

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura



Proyecto de Grado
Carrera de Ingeniería Civil

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS EN
CALIENTE CON APORTE DE CAUCHO Y
PLÁSTICO

ESTUDIANTES

NOVISKI, Valentina	N-1166/5
PALACIOS, Tomás	P-4551/9
ROSSI, Maite Yamila	R-4104/1

DIRECTORA:

Dra. Ing. Cauhape Casaux, Marina

*Trabajo presentado en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

Ingeniero Civil

Febrero de 2025

CONTENIDO

1. RESUMEN.....	3
2. OBJETIVO GENERAL.....	3
3. OBJETIVOS PARTICULARES.....	3
4. INTRODUCCIÓN.....	4
5. DESARROLLO TEÓRICO.....	5
5.1. Antecedentes.....	5
5.2. Mezclas asfálticas.....	9
5.3. Estructura de pavimentos.....	11
5.4. Ensayos y procedimientos.....	12
5.4.1. Método Marshall.....	12
5.4.2. Ensayo de deformación permanente mediante equipo de rueda cargada o wheel tracking test (WTT).....	13
5.4.3. Módulo Dinámico de mezclas asfálticas a partir del ensayo de Tracción Indirecta.....	15
5.4.4. Resistencia conservada (RC).....	17
5.4.5. Ensayo Ideal CT.....	18
5.4.6. Ensayo Ideal RT.....	20
5.4.7. Propiedades volumétricas.....	21
6. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	23
6.1. Materiales a utilizar.....	23
6.1.1. Agregados pétreos.....	23
6.1.2. Cemento asfáltico.....	26
6.1.3. Caucho.....	26
6.1.4. Plástico reciclado.....	27
6.2. Mezclas asfálticas y realización de probetas.....	28
6.2.1. Cálculo de densidades.....	33
6.3. Análisis comparativo entre las mezclas.....	34
6.3.1. Propiedades Volumétricas.....	34
6.3.2. Ensayo de Estabilidad y Fluencia.....	37
6.3.3. Ensayo de Rueda Cargada WTT.....	38
6.3.4. Módulo Dinámico.....	40
6.3.5. Resistencia conservada.....	42
6.3.6. Ideal CT.....	43
6.3.7. Ideal RT.....	43
7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS).....	45
8. CONCLUSIONES.....	46
9. BIBLIOGRAFÍA.....	47
10. NORMAS.....	49
11. ANEXO.....	50
11.1. Mezcla patrón (P).....	50

11.2. Mezcla con caucho (C).....	52
11.3. Mezcla con plástico (B).....	54

1. RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo principal evaluar la viabilidad de incorporar materiales reciclados, como caucho triturado y plástico reciclado en forma de pellets de polietileno de alta densidad, en mezclas asfálticas densas en caliente para la construcción de pavimentos sostenibles. Se elaboraron tres tipos de mezclas: una convencional (patrón) y dos modificadas con aporte de caucho y plástico, utilizando el método de incorporación por vía seca para ambos. El desempeño que tiene cada mezcla como parte de la estructura de un pavimento flexible, será evaluado mediante los resultados de ensayos de laboratorio normalizados.

Se llevan a cabo los ensayos Wheel Tracking Test (WTT), módulo dinámico, resistencia conservada, Ideal CT, Ideal RT; considerando en todo momento las propiedades volumétricas y densidades, para analizar de forma integral aspectos como rigidez, durabilidad, comportamiento frente a la acción del agua, resistencia al agrietamiento y deformaciones plásticas. Los resultados muestran en términos generales que la mezcla patrón cumple con los requisitos normativos, la mezcla con caucho presenta un desempeño adecuado, mejorando la resistencia a la fisuración y aportando elasticidad, aunque con ligeras limitaciones en la resistencia al ahuellamiento. En cambio, la mezcla con plástico demuestra un comportamiento no apto para pavimentos relacionando esto, probablemente, a la forma de incorporación de los pellets y en el diseño de la mezcla en general.

Este trabajo concluye que la incorporación de caucho y plástico reciclados representa una alternativa sostenible para reducir residuos y mitigar el impacto ambiental, aunque su implementación en pavimentos requiere ajustes en el diseño para garantizar su correcto desempeño estructural y funcional.

Palabras claves: mezclas asfálticas, caucho, plástico, sostenibilidad, pavimentos flexibles, módulo dinámico, resistencia al agrietamiento, ahuellamiento.

2. OBJETIVO GENERAL

Se propone el siguiente objetivo general:

- ❖ Evaluar la viabilidad de la incorporación de materiales reciclados para la elaboración de mezclas asfálticas sostenibles.

3. OBJETIVOS PARTICULARES

Se tienen en cuenta, además, los objetivos particulares:

- ❖ Elaborar mezclas asfálticas no convencionales a partir de la incorporación de polvo de caucho y plástico reciclado a partir de la metodología denominada "por vía seca".
- ❖ Caracterizar las distintas mezclas asfálticas.

- ❖ Comparar técnica y ambientalmente las mezclas obtenidas con otras consideradas convencionales.

4. INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas constituyen una pieza importante en la construcción de estructuras viales, ya que proporcionan la durabilidad y resistencia necesarias para soportar el tráfico y las condiciones ambientales.

En la actualidad, la creciente preocupación por el medio ambiente y la gestión de residuos ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles en diversas industrias, incluida la construcción de caminos. La Organización de Naciones Unidas (ONU), en el año 1987, dio una definición de *desarrollo sostenible* y lo describió como: *“la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”*. Es decir, consiste en crear un equilibrio entre los seres humanos y el manejo de los recursos naturales que permita a futuras generaciones hacer un uso responsable de estos, además de concientizar a la población sobre la importancia de un cambio de paradigma promoviendo prácticas y enfoques que respeten y protejan el medio ambiente. Las mezclas asfálticas presentan una oportunidad única para agregar materiales reciclados en su formulación, siempre que esta incorporación no empeore las propiedades de la mezcla asfáltica tomada como base, sin residuos. La incorporación de estos materiales no solo aborda el problema de los “desechos”, sino que también ofrece la posibilidad de modificar las propiedades físicas y mecánicas del asfalto y las mezclas asfálticas.

En relación a esto, según la Cámara Argentina de la Construcción (CAMARCO) [1], en la República Argentina se generan actualmente 47.505 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (RSU), de los cuales los plásticos representan el 14,61%, lo que equivale a 6.940 toneladas diarias y la cantidad de caucho que se desecha por día corresponde a, aproximadamente, 600 toneladas (Figura N° 1).

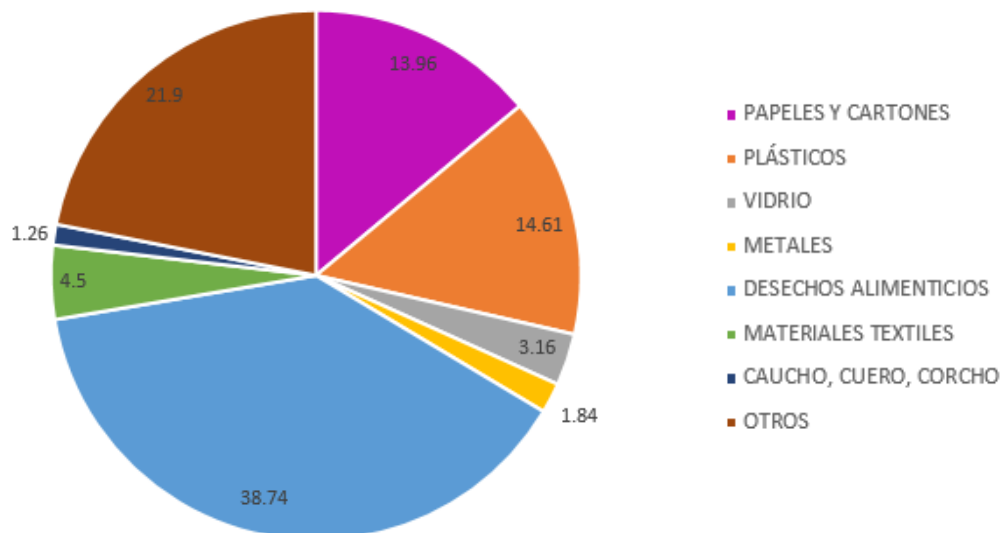


Figura Nº 1 - Composición de los RSU en Argentina. Fuente: CAMARCO - Nota: "La importancia de la planificación en la gestión de los residuos sólidos urbanos"

La economía circular propone un enfoque regenerativo en el uso de recursos, donde materiales como el plástico y el caucho, en lugar de ser desechados tras su primera utilización, son reincorporados a alguna producción mediante procesos de reciclaje y reutilización. En el contexto de las mezclas asfálticas, diversas investigaciones a nivel nacional e internacional indican que la incorporación de estos residuos permite no solo extender la vida útil de los materiales, sino también reducir la extracción de recursos naturales vírgenes. Este enfoque, alineado con los principios de sostenibilidad, busca cerrar el ciclo de vida de los productos, minimizando los desechos y promoviendo una mayor eficiencia en el uso de los recursos.

Se pueden buscar soluciones inteligentes para tender a la *sostenibilidad en carreteras*, lo que lleva a pensar que la infraestructura del transporte se diseñe para durar y pueda adaptarse a los cambios; maximice el reciclado, incluyendo residuos de manera tal que las rutas tengan mejores prestaciones; y minimice los impactos ambientales, sobre la sociedad y sobre la economía.

En este contexto, el presente trabajo consiste en estudiar el comportamiento de mezclas asfálticas con aporte de plástico o caucho triturado incorporado por vía seca. Se busca analizar dicho comportamiento considerando que la mezcla se aplicará como capa de base dentro de la estructura del pavimento flexible de un camino principal. Este análisis contribuirá a avanzar en el desarrollo de soluciones más sostenibles y eficientes para la infraestructura vial.

5. DESARROLLO TEÓRICO

5.1. Antecedentes

El aporte de materiales reciclados como el caucho y los pellets de plástico en mezclas asfálticas ha sido objeto de múltiples estudios e investigaciones en las

últimas décadas. Estos materiales no solo representan una opción sostenible para la gestión de residuos, sino que además se ha probado que influyen en la mejora de ciertas propiedades mecánicas de los pavimentos. En este informe se realiza una revisión de antecedentes sobre el uso de caucho y plásticos, específicamente pellets provenientes de bidones de polietileno de alta densidad (PEAD), en mezclas asfálticas densas en caliente.

Aporte de caucho triturado de Neumáticos Fuera de Uso (NFU):

Diversas investigaciones han explorado la incorporación de polvo de caucho reciclado en mezclas asfálticas como un método para mejorar sus propiedades mecánicas y promover la sostenibilidad ambiental. Según estudios recientes, ha demostrado mejorar significativamente el comportamiento mecánico del pavimento. En particular, los ensayos realizados han confirmado que el polvo de caucho actúa como un excelente adherente, mejorando la interacción entre los componentes de la mezcla y permitiendo el diseño de pavimentos más flexibles y de menor espesor, sin comprometer su resistencia estructural.

Los autores Luis Enrique Fajardo Cachay y Douglas Alfonso Vergaray Huamán, en su investigación [2], concluyen que el caucho reciclado proveniente de neumáticos desechados puede emplearse de manera confiable como agregado en mezclas asfálticas, mejorando significativamente sus propiedades mecánicas. En concordancia con lo planteado por Fajardo y Vergaray (2014) en su estudio "*Efecto de la incorporación por vía seca del polvo de neumático reciclado como agregado fino en mezclas asfálticas*", los ensayos de laboratorio realizados también demuestran que el polvo de caucho reciclado mejora la adherencia de los materiales pétreos y, consecuentemente, las propiedades mecánicas de la mezcla. Este proceso, además, representa una solución sostenible para la valorización de los residuos de neumáticos, mitigando los problemas ambientales relacionados con su inadecuada disposición final.

Según el análisis realizado por Wilson Cando, Patricio Bonilla, Gustavo Yáñez, Jorge Bucheli, Adriana Muñoz, María Fernanda Orquera, Lenys Fernández, Patricio Espinoza-Montero [3], se reporta el efecto del residuo de caucho, recuperado de la pista de aterrizaje del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito, Ecuador, producto de la fricción entre el neumático y la superficie de rodamiento, como material modificador en una mezcla asfáltica que utiliza asfalto AC-20. En el estudio se analizó el comportamiento de la mezcla asfáltica resultante al incorporar el residuo de caucho, ya sea como un árido adicional o como un sustituto parcial del agregado fino, en proporciones que varían entre el 1 % y el 3% del peso total de los agregados en la mezcla. El proceso de modificación de la mezcla se realizó por vía seca, y los especímenes obtenidos fueron evaluados mediante el método Marshall.

Los resultados de esta investigación concluyen que la adición de polvo de caucho reciclado a la mezcla asfáltica mejora significativamente su estabilidad, lo que sugiere que el pavimento modificado podría soportar una mayor carga de tráfico, siendo una solución adecuada para las exigencias del Aeropuerto. Los parámetros relacionados con los vacíos, vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VAF) también mejoraron, indicando una mayor durabilidad del pavimento. En comparación con la mezcla no modificada, que podría presentar desgaste prematuro debido a su estructura abierta, la mezcla con caucho reduciría considerablemente la entrada de aire y agua a la capa de rodadura, minimizando el riesgo de deterioro. Asimismo, se prevé que la mezcla modificada tendrá una mayor resistencia al envejecimiento, a la oxidación del ligante asfáltico, así como al agrietamiento y al calor, además de reducir el ruido de rodadura. Estos hallazgos son especialmente relevantes considerando el impacto ambiental negativo que genera el almacenamiento de residuos de caucho en el aeropuerto, los cuales no han sido reutilizados ni reciclados hasta la fecha.

Según Botasso [4], la utilización de los NFU promueve el reciclado de un producto de alto valor tecnológico, de baja tasa de degradabilidad y que genera vectores que afectan a la salud. Además, su incorporación alienta la implementación de nuevas alternativas tecnológicas en mezclas asfálticas, permite la disminución de espesores de las distintas capas que integran el paquete estructural, logran una mayor durabilidad, mejora los desempeños de superficie, aumenta las propiedades fonoabsorbentes, se producen menores consumos de energía en el proceso de producción, junto con las menores emisiones de CO₂.

De acuerdo a este mismo autor, las posibilidades de incorporación de NFU por vía seca, se logra almacenando la mezcla caliente y agregando el caucho directamente a la mezcla, en una proporción comprendida entre el 0,50% y el 1,00% sobre el peso de mezcla. Esto, como todo procedimiento, tiene sus riesgos los cuales involucran la necesidad de digestión para los componentes de caucho y se obtiene una mejora limitada. Pero como ventaja, se puede mencionar que es fácil de utilizar. Con todo esto, concluye que el uso de asfalto con caucho de NFU es una realidad en Argentina.

Conclusiones generales de los antecedentes:

El aporte de caucho reciclado, molido, en mezclas asfálticas densas en caliente contribuye a la mejora tanto de las propiedades mecánicas del pavimento como su cooperación con el medioambiente. Varios estudios, como los detallados anteriormente, por citar algunos ejemplos, han explorado los efectos del caucho como capaz de mejorar la interacción entre áridos y ligante, junto con los beneficios técnicos y de carácter sustentable.

En términos de desempeño mecánico, se ha demostrado que el caucho reciclado incorporado a las mezclas por vía seca, mejora significativamente su estabilidad.

Otro aspecto clave es el impacto medioambiental positivo. La utilización de polvo de caucho reciclado, promueve la reutilización de neumáticos fuera de uso (NFU), y al mismo tiempo reduce la cantidad de cemento asfáltico requerido en las mezclas, lo que representa un ahorro en materiales y una reducción de la huella de carbono asociada a la producción de pavimentos. Además, cabe destacar que se ha comprobado la efectividad en la reducción del espesor de las capas del pavimento, sin comprometer su resistencia, logrando optimizar los recursos utilizados en la construcción de carreteras.

En conclusión, los antecedentes sobre la incorporación de caucho reciclado en mezclas asfálticas densas en caliente evidencian mejoras significativas en las propiedades mecánicas y de durabilidad del pavimento, junto con importantes beneficios ambientales. Este enfoque además de facilitar la reutilización de residuos de neumáticos, también ofrece una alternativa más sostenible para la construcción de infraestructuras viales, alineada con las crecientes demandas de sostenibilidad en la ingeniería civil.

Aporte de plástico reciclado:

La mayor parte de antecedentes de incorporación de polietileno en mezclas asfálticas tratan sobre la realización por vía húmeda. Respecto a antecedentes por vía seca, en donde el polietileno se agrega como una fracción de áridos, se recolectaron pocos casos y todos hacen referencia solamente a la dosificación y no a la caracterización de su comportamiento mecánico.

En el año 2012, en Argentina, Cauhapé Casaux et al [5] en la Universidad de Nacional de Rosario (UNR), comenzaron a publicar las primeras experiencias sobre la incorporación de plásticos reciclado por vía seca en mezclas asfálticas en forma de escamas (triturado) y pellets. En 2016, Angelone et al [5] efectuaron un análisis comparando el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con incorporación de polietileno por vía seca y húmeda y concluyen que en ambos casos las mezclas modificadas son más resistentes a las deformaciones permanentes que las mezclas convencionales.

Conclusiones generales de los antecedentes:

Las mezclas asfálticas con aporte de plásticos ofrecen ventajas relacionadas a la durabilidad y resistencia de los pavimentos aportando disminución de mantenimiento, mayor resistencia al ahuellamiento y mejor adherencia entre agregados. Esto resulta en una mayor vida útil de los pavimentos bajo diversas condiciones climáticas.

Es importante destacar que una cantidad excesiva de plástico puede comprometer la compactación de la mezcla y sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, se debe encontrar un equilibrio en la dosificación para obtener los beneficios mencionados sin reducir la capacidad estructural de la mezcla asfáltica.

Además, la reutilización de polietileno reciclado en mezclas asfálticas es una alternativa ambientalmente sostenible.

Beneficios del caucho y plástico reciclado en mezclas asfálticas

La incorporación de caucho y plástico reciclado en las mezclas asfálticas ha mostrado resultados positivos tanto a nivel técnico como ambiental. La compatibilidad del caucho y el plástico con el asfalto permite que estos residuos se integren eficazmente en las mezclas, mejorando sus propiedades mecánicas.

Uno de los principales beneficios ambientales es la reducción de desechos en vertederos. Al reutilizar plásticos provenientes de silobolsas y bidones de fitosanitarios, así como NFU, se evita su disposición final inadecuada, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental. No obstante, aunque la incorporación de estos residuos en pavimentos podría significar un porcentaje de reciclaje significativo, aún es necesario encontrar formas de aumentar su utilización sin comprometer la calidad de las mezclas.

Desde el punto de vista económico, estas mezclas permiten reducir el espesor de las capas del pavimento sin perder resistencia estructural, lo que conduce a un menor uso de materiales y recursos energéticos. Esto se traduce en ahorros en la construcción y en una menor emisión de gases de efecto invernadero asociados al transporte y procesamiento de materiales. Sin embargo, para maximizar los beneficios del uso de materiales reciclados en pavimentos, es necesario que estas iniciativas estén respaldadas por políticas públicas y normativas que incentiven su adopción.

En resumen, de acuerdo a lo investigado en la bibliografía disponible, la incorporación de caucho y plástico en las mezclas asfálticas no solo mejora las propiedades técnicas y reduce los costos a largo plazo, sino que también ofrece una solución ambientalmente sostenible al reutilizar materiales que, de otro modo, se convertirían en desechos [6].

5.2. Mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica es una combinación de ligante asfáltico, agregados pétreos (gruesos y finos), y en algunos casos, aditivos o materiales modificadores (como polímeros o caucho). Su propósito principal es proporcionar una capa estructural

capaz de resistir las cargas y condiciones ambientales, garantizando flexibilidad-durabilidad y condiciones de seguridad a los usuarios en pavimentos.

Cuando se quiere analizar el comportamiento de una mezcla asfáltica, se tienen en cuenta distintas propiedades de la misma como: resistencia a las deformaciones plásticas, resistencia a fatiga y resistencia a la acción del agua.

- ❖ Resistencia a las deformaciones plásticas: se refiere a la capacidad de la mezcla a resistir deformaciones, como ahuellamiento y desplazamientos, debida a la acción de las cargas de tránsito. Esta propiedad depende de los agregados pétreos (granulometría en la mezcla y características), del ligante asfáltico (viscosidad y contenido en la mezcla) y también de la compactación recibida.
- ❖ Resistencia a fatiga: es la capacidad que tiene la mezcla dentro del pavimento para soportar un determinado número de ciclos de carga sin fisurarse. Esta propiedad depende principalmente del contenido de asfalto y su rigidez, siendo también muy importantes las temperaturas en los procesos y condiciones de compactación.
- ❖ Resistencia a la acción del agua: capacidad de la mezcla para resistir la desintegración provocada por la infiltración del agua. Esta resistencia responde principalmente a las características físicas y químicas de los agregados pétreos y la adhesión ligante-agregados.

En términos generales, otras características a tener en cuenta para el diseño son: durabilidad, adherencia, impermeabilidad, trabajabilidad, economía, sustentabilidad.

Todas las propiedades mencionadas, están relacionadas a través de distintos parámetros que deben ser evaluados con el objetivo de lograr un equilibrio que asegure el comportamiento buscado de la mezcla en relación a su desempeño dentro de la estructura de un pavimento.

Las mezclas se clasifican de acuerdo al PETG de la DNV [7], considerando las siguientes nomenclaturas:

CAC	D	R/B	TMN	CA-XX / AM-Y
-----	---	-----	-----	--------------

Donde:

- CAC: sigla que indica que se trata de un “Concreto Asfáltico en Caliente”.
- D: letra que indica que el esqueleto granular corresponde al tipo “Densa”.
- R/B: letras que indican la ubicación de la capa en el paquete estructural, rodamiento o base, respectivamente.
- TMN: tamaño máximo nominal, en milímetros, del huso granulométrico. Se entiende como tamaño máximo nominal al tamiz (de la serie normalizada de tamices según IRAM 1501-1 [A]) con menor abertura de malla que retiene hasta el quince por ciento (15%) de la mezcla de agregados.

- CA-XX: indicación correspondiente a los asfaltos convencionales con grado de viscosidad XX, donde XX puede ser 5/10/20/30 o 40 de acuerdo a la Norma IRAM IAPG A 6835 [B].
- AM-Y: indicación correspondiente a los asfaltos modificados tipo, donde Y puede ser 1, 2, 3 o 4 de acuerdo a la Norma IRAM 6596 [C].

5.3. Estructura de pavimentos

Se denomina pavimento flexible a la estructura multicapa lineal destinada a recibir las cargas de tránsito y transmitir las a estratos de suelo inferiores. Debe ser capaz de resistir esfuerzos destructivos provenientes del tránsito, agua y clima cumpliendo su principal objetivo de garantizar seguridad y confort para el usuario.

El pavimento se conforma de las siguientes capas:

- ❖ Capa de rodamiento o carpeta de superficie: capa expuesta directamente a las solicitaciones de tránsito y acciones climáticas. Tiene dos roles fundamentales en la estructura: brindar seguridad y confort al usuario y por otro lado, proteger las capas inferiores subyacentes.
- ❖ Capas estructurales de base y subbase: capas destinadas a transmitir cargas disipadas a la subrasante y funcionan como apoyo de la capa de rodamiento.
- ❖ Subrasante: terreno natural o mejorado donde apoya la superestructura.

Las capas mencionadas pueden observarse en la Figura N° 2:

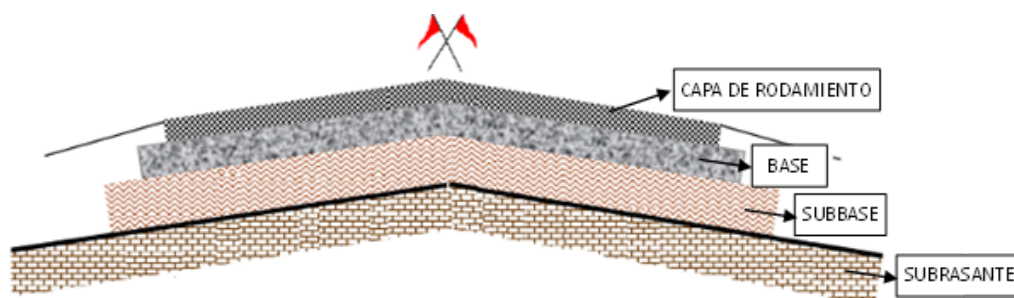


Figura N° 2 - Perfil típico de las capas de un pavimento flexible. Fuente: material de apoyo de la cátedra Transporte III [8]

Cada una de las capas tiene que ser compactada de acuerdo a las especificaciones correspondientes y además, entre cada una de ellas deben ejecutarse diferentes riegos de emulsiones asfálticas, que permiten la adherencia, curado e impermeabilización de las capas, entre otras funciones.

5.4. Ensayos y procedimientos

5.4.1. Método Marshall

El **Método Marshall** es un procedimiento desarrollado en el año 1939 y es uno de los métodos más utilizados hoy en día por su amplia difusión y cantidad de resultados recopilados. Está pensado para diseño en laboratorio y control en obra de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa y semidensa.

Es un ensayo de naturaleza empírica, por lo que sus resultados son comparables sólo si se respeta el procedimiento. Sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor.

El método emplea moldes metálicos con medidas normalizadas (diámetro: 101,7 mm y altura: 63,5 mm) donde la mezcla asfáltica diseñada y se compacta con un martillo (Peso: 4.540 kg y altura de caída 45,7 cm) que aplica la carga en toda la superficie de la probeta. Habitualmente se aplican 75 golpes por cara de la probeta, aunque esta energía puede ser menor en casos que se requiera una menor densidad.

Cada probeta ejecutada es pesada mediante balanza considerando distintos pesos (peso seco, peso sumergido, peso a superficie seca saturada) y se registran distintas medidas de las dimensiones con calibre (altura y diámetro). Con estos datos, se calculan densidades (Densidad Marshall y Densidad Teórica Máxima, DTmax). La DTmax se obtiene a partir del Método RICE, que se analiza en el apartado 5.5.7 *Determinación de propiedades y propiedades volumétricas*.

Para realizar el ensayo mecánico, se someten las probetas a un baño termostático en agua a 60°C. El mismo consiste en una compresión semi confinada, para una velocidad de deformación de 50,4 mm/minuto.

Se denomina **Estabilidad Marshall** a la carga máxima registrada y la deformación diametral en correspondencia con ella se llama **Fluencia Marshall**.

La estabilidad se obtiene con la siguiente expresión, debido a que se utiliza un equipo automático:

$$\text{Estabilidad} = L_A \times K$$

Donde:

- L_A : es la lectura directa de indicación de carga [kN].
- K : es el factor de corrección extraído de la tabla que se muestra a continuación, el que está en relación directa con la altura real de la probeta o el volumen determinado en el ensayo de densidad. Estos valores, se muestran en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1 - Factores de corrección de estabilidad Marshall

Tabla 1 - Factores de corrección de la estabilidad Marshall

Volumen de la probeta (cm ³)	Altura de la probeta (mm)	Factor de corrección (K)	Volumen de la probeta (cm ³)	Altura de la probeta (mm)	Factor de corrección (K)
200 a 214	25,4	5,56	-	60,7	1,08
215 a 225	27,0	5,00	-	61,0	1,07
226 a 237	28,6	4,55	-	61,2	1,06
238 a 250	30,2	4,17	-	61,5	1,05
251 a 264	31,8	3,85	496 a 508	61,7	1,04
265 a 276	33,3	3,57	-	62,2	1,03
277 a 289	34,9	3,33	-	62,6	1,02
290 a 301	36,5	3,03	-	63,1	1,01
302 a 316	38,1	2,78	509 a 522	63,5	1,00
317 a 328	39,7	2,50	-	63,9	0,99
329 a 340	41,3	2,27	-	64,4	0,98
341 a 353	42,9	2,08	-	64,8	0,97
354 a 367	44,5	1,92	523 a 535	65,3	0,96
368 a 379	46,0	1,79	-	65,8	0,95
380 a 392	47,6	1,67	-	66,3	0,94
393 a 405	49,2	1,56	536 a 546	66,6	0,93
406 a 420	50,8	1,47	-	67,0	0,92
421 a 431	52,4	1,39	547 a 559	68,3	0,89
432 a 443	54,0	1,32	560 a 573	69,8	0,86
444 a 456	55,6	1,25	574 a 585	71,4	0,83
457 a 470	57,2	1,19	586 a 598	73,0	0,81
471 a 482	58,7	1,14	599 a 610	74,6	0,78
483 a 495	60,5	1,09	611 a 626	76,2	0,76

En nuestro país, estos lineamientos están plasmados en la Norma de Ensayo de la Dirección Nacional de Vialidad VN-E9-86 [D] o mediante la norma IRAM 6845 [E].

5.4.2. Ensayo de deformación permanente mediante equipo de rueda cargada o wheel tracking test (WTT)

Este ensayo evalúa el comportamiento reológico de mezclas asfálticas, considerando que estas presentan propiedades elasto-visco-plásticas. Cuando se aplica una carga, las deformaciones son inicialmente elásticas y si la tensión persiste, se desarrollan deformaciones viscosas que dependen del tiempo, las cuales al descargar, solo se recuperan parcialmente, quedando una deformación plástica residual. Cuando las cargas son cíclicas, como en el caso del tránsito, las deformaciones plásticas se acumulan progresivamente.

En este contexto, el “Wheel Tracking Test” (WTT) simula la acción del tráfico sobre la mezcla asfáltica y permite determinar la resistencia al ahuellamiento. Durante este ensayo, se aplican ciclos repetidos de carga mediante una rueda y se mide la profundidad de la huella en todo el ensayo (Figura N° 3). Se finaliza cuando se alcanza un número definido de ciclos o una profundidad de huella máxima.

A fin de automatizar el cálculo de los resultados de ensayo y reducir las incertezas en la medición, las mediciones experimentales se han ajustado por norma, a partir del ciclo 100 de carga en adelante, mediante la siguiente función:

$$D_n = a * N_i^b \quad (1)$$

- D_n = profundidad de huella para el ciclo n, en mm.
- N_i = el número de ciclos aplicados en el ensayo.
- a y b = coeficientes de ajuste.

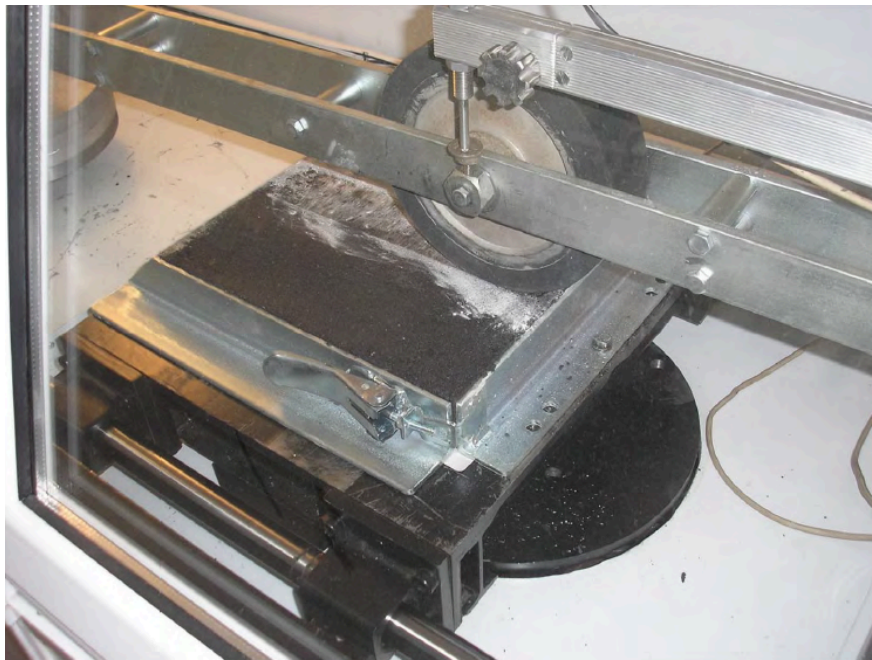


Figura Nº 3 - Ensayo "WTT" en ejecución. Fuente: presentación de clase de curso para Maestría Vial - FCEIA - UNR.

Los resultados obtenidos son:

- Profundidad de la huella (RD) para $N = 5000$ y $N = 10000$ ciclos, para cada probeta en forma individual.
- Velocidad media de aumento de dicha profundidad, entre los ciclos 5000 y 10000:

$$WTS_i \left[\frac{\text{mm}}{10^3 \text{ ciclos}} \right] = \frac{RD_{10000} - DR_{5000}}{5} \quad (2)$$

siendo:

- N = número de ciclos totales

- RD_{5000} y RD_{10000} = profundidad de huella a los 5000 y 10000 ciclos respectivamente obtenidos mediante el cálculo de la regresión de la ecuación (1) para $N = 5000$ y $N = 10000$.

Si el ensayo culmina previo a los 10000 ciclos para el cálculo de la ecuación (2), se extrapolan los valores de la ecuación (1).

- c) Proporción de ahuellamiento respecto al espesor de la probeta (PRD), medida para el ciclo de carga 10000 (d_{10000}) expresada en porcentaje al 0.1%, según la ecuación (3).

$$PRD_i(\%) = \frac{RD_{10000}}{e} \cdot 100 \% \quad (3)$$

siendo:

- RD_{10000} = la profundidad de la huella para el ciclo 10000, obtenido mediante el cálculo de la regresión de la ecuación (1), en mm.
- e = espesor de la probeta, en mm.
- En el caso que el ensayo culmine antes de los 10000 ciclos para el cálculo de PRD_i se extrapolan el valor de RD_{10000} valores a partir de la expresión de la ecuación (1).

Este procedimiento se encuentra reglamentado en la Norma IRAM 6850 [F], donde se indican en forma detallada, características de las probetas a utilizar, ciclos de cargas, condiciones de ejecución y demás parámetros relacionados al ensayo.

5.4.3. Módulo Dinámico de mezclas asfálticas a partir del ensayo de Tracción Indirecta

Como se ha mencionado anteriormente, las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos, comportándose como tales bajo la acción de las cargas y el clima. El módulo dinámico, definido como la relación entre las tensiones aplicadas y las deformaciones resilientes o recuperables propias de cada material, constituye un parámetro que permite caracterizarlas. Las Curvas Maestras permiten representar la variación del módulo dinámico en función de la temperatura y la frecuencia de sollicitación.

El Módulo Dinámico es considerado una propiedad fundamental de cada mezcla asfáltica y por este motivo podría determinarse mediante cualquier metodología experimental. De esta forma, se podría utilizar la configuración de ensayo en tracción indirecta por compresión diametral aplicable a probetas del tipo Marshall (Ver Figura N° 4) aplicando distintos entornos de valores cargas dinámicas sinusoidales a diferentes temperaturas.

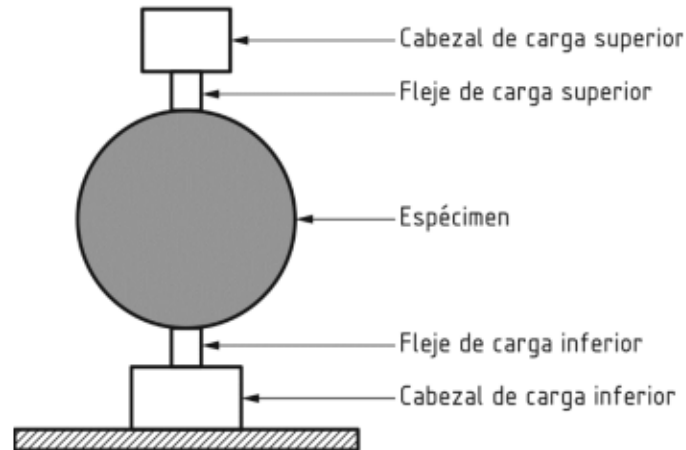


Figura N° 4 - Configuración de ensayo. Fuente: Norma IRAM 6846-1.

Utilizando una temperatura y frecuencia de referencia, se puede obtener las mencionadas Curvas Maestras utilizando la ecuación sigmoideal:

$$\log(|E^*|) = \log(|E_{mín}^*|) + \frac{\log(|E_{máx}^*|) - \log(|E_{mín}^*|)}{S}$$

donde:

- E^* = módulo dinámico de la mezcla [MPa].
- $S = 1 + e^{\beta + \log(fr^*\gamma)}$ (parámetro de forma).
- β y γ son parámetros de ajuste de la fórmula.
- $fr = f * e^{C * (\frac{1}{T} - \frac{1}{TREF})}$ (frecuencia reducida ajustada en función de la temperatura) [Hz].

Este procedimiento se enuncia en la Norma IRAM 6846-1 [G] - Primera Edición 2022/04/01 y Norma UNE-EN 12697 [H].

5.4.4. Resistencia conservada (RC)

La resistencia conservada RC se utiliza para evaluar la pérdida de cohesión de mezclas asfálticas debido a la acción del agua aplicado a probetas del tipo Marshall compactadas de forma tal que garanticen un volúmen de vacíos del 7% o más. Esto en general, se satisface aplicando 25 golpes.

Este parámetro se obtiene mediante el ensayo de inmersión-tracción por compresión diametral (Ver Figura N° 5), comparando la resistencia a tracción de probetas mantenidas al aire (probetas tipo 1) con probetas sometidas al agua a una determinada temperatura (probetas tipo 2).



Figura N° 5 - Ensayo a tracción por compresión diametral. Fuente: presentación de clase de curso para Maestría vial - FCEIA - UNR.

Para cada tipo de probeta se obtiene la resistencia a la tracción indirecta (RTI) con la ecuación:

$$RTI = \frac{2 \times P_{m\acute{a}x}}{\pi \times D \times h}$$

Siendo:

- RTI : la Resistencia a Tracción Indirecta, expresada en kilopascal [kPa], redondeada al número entero más cercano.
- $P_{m\acute{a}x}$: la carga máxima, expresada en kilonewton [kN], redondeada a tres cifras significativas.
- D : el diámetro de la muestra, expresado en metros [m].
- h : la altura de la muestra, expresada en metros [m].

Finalmente, el valor de Resistencia Conservada (RC) resulta:

$$RC = \frac{RTI \text{ probetas tipo 2}}{RTI \text{ probetas tipo 1}} * 100 \text{ (expresado en porcentaje)}$$

Este procedimiento se realiza considerando la Norma IRAM 6846 [G] .

5.4.5. Ensayo Ideal CT

Es un ensayo de tracción indirecta. Determina el potencial de fisuración de mezclas asfálticas con un parámetro basado en la mecánica de la fractura: índice de tolerancia al agrietamiento (CT Index) [9].

El ensayo Ideal CT, se lleva a cabo a temperatura ambiente (25°C) con muestras cilíndricas a una velocidad de carga de 50 mm/min. Una gran ventaja es que este ensayo no requiere ninguna instrumentación, corte, pegado, perforación o entalladura de la probeta. La duración del ensayo no alcanza el minuto.

El resultado que se obtiene es un parámetro de desempeño relacionado al agrietamiento:

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \cdot \frac{G_f}{|m_{75}|} \cdot \left(\frac{l_{75}}{D}\right)$$

donde:

- t: espesor de la probeta (mm)
- D: diámetro de la probeta (mm)
- G_f : energía de fractura (J/m²)
- $|m_{75}|$: valor absoluto de la pendiente de la curva alrededor del 75% de la carga máxima en el tramo posterior a dicha carga.
- l_{75} : desplazamiento al 75% de la carga máxima después del pico.

La energía de fractura G_f se calcula como:

$$G_f = \frac{W_f}{D \cdot t} \cdot 10^6$$

- W_f : trabajo de fractura calculado como el área bajo la curva P-l (J). La pendiente de la curva alrededor del 75% de la carga máxima en el tramo post-pico se calcula como:

$$|m_{75}| = \left| \frac{(P_{85} - P_{65})}{(l_{85} - l_{65})} \right|$$

donde:

- P_{85} , P_{65} , l_{85} y l_{65} se consideran de acuerdo a la Figura N°6:

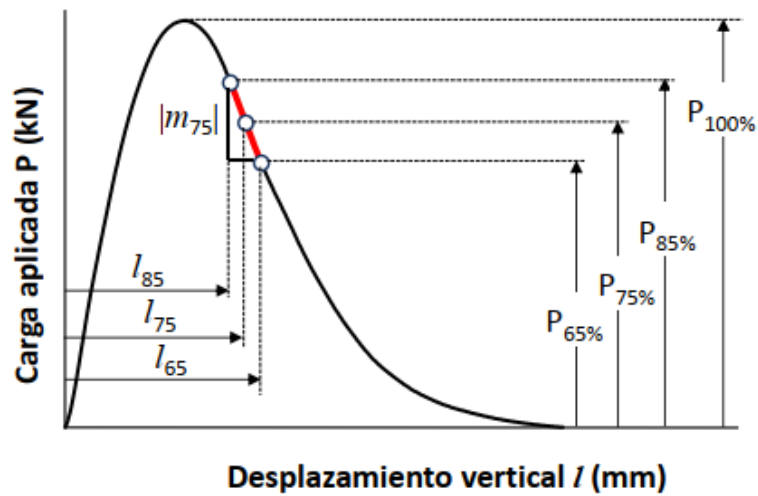


Figura N° 6 - Curva típica de evolución de la carga aplicada (P) y el desplazamiento vertical (l).

En general, cuanto mayor sea G_f , la resistencia al agrietamiento resulta mejor. La reducción de la carga (con un mayor valor de $|m_{75}|$) y el crecimiento del agrietamiento serán más rápidos cuanto más rígida sea la mezcla.

Además, cuanto mayor sea el valor de CT Index, mejor será la resistencia al agrietamiento, es decir, es posible clasificar a las mezclas de acuerdo a este parámetro. El equipamiento utilizado se muestra en la Figura N° 7:

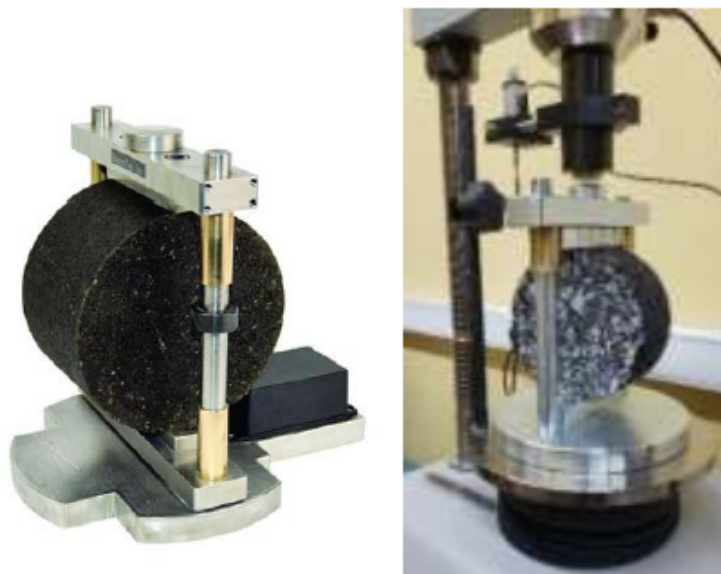


Figura N° 7 - Ensayo Ideal CT [10].

Este procedimiento se realiza considerando la Norma ASTM D8225 [1].

5.4.6. Ensayo Ideal RT

El ensayo RRT (Repeated Load Test) se utiliza para evaluar la resistencia al ahuellamiento en mezclas asfálticas, determinando el índice de tolerancia al corte mediante un ensayo de corte rápido. Este método emplea un cabezal superior de tracción indirecta y un soporte inferior que inducen tensiones de corte en las probetas, simulando las condiciones que enfrenta el pavimento bajo el tránsito repetitivo [9].

Se utilizan probetas de 150 mm de diámetro y 50 mm de espesor obtenidas mediante el compactador giratorio que luego son aserradas y se las somete a determinadas condiciones de temperatura y carga. El resultado principal del ensayo es el CR Index (Índice de Corte Rápido) donde a mayores valores, mayor será la resistencia al ahuellamiento de la mezcla. La información brindada se utiliza para estudiar el desempeño de la mezcla bajo condiciones críticas de tránsito y clima.

El parámetro RT index para evaluar el desempeño de las mezclas frente a la falla por ahuellamiento se obtiene con la siguiente expresión:

$$RT_{index} = 0,0665 \times \tau$$

Donde τ es la tensión de corte expresada en MPa.

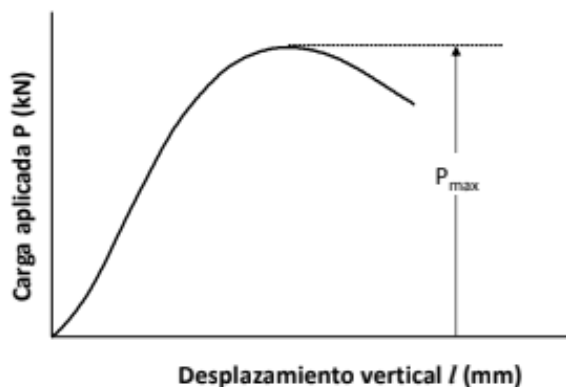


Figura N° 8 - Curva típica carga aplicada vs desplazamiento vertical del Ensayo Ideal RT

La tensión de corte τ se calcula como:

$$\tau = 0,356 \times \frac{P_{m\acute{a}x}}{t \times w}$$

Donde: $P_{m\acute{a}x}$ es la carga máxima en kN; t es el espesor de la probeta en m; w es el ancho del cabezal superior de carga igual a 0,0191 m.

El ensayo se realiza con el siguiente equipo (Figura N° 9):

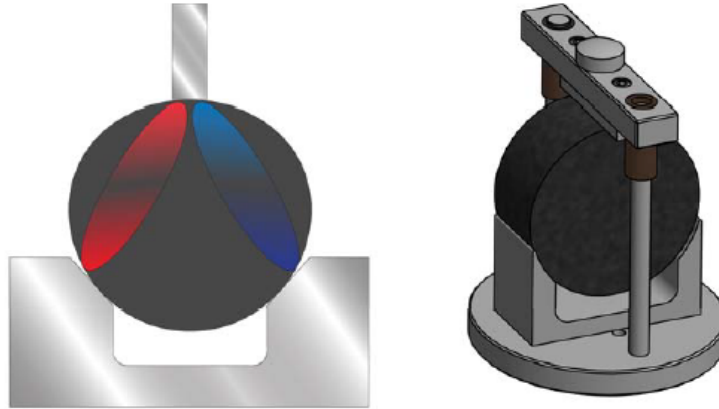


Figura N° 9 - Ensayo Ideal RT. Fuente: presentación de clase de curso para Maestría vial - FCEIA - UNR.

Este procedimiento se realiza considerando la Norma ASTM WK71466 [J].

Con valores de CT y resistencia al corte τ , se crean Diagramas de Desempeño (DED) [9] (Figura N° 10) utilizados para evaluar las mezclas asfálticas de forma integral frente al agrietamiento y al ahuellamiento. En el eje vertical se representa el desempeño respecto al agrietamiento mediante el CT index y en el eje horizontal el desempeño respecto al ahuellamiento con la tensión de corte asociada al RT index. Los signos (+) significan mejor desempeño y el (-) lo contrario.

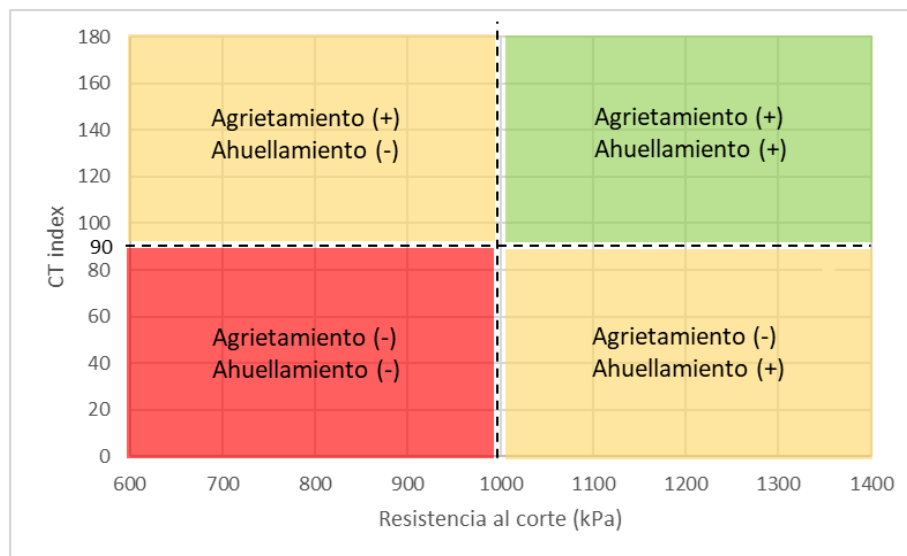


Figura N° 10 - Diagrama Espacial de Desempeño

5.4.7. Propiedades volumétricas

- ❖ Densidad Teórica Máxima (DT): es la masa por unidad de volumen de la mezcla compactada en su estado más denso posible, es decir, sin incluir los vacíos de aire.

Para obtenerla, se emplea el procedimiento de J. Rice (Figura N° 11) aplicado a un pastón de mezcla preparado específicamente para este ensayo a partir de la norma VN-E 27-84.

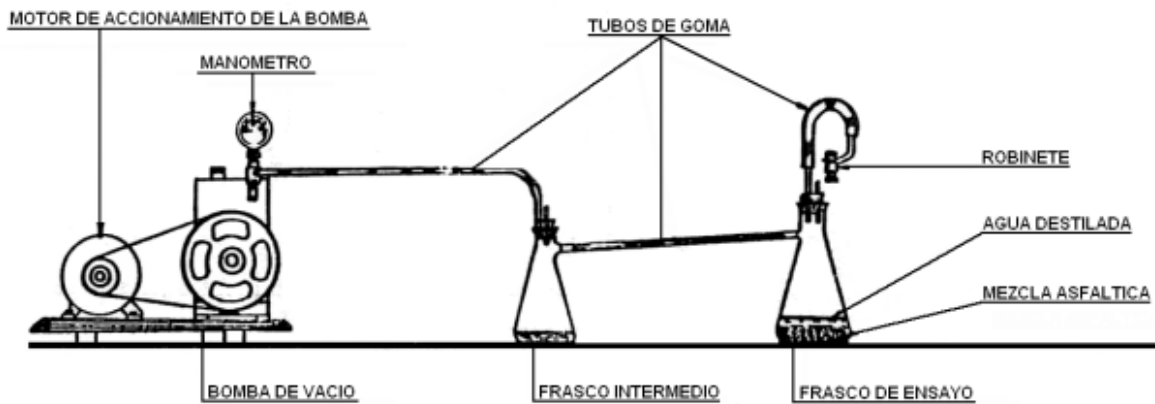


Figura N° 11 - Procedimiento J. Rice. Fuente: Norma VN - E27 - 84 [K].

- ❖ Densidad Marshall: es la densidad aparente donde se mide la masa por unidad de volumen de probetas compactadas según el método Marshall. Esta densidad incluye los vacíos de aire presentes en la mezcla después de la compactación. Se obtiene mediante la medición del peso seco y el volumen mediante inmersión en agua con el método conocido como balanza de Mohr (Figura N° 12).

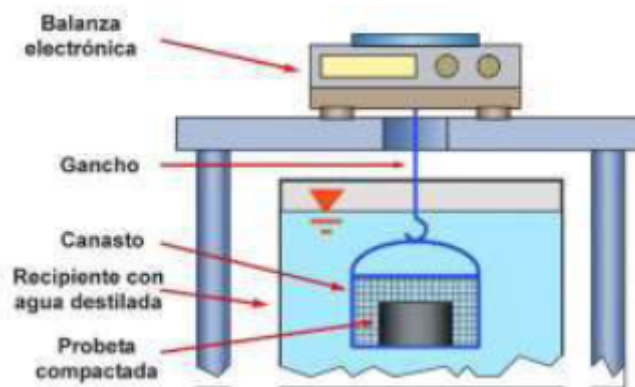


Figura N° 12 - Procedimiento Balanza de Mohr. Fuente: material de apoyo de la cátedra Transporte III [11].

Relaciones volumétricas [11]:

Las relaciones volumétricas son las propiedades físicas de la mezcla compactada que ayudan a interpretar cómo se desempeñará en servicio:

- ❖ Vacíos de Aire "V": indica la diferencia entre la densidad teórica y la real para el estado de compactación alcanzado.

- ❖ Vacíos del Agregado Mineral “VAM”: representa el volumen de vacíos existentes en el agregado mineral al estado de densificación alcanzado (Aire + Asfalto efectivo + Asfalto Absorbido).
- ❖ Vacíos ocupados por Asfalto “RBV” (Relación Betún-Vacíos)”: proporción de asfalto efectivo que ocupa los vacíos que deja la estructura granular.

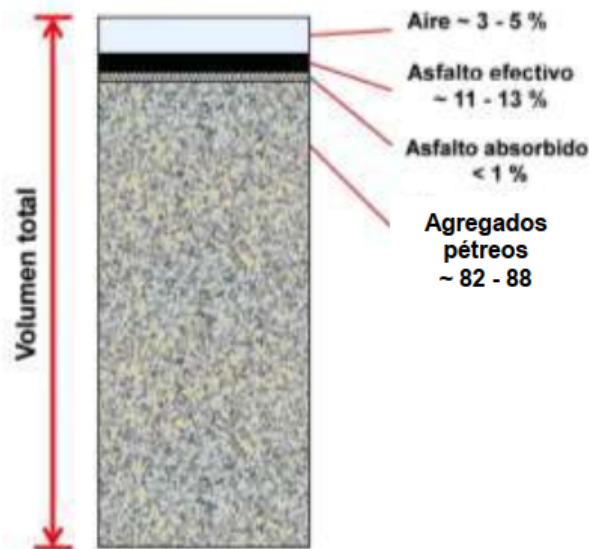


Figura N° 13: Relaciones Volumétricas. Material de Apoyo, Cátedra de Transporte III.

6. DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.1. Materiales a utilizar

Los materiales a utilizar en el desarrollo experimental del presente trabajo son: agregados pétreos, caucho reciclado, plástico reciclado y cemento asfáltico. A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos.

6.1.1. Agregados pétreos

Se cuenta con tres cortes distintos: 0-6 mm, 6-12 mm y 12-19 mm.

Para realizar la granulometría de cada uno, en primer lugar se selecciona una muestra representativa mediante el método de cuarteo según procedimiento indicado en la Norma NLT 148/91. Se puede observar en la Figura N° 14 parte del procedimiento:



Figura N° 14 - Selección de muestras de agregados pétreos. Fuente: elaboración propia.

Se requiere una muestra para cada tamaño de agregado para poder estudiar sus granulometrías. Este procedimiento se ejecuta bajo los lineamientos de la Norma IRAM 1505-2019 [L] la cual indica las cantidades y pasos a tener en cuenta. El resumen de resultados se observa en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2 - Granulometrías de los agregados

Tamiz (ASTM/ISO)	% acumulado que pasa					
1" (25.4)		100,00		100,00		100,00
3/4" (19.05)		100,00		99,77		94,53
1/2"		100,00		98,20		33,04
3/8" (9.525)		99,94		83,35		10,21
1/4"		99,68		49,44		5,93
N°4 (4.76)		97,65		19,01		3,37
N°8 (2.36)	0 - 6	71,50	6 - 12	2,93	12 - 19	1,39
N°16 (1.18)		47,12		1,78		1,12
N°30 (0.6)		33,97		1,51		1,00
N°50 (0.297)		24,12		1,27		0,73
N°100 (0.15)		13,57		0,91		0,52
N°200 (0.075)		5,51		0,42		0,26
Plato (Pasa N°200)		0,00		0,00		0,00

En función de las especificaciones dadas por el PETG de la DNV [7], para el caso de TMN 19 mm, se elige una granulometría para la mezcla (Tabla N° 3). La opción

más favorable resulta de considerar: 54% de 0-6 mm, 15% de 6-12 mm y 30% de 12-19 mm (se debe considerar además 1% de filler de aporte).

Tabla N° 3 - Granulometrías de la mezcla asfáltica y husos granulométricos PETG DNV [7].

TAMIZ (ASTM/ISO)	% acumulado que pasa	Mínimo.	Máximo
1" (25.4)	100,00	100	100
3/4" (19.05)	98,33	83	100
1/2"	79,64	-	-
3/8" (9.525)	70,53	60	75
1/4"	64,02	-	-
N°4 (4.76)	57,59	42	60
N°8 (2.36)	40,46	29	47
N°16 (1.18)	27,04	-	-
N°30 (0.6)	19,87	15	29
N°50 (0.297)	14,43	11	21
N°100 (0.15)	8,62	-	-
N°200 (0.075)	4,00	4	8

Las curvas granulométricas respectivas se enseñan en el Gráfico N° 1.

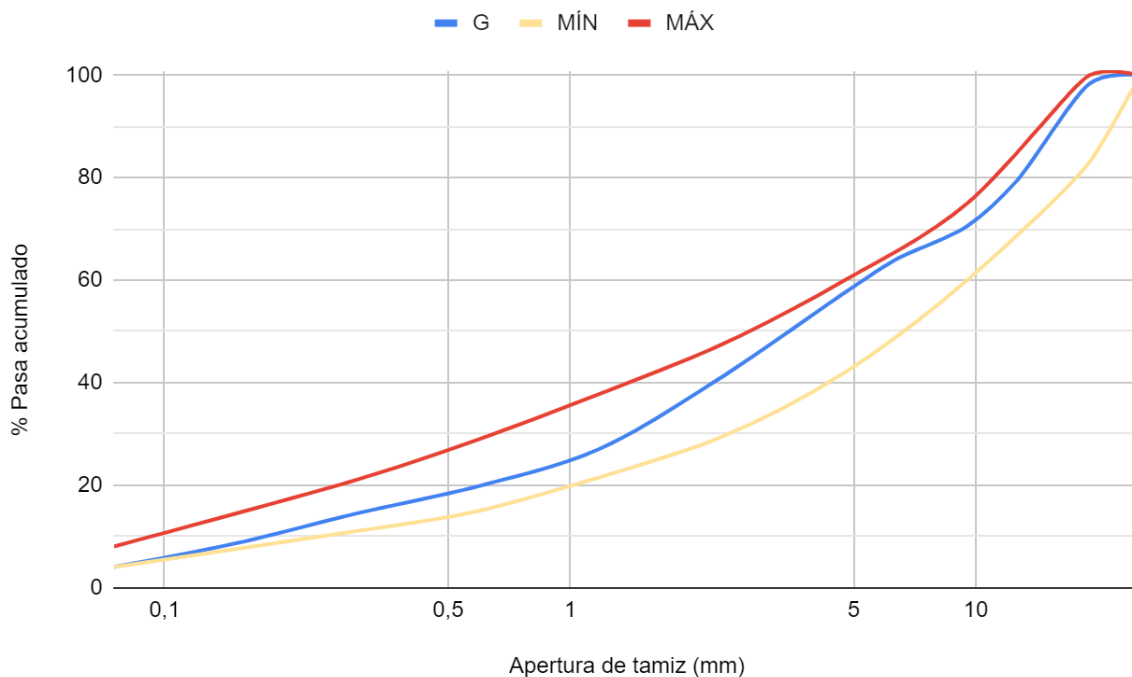


Gráfico N° 1 - Granulometrías de la mezcla asfáltica y entorno de valores permitidos según PETG DNV [7]. Fuente: elaboración propia.

6.1.2. Cemento asfáltico

El cemento asfáltico utilizado es del tipo CA30 y satisface los requisitos especificados en la Norma IRAM-IAPG A 6835 (Tabla N° 4):

Tabla N° 4 - Requisitos para asfalto CA30 según IRAM-IAPG A 6835 [B]

Cemento asfáltico CA30			
Característica	Mínimo	Máximo	Unidad
Viscosidad a 60°C	2401	3600	dPa s
Viscosidad a 135°C	350	-	mPa s
Índice de Penetración	-1.5	+0.5	-
Ensayo de Oliensis	Negativo		
Solubilidad en tricloroetileno	99	-	g/100g
Punto de inflamación	230	-	°C
Índice de durabilidad	-	3.5	-
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min	50	-	cm
Asfalto homogéneo, libre de agua y sin formación de espuma a 175°C			

6.1.3. Caucho

El caucho molido empleado en esta investigación se presenta en la Figura N° 15 y su granulometría se detalla en la Tabla N° 5:

Tabla N° 5 - Granulometría de caucho molido

CAUCHO	Tamiz (ASTM/ISO)	% acumulado que pasa
	1" (25.4)	100,00
	3/4" (19.05)	100,00
	1/2"	100,00
	3/8" (9.525)	100,00
	1/4"	100,00
	N°4 (4.76)	100,00
	N°8 (2.36)	100,00
	N°16 (1.18)	100,00
	N°30 (0.6)	94,79
	N°50 (0.297)	36,77
	N°100 (0.15)	9,77
	N°200 (0.075)	1,77
	Plato (Pasa N°200)	0,00



Figura N° 15 - Caucho molido (C). Fuente: elaboración propia.

6.1.4. Plástico reciclado

El plástico empleado corresponde a pellets de polietileno de alta densidad proveniente de bidones (B), color verde, en forma de lenteja. Su diámetro es de 2 - 4 mm, como se muestra en la Figura N° 16:



Figura N° 16 - Pellets de bidones (B). Fuente: elaboración propia.

6.2. Mezclas asfálticas y realización de probetas

En este trabajo de investigación se analizarán dos mezclas con incorporación de caucho y plástico que serán comparadas con una mezcla asfáltica convencional considerada de control.

De acuerdo a las condiciones que presentan, considerando el apartado 5.2 *Mezclas asfálticas*, las mezclas analizadas en este trabajo resultan:

CAC D B 19 CA-30

Para los tres tipos, se emplearon las mismas temperaturas y tiempos de mezclado siendo de 160°C en pastones secos, 150°C ligante asfáltico y luego se dejan las mezclas asfálticas durante una hora en horno a 155°C para simular el envejecimiento que sufre la mezcla durante el traslado hacia la obra.

En la Tabla N° 6 se presentan las nomenclaturas que se emplearán a lo largo del presente informe ya sea en las demás tablas de resultados como en las conclusiones, así como los ensayos a los cuales serán sometidas:

Tabla N° 6 - Probetas y referencias

Mezcla	Referencia	Probetas - Numeraciones y referencias						
		Marshall (75 golpes)	Módulo Dinámico (75 golpes)	RC (25 golpes)	WTT	Ideal CT	Ideal RT	%residuos (del peso total)
Patrón (P)	(P)					CG1,CG4	CG2,CG3	-
Caucho (C)	(C)	1,2,3,4,5	4,5	A,B,C,D	W1	CG2,CG3	CG1,CG4	0.50%
Plástico (B)	(B)					CG1,CG4	CG2,CG3	1.00%

Se muestra en las Figuras N° 17 y 18 algunas fotos de las probetas fabricadas:



Figura N° 17 - Probetas tipo Marshall y giratorias fabricadas. Fuente: elaboración propia



Figura N° 18 - Probetas para ensayo "WTT". Fuente: elaboración propia.

En las Tablas N° 7, N° 8, N° 9, se presentan los valores promedios obtenidos de medir las dimensiones con calibre de precisión $\pm 1/20$ mm y peso de las probetas tipo "Marshall" con balanza de precisión $\pm 0,1g$. Dichos valores se utilizan como representativos para el cálculo de densidades y ensayos sobre las probetas. Los resultados individuales de cada una de las mediciones se pueden encontrar en el Anexo (Tabla N°A1, N°A2 y N°A3).

Tabla N° 7 - Valores promedios de mediciones de probetas patrón

PATRÓN (P)	Dimensiones de probetas					
	Probeta	Geometría (h: altura, D: diámetro) [mm]		Pesos [g]		
		h	D	Ps (Peso seco)	Psum (Peso sumergido)	Psss (Peso saturado a superficie seca)
	1-P	61,7	102,0	1225,6	734,0	1227,6
	2-P	62,2	101,8	1232,0	738,2	1234,1
	3-P	62,5	101,6	1234,0	741,5	1235,5
	4-P	62,4	101,9	1229,4	734,2	1232,1
	5-P	61,7	102,0	1218,9	727,8	1221,3
	A-P	61,3	101,7	1156,1	678,6	1160,9
	B-P	61,1	101,7	1151,7	683,2	1160,4
	C-P	61,3	101,9	1158,3	680,1	1163,5
	D-P	62,0	101,5	1132,3	667,3	1140,1
	W1-P	50,6	-	11148,0	6739,0	11165,0
	CG1-P	58,8	149,9	2641,0	1608,0	2644,0
	CG2-P	58,9	149,8	2624,0	1599,0	2626,0
	CG3-P	56,2	150,0	2495,0	1514,0	2497,0
	CG4-P	57,9	149,9	2592,0	1575,0	2594,0

Tabla N° 8 - Valores promedios de mediciones de probetas con caucho

CAUCHO (C)	Dimensiones de probetas					
	Probeta	Geometría (h: altura, D: diámetro) [mm]		Pesos [g]		
		h	D	Ps (Peso seco)	Psum (Peso sumergido)	Psss (Peso saturado a superficie seca)
	1-C	64,0	101,4	1243,9	743,8	1247,4
	2-C	63,6	101,5	1232,5	733,4	1233,5
	3-C	63,5	101,6	1224,4	730,0	1228,0
	4-C	64,4	101,5	1248,3	739,3	1251,8
	5-C	63,0	101,3	1219,0	725,5	1223,9
	A-C	63,6	102,2	1165,2	672,8	1170,5
	B-C	63,1	101,2	1159,3	678,4	1169,8
	C-C	62,6	101,4	1165,8	682,7	1171,4
	D-C	62,7	101,8	1160,4	674,1	1168,8
	W1-C	50,8	-	11181,0	6724,0	11195,0
	CG1-C	59,3	149,8	2590,0	1562,0	2595,0
	CG2-C	59,0	149,9	2570,0	1550,0	2573,0
	CG3-C	59,6	149,7	2621,0	1583,0	2625,0
	CG4-C	58,0	149,8	2516,0	1523,0	2521,0

Tabla N° 9 - Valores promedios de mediciones de probetas con plástico

PLÁSTICO (B)	Dimensiones de probetas					
	Probeta	Geometría (h: altura, D: diámetro) [mm]		Pesos [g]		
		h	D	Ps (Peso seco)	Psum (Peso sumergido)	Psss (Peso saturado a superficie seca)
	1-B	64,7	101,4	1245,6	735,9	1253,3
	2-B	64,3	101,8	1231,0	726,7	1237,2
	3-B	64,9	101,6	1238,5	730,8	1246,9
	4-B	63,8	102,0	1218,1	716,9	1228,4
	5-B	64,8	101,9	1232,0	724,8	1243,3
	A-B	63,7	101,4	1157,5	672,2	1169,9
	B-B	64,8	101,6	1170,7	679,2	1183,9
	C-B	63,8	101,6	1161,6	691,7	1194,0
	D-B	64,1	101,7	1183,5	667,4	1170,0
	W1-B	50,8	-	10978,0	6552,0	10999,0
	CG1-B	59,6	150,0	2480,0	1465,0	2487,0
	CG2-B	58,6	150,2	2519,0	1502,0	2523,0
	CG3-B	59,8	149,6	2587,0	1547,0	2590,0
	CG4-B	58,6	149,8	2552,0	1524,0	2554,0

6.2.1. Cálculo de densidades

Se calcula la densidad teórica de cada tipo de mezcla según lo desarrollado en el marco teórico y se expresan los resultados en la Tabla N°10:

Tabla N° 10 - Densidad teórica según ensayo "RICE" de mezclas asfálticas

Tipo de mezcla	Ensayo "RICE"			
	A: peso mezcla	D: peso frasco + agua	E: peso frasco + agua + mezcla	DT (densidad teórica máxima)
Patrón (P)	1500,4	2990,1	3908,1	2,576
Caucho (C)	1991,4	3070,3	4284,1	2,561
Plástico (B)	1488,8	2990,1	3892,4	2,538

Se calcula la densidad aparente o "Marshall" de cada una de las probetas teniendo en cuenta los distintos pesos mostrados en la Tablas N°7, N°8, N°9. según el caso. Estas se irán mostrando en cada una de las tablas de resultados de ensayos a

medida que se avanza en este informe, por lo que se encontrarán a lo largo del ítem 6.3 *Análisis comparativo entre las mezclas.*

6.3. Análisis comparativo entre las mezclas

6.3.1. Propiedades Volumétricas

Se presentan las propiedades volumétricas de las probetas Marshall compactadas mediante 75 golpes. Los valores se representan en las Tabla N°11, N°12, N°13. según el caso:

Tabla N° 11 - Propiedades volumétricas de mezcla patrón para probetas de 75 golpes.

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS							
Mezcla	Probeta	% asfalto	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]	Densidad teórica máxima DT [g/cm ³]	Vol. Vacíos	VAM	Relación Betún/Vacíos
PATRÓN (P)	1-P	4,80%	2,483	2,576	3,6%	15,5%	77%
	2-P		2,484		3,6%	15,5%	77%
	3-P		2,498		3,0%	15,0%	80%
	4-P		2,469		4,2%	16,0%	74%
	5-P		2,470		4,2%	16,0%	74%

Tabla N° 12 - Propiedades volumétricas de mezcla con caucho para probetas de 75 golpes.

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS							
Mezcla	Probeta	% asfalto	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]	Densidad teórica máxima DT [g/cm ³]	Vol. Vacíos	VAM	Relación Betún/Vacíos
CAUCHO (C)	1-C	4,80%	2,470	2,561	3,6%	15,4%	77%
	2-C		2,465		3,8%	15,6%	76%
	3-C		2,459		4,0%	15,8%	75%
	4-C		2,436		4,9%	16,6%	71%
	5-C		2,446		4,5%	16,2%	72%

Tabla N° 13 - Propiedades volumétricas de mezcla con plástico para probetas de 75 golpes.

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS							
Mezcla	Probeta	% asfalto	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]	Densidad teórica máxima DT [g/cm ³]	Vol. Vacíos	VAM	Relación Betún/Vacíos
PLÁSTICO (B)	1-B	4,80%	2,407	2,538	5,2%	16,7%	69%
	2-B		2,411		5,0%	16,6%	70%
	3-B		2,400		5,5%	17,0%	68%
	4-B		2,381		6,2%	17,6%	65%
	5-B		2,376		6,4%	17,8%	64%

Los valores se comparan con los admisibles dados por la Tabla 12 del PETG de la DNV [7] (Tabla N° 14):

Tabla N° 14 - Requisitos de dosificación. Fuente: PETG - DNV [7]

Tabla N°12 – REQUISITOS DE DOSIFICACIÓN																									
Parámetro	Exigencia																								
Ensayo Marshall (IRAM 6845)	N° golpes por cara ⁽¹⁾	75																							
	Estabilidad	> 10 kN																							
	Relación Estabilidad-Fluencia ⁽²⁾	2,5 - 4,5 kN/mm																							
	Vacíos en la mezcla ⁽³⁾	3 - 5 %.																							
	Vacíos del agregado mineral (VAM) ⁽³⁾	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamaño máximo nominal del agregado pétreo</th> <th>VAM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TMN 19 mm</td> <td>≥ 14 %</td> </tr> <tr> <td>TMN 12 mm</td> <td>≥ 15 %</td> </tr> </tbody> </table>	Tamaño máximo nominal del agregado pétreo	VAM	TMN 19 mm	≥ 14 %	TMN 12 mm	≥ 15 %																	
	Tamaño máximo nominal del agregado pétreo	VAM																							
TMN 19 mm	≥ 14 %																								
TMN 12 mm	≥ 15 %																								
Relación Betún-Vacíos (RBV)	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tipo de capa</th> <th colspan="4">RBV (%)</th> </tr> <tr> <th colspan="4">Clasificación por tránsito</th> </tr> <tr> <th></th> <th>T1</th> <th>T2</th> <th>T3</th> <th>T4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rodamiento</td> <td>65 - 75</td> <td>65 - 75</td> <td>65 - 78</td> <td>65 - 78</td> </tr> <tr> <td>Base</td> <td>68 - 78</td> <td>68 - 78</td> <td>70 - 80</td> <td>70 - 80</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de capa	RBV (%)				Clasificación por tránsito					T1	T2	T3	T4	Rodamiento	65 - 75	65 - 75	65 - 78	65 - 78	Base	68 - 78	68 - 78	70 - 80	70 - 80
Tipo de capa	RBV (%)																								
	Clasificación por tránsito																								
	T1	T2	T3	T4																					
Rodamiento	65 - 75	65 - 75	65 - 78	65 - 78																					
Base	68 - 78	68 - 78	70 - 80	70 - 80																					

De acuerdo a los requisitos, la mezcla patrón cumple con las especificaciones de vacíos, vacíos del agregado mineral (VAM) y la relación Betún-Vacíos (RBV), ya que el porcentaje de los mismos se encuentra entre 3% y 5%, el VAM resulta superior a 14% y para un tránsito T1 y tipo de capa base, la RBV está en el entorno de 68% a 78%.

Considerando los mismos valores admisibles para las mezclas con incorporación de residuos, se observa que la mezcla con caucho cumple con las especificaciones, no así las que contienen plástico, donde los vacíos de la mezcla son superiores a 5%. Valores altos de vacíos no son deseables puesto que pueden ser motivo de problemas de ahuellamiento y de degradación por acción del agua.

Para el resto se las probetas fabricadas, se presentan las propiedades volumétricas en las Tablas N°15, N°16, N°17:

Tabla N° 15 - Propiedades volumétricas de mezcla patrón para el resto de las probetas

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS							
Mezcla	Probeta	% asfalto	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]	Densidad teórica máxima DT [g/cm ³]	Vol. Vacíos	VAM	Relación Betún/Vacíos
PATRÓN (P)	A-P	4,80%	2,397	2,576	7,0%	18,5%	62%
	B-P		2,413		6,3%	17,9%	65%
	C-P		2,396		7,0%	18,5%	62%
	D-P		2,395		7,0%	18,5%	62%
	W1-P		2,519		2,2%	14,3%	84%
	CG1-P		2,549		1,0%	13,3%	92%
	CG2-P		2,555		0,8%	13,1%	94%
	CG3-P		2,538		1,5%	13,7%	89%
	CG4-P		2,544		1,3%	13,5%	91%

Tabla N° 16 - Propiedades volumétricas de mezcla con caucho para el resto de las probetas

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS							
Mezcla	Probeta	% asfalto	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]	Densidad teórica máxima DT [g/cm ³]	Vol. Vacíos	VAM	Relación Betún/Vacíos
CAUCHO (C)	A-C	4,80%	2,341	2,561	8,6%	19,8%	57%
	B-C		2,359		7,9%	19,2%	59%
	C-C		2,386		6,9%	18,3%	63%
	D-C		2,346		8,4%	19,7%	57%
	W1-C		2,481		3,1%	15,0%	79%
	CG1-C		2,507		2,1%	14,1%	85%
	CG2-C		2,512		1,9%	14,0%	86%
	CG3-C		2,515		1,8%	13,9%	87%
	CG4-C		2,521		1,6%	13,7%	89%

Tabla N° 17 - Propiedades volumétricas de mezcla con plástico para el resto de las probetas

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS							
Mezcla	Probeta	% asfalto	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]	Densidad teórica máxima DT [g/cm ³]	Vol. Vacíos	VAM	Relación Betún/Vacíos
PLÁSTICO (B)	A-B	4,80%	2,326	2,538	8,4%	19,5%	57%
	B-B		2,320		8,6%	19,8%	56%
	C-B		2,313		8,9%	20,0%	56%
	D-B		2,355		7,2%	18,5%	61%
	W1-B		2,458		3,2%	15,0%	79%
	CG1-B		2,427		4,4%	16,1%	73%
	CG2-B		2,467		2,8%	14,6%	81%
	CG3-B		2,480		2,3%	14,2%	84%
	CG4-B		2,478		2,4%	14,3%	83%

6.3.2. Ensayo de Estabilidad y Fluencia

Para cada una de las mezclas y las probetas Marshall de 75 golpes que se ensayaron, se presentan algunos resultados en las Tablas N°18, N°19, N°20:

Tabla N° 18 - Resultados de Estabilidad y Fluencia para mezcla patrón

PATRÓN (P)	Nombre Probeta	Carga corregida [kg]	Fluencia [mm]	Relación E/F	Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	2-P	13,37	3,98	2,98	3,6%	2,484
	5-P	14,05	3,62	2,58	4,2%	2,470

Tabla N° 19 - Resultados de Estabilidad y Fluencia para mezcla con caucho

CAUCHO (C)	Nombre Probeta	Carga corregida [kg]	Fluencia [mm]	Relación E/F	Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	1-C	12,19	3,91	3,21	3,6%	2,470
	2-C	12,92	4,55	3,52	3,8%	2,465

Tabla N° 20 - Resultados de Estabilidad y Fluencia para mezcla con plástico

PLÁSTICO (B)	Nombre Probeta	Carga corregida [kg]	Fluencia [mm]	Relación E/F	Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	2-B	11,20	10,86	3,64	5,0%	2,411
	4-B	7,91	7,85	4,49	6,2%	2,381

Los resultados obtenidos en los ensayos revelan diferencias significativas en términos de estabilidad y fluencia, las cuales son indicadores para evaluar la capacidad de las mezclas frente a las cargas aplicadas y su resistencia a deformaciones permanentes. Las mezclas patrón y caucho demuestran un equilibrio adecuado de rigidez, con valores promedio de estabilidad y fluencia que cumplen con los requisitos establecidos en la Tabla N° 14 del Pliego, manifestando un desempeño satisfactorio.

En el caso de la mezcla con caucho, se observa una leve variación respecto a la mezcla patrón, destacándose una relación estabilidad/fluencia más elevada. Esto podría atribuirse a los mayores vacíos presentes en la mezcla, resultado de las propiedades físicas del caucho que, además de aportar elasticidad, influyen en la redistribución de esfuerzos y en la adherencia con el ligante asfáltico.

Por otro lado, las mezclas con plástico presentaron un comportamiento diferenciado que podría estar relacionado con la falta de integración de los pellets dando como resultado una mezcla con un comportamiento interno “heterogéneo”. Este fenómeno se refleja en los valores dispersos de estabilidad y en la elevada fluencia registrada, así como en una mayor proporción de vacíos, lo que compromete el cumplimiento de los requisitos normativos.

Cabe señalar que la respuesta observada en estas mezclas no parece depender directamente de los parámetros de temperatura de compactación o tiempos de mezclado, sino más bien de las interacciones intrínsecas entre el ligante y los materiales reciclados. Por lo tanto, para mejorar el desempeño de las mezclas con plástico, se sugiere explorar ajustes en el diseño, tales como la optimización del esqueleto granular o el contenido de ligante asfáltico.

6.3.3. Ensayo de Rueda Cargada WTT

Se analiza el desempeño frente al ahuellamiento de las tres mezclas mediante los resultados de las regresiones lineales obtenidas de los valores medidos (en milímetros) de la profundidad de la huella en función del número de ciclos, para cada una de las probetas ensayadas en el equipo de Wheel Tracking Test (Gráfico N° 2).

Los valores de las mediciones que se utilizan para obtener las regresiones lineales se presentan en el Anexo, en los Gráficos N° A1, N° A2 y N° A3.

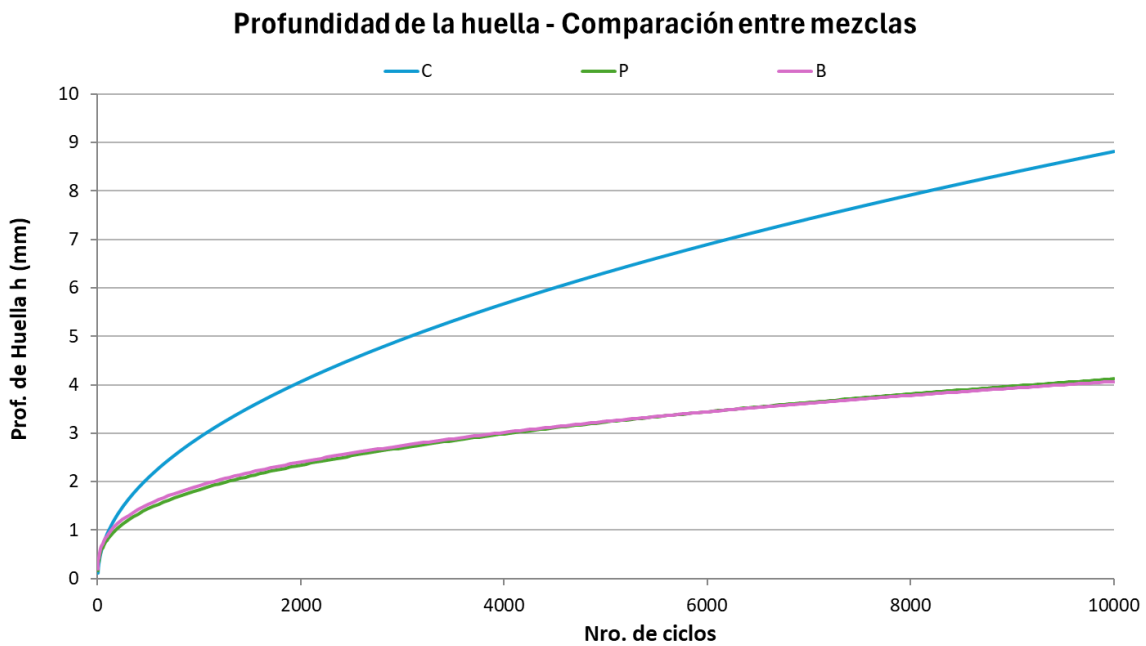


Gráfico N° 2 - Resultado del ensayo WTT de la mezclas mediante regresión lineal. Fuente: elaboración propia

Con las fórmulas del apartado 5.5.2 *Ensayo de deformación permanente mediante equipo de rueda cargada o wheel tracking test (WTT)* del presente informe, valores de interés se presentan en la Tabla N° 21, Tabla N° 22 y Tabla N° 23 según la mezcla.

Tabla N° 21 - Parámetros del ensayo WTT para mezcla patrón

Según Norma EN 12697-22 - Mezcla (P)	
h 5000 (mm) =	3,20
h 10000 (mm) =	4,28
WTSaire (mm/1000 ciclos) =	0,215
PRD 10000 (%) =	8,5%

Tabla N° 22 - Parámetros del ensayo WTT para mezcla con caucho

Según Norma EN 12697-22 - Mezcla (C)	
h 5000 (mm) =	6,66
h 10000 (mm) =	-
WTSaire (mm/1000 ciclos) =	-1,331
PRD 10000 (%) =	0,0%

Tabla N° 23 - Parámetros del ensayo WTT para mezcla con plástico

Según Norma EN 12697-22 - Mezcla (B)	
h 5000 (mm) =	3,21
h 10000 (mm) =	4,12
WTSaire (mm/1000 ciclos) =	0,182
PRD 10000 (%) =	8,1%

Tabla N° 24 - Parámetros del ensayo WTT con valores estimados para mezcla con caucho

Según Norma EN 12697-22 - Mezcla (C)	
h 5000 (mm) =	6,66
h 10000 (mm) =	9,43
WTSaire (mm/1000 ciclos) =	0,554
PRD 10000 (%) =	18,6%

De acuerdo al tipo de tránsito esperado (T1) y para que pueda ser utilizada como base, según Tabla N° 25 relacionada a las especificaciones del pliego DNV, se tienen los siguientes valores admisibles:

$$WTS \text{ aire} \leq 0,10$$

$$PRD \leq 8\%$$

Tabla N° 25 - Valores admisibles en función del tipo de capa y de la clasificación por tránsito

Tabla N°13 - EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO "Wheel Tracking Test" (Norma ENE-EN 12697-22 – Procedimiento B)				
Pendiente Media de Deformación (WTS AIRE) [mm/1000 ciclos de carga] en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos y Profundidad Media de la Huella (PRD) [%]				
Tipo de capa	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Rodamiento	WTS aire \leq 0,08 PRD \leq 5%	WTS aire \leq 0,10 PRD \leq 8%	WTS aire \leq 0,12 PRD \leq 10%	WTS aire \leq 0,15 PRD \leq 10%
Base	WTS aire \leq 0,10 PRD \leq 8%	WTS aire \leq 0,12 PRD \leq 10%	WTS aire \leq 0,15 PRD \leq 10%	WTS aire \leq 0,15 PRD \leq 12%

Se concluye que ninguna de las mezclas analizadas cumple con las especificaciones normativas en términos de resistencia al ahuellamiento, ya que los resultados alcanzados se encuentran fuera de los rangos permitidos. A pesar de las hipótesis planteadas durante el diseño, el mal desempeño frente al ahuellamiento no puede atribuirse a una única causa. Esto resalta la necesidad de realizar algunos ajustes, incluyendo modificaciones en las dosificaciones y el esqueleto granular, así como la ejecución de una batería de ensayos específicos para evaluar las propiedades individuales de los componentes: agregados pétreos, ligante asfáltico y materiales de aporte (caucho y plástico).

6.3.4. Módulo Dinámico

A partir de los datos de ensayo obtenidos se procede a determinar las curvas maestras de módulo dinámico para cada una de las mezclas. En el Gráfico N° 3

puede observarse la variación del módulo dinámico en función de la temperatura para una frecuencia dada.

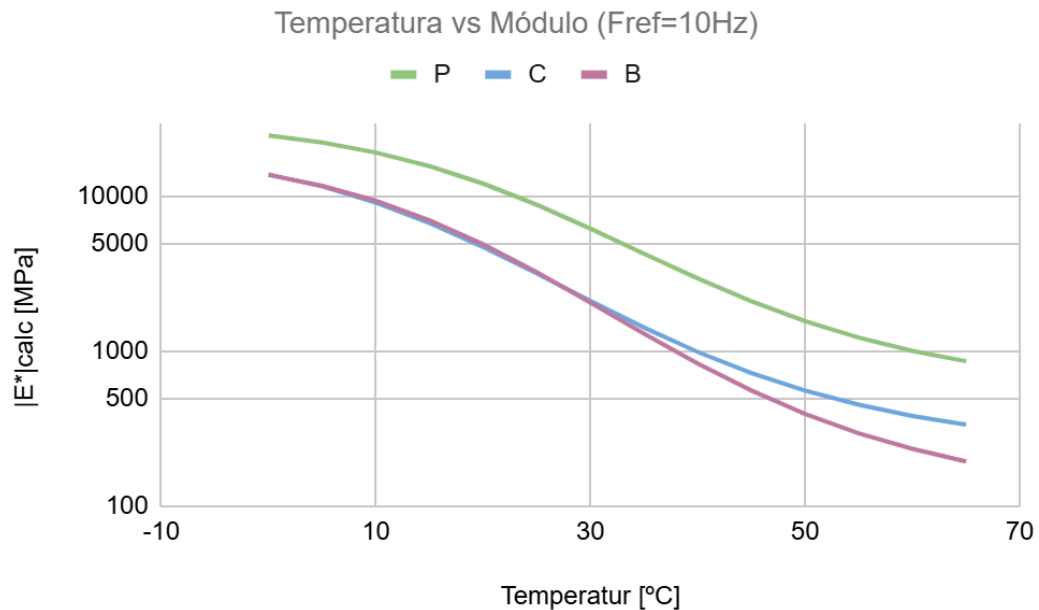


Gráfico N° 3 - Curva maestra de Módulo Dinámico a frecuencia de referencia de 10Hz.
Fuente: elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos para las curvas maestras de módulo dinámico, del Gráfico N° 3, se puede observar que la mezcla patrón presenta valores más altos en todo el rango de temperaturas lo que indica una mayor rigidez, mayor capacidad para resistir deformaciones permanentes y mejor comportamiento ante cargas. En las mezclas con adición de caucho o plástico se produce una disminución de su rigidez.

También se procede a analizar valores puntuales de módulo dinámico para diferentes temperaturas y frecuencias con el fin de analizar la susceptibilidad térmica de las mezclas. En la Tabla N° 26, se presentan los valores de módulos para los tres tipos de mezclas, en distintos rangos intermedios de temperatura y frecuencia.

Tabla N° 26 - Valores de módulos dinámicos.

MEZCLA	Módulos dinámicos [MPa]		
	Patrón (P)	Caucho (C)	Plástico (B)
0°C	24777	13921	13812
20°C	12125	4726	4922
40°C	2959	993	836
55°C	1229	453	296
0,1 HZ	2904	756	576
1HZ	5178	1499	1364
10HZ	8858	3185	3248

Se analiza de manera particular, con los datos presentados en la Tabla N° 26, la variación de módulo entre 55° y 0° para las mezclas mediante sus variaciones relativas. Las mezclas con aportes tienen menor variación relativa lo cual significa que son menos susceptibles térmicamente.

6.3.5. Resistencia conservada

En la Tabla N° 27 se presentan los resultados de ensayos de resistencia conservada para las tres mezclas:

Tabla N° 27 - Resultados de Ensayo de Resistencia Conservada

MEZCLA	Límite inferior	RTR
Patrón (P)	80%	85%
Caucho (C)		80%
Plástico (B)		64%

La condición del pliego de DNV, indica que los valores de RTR deben ser superiores al 80%. Las mezclas patrón y la mezcla con aporte de caucho cumplen con este requisito, lo que indica que dichas mezclas tendrán buen comportamiento cuando sean sometidas a la acción del agua. En cambio, la mezcla con plástico, podría presentar problemas como el desprendimiento del agregado o pérdida de cohesión interna entre agregados de la mezcla.

Las Tablas N° A2, N° A6 y N° A10 del Anexo, muestran los elementos que permiten obtener el valor de RTR.

6.3.6. Ideal CT

El comportamiento de las tres mezclas frente al agrietamiento expresados en el valor CT index, se muestra en el Gráfico N° 4:

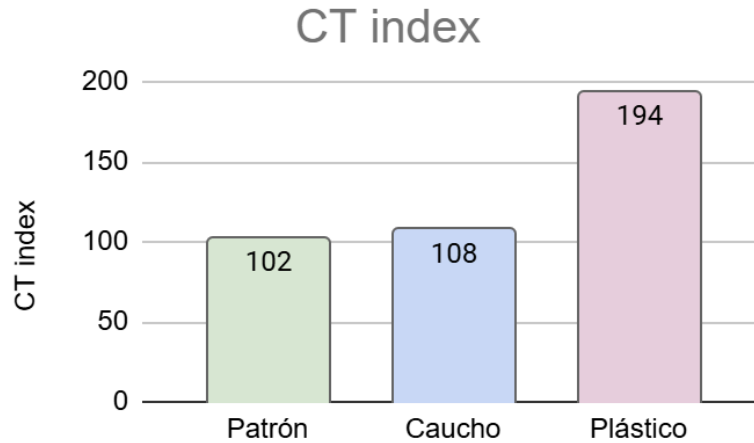


Gráfico N° 4 - Valores de CT index de las mezclas. Fuente: elaboración propia.

Algunas referencias indican que los valores mínimos de CT index deben encontrarse entre 80 y 110. Todas las mezclas verifican este valor, lo que indica que de acuerdo a este parámetro es de esperar un buen comportamiento frente al agrietamiento.

Los valores de los parámetros que se utilizan para obtener el CT index se presentan en el Anexo, en las Tablas N° A3, N° A7 y N° A11.

6.3.7. Ideal RT

Los valores que arroja el ensayo de cada una de las tres mezclas se muestran en los Gráficos N° 5 y N° 6.

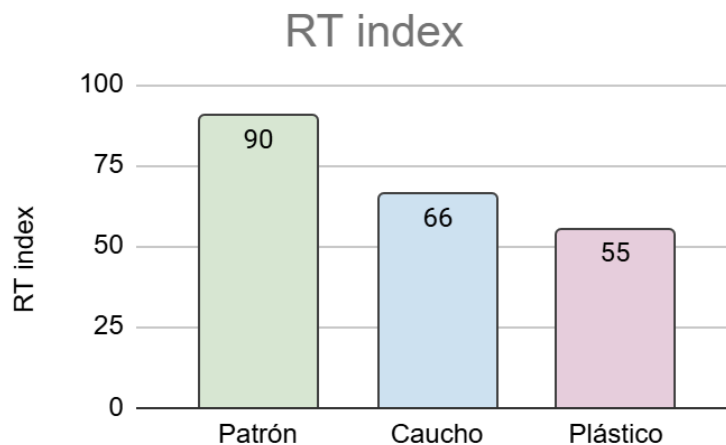


Gráfico N° 5 - Valores RT index. Fuente: Elaboración propia.

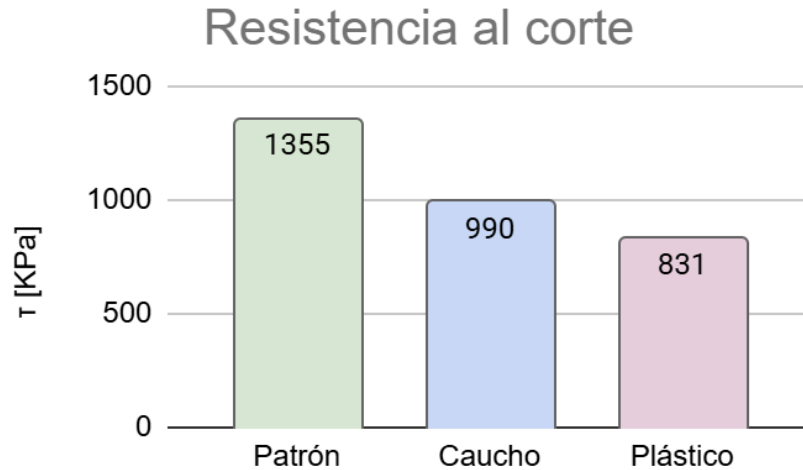


Gráfico N° 6 - Valores tensión de corte. Fuente: Elaboración propia.

La mezcla patrón supera el mínimo recomendado de $\tau = 1000 \text{ kPa}$ que indicaría un buen comportamiento frente al ahuellamiento. En correspondencia a los valores de resistencia al corte, se consideran aceptados los valores de RT index superior a 66.

La mezcla con aporte de caucho se encuentra cercana al valor mínimo y podría considerarse en condiciones. Sin embargo la mezcla con plástico no lo alcanza y sería esperable un comportamiento regular frente a este tipo de falla.

A modo de cierre de los resultados, aplicado a las mezclas en estudio y considerando los valores de CT y resistencia de corte, se obtiene el DED correspondiente (Gráfico N° 7):

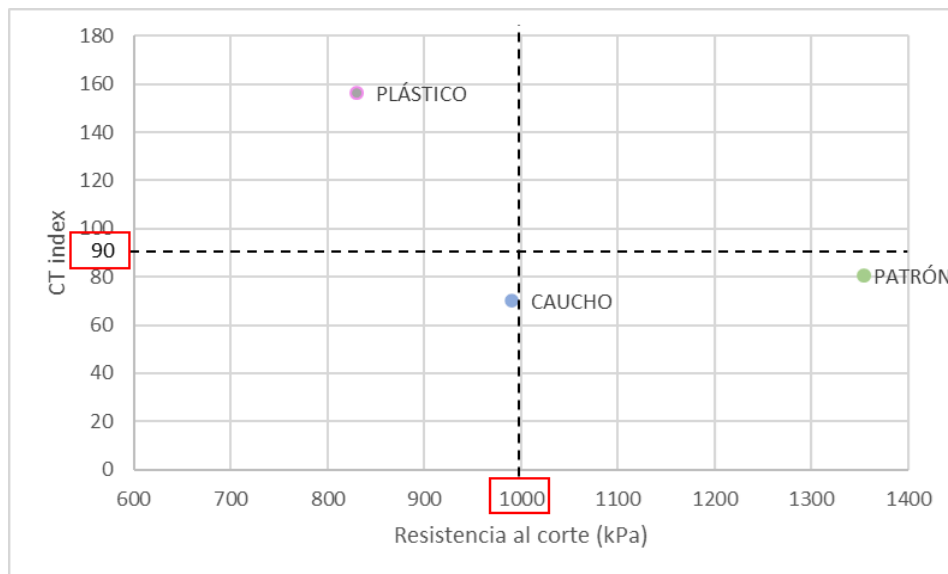


Gráfico N° 7 - Esquema Espacial de Desempeño para las tres mezclas. Fuente: elaboración propia.

Se observa que la mezcla con incorporación de plástico presenta un buen comportamiento respecto al agrietamiento, no así frente al ahuellamiento. En cambio, la situación que presenta la patrón es a la inversa que la anterior; mientras que la de caucho tiene un mal comportamiento respecto al ahuellamiento y al agrietamiento.

7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

En 2015, la Organización de las Naciones Unidas aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendieran un nuevo camino con el que mejorar la vida de todas las personas, sin dejar a nadie atrás. Esta Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (Figura N° 19), que establecen que la erradicación de la pobreza debe ir de la mano de estrategias que fomenten el crecimiento económico y abordan una serie de necesidades sociales como la educación, la sanidad, la protección social y las perspectivas de empleo, al tiempo que se combate el cambio climático y se protege el medio ambiente.



Figura N° 19 - Objetivos de Desarrollo Sostenible

El proyecto puede incluirse dentro de los objetivos: 9 (*industria, innovación e infraestructura*), debido a que estas mezclas pueden implementarse para ejecutar capas de paquetes estructurales de pavimentos sostenibles y además se fomenta la innovación; 11 (*ciudades y comunidades sostenibles*) por interactuar con la infraestructuras urbanas y gestión de residuos; 12 (*Producción y consumo responsable*) por fomentar la reutilización de materiales y promover una economía circular de recursos; 13 (*Acción por el clima*) ya que se reduce la cantidad de caucho y plástico que son incinerados y se reduce así la emisión de gases de efecto invernadero; y finalmente, se incluye este proyecto en el objetivo 15 (*Vida de*

ecosistemas terrestres) por gestionar estos materiales y minimizar la presencia de los mismos en distintos espacios.

8. CONCLUSIONES

La conclusión general de este trabajo se formula integrando los resultados obtenidos de los diversos ensayos realizados, con el objetivo de evaluar el desempeño de las tres mezclas asfálticas mediante diferentes parámetros mecánicos. Se ha efectuado una comparación detallada entre las mezclas, identificando las ventajas y desventajas de cada una en términos de rigidez, comportamiento mecánico, resistencia a la fisuración y comportamiento frente a deformaciones plásticas.

Es esencial considerar no solo los resultados específicos de cada ensayo, sino también el impacto conjunto de estos factores en la funcionalidad general del pavimento. Se busca una mezcla que logra el mejor equilibrio entre rigidez y flexibilidad, así como la que muestra una alta resistencia al ahuellamiento y buena durabilidad.

Para finalizar, se describen los comportamientos destacados de las mezclas:

- ❖ Mezcla patrón: presenta un desempeño equilibrado en prácticamente todos los ensayos, destacando los valores de sus propiedades volumétricas, densidades y resistencia conservada.
- ❖ Mezcla con caucho: mejora elasticidad y resistencia a fisuras, pero muestra debilidades en resistencia al ahuellamiento y al daño por acción del agua. Requiere ajustes en diseño para optimizar su desempeño.
- ❖ Mezcla con plástico: aunque tiene buen desempeño frente al ahuellamiento, sus deficiencias en densidad, resistencia conservada y módulo dinámico limitan su viabilidad para aplicaciones estructurales. Optimizar la integración de los pellets de plásticos y algunas otras modificaciones mencionadas, podría mejorar su desempeño.

Por último, la experiencia de trabajar en laboratorio dentro de un proyecto de investigación, conlleva un largo camino para alcanzar los resultados que requiere esfuerzo, planificación y dedicación, así como también investigación y toma de decisiones. Se pretende que este trabajo sirva como base para un nuevo proyecto donde se optimicen los resultados y procedimientos para avanzar en el uso de técnicas y recursos sostenibles a nivel país.

9. **BIBLIOGRAFÍA**

[1] Cámara Argentina de la Construcción (CAMARCO)

<https://www.camarco.org.ar/?s=residuos>

Último acceso: 01 de Octubre de 2024

[2] *Luis Enrique Fajardo Cachay y Douglas Alfonso Vergaray Huamán (2014). EFECTO DE LA INCORPORACIÓN POR VÍA SECA, DEL POLVO DE NEUMÁTICO RECICLADO, COMO AGREGADO FINO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS. Facultad de Ingeniería y Arquitectura - Lima, Perú.*

https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/1044/vergaray_da.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Último acceso: 08 de Octubre de 2024

[3] *Wilson Cando, Patricio Bonilla, Gustavo Yáñez, Jorge Bucheli, Adriana Muñoz, María Fernanda Orquera, Lenys Fernández, Patricio Espinoza-Montero (2020). EFECTO DE LA INCORPORACIÓN POR VÍA SECA DE RESIDUOS DE CAUCHO OBTENIDO TRAS SU REMOCIÓN DE UNA PISTA DE ATERRIZAJE DE AEROPUERTO EN UN ASFALTO AC-20. Universidad del Zulia.*

<https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/30780/31823>

Último acceso: 08 de Octubre de 2024

[4] *Dr. Ing. Gerardo Botasso (2023). TECNOLOGÍAS DE INCORPORACIÓN DE CAUCHO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS Y SU IMPACTO EN LA SUSTENTABILIDAD Y LA INNOVACIÓN. Simposio “Sustentabilidad y resiliencia en la pavimentación asfáltica” - Comisión Permanente del Asfalto.*

[5] *Silvia Angelone, Fernando Martínez, Marina Cauhape Casaux, Luis Zorzutti, Marcela Balige, Rubén González, Mike Vargas Martínez y Gerardo Lucci (2019). PROYECTO PASOS: PAVIMENTOS SOSTENIBLES. PRIMER TRAMO EXPERIMENTAL CON PLÁSTICOS RECICLADOS. Universidad Nacional de Rosario - Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto - México*

[6] *M. Julieta Reano (2022). ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SUSTENTABLES. Universidad Nacional de Rosario.*

<https://rephip.unr.edu.ar/items/caf6cbe5-66f3-4098-bc54-16fe5cb626b6>

Último acceso: 09 de Octubre de 2024

[7] Dirección Nacional de Vialidad. Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para Concretos Asfálticos en Caliente y Semicaliente del tipo denso. *Edición 2017*

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/petg_1.pdf

Último acceso: 01 de Octubre de 2024

[8] *Dra. Ing. Marta Pagola (2021). PERFILES ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS. Cátedra Transporte III - Escuela de Ingeniería Civil - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario.*

[9] *Fernando Martínez, Luis Zorzutti, Sebastián Andreoni, Marina Cauhape Casaux (2024). APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE DISEÑO BALANCEADO A MEZCLAS TEMPLADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA. UNA APUESTA A LA SOSTENIBILIDAD DE PAVIMENTOS. XXII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA). Granada.*

[10] *J. Páramo, H. Poncino, F. Martínez, A. Pugliese y J. P. Raffaelli (2021, 2022 y 2024). DISEÑO BALANCEADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS. Escuela de Posgrado y Educación Continua - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario.*

[11] *Ing. Pablo I. Martínez, Dra. Ing. Marta B. Pagola (2017). MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES. PROCEDIMIENTO DE DOSIFICACIÓN CON MÉTODO DE ENSAYO MARSHALL. Cátedra Transporte III - Escuela de Ingeniería Civil - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario.*

10. NORMAS

[A] **IRAM.** (1978). *Norma IRAM 1501-1: Materiales para pavimentos. Determinación de la densidad del agregado grueso.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

[B] **IRAM-IAPG.** (2020). *Norma IRAM-IAPG A 6835: Hidrocarburos. Determinación del contenido de azufre en combustibles.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

[C] **IRAM.** (2018). *Norma IRAM 6596: Ensayo Marshall para mezclas asfálticas en caliente.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

[D] **DNV.** (1986). *Norma VN-E9-86: Ensayo de estabilidad y fluencia por el método Marshall.* DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD - 1° Distrito Buenos Aires.

[E] **IRAM.** (2016). *Norma IRAM 6845: Ensayo de penetración en asfaltos.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

[F] **IRAM.** (2018). *Norma IRAM 6850: Mezclas asfálticas. Determinación del contenido de vacíos en el agregado mineral.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

[G] **IRAM.** (2022). *Norma IRAM 6846-1: Asfaltos modificados con polímeros. Parte 1: Procedimiento de recuperación elástica.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

[H] **UNE.** (s. f.). *UNE-EN 12697: Ensayos de mezcla bituminosa en caliente.* Asociación Española de Normalización.

[I] **ASTM.** (s. f.). *ASTM D8225: Método estándar para la evaluación de la rigidez de mezclas asfálticas.* ASTM International.

[J] **ASTM.** (s. f.). *ASTM WK7 1466: Guía provisional para la caracterización de mezclas recicladas en frío.* ASTM International.

[K] **DNV.** (1984). *Norma VN-E27-84: Determinación del peso específico y absorción de asfalto de agregados pétreos para mezclas asfálticas en caliente.* DIRECCIÓN NACIONAL DE VIALIDAD - 1° Distrito Buenos Aires.

[L] **IRAM.** (2019). *Norma IRAM 1505: Método para la determinación de la plasticidad en arcillas.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

11. ANEXO

11.1. Mezcla patrón (P)

Tabla N° A1 - Mediciones geométricas de las probetas patrón.

Nombre Probeta	Cantidad de golpes p/cara	Mediciones geometría [mm]					
		h1	h2	h3	h4	D1	D2
1-P	75	61,7	61,8	61,45	61,75	101,85	102,05
2-P	75	62,3	62,35	62,15	61,8	101,85	101,8
3-P	75	62,5	62,65	62,7	62,2	101,5	101,65
4-P	75	62,4	61,8	62,25	62,95	102	101,7
5-P	75	61,7	61,55	61,65	61,9	102,05	101,85
A-P	25	61,3	61,1	61,3	61,45	101,75	101,65
B-P	25	61,35	61	61	61,1	101,65	101,7
C-P	25	61,15	61,35	61,35	61,2	101,85	101,85
D-P	25	61,7	61,9	62,1	62,3	101,5	101,45
W1-P	-	50,9	51,1	50,4	50	-	-
CG1-P	-	59,18	59,28	58,44	58,36	149,90	149,80
CG2-P	-	59,78	57,78	58,40	59,62	149,72	149,84
CG3-P	-	55,48	53,80	56,68	59,00	149,94	149,96
CG4-P	-	58,10	57,22	58,26	58,12	149,92	149,82

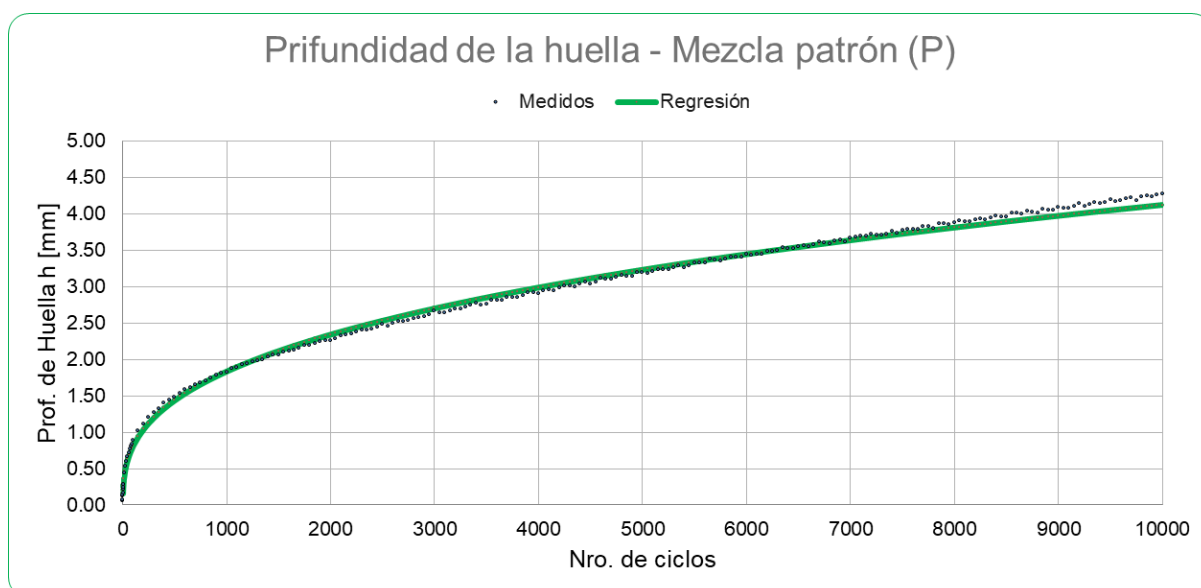


Gráfico N° A1 - Resultado del ensayo WTT de la mezcla asfáltica patrón. Fuente: elaboración propia

Tabla N° A2 - Resultados de Ensayo de Resistencia Conservada para mezcla patrón.

PATRÓN (P)	MUESTRAS SECAS					RTR 85%	Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	N°	Diámetro D [mm]	altura h [mm]	P _{máx}	RTI [kPa]			
	A-P	101,70	61,29	57,585	2,941		7,0%	2,397
	D-P	101,48	62,00	49,737	2,516		7,0%	2,395
	MUESTRAS HÚMEDAS							
	N°	Diámetro D [mm]	altura h [mm]	P _{máx}	RTI [kPa]		Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	B-P	101,68	61,11	48,658	2,493		6,3%	2,413
	C-P	101,85	61,26	42,477	2,167		7,0%	2,396

Tabla N° A3 - CT index de las probetas patrón.

CG1P			CG4P		
CT index	102,49		CT index	58,56	
t (espesor)	58,82	mm	t (espesor)	57,93	mm
D (diámetro)	149,85	mm	D (diámetro)	149,87	mm
Gf	5599,11	J/m ²	Gf	5924,67	J/m ²
m75	1,591		m75	2,525	
l75	4,600	mm	l75	4,004	mm
cálculos auxiliares			cálculos auxiliares		
Wf	49,34734	mm.KN	Wf	51,433335	mm.KN
P85	7,380	kg	P85	9,290	kg
P65	5,630	kg	P65	7,040	kg
l85	4,073		l85	3,557	
l65	5,173		l65	4,448	

Tabla N° A4 - RT index de las probetas patrón.

CG2P			CG3P		
RT index	89,65		RT index	90,58	
t (espesor)	0,06	m	t (espesor)	0,06	m
τ	1348,18	kPa	τ	1362,11	kPa
P _{máx}	4,26	KN	P _{máx}	4,11	KN
w	0,0191	m	w	0,0191	m

11.2. Mezcla con caucho (C)

Tabla N° A5 - Mediciones geométricas de las probetas con caucho.

Nombre Probeta	Cantidad de golpes p/cara	Mediciones geometría [mm]					
		h1	h2	h3	h4	D1	D2
1-C	75	63,7	64,75	64,05	63,35	101,45	101,35
2-C	75	63,5	63,55	63,7	63,7	101,35	101,7
3-C	75	63,7	63,8	62,9	63,5	101,4	101,7
4-C	75	64,45	64,45	64,25	64,4	101,7	101,35
5-C	75	62,5	63,8	63,15	62,5	101,3	101,25
A-C	25	63,45	63,65	63,8	63,6	102,2	102,15
B-C	25	63,6	62,7	62,95	63,3	101,1	101,35
C-C	25	62,7	62,6	62,5	62,5	101,4	101,3
D-C	25	63,05	63,4	62,5	62	101,65	101,85
W1-C	-	50,5	50,5	51,15	50,95	-	-
CG1-C		58,70	59,46	59,92	59,20	149,68	149,92
CG2-C		60,92	59,08	57,02	58,96	149,76	150,00
CG3-C		58,12	58,14	61,42	60,68	149,68	149,80
CG4-C		58,24	61,14	55,52	56,90	149,86	149,66

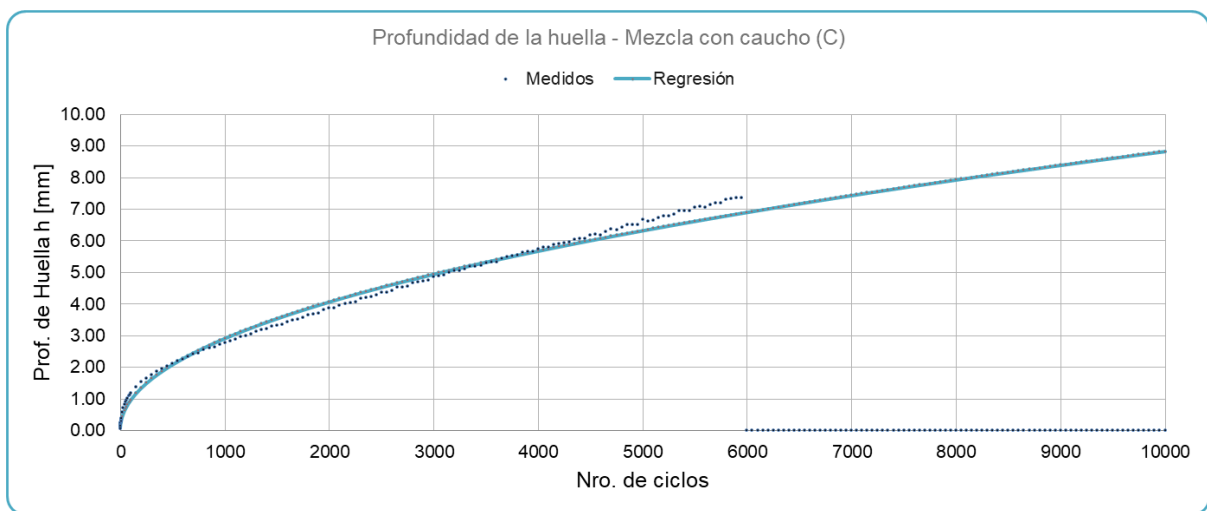


Gráfico N° A2 - Resultado del ensayo WTT de la mezcla asfáltica con caucho. Fuente: elaboración propia

Tabla N° A6 - Resultados de Ensayo de Resistencia Conservada para mezcla con caucho.

CAUCHO (C)	MUESTRAS SECAS					RTR 80%	Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	N°	Diámetro D [mm]	altura h [mm]	P _{máx}	RTI [kPa]			
	B-C	101,23	63,14	32,373	1,612		7,9%	2,359
	C-C	101,35	62,58	37,670	1,891		6,9%	2,386
	MUESTRAS HÚMEDAS						Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	N°	Diámetro D [mm]	altura h [mm]	P _{máx}	RTI [kPa]			
	A-C	102,18	63,63	25,114	1,230		8,6%	2,341
	D-C	101,75	62,74	25,898	1,291		8,4%	2,346

Tabla N° A7 - CT index de las probetas con caucho.

CG2C			CG3C		
CT index	108,00		CT index	31,90	
t	59,00	mm	t	59,59	mm
D	149,88	mm	D	149,74	mm
Gf	5731,58	J/m ²	Gf	3650,28	J/m ²
m75	1,565		m75	2,175	
l75	4,645	mm	l75	2,961	mm
cálculos auxiliares			cálculos auxiliares		
Wf	50,679595	mm.KN	Wf	32,57151	mm.KN
P85	7,580	kg	P85	7,070	kg
P65	5,810	kg	P65	5,430	kg
l85	4,068		l85	2,604	
l65	5,199		l65	3,358	

Tabla N° A8 - RT index de las probetas con caucho.

CG1C			CG4C		
RT index	67,07		RT index	64,59	
t (espesor)	0,06	m	t (espesor)	0,06	m
τ	1008,60	kPa	τ	971,34	kPa
P _{máx}	3,21	KN	P _{máx}	3,02	KN
w	0,0191	m	w	0,0191	m

11.3. Mezcla con plástico (B)

Tabla N° A9 - Mediciones geométricas de las probetas con plástico.

Nombre Probeta	Cantidad de golpes p/cara	Mediciones geometría [mm]					
		h1	h2	h3	h4	D1	D2
1-B	75	64,5	64,9	64,65	64,85	101,2	101,65
2-B	75	64,2	64,15	64,65	64	102,05	101,55
3-B	75	65	64,9	64,9	64,95	101,6	101,6
4-B	75	62,95	64,3	64	63,95	101,9	102
5-B	75	64,9	64,95	64,85	64,65	102	101,75
A-B	25	63,5	63,7	63,65	63,8	101,25	101,45
B-B	25	64,8	64,75	64,9	64,65	101,8	101,45
C-B	25	63,4	63,6	63,95	64,3	101,65	101,6
D-B	25	64,15	64,2	63,9	64	101,75	101,55
W1-B	-	50,45	50,2	52,05	50,5	-	-
CG1-B	-	59,58	57,92	60,40	60,32	150,04	150,04
CG2-B	-	59,02	59,94	56,68	58,94	150,16	150,16
CG3-B	-	60,00	59,82	61,18	58,14	149,52	149,64
CG4-B	-	59,62	58,54	58,90	57,36	149,68	150,00

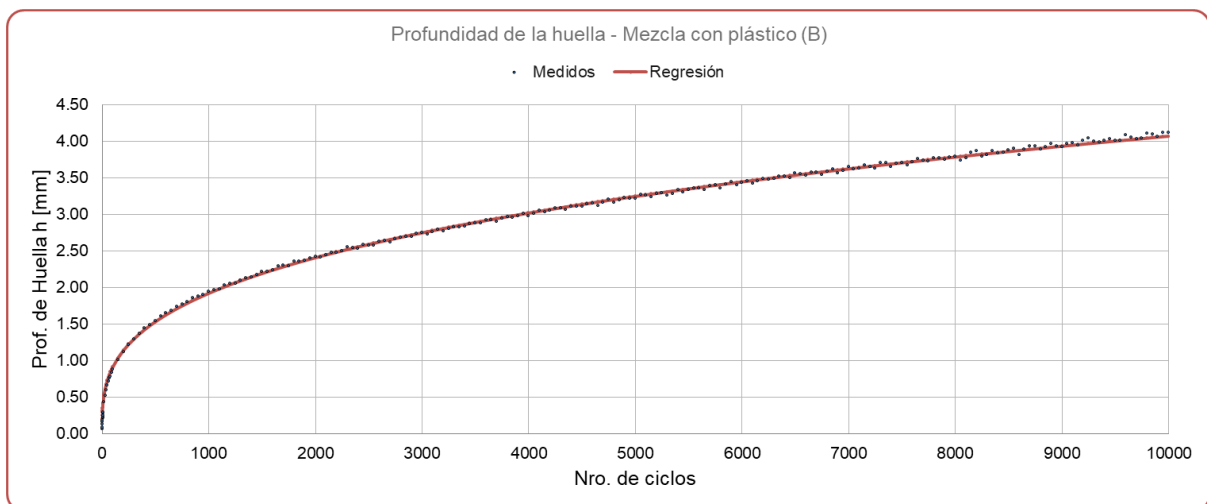


Gráfico N° A3 - Resultado del ensayo WTT de la mezcla asfáltica con plástico. Fuente: elaboración propia

Tabla N° A10 - Resultados de Ensayo de Resistencia Conservada para mezcla con plástico.

PLÁSTICO (B)	MUESTRAS SECAS					RTR 64%	Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	N°	Diámetro D [mm]	altura h [mm]	P _{máx}	RTI [kPa]			
	C-B	101,63	63,81	43,556	2,138		8,9%	2,313
	D-B	101,65	64,06	31,981	1,563		7,2%	2,355
	MUESTRAS HÚMEDAS						Vol. Vacíos	Densidad Marshall (aparente) [g/cm ³]
	N°	Diámetro D [mm]	altura h [mm]	P _{máx}	RTI [kPa]			
	A-B	101,35	63,66	20,307	1,002		8,4%	2,326
	B-B	101,63	64,78	19,130	0,925		8,6%	2,320

Tabla N° A11 - CT index de las probetas con plástico.

CG1B			CG4B		
CT index	118,71		CT index	193,73	
t	59,56	mm	t	58,61	mm
D	150,04	mm	D	149,84	mm
Gf	4897,693193	J/m ²	Gf	5448,777647	J/m ²
m75	1,420		m75	0,999	
l75	5,377	mm	l75	5,632	mm
cálculos auxiliares			cálculos auxiliares		
Wf	43,763985	mm.KN	Wf	47,84775	mm.KN
P85	6,260	kg	P85	5,900	kg
P65	4,800	kg	P65	4,530	kg
l85	4,863		l85	4,965	
l65	5,891		l65	6,336	

Tabla N° A12 - RT index de las probetas con plástico.

CG2B			CG3B		
RT index	56,01		RT index	54,53	
t (espesor)	0,06	m	t (espesor)	0,06	m
τ	842,23	kPa	τ	819,94	kPa
P _{máx}	2,65	KN	P _{máx}	2,63	KN
w	0,0191	m	w	0,0191	m