoluciones	1.000		500				

Fuente: Manual de carreteras volumen N°8, 2023.

### 3.1.6 Cubicidad de partículas.

Se determinará el porcentaje en masa de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos. El porcentaje de piedra chancada debe ser mínimo del 50%. Los porcentajes de piedra chancada y piedra rodada deben sumar 100% (Manual de carreteras volumen N°8, 2023).

Uno de los propósitos de este requisito es incrementar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregados (Manual de carreteras volumen N°8, 2023).

El tamaño de la muestra será tal que la masa de la fracción retenida en el tamiz 5mm cumpla con lo indicado en el inciso 8.202.6 del manual de carreteras volumen N°8.

Tabla N°3.5 Cantidad mínima de muestra de ensaye cubicidad de partículas.

Tamaño máximo absoluto de las partículas (mm)	Masa mínima de muestra (g)
50	2.000
25	1.000
20	500
12,5 y menor	200

Fuente: Manual de carreteras volumen N°8, 2023

### 3.1.7 Determinación de la razón de soporte de suelos compactados (CBR).

Se procederá a realizar el ensayo CBR según lo indica la Nch 1852 of 81, para así conocer la capacidad de soporte de explanadas de la base granular.

El manual de carreteras volumen 5, los valores del índice de CBR generalmente oscilan entre 0 y 150%, siendo el requisito mínimo el valor de 80% de CBR al 95% de la densidad máxima compactada seca para los suelos de bases granulares que formarán parte de un pavimento flexible.

Tabla N°3.6 Requisitos mínimos de CBR y cubicidad para Bases Granulares.

DESCRIPCION	CONCRETO ASFALTICO	ENSAYE
Capacidad de soporte (CBR) al 95% de la D.M.C.S según Método LNV95	min. 80%	LNV92
Material Chancado	min. 50%	LNV3

Fuente: Manual de carreteras volumen N°5, 2023.

### 3.1.8 Ensayo de permeabilidad.

Se debe determinar el coeficiente de permeabilidad mediante una carga constante de agua a través de suelos granulares que no contengan más del 10% de partículas que pasen por el tamiz N° 200 (0,075mm) (B. Nahuel, 2002).

#### 3.1.8.1 Preparación de la muestra y procedimiento.

La norma ASTM D 2434 y la norma AASHTO T 215 indican que el suelo con las partículas mayores de 19 mm (malla ¾") no deberán ser empleadas para el ensayo de permeabilidad. Del material del cual se han removido los sobre tamaños se deberá escoger una cantidad aproximadamente igual a dos veces la requerida para llenar la cámara del permeámetro. Una vez que se determine el peso de la muestra que se va a utilizar en el

ensayo, éste se debe mezclar con suficiente agua para producir el contenido de humedad deseado. Seguidamente se coloca el suelo preparado al interior del cilindro en capas delgadas uniformes aproximadamente iguales en espesor al tamaño máximo de las partículas después de compactadas, pero no menor de 15 mm (0.60"), aproximadamente. Seguidamente se compactan las capas sucesivas hasta que el suelo alcance el peso unitario relativo deseado, mediante un procedimiento adecuado, como sigue, por medio de golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie de la capa siguiendo una trayectoria regular, hasta una altura de alrededor de 20 mm por encima de la salida del manómetro superior. Cuando ya esté determinado el peso final del suelo empleado en el ensayo se deberá nivelar la superficie superior del suelo colocando la piedra porosa superior y medir la altura final de la muestra desde la superficie superior de la placa tope perforada hasta el tope de la placa porosa superior. Para concluir el ítem de preparación de la muestra se coloca la tapa superior del permeámetro asegurándola con tornillos y el procede a eliminar el aire atrapado en las partículas empleando una bomba de vacío durante 15 minutos continuando la operación mediante una saturación lenta de la muestra de abajo hacia arriba, luego se cierra la válvula de desagüe y se desconecta el vacío. Se debe abrir ligeramente la válvula de admisión del tanque de carga constante, hasta que la carga de agua sea estable. Al concluir el ensayo de permeabilidad, se drena y se examina la muestra para establecer si era esencialmente homogénea y de carácter isotrópico. Cualquier clase de rayas o capas horizontales alternadas claras y oscuras son evidencia de la segregación de finos. Se calculará el coeficiente de permeabilidad  $K$  con la formula correspondiente.





#### 4.1.1.1 Granulometría base granular.

En la tabla N° 4.1 se presenta la muestra representativa del 100% de base granular y 0% de adición de PET.

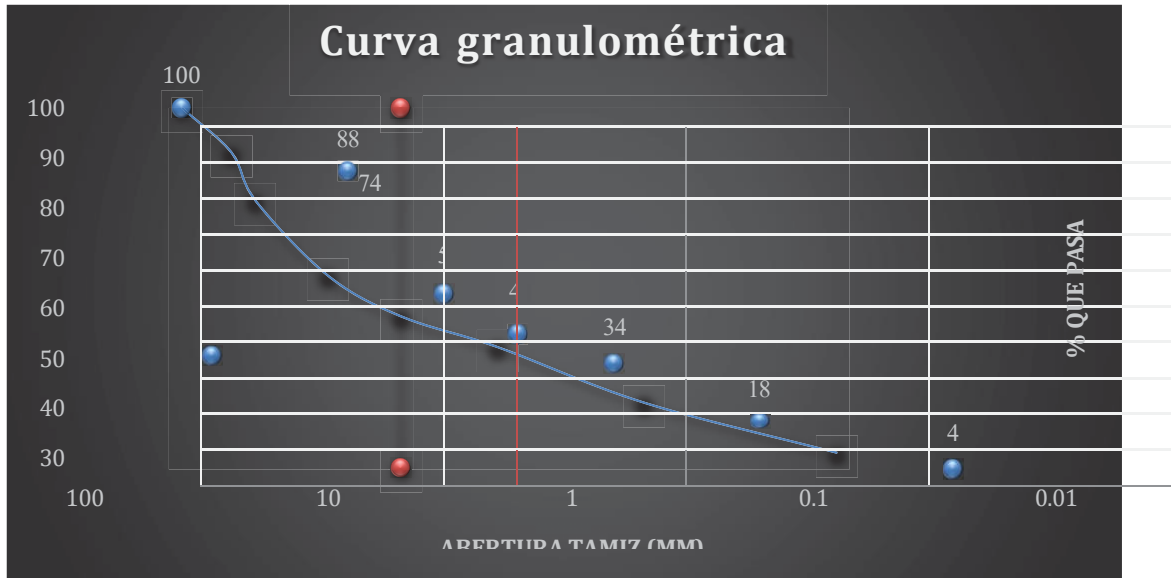
Tabla N° 4.1 Resumen granulometría de base granular.

Tamiz(ASTM)	Abertura (mm)	Pasa(%)
11/2"	40	100
1"	25	88
3/4"	20	74
3/8"	10	53
N°4	5	42
N°10	2	34
N°40	0,5	18
N°200	0,08	4

Fuente: (Elaboración propia, 2024).

De acuerdo con los datos obtenidos en la tabla N° 4.1 se realizó el siguiente gráfico.

Figura N° 4.1 Curva granulométrica base granular.



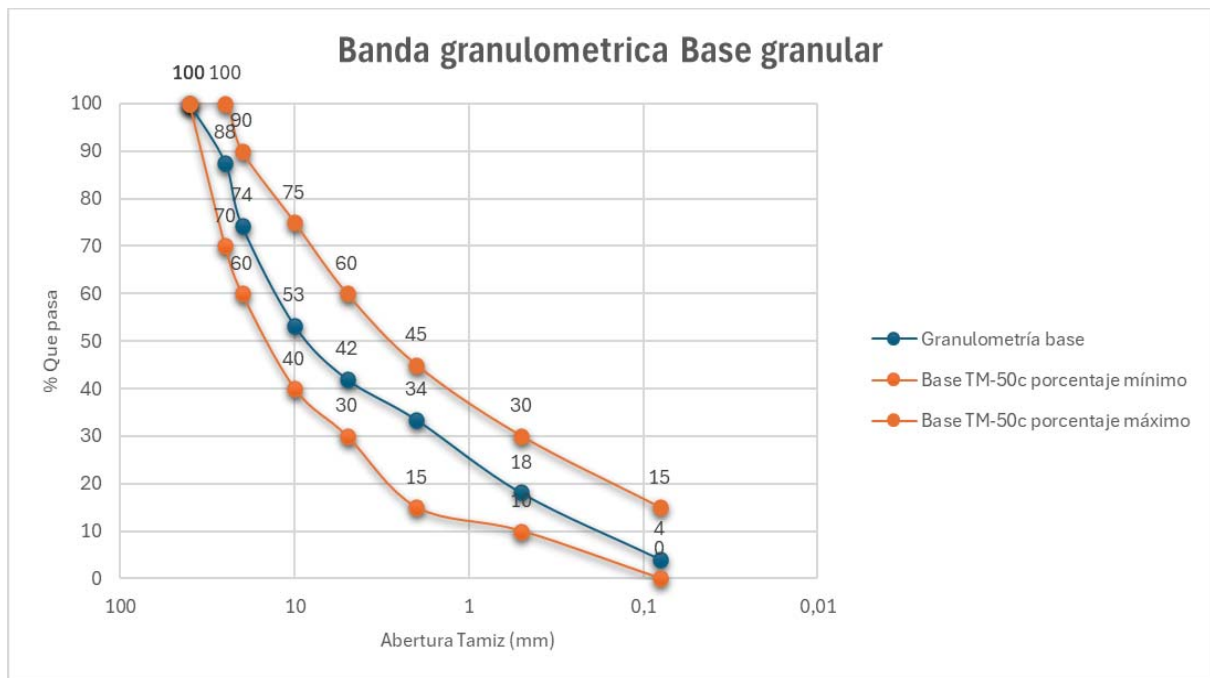
Fuente: (Elaboración propia, 2024)

De la curva granulométrica N° 4.1 y de la tabla N° 4.1 se puede determinar que un 42% de la muestra de suelo corresponde a agregado fino, es decir, arenas y finos que pasan por el tamiz N°4 el cual tiene un tamaño nominal de 5 mm y la cantidad de fino representa un 4% de la muestra total. Mientras que el 58% de la muestra del suelo corresponde a un suelo granular, es decir, gravas que pasan por el tamiz 1 1/2" el cual tiene un tamaño nominal de 50 mm y se retienen en el tamiz N°4 cuyo tamaño nominal es de 5 mm.

#### 4.1.2 Banda granulométrica base granular.

Se determinó la banda granulométrica de la base granular a partir del análisis granulométrico de la muestra ensayada, resultando en una banda granulométrica TM-50c, que se detalla en la figura N° 4.2 En esta banda, el porcentaje de material fino que pasa a través de la malla N°200 no supera el 15%.

Figura N° 4.2 Banda granulométrica Base granular.



Fuente: (Elaboración propia, 2024).

#### 4.1.3 Límites de Atterberg.

Se realizaron los ensayos para determinar el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) de la base granular. Dando como resultado que el límite de atterberg de la base granular es indeterminable y por consecuencia el índice de plasticidad (IP) tiene un valor de 0.

#### 4.1.4 Clasificación de suelos.

##### 4.1.4.1 Clasificación de suelo con método SUCS.

En la muestra de suelo estudiado se analiza que el suelo granular, gravas y arenas, tiene un porcentaje de 96%, mientras que el suelo fino, arcillas y limos, tiene un porcentaje de 4%. El porcentaje de gravas, 58%, es mayor al porcentaje de arenas, 38%, presentes en la muestra de suelo. De la curva granulométrica se pudo obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la muestra de suelo, y con estos hallar el coeficiente de uniformidad y de curvatura.

Tabla N° 4.2 Distribución de tamaños de partículas de base granular.

%Diametro	Diametro(mm)
D10	0,26
D30	1,625
D60	13,33

Fuente: (Elaboración propia, 2024).

$$\text{Coeficiente de uniformidad: } Cu = \frac{D60}{D10}$$

$$Cu = \frac{13,33}{0,26} = 51,27 \approx Cu = 51$$

$$\text{Coeficiente de curvatura: } Cc = \frac{D30^2}{D60 \times D10}$$

$$Cc = \frac{(1,625)^2}{13,33 \times 0,26} = 0,76 \approx Cc = 1$$

Debido a que el coeficiente de uniformidad es mayor a 6, y el coeficiente de curvatura se encuentra entre los valores 1 y 3, la muestra de suelo se define como bien clasificado o gradado, es decir, que el tamaño de partículas está distribuido en un amplio rango (Das, 2014).

Dando como resultado la clasificación de suelo con el método SUCS una grava bien gradada

GW.

Figura N° 4.3 Resumen clasificación de suelos



Fuente: (Elaboración propia, 2024).

#### 4.1.4.2 Clasificación de suelo con método AASHTO.

A partir de la tabla N°4.3, se realizará la clasificación del suelo utilizando el método AASHTO. El porcentaje de material que pasa a través de la malla N°10 es del 34%, lo que está por debajo del 50% requerido. En la malla N°40, el porcentaje que pasa es del 18%, inferior al 30% exigido. Por otro lado, el material que pasa por la malla N°200 es del 4%, menor al 15% estipulado. Además, el índice plástico es de 0, lo que está por debajo del umbral del 6% requerido. Como resultado, el índice de grupo es 0. Por lo tanto, la clasificación según el método AASHTO es del grupo A-1, con el subgrupo A-1<sup>a</sup>. El material del suelo se denomina fragmentos de pétreos de gravas y arenas.

Tabla 4.3.1 Clasificación de suelos método AASHTO

Fuente: Ingeotecnica..

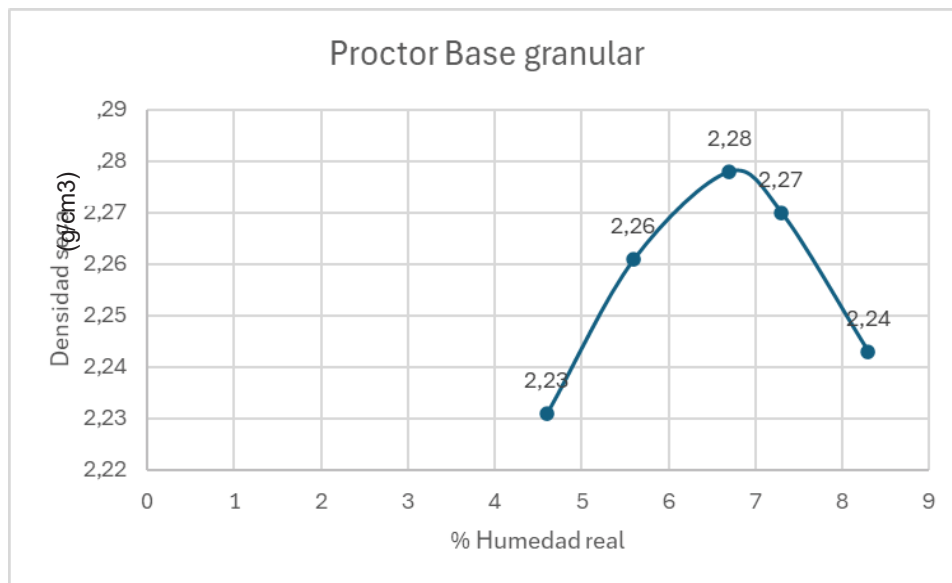
Clasificación General	Material Granular						Material limo arcillosos					
	A-1		A-2				A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	
Grupos	A-1a	A-1b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7-5	A-7-6
% pasante												
#10	50% máx											
#40	30% máx	50% máx					51% mín					
#200	15% máx	25% máx	35% máx	35% máx	35%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

#### 4.1.5 Proctor modificado (NCh 1534/2 Of 2008).

Se realizó el ensayo de Proctor modificado a la base granular para así obtener la densidad máxima compactada seca y su humedad óptima. Los resultados correspondientes a la humedad óptima con su densidad media compactada seca se muestran en la figura N° 4.4 en la que se establece que el punto de humedad óptima es equivalente a 6,7% y la densidad máxima correspondiente es de  $2,28 \frac{g}{cm^3}$

Figura N° 4.4 Curva de compactación de base granular.

Fuente: (Elaboración propia, 2024).



#### 4.1.6 Densidad de partículas sólidas (NCh 1532 Of 80).

Se realizó el ensayo de densidad de partículas sólidas para determinar el peso específico de la base granular. Dando como resultado un peso específico ponderado de 2,8 g/cm<sup>3</sup> como se muestra en la tabla N°4.4.

Tabla N° 4.4 Densidad de partículas sólidas base granular.

Densidad de partículas sólidas Base granular		
	Material	
	Bajo 5mm	Sobre 5mm
	Ps(g/cm <sup>3</sup> )	Pn(g/cm <sup>3</sup> )
	2,8	2,8
Peso específico ponderado	2,8	

Fuente: (Elaboración propia, 2024).

#### 4.1.7 Cubicidad de partículas.

Se realizó el ensayo de cubicidad de partículas, para así obtener el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajas representativas en la base granular. Generando una recopilación de los resultados obtenidos en el ensayo de cubicidad de partículas, se desprende la siguiente tabla con el promedio de porcentaje de chancado, rodado y lajas.

Tabla N° 4.5. Resumen de cubicidad de partículas base granular.

Tipo de partículas	Chancado	Rodado	Lajas
Porcentaje promedio (%)	60,2	39,7	1,7

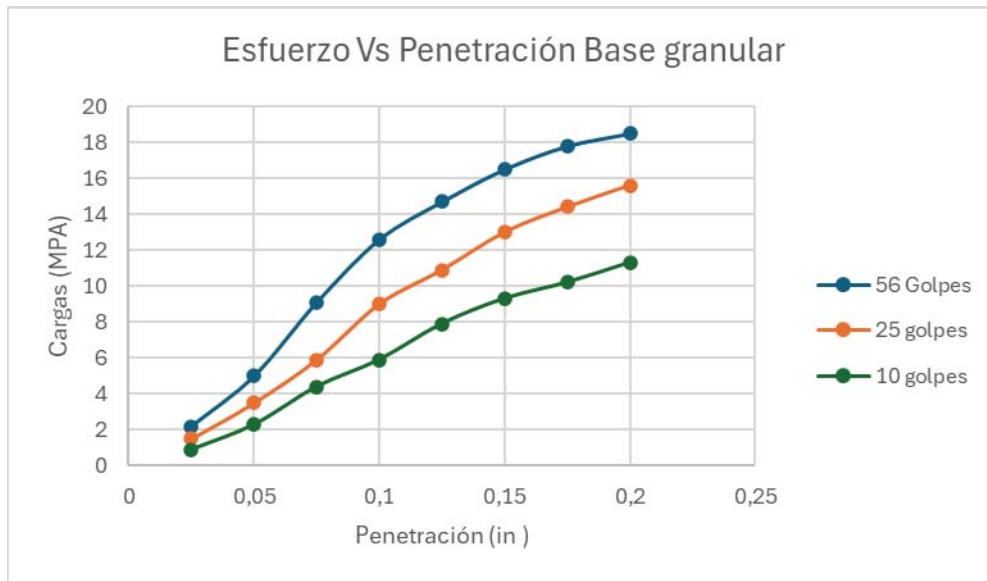
Fuente: (Elaboración propia, 2024).

En la tabla N° 4.5. Se muestra que el porcentaje de partículas chancadas en la muestra analizada da un 60,2%, las rodadas 39,7% y las lajas 1,7%. La suma de los porcentajes de las partículas chancadas y rodadas da 100%, cumpliendo así con las especificaciones del manual de carreteras volumen 8. Los resultados de partículas chancadas supera el 50% para cumplir con las especificaciones mínimas requeridas por el manual de carreteras para pavimentos flexibles. Esto es importante principalmente porque al tener un mayor porcentaje de chancado existe una mayor traba mecánica entre partículas al momento de compactar y, por tanto, existirá una mayor capacidad de soporte del suelo.

#### 4.1.8 Capacidad de soporte C.B.R (NCh 1852 Of 81).

Para la realización del ensayo de C.B.R se tomó los valores de humedad óptima y densidad máxima compactada seca obtenidas en el ensayo Proctor modificado. El C.B.R se determinó al 95% de la D.M.C.S. y a 0.2” de penetración. Con todos los datos obtenidos realizados en los ensayos para cada una de las muestras de la base granular se desprenden las siguientes figuras y tabla.

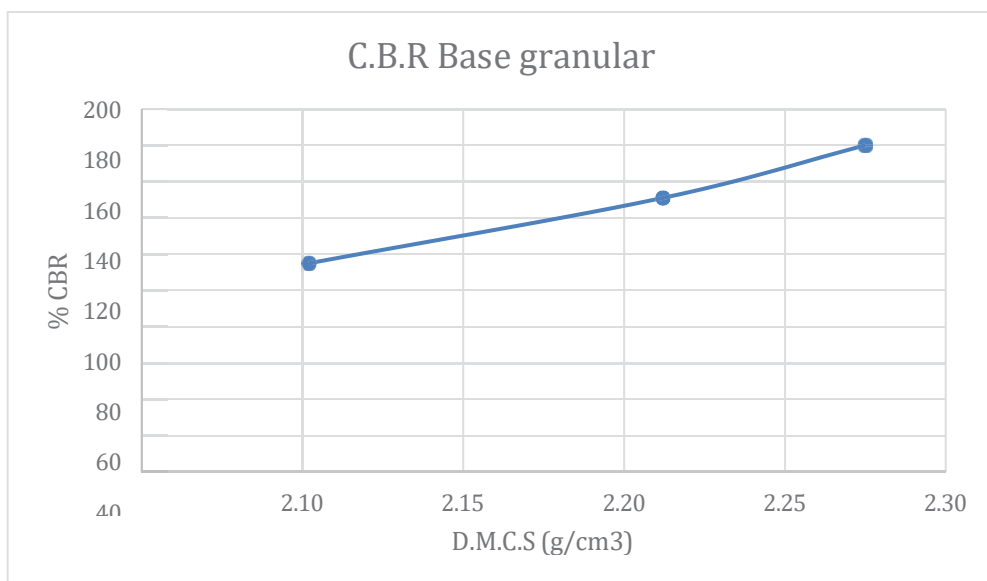
Figura N° 4.5 Curva de esfuerzo Vs penetración.



Fuente: (Elaboración propia, 2024).

De la figura N° 4.5 se puede determinar que el porcentaje de C.B.R para la muestra de 56 golpes da como resultado 180%. Para la muestra de 25 golpes el porcentaje de C.B.R da como resultado 151%. Finalmente, para la muestra de 10 golpes el porcentaje de C.B.R da como resultado 115%. Con estos datos, junto con las D.M.C.S de cada muestra de C.B.R se puede formular la figura N° 4.6.

Figura N° 4.6. Curva C.B.R base granular.



Fuente: (Elaboración propia, 2024).

De la figura N° 4.6 se puede generar una interpolación para así obtener el porcentaje de C.B.R al 95% de la densidad máxima seca compactada del Proctor modificado realizado previamente. Dando como resultado que el porcentaje de C.B.R de la base granular es de 135%. La tabla N°4.6 resume los datos usados para calcular el C.B.R de la base granular.

Tabla N° 4.6. C.B.R Base granular.

C.B.R Base granular		
D.M.C.S Proctor	2,28	g/cm3
D.M.C.S 95%	2,16	g/cm3
CBR al 95% D.M.C.S	135	%

Fuente: (Elaboración propia, 2024).

## 4.2 Caracterización de base granular con adición de PET.

### 4.2.1 Análisis granulométrico de base granular con PET.

Para realizar el ensayo de granulometría se tomó una muestra representativa de la base granular y una muestra representativa de PET. Esto con el fin de obtener la clasificación de suelos de la base granular con adición de PET triturado.

#### 4.2.1.1 Granulometría de PET.

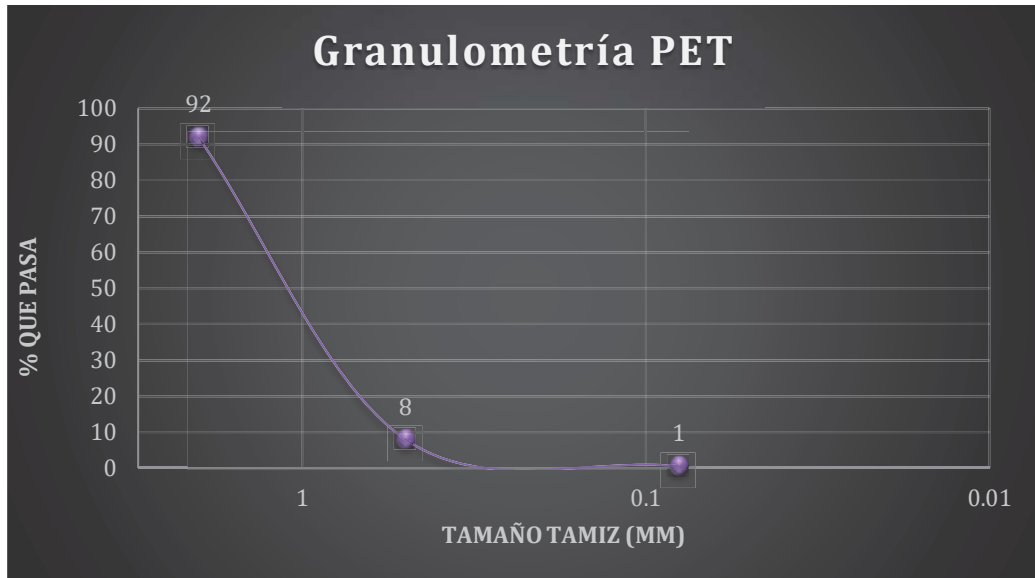
En la tabla N° 4.7 y el gráfico N° 4.7 se presenta la muestra representativa del 100% de PET.

Tabla N° 4.7 Tabla granulométrica de PET

Abertura	Tamiz	Peso(g)	%	Ret acumulado	Pasa (%)
2	N°10	40,14	8	8	92
0,5	N°40	417,26	84	92	8
0,08	N°200	37,03	7	99	1
Residuo		2,5			
Sumatoria tamices y residuos		497			

Fuente: (Elaboración propia, 2025)

Gráfico N°4.7 Gráfico granulometría PET.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

#### 4.2.1.2 Granulometría de base granular con 1% de PET adicionado.

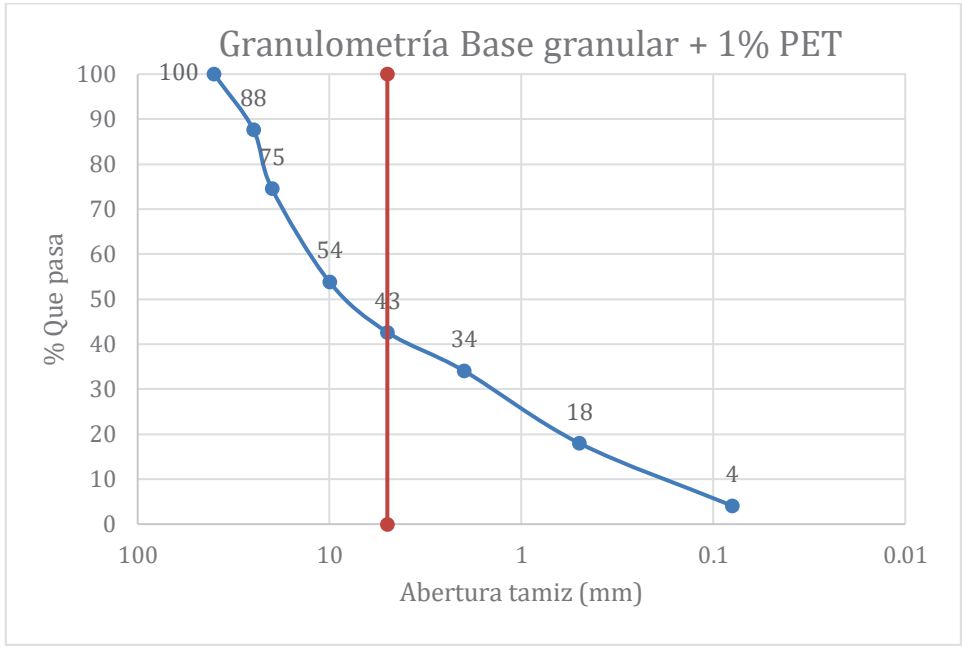
Para llevar a cabo el ensayo de granulometría, se tomó una muestra representativa de la base granular a la que se le incorporó un 1% del peso total seco de la muestra en forma de PET triturado. En la tabla N° 4.8 y figura N°4.8 se presenta la granulometría tanto de la muestra representativa de la base granular como la cantidad de PET triturado añadida.

Tabla N° 4.8 Granulometría base granular con 1% de PET adicionado.

Granulometría base + 1% PET		
Abertura	Tamiz	% que pasa
40	11/2"	100
25	1"	88
20	3/4"	75
10	3/8"	54
5	N°4	43
2	N°10	34
0,5	N°40	18
0,08	N°200	4

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura N° 4.8 Curva granulométrica base granular con 1% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

4.2.1.3 Granulometría de base granular con 4% de PET adicionado.

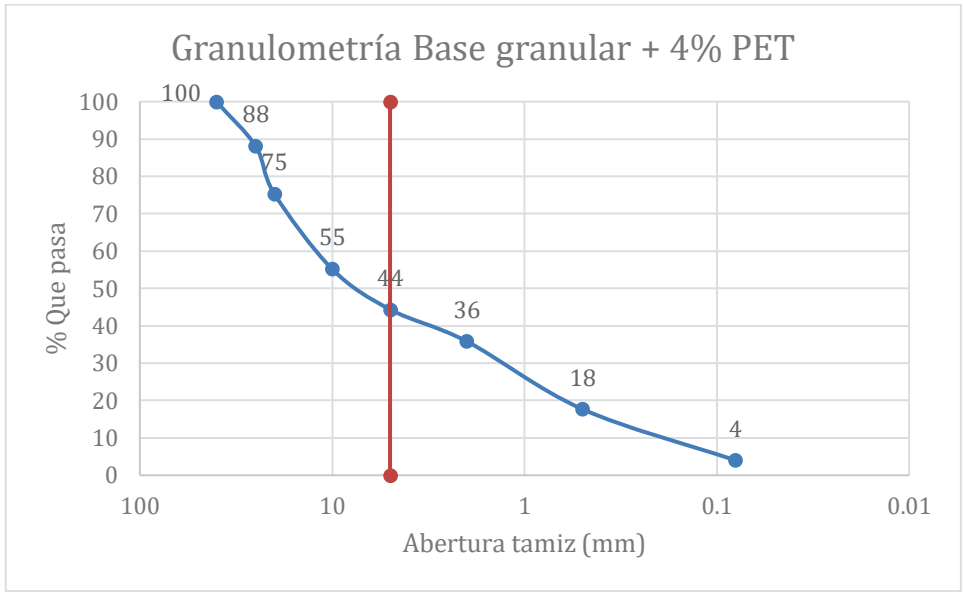
Para llevar a cabo el ensayo de granulometría, se tomó una muestra representativa de la base granular a la que se le incorporó un 4% del peso total seco de la muestra en forma de PET triturado. En la tabla N° 4.9 y figura N°4.9 se presenta la granulometría tanto de la muestra representativa de la base granular como la cantidad de PET triturado añadida.

Tabla N° 4.9 Granulometría base granular con 4% de PET adicionado.

Granulometría base + 4% PET		
Abertura	Tamiz	% que pasa
40	11/2"	100
25	1"	88
20	3/4"	75
10	3/8"	55
5	N°4	44
2	N°10	36
0,5	N°40	18
0,08	N°200	4

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura N° 4.9 Curva granulométrica base granular con 4% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

#### 4.2.1.4 Granulometría de base granular con 7% de PET adicionado.

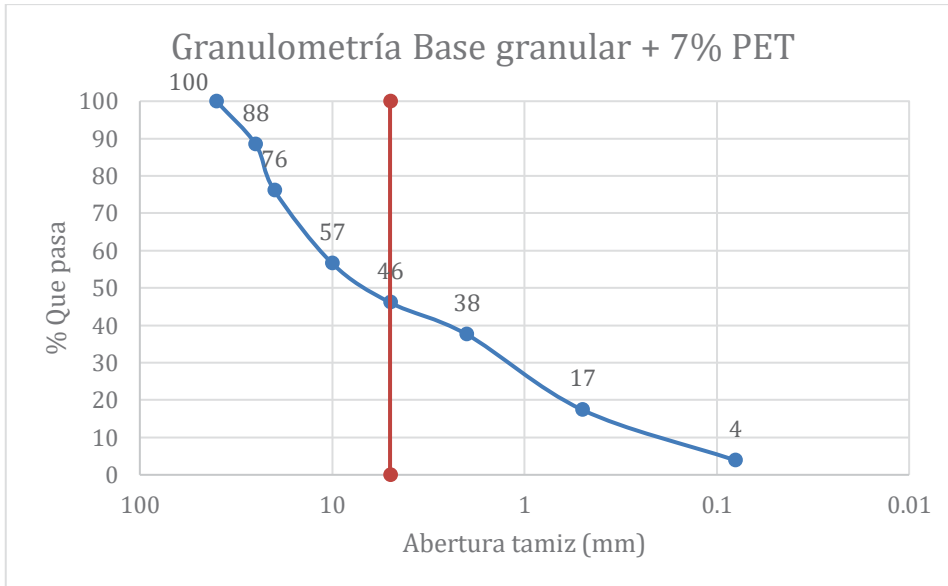
Para llevar a cabo el ensayo de granulometría, se tomó una muestra representativa de la base granular a la que se le incorporó un 7% del peso total seco de la muestra en forma de PET triturado. En la tabla N° 4.10 y figura N°4.10 se presenta la granulometría tanto de la muestra representativa de la base granular como la cantidad de PET triturado añadida.

Tabla N° 4.10 Granulometría base granular con 7% de PET adicionado.

Granulometría base + 7% PET		
Abertura	Tamiz	% que pasa
40	1 1/2"	100
25	1"	88
20	3/4"	76
10	3/8"	57
5	N°4	46
2	N°10	38
0,5	N°40	17
0,08	N°200	4

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura N° 4.10 Curva granulométrica base granular con 7% de PET triturado.

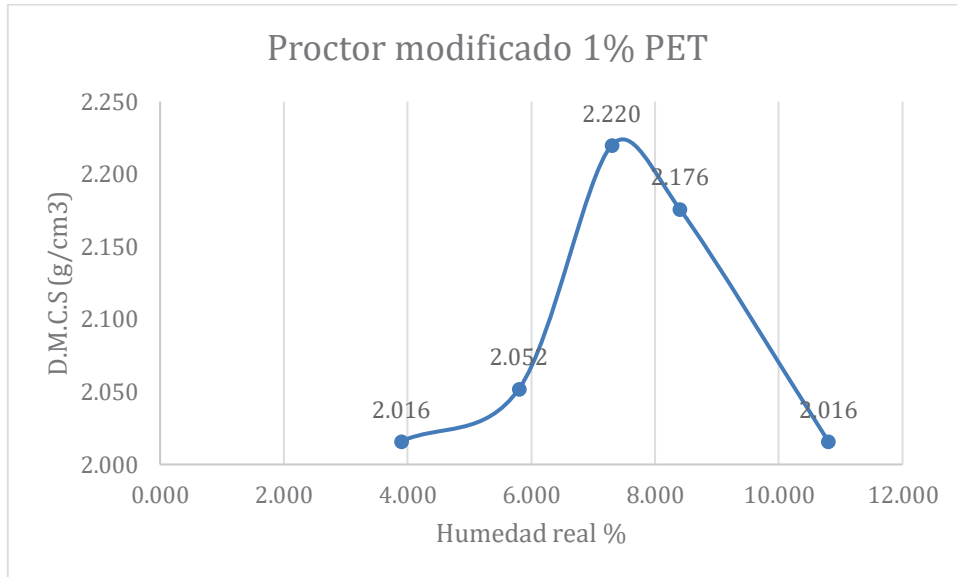


Fuente: (Elaboración propia, 2025).

#### 4.2.2 Proctor modificado con adición de 1% de PET

Se realizó el ensayo de Proctor modificado a la base granular con adición de 1% de PET, respecto al peso seco total, para así obtener la densidad máxima compactada seca y su humedad óptima. Los resultados correspondientes a la humedad óptima con su densidad media compactada seca se muestran en la figura N° 4.11 en la que se establece que el punto de humedad óptima es equivalente a 7,3% y la densidad máxima correspondiente es de  $2,22 \frac{g}{cm^3}$ .

Figura N° 4.11 Proctor modificado base granular con 1% de PET triturado.

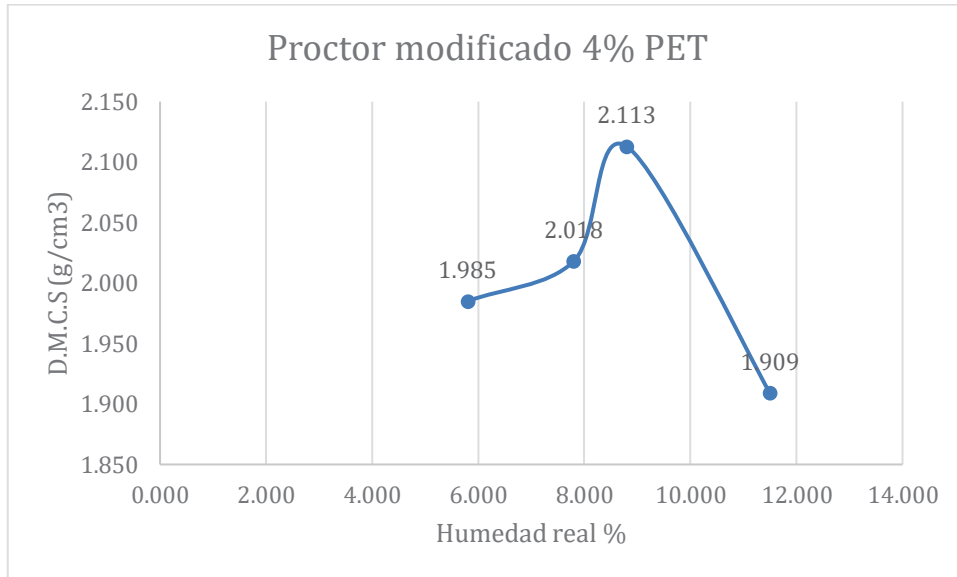


Fuente: (Elaboración propia, 2025).

#### 4.2.3 Proctor modificado con adición de 4% de PET.

Se realizó el ensayo de Proctor modificado a la base granular con adición de 4% de PET, respecto al peso seco total, para así obtener la densidad máxima compactada seca y su humedad óptima. Los resultados correspondientes a la humedad óptima con su densidad media compactada seca se muestran en la figura N° 4.12 en la que se establece que el punto de humedad óptima es equivalente a 8,8% y la densidad máxima correspondiente es de  $2,113 \frac{g}{cm^3}$ .

Figura N° 4.12 Proctor modificado base granular con 4% de PET triturado.

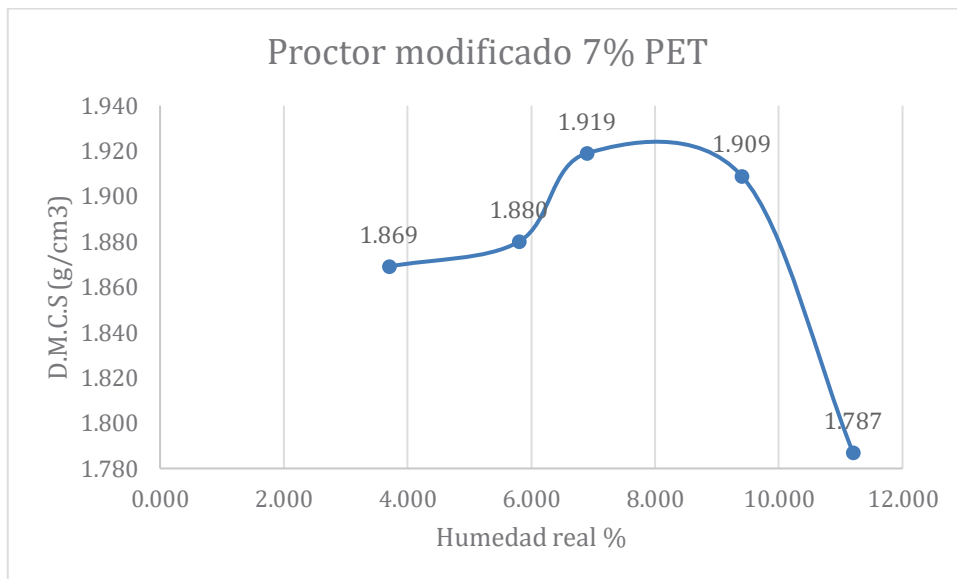


Fuente: (Elaboración propia, 2025).

#### 4.2.4 Proctor modificado con adición de 7% de PET.

Se realizó el ensayo de Proctor modificado a la base granular con adición de 4% de PET, respecto al peso seco total, para así obtener la densidad máxima compactada seca y su humedad óptima. Los resultados correspondientes a la humedad óptima con su densidad media compactada seca se muestran en la figura N°4.13 en la que se establece que el punto de humedad óptima es equivalente a 6,9% y la densidad máxima correspondiente es de  $1,919 \frac{g}{cm^3}$ .

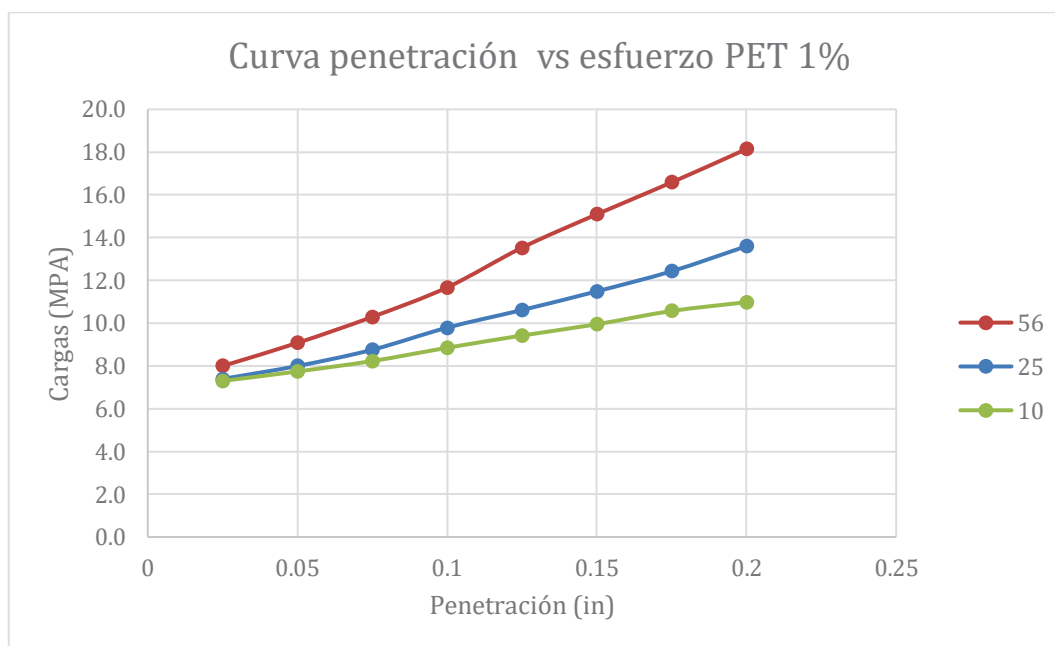
Figura N° 4.13 Proctor modificado base granular con 7% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

#### 4.2.5 Capacidad de soporte (C.B.R) de base granular con adición de 1% de PET.

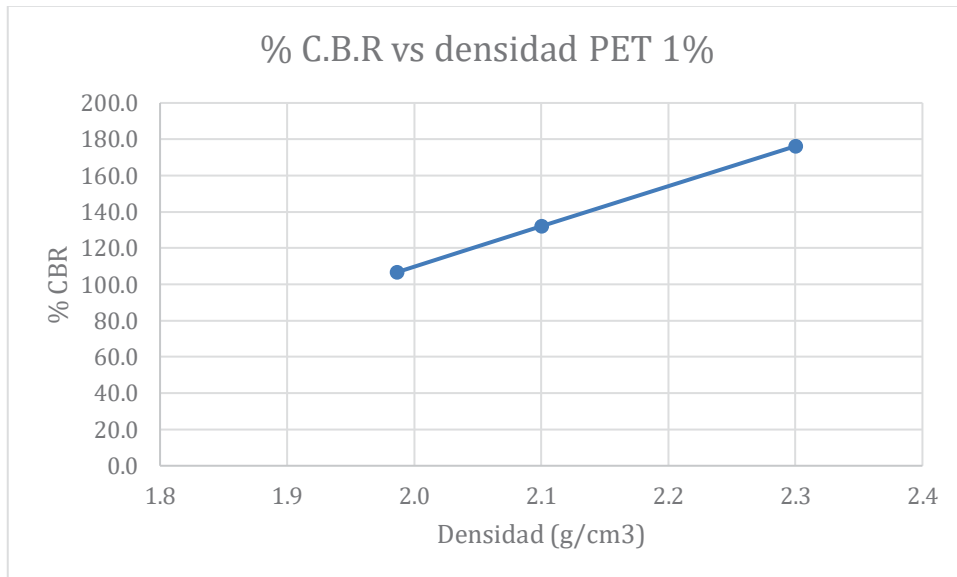
Figura N° 4.14 Curva penetración Vs esfuerzo base granular con 1% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

De la figura N°4.14 se puede determinar que el porcentaje de C.B.R para la muestra de 56 golpes da como resultado 176,2%. Para la muestra de 25 golpes el porcentaje de C.B.R da como resultado 132%. Finalmente, para la muestra de 10 golpes el porcentaje de C.B.R da como resultado 106,6%. Con estos datos, junto con las D.M.C.S de cada muestra de C.B.R se puede formular la figura N° 4.15.

Figura N° 4.15 C.B.R base granular con 1% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

De la figura N° 4.15 se puede generar una interpolación para así obtener el porcentaje de C.B.R al 95% de la densidad máxima seca compactada del Proctor modificado realizado previamente. Dando como resultado que el porcentaje de C.B.R de la base granular es de 134%. La tabla N° 4.11 resume los datos usados para calcular el C.B.R de la base granular.

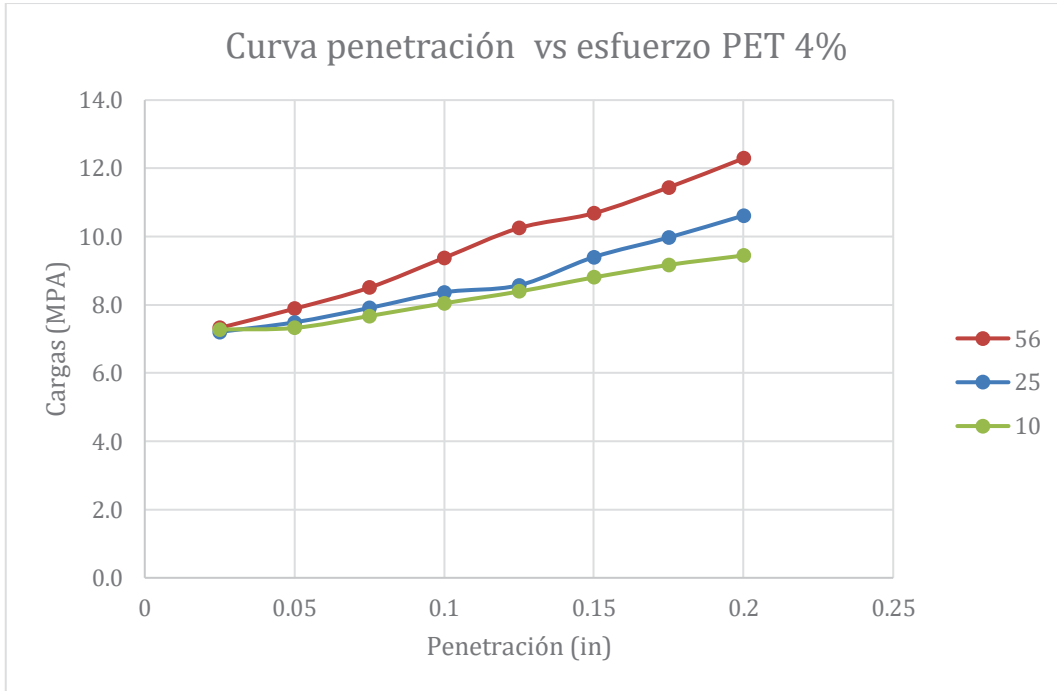
Tabla N° 4.11 C.B.R base granular con 1% de PET adicionado.

C.B.R Base granular + 1% PET		
D.M.C.S Proctor	2,22	g/cm <sup>3</sup>
D.M.C.S 95%	2,11	g/cm <sup>3</sup>
CBR al 95% D.M.C.S	134	%

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

#### 4.2.6 Capacidad de soporte (C.B.R) de base granular con adición de 4% de PET.

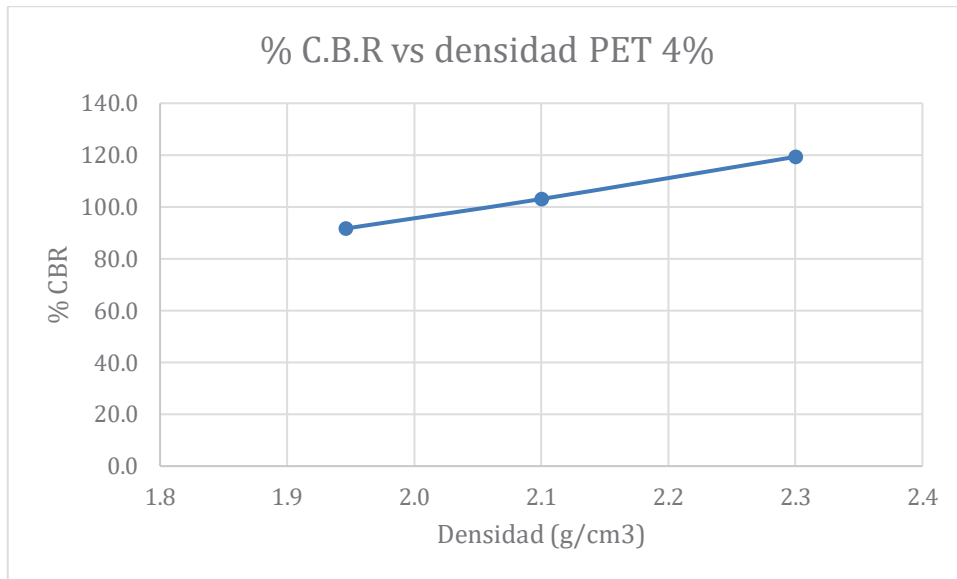
Figura N° 4.16 Curva penetración vs esfuerzo base granular con 4% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

De la figura N° 4.16 se puede determinar que el porcentaje de C.B.R para la muestra de 56 golpes da como resultado 119,3%. Para la muestra de 25 golpes el porcentaje de C.B.R da como resultado 103,1%. Finalmente, para la muestra de 10 golpes el porcentaje de C.B.R da como resultado 91,7%. Con estos datos, junto con las D.M.C.S de cada muestra de C.B.R se puede formular la figura N° 4.17

Figura N° 4.17 C.B.R base granular con 4% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

De la figura N°4.17 se puede generar una interpolación para así obtener el porcentaje de C.B.R al 95% de la densidad máxima seca compactada del Proctor modificado realizado previamente. Dando como resultado que el porcentaje de C.B.R de la base granular es de 107%. La tabla N° 4.12 resume los datos usados para calcular el C.B.R de la base granular.

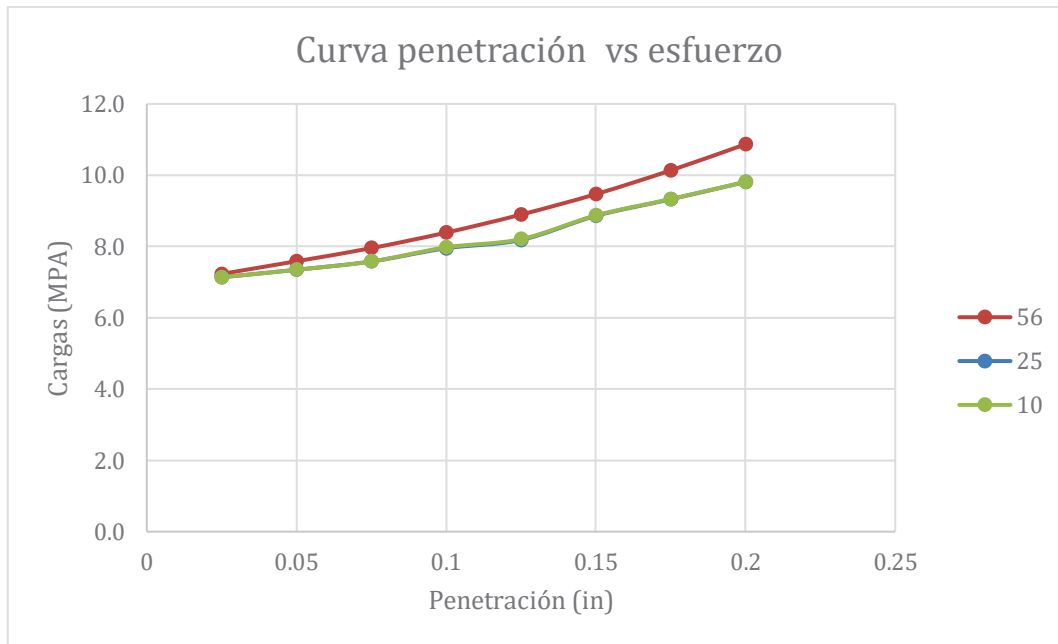
Tabla N° 4.12 C.B.R base granular con 4% de PET adicionado.

C.B.R Base granular + 4% PET		
D.M.C.S Proctor	2,13	g/cm <sup>3</sup>
D.M.C.S 95%	2,02	g/cm <sup>3</sup>
CBR al 95% D.M.C.S	107	%

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

#### 4.2.7 Capacidad de soporte (C.B.R) de base granular con adición de 7% de PET.

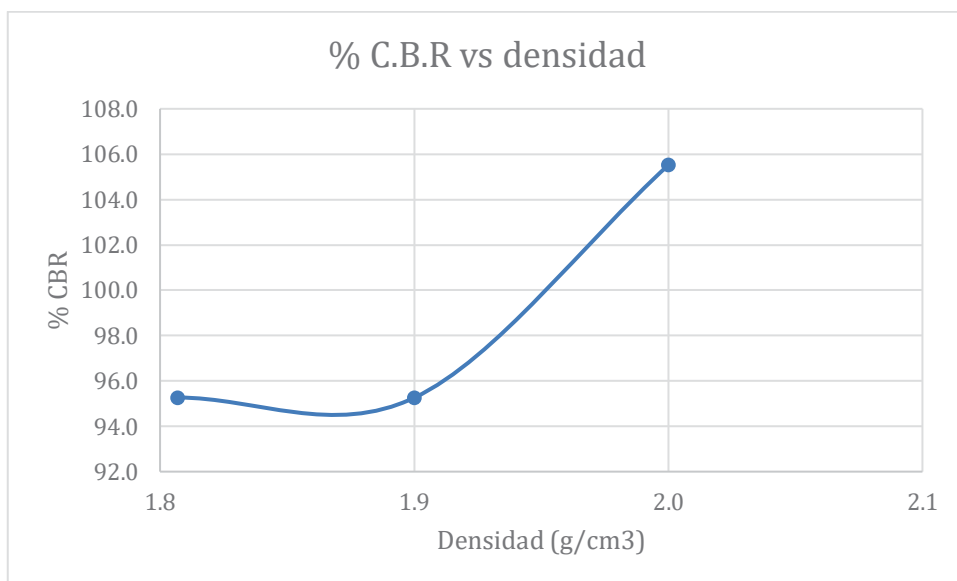
Figura N° 4.18 Curva penetración vs esfuerzo base granular con 7% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

De la figura N°4.18 se puede determinar que el porcentaje de C.B.R para la muestra de 56 golpes da como resultado 105,5%. Para la muestra de 25 golpes el porcentaje de C.B.R da como resultado 95,3%. Finalmente, para la muestra de 10 golpes el porcentaje de C.B.R da como resultado 95,3%. Con estos datos, junto con las D.M.C.S de cada muestra de C.B.R se puede formular la figura N° 4.19

Figura N° 4.19 C.B.R base granular con 7% de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

De la figura N°4.19 se puede generar una interpolación para así obtener el porcentaje de C.B.R al 95% de la densidad máxima seca compactada del Proctor modificado realizado previamente. Dando como resultado que el porcentaje de C.B.R de la base granular es de 100%. La tabla N° 4.13 resume los datos usados para calcular el C.B.R de la base granular.

Tabla N° 4.13 C.B.R base granular con 7% de PET adicionado.

C.B.R Base granular + 7% PET		
D.M.C.S Proctor	1,92	g/cm <sup>3</sup>
D.M.C.S 95%	1,82	g/cm <sup>3</sup>
CBR al 95% D.M.C.S	100	%

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

### 4.3 Evaluación de la permeabilidad de la base granular con adición de PET.

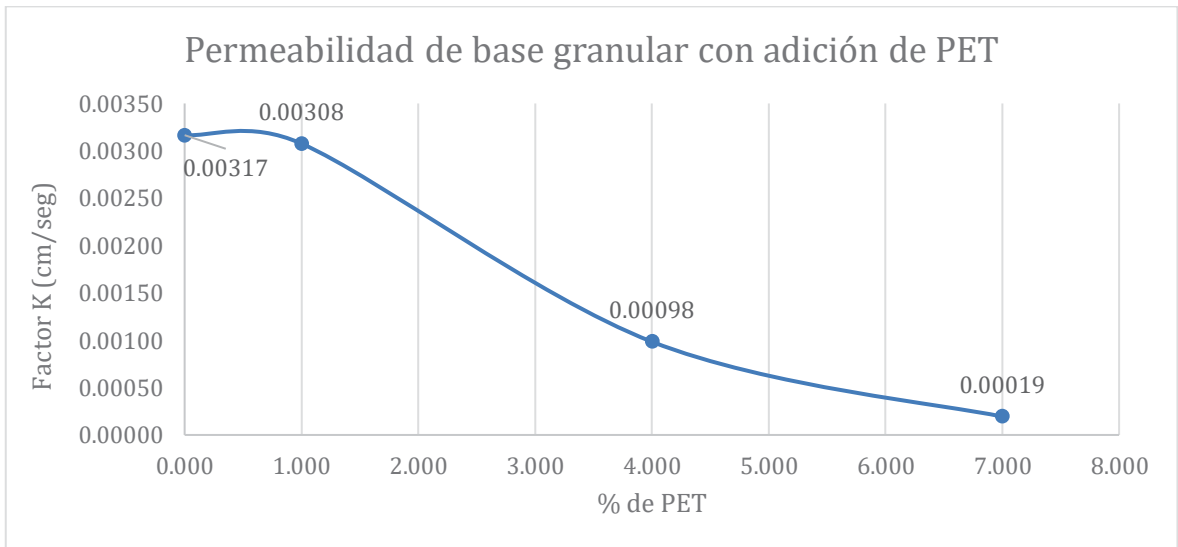
En la Tabla N° 4.14 se presentan los resultados del ensayo de permeabilidad, que incluyen tanto la base granular sin adición de PET como la base granular con un 1%, 4% y un 7% de PET triturado. A partir de estos datos, se obtienen los coeficientes K necesarios para evaluar si la incorporación de PET triturado a la base granular genera un cambio en la permeabilidad de esta.

Tabla N° 4.14 Resumen de permeabilidad de base granular con de PET adicionado.

Material	Q (cm3)	Tiempo (seg)	L (cm)	h (cm)	A (cm2)	T (°C)	K (cm/seg)
Base granular TRICAM	900,0	300	11,6	140	78,54	17	3,16E-03
Base granular TRICAM + 1% PET	874,8	300	11,6	140	78,54	17	3,08E-03
Base granular TRICAM + 4% PET	280	300	11,6	140	78,54	17	9,85E-04
Base granular TRICAM + 7% PET	55	300	11,6	140	78,54	17	1,93E-04

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

Figura N° 4.20 Curva de permeabilidad de base granular con diferentes adiciones de PET triturado.



Fuente: (Elaboración propia, 2025).

Los valores obtenidos indican que el material presenta una permeabilidad media. Sin embargo, los coeficientes derivados del ensayo de permeabilidad evidencian variaciones

significativas en función de las diferentes proporciones de PET triturado incorporadas a la mezcla base granular. Según lo mostrado en la Figura N° 4.20, la adición del 1% de vidrio triturado genera una leve disminución en la permeabilidad al agua del suelo. A medida que se incrementa el contenido de PET, la permeabilidad disminuye de forma progresiva, alcanzando niveles propios de materiales de baja permeabilidad. En contraste, la incorporación del 7% de vidrio triturado produce una reducción más efectiva en la permeabilidad del suelo, considerándose como un valor óptimo en este contexto.

## 5. Conclusiones

### 5.1. Influencia del PET en la permeabilidad de la base granular.

El ensayo de permeabilidad evidenció que la incorporación de PET produce una disminución progresiva del coeficiente de permeabilidad. Si bien los valores iniciales corresponden a una permeabilidad media, a medida que se incrementa la proporción de PET en la mezcla, se observa una transición hacia niveles de baja permeabilidad. La dosificación del 7% fue la que generó la mayor reducción, siendo considerada óptima para aplicaciones donde se requiere un mayor control del drenaje interno. Esta característica puede resultar especialmente beneficiosa en zonas vulnerables a la acumulación de humedad o con problemas de infiltración.

### 5.2. Influencia del PET en la capacidad de carga de la base granular.

La adición del 1% de PET triturado a la base granular resultó en una leve disminución de la capacidad de soporte, alcanzando un valor de CBR del 134%. Esto sugiere que una baja proporción de PET puede actuar como estabilizador mecánico dentro de la estructura granular sin alterar en gran medida la capacidad de carga. Sin embargo, a medida que se incrementó el porcentaje de PET entre 4% y 7%, el valor del CBR disminuyó a 107% y 100% respectivamente. Aunque aún dentro de los rangos mínimos exigidos para bases granulares en pavimentos flexibles, esta caída indica que excesivas

cantidades de PET pueden afectar negativamente la capacidad portante, posiblemente debido a una mayor presencia de partículas plásticas con menor rigidez que los agregados minerales.

Los resultados indican que el 1% de PET es la proporción óptima para tener una disminución pequeña en la capacidad de soporte sin comprometer otras propiedades como la compactación o la estabilidad estructural. Este porcentaje puede ser recomendado en zonas de alto tránsito o donde se requiere un mayor desempeño mecánico de la base granular.

## 6. Bibliografía

Agenda País, 2021. Chile es el país latinoamericano que genera más desechos plásticos de un solo uso. <https://www.elmostrador.cl/agenda-pais/2021/07/03/chile-es-el-pais-latinoamericano-que-genera-mas-desechos-plasticos-de-un-solo-uso/>

A. Urián, N. Ilies, N. M. O. Nemes, A. Nagy (2023), Clayey Soil Improvement with Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. <https://www-webofscience-com.bibliotecadigital.uv.cl/wos/woscc/full-record/WOS:001099601900001>

Costa, A. (2021). Patología de los pavimentos. [https://asefma.es/wp-content/uploads/2021/12/31.-patologias-15\\_Maquetaci%C3%B3n-1.pdf](https://asefma.es/wp-content/uploads/2021/12/31.-patologias-15_Maquetaci%C3%B3n-1.pdf)

Crediform, 2023. Cuánto tiempo tardan en descomponerse los plásticos de uso habitual. <https://www.credinformsa.com/blog/cuanto-tiempotardaendescomponerseelplasticoqueusamosadiario/#:~:text=Se%20calcula%20que%20el%20pl%C3%A1stico,tiempo%20se%20prolonga%20a%C3%BA%C3%A1s>

Extrulam, 2023. Propiedades físicas de los materiales PET. <https://extrulam.com.mx/propiedades-fisicas-de-los-materiales-pet/#:~:text=Las%20propiedades%20mec%C3%A1nicas%20del%20PET,fuerzas%20de%20tensi%C3%B3n%20sin%20romperse.>

G. Alarcon y M. Cárdenas, 2021. MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA CON POLIMEROS SBS PARA LA OPTIMIZACION DE LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFALTICA. [https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/4698/T030\\_70220826\\_T%20%20C%C3%81RDENAS%20QUINTE%20MARCO%20ANTONIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/4698/T030_70220826_T%20%20C%C3%81RDENAS%20QUINTE%20MARCO%20ANTONIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

J. Arteaga, 2018. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA BASE – CEMENTO PARA PAVIMENTOS CON ADICIÓN DE RESIDUOS PET RECICLADO. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/579c6b6e-04cf-43f1-b94f-0ac55106c03e/content>

J. Mocondino, 2020. ¿Qué es un pavimento? <https://construyored.com/noticias/2299-que-es-un-pavimento>

J. López, 2011. Análisis y diseño de una cimentación superficial de una estructura. [https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000675570/3/0675570\\_A1.pdf](https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000675570/3/0675570_A1.pdf)

Koohmishi, M., & Azarhoosh, A. (2021). Assessment of permeability of granular drainage layer considering particle size and air void distribution. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121373>

L. Suthar, S. Meena, U. Kumar (2024), Utilization of Plastic Waste in Reinforcing Sandy Soil for Sustainable Engineering Applications. <https://www-webofscience-com.bibliotecadigital.uv.cl/wos/woscc/full-record/WOS:001250399400004>

Macias, C. (2024). Asipla: “La capacidad total de reciclaje del plástico en Chile es suficiente hasta el segundo año de la Ley REP”. Piensa Circular. <https://www.piensacircular.com/2024/02/02/asipla-la-capacidad-total-de-reciclaje-del-plastico-en-chile-es-suficiente-hasta-el-segundo-ano-de-la-ley-rep/>

Siddique, S. N., Akter, M., & Mohamedelhassan, E. (2024) Utilizing Micronized Recycled Plastic Waste for Increasing the Shear Strength and Permeability of Root-Reinforced Soil. <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00403-9>

Solanki, P., & Bhattarai, S. (2018). Strength and permeability of pervious composite prepared by using post-consumer plastic waste bottles. <https://www-scopus->

[com.bibliotecadigital.uv.cl/record/display.uri?eid=2-s2.0-85051105671&origin=scopusAI#metrics](https://com.bibliotecadigital.uv.cl/record/display.uri?eid=2-s2.0-85051105671&origin=scopusAI#metrics)

(Structuralia, 2022). La importancia de la granulometría de suelos para las edificaciones.  
<https://blog.structuralia.com/granulometria-suelos-cimentaciones>

T. Coffey, 2017. Canto rodado Vs piedra chancada.  
<https://es.scribd.com/document/479780970/Canto-Rodado-vs-Piedra-Chancada-docx#:~:text=la%20piedra%20chancada.,El%20canto%20rodado%20es%20un%20agregado%20natural%20redondeado%20y%20resistente,creado%20al%20quebrar%20cantos%20rodados.>

V. Nguyen, J. Pineda, E. Romero, D. Sheng (2020), Influence of soil microstructure on air permeability in compacted clay.  
<https://www.sciencedirect.com/org/science/article/abs/pii/S0016850520000117>

Y. Irán, 2023. Apuntes de Materiales y Procedimientos de Construcción, Esquemas y mapas conceptuales de Geología.  
<https://www.docsity.com/es/docs/tareas-y-apuntes-de-la-asignatura-de-geologia/11006986/>